

Departement für Neurowissenschaften und Bewegungswissenschaften  
Universität Freiburg (Schweiz)

## **Citius, altius?**

Verhältnis zwischen Schwierigkeitsindex, Anlaufgeschwindigkeit und konditionellen Voraussetzungen in verschiedenen Altersklassen beim Pferdsprung im Elite-Kunstturnen

## **Fortius!**

Wirkung von spezifischem exzentrischem Training auf Kraftelemente an den Ringen

## DISSERTATION

vorgelegt der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Fakultät der  
Universität Freiburg (Schweiz) zur Erlangung des akademischen Grades  
*Doktor der Philosophie in Medizinischen Wissenschaften*

von

**Christoph Schärer**

aus Thunstetten, BE

Thesis Nr: 2184

Druckerei BASPO, Magglingen,

2020

Angenommen von der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Fakultät der Universität Freiburg (Schweiz) auf Empfehlung von Prof. Dr. Wolfgang Taube, Prof. Dr. Albert Gollhofer, Prof. Dr. Jürgen Krug, Dr. Klaus Hübner und Prof. Dr. Beat Schwaller (Jurypräsident).

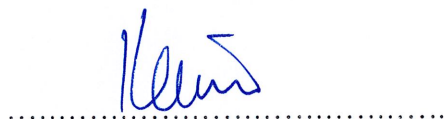
Freiburg, 28.04.2020

Die Dissertationsleiter

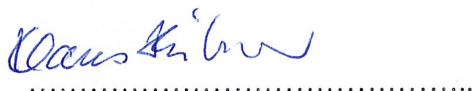
Der Dekan



Prof. Dr. Wolfgang Taube



Prof. Dr. Gregor Rainer



Dr. Klaus Hübner

*Amor vincit omnia.*

Für meine Frau und unsere beiden wundervollen Söhne Lio und Mauro.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
Zusammenfassung.....	2
Abstract .....	5
1 Allgemeine Einleitung .....	8
1.1 Leistungsstruktur im Kunstturnen .....	9
1.1.1 Wettkampfvorschriften.....	9
1.1.2 Wettkampfgeräte .....	10
1.1.3 Konstitution.....	12
1.1.4 Kondition.....	13
1.1.5 Sportliche Technik / Koordination.....	16
1.1.6 Psyche.....	17
2 Wissenslücken und Fragestellungen .....	19
2.1 Originalartikel 1.....	19
2.2 Originalartikel 2.....	20
2.3 Originalartikel 3.....	21
2.4 Originalartikel 4.....	22
2.5 Fragestellungen.....	24
3 Originalartikel 1 .....	25
4 Originalartikel 2 .....	43
5 Originalartikel 3 .....	56
6 Originalartikel 4 .....	76
7 Zusammenfassung der Resultate und Diskussion.....	93
7.1 Originalartikel 1.....	93
7.2 Originalartikel 2.....	96
7.3 Originalartikel 3.....	98
7.4 Originalartikel 4.....	99
8 Praktische Konsequenzen .....	102
Literaturverzeichnis.....	105
Danksagung.....	112
Lebenslauf.....	113
Publikationsverzeichnis.....	114
Erklärung.....	115

## **Zusammenfassung**

Kunstturnen hat sich den letzten Jahrzehnten in allen Leistungsfaktoren seiner hochkomplexen Leistungsstruktur schnell weiterentwickelt. Verbesserte konditionelle Eigenschaften der Athleten und Athletinnen, Anpassungen im Bewertungssystem und Verbesserungen der Federeigenschaften der Geräte haben unter anderem dazu geführt, dass die Übungen an allen sechs (Männer) respektive vier Geräten (Frauen) heute von höchst dynamischen, maximalkräftigen und / oder akrobatischen Elementen geprägt sind.

Am Pferdsprung wird angenommen, dass eine hohe Anlaufgeschwindigkeit eine zentrale Voraussetzung ist, um schwierige Sprünge turnen zu können. Deshalb wurden in Originalartikel 1 die Zusammenhänge zwischen Anlaufgeschwindigkeit und der Leistung am Pferdsprung sowie Leistungsunterschiede zwischen Männern und Frauen sowie Junioren- und Eliteathleten und -athletinnen ( $n = 407$ ) an den Europameisterschaften 2016 berechnet. Der Schwierigkeitswert der gezeigten Pferdsprünge wurde dabei bei den Frauen bis zu 64% und bei den Männern bis zu 42% durch die Anlaufgeschwindigkeit erklärt. Männer erreichten 8 - 9% höhere Anlaufgeschwindigkeiten als die Frauen bei Überschlag- und Tsukaharasprüngen, hingegen ähnliche Anlaufgeschwindigkeiten bei Yurchenkosprüngen. Folglich erreichen die Frauen bei diesen Sprüngen eine - relativ zu ihrer Maximalgeschwindigkeit - höhere Geschwindigkeit als die Männer. Es muss deshalb angenommen werden, dass sie ein höheres Risiko auf sich nehmen müssen, um diese technisch anspruchsvollen Sprünge zeigen zu können. Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass bei den Frauen schwierige Pferdsprünge aus allen Sprunggruppen höhere Anlaufgeschwindigkeiten erfordern, als Sprünge mit tiefem Schwierigkeitsindex. Die Männer hingegen müssen nicht ihr gesamtes Geschwindigkeitspotential ausnutzen, um die schwierigsten Sprünge zu zeigen. Die Kenntnis der notwendigen Anlaufgeschwindigkeiten für die einzelnen Sprünge hilft den Trainern und Trainerinnen dabei, das Potential ihrer Athleten und Athletinnen richtig einzuschätzen sowie das Training zu steuern (konditionelle Vorbereitung und / oder Techniktraining).

Die (unter anderem) leistungsdeterminierende Flughöhe der zweiten Flugphase am Pferdsprung konnte bisher nur mittels komplexer 3D-Videoanalyse-Methoden ermittelt werden. Deshalb wurden in Originalartikel 2 die Gütekriterien einer einfacheren 2D-Videoanalyse-Methode zur Erfassung von Flughöhe und -weite in der zweiten Flugphase am Pferdsprung (im Vergleich zu einer komplexen 3D-Videoanalyse) überprüft ( $n = 38$ ). Die Resultate zeigten, dass die Flughöhe ( $\pm 95\%$  Konfidenzintervall:  $\pm 3.6\%$  der mittleren Flughöhe) valider bestimmt werden kann als die Flugweite ( $\pm 95\%$  Konfidenzintervall:  $\pm 7.6\%$  der mittleren Flugweite). Hingegen

wurden nur sehr tiefe Variabilitätskoeffizienten und keine systematischen Fehler in Bezug auf die Reliabilität und Objektivität bei Flughöhe (CV%: 0.44% bis 0.51%; p: 0.55 bis 0.81) und -weite (CV%: 0.72 bis 0.87%; p: 0.14 bis 0.44) festgestellt. Aus den Resultaten kann gefolgert werden, dass insbesondere die Flughöhe mit der überprüften 2D-Videoanalyse-Methode valide, reliabel und objektiv bestimmt werden kann. Dies rechtfertigt die Anwendung dieser einfachen und kostengünstigen Methode in der Trainingspraxis durch Trainer und Trainerinnen.

Die notwendigen konditionellen Voraussetzungen, um schwierige Pferdsprünge zeigen zu können, sowie deren Unterschiede zwischen verschiedenen Altersklassen wurden bisher nie untersucht. Deshalb wurden in Originalartikel 3 einerseits die Zusammenhänge zwischen dem Schwierigkeitswert, der Anlaufgeschwindigkeit und dem Schrittmuster beim Pferdsprunganlauf sowie Schnelligkeits- (25m-Sprintgeschwindigkeit) und Schnellkraftparametern (Explosiv- und Reaktivkraft) der unteren Extremitäten berechnet. Andererseits wurden deren Unterschiede zwischen verschiedenen Altersklassen bei Junioren- und Eliteathleten (n = 47) betrachtet. Die Resultate zeigten signifikante Zusammenhänge zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem Schwierigkeitswert bei Überschlag- / Tsukaharasprüngen ( $r = 0.79$ ;  $p < 0.01$ ) sowie der 25m-Sprintgeschwindigkeit ( $r = 0.85$ ;  $p < 0.01$ ) auf. In Bezug auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Altersklassen konnte eine Erhöhung des Schwierigkeitswertes am Pferdsprung von insgesamt 11.6% ( $p < 0.01$ ) vom Junioren- bis ins Elitealter festgestellt werden. Zudem wurden bei der Altersklasse U19 im Vergleich zur U17 signifikant höhere Werte bei der Anlaufgeschwindigkeit ( $p < 0.05$ ), der Schrittlänge ( $p < 0.05$ ) sowie der Körpergrösse ( $p < 0.01$ ) und dem -gewicht ( $p < 0.001$ ) festgestellt. U21 Athleten erreichten ausserdem höhere Anlauf- und 25m-Sprintgeschwindigkeiten sowie bessere Explosivkraftwerte als U19 Athleten (alle  $p < 0.05$ ). Folglich kann die Optimierung der relevanten konditionellen Voraussetzungen das Potential schwierige Pferdsprünge ausführen zu können, erhöhen. Weiter scheinen zuerst Wachstum und Entwicklung und anschliessend die Verbesserung von Schnelligkeits- und Schnellkraftparametern zur Verbesserung der Anlaufgeschwindigkeit zwischen den verschiedenen Altersklassen beizutragen. Somit sind die regelmässige Durchführung leistungsdiagnostischer Tests (mit Bezug zur Leistung am Pferdsprung) und die Ableitung von individuellen Trainingsempfehlungen zur Optimierung der konditionellen Voraussetzungen sicher sinnvoll.

An den Ringen im Kunstturnen der Männer hat die Bedeutung der Kraftelemente und deren Anzahl in der Wettkampfübung in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Die dafür notwendige relative Maximalkraft wird häufig mit spezifischen exzentrischen Krafttrainingsübungen an den Ringen trainiert. Diese können aber aufgrund der dabei entstehenden hohen Kraftspitzen

zu Überbelastungen und Verletzungen der oberen Extremitäten führen. Deshalb wurde in Originalartikel 4 eine neue spezifische, exzentrisch-isokinetische Krafttrainingsmethode (mit einem computergesteuerten Seilzuggerät) zur Verbesserung der Maximalkraft und Kraftausdauer bei den Elementen Schwalbe und Stützwaage an den Ringen entwickelt und ihre Wirksamkeit bei neun Nationalkaderathleten überprüft. Nach dem vierwöchigen Training verbesserte sich die Maximalkraft signifikant (Schwalbe: + 4.1%;  $d = 0.85$ ;  $p = 0.01$ ; Stützwaage: + 3.6%;  $d = 2.47$ ;  $p = 0.0002$ ) und die Maximalkraftausdauer steigerte sich tendenziell (Schwalbe: + 104.8%;  $d = 0.60$ ;  $p = 0.07$ ; Stützwaage: + 26.8%;  $d = 0.27$ ;  $p = 0.19$ ). Schlussfolgernd kann angenommen werden, dass der neue Trainingsreiz (hochspezifisch mit langer maximaler Spannungsdauer der Muskulatur) zu diesen Verbesserungen geführt hat. Diese Krafttrainingsform sollte als Reizwechsel während Phasen mit tiefer (technischer) Trainingsbelastung eingesetzt werden.

Die vorliegende Dissertation liefert im Kunstturnen am Pferdsprung der Männer und Frauen und an den Ringen Erkenntnisse für das sportliche Training, die sportliche Leistung und den sportlichen Wettkampf sowie deren gegenseitigen Wechselbeziehungen. Dieses Wissen kann zur besseren Steuerung und Optimierung des Trainings im Nachwuchs- und Elite-Kunstturnen beitragen.

## Abstract

Over the past few decades, the highly complex performance profile of artistic gymnasts has evolved rapidly in all its integral parts. Improvements in athletes' physical condition, adaptations to competition rules and better spring characteristics of the apparatus (amongst other things) have led to the highly dynamic, powerful and / or acrobatic performances currently observed on the six (males) or four apparatus (females) during competitions.

On vault, it is assumed that a high run-up speed is crucial for performing difficult vaults. Therefore, in study 1, the relationships between run-up speed and vault performance at the European Artistic Gymnastics Championships 2016 were investigated. Additionally, differences between males and females, and between elite and junior gymnasts ( $n = 407$ ) were examined. The results revealed that run-up speed on vault explained up to 64% and 42% of the variance, for females and males, respectively, of the difficulty value of Handspring and Tsukahara style vaults. Furthermore, while performing Handspring and Tsukahara vaults, males attained 8 - 9% higher run-up speeds than females, but similar speeds performing Yurchenko vaults. Consequently, females must attain run-up speeds closer to their maximal sprinting speed in order to perform these vaults than males. Therefore, it might be assumed that women have to take greater risks when executing these technically demanding vaults. In conclusion, it appears that for females, difficult vaults require higher run-up speeds than vaults with lower difficulty scores (independent of the vault style). However, males do not need to exploit their entire speed potential to perform even the most difficult vaults. The knowledge of the necessary run-up speeds needed to perform different vaults may help coaches to evaluate each athlete's potential correctly.

The height of flight of the second flight phase on vault (among other parameters) determines the potential to perform difficult vaults. In the past, the height of flight could only be determined with complex 3D-video analyses. Therefore, in study 2, height and length of flight of the second flight phase of 38 vaults was determined by a simple 2D-video analysis in order to assess validity and (intrarater- and interrater-) reliability compared to a complex 3D-video analysis. The results showed that height of flight could be determined more accurately ( $\pm 95\%$  limits of agreement:  $\pm 3.6\%$  of mean height of flight) than length of flight ( $\pm 95\%$  limits of agreement:  $\pm 7.6\%$  of mean flight height). Considering interrater- and intrarater-reliability, low coefficients of variability and no systematic errors were found for height CV%: 0.44% to 0.51%;  $p$ : 0.55 to 0.81) and length of flight (CV%: 0.72 to 0.87%;  $p$ : 0.14 to 0.44). We therefore concluded that the 2D-video analysis is valid and reliable, in particular for assessing height of flight on vault, and recommend the use of this simple and cost-efficient method by coaches in training.



The physical parameters that contribute to the performance on vault and their age-related differences between different age-groups have rarely been investigated. Therefore, the first aim of study 3 was to calculate the relationships between the difficulty value and the run-up kinematics (speed and step kinematics) as well as lower body power (25m-sprint speed, explosive- and reactive strength). The second purpose was to investigate the differences between different age-groups of junior and elite athletes ( $n = 47$ ). The results showed significant relationships between run-up speed and the difficulty value of Handspring / Tsukahara vaults ( $r = 0.79$ ;  $p < 0.01$ ) as well as 25m-sprint speed ( $r = 0.85$ ;  $p < 0.01$ ). With regard to the age-related differences, an overall increase of the difficulty value of 11.6% ( $p < 0.01$ ) was observed from junior to elite level. Moreover, we found significantly higher run-up speeds ( $p < 0.05$ ), and greater step lengths ( $p < 0.05$ ), body height ( $p < 0.01$ ), and body mass ( $p < 0.001$ ) for the age-group U19 compared to U17. The age-group U21, however, showed significantly higher run-up and 25m sprint speeds, as well as better explosive strength (all  $p < 0.05$ ) compared to the U19 age-group. In conclusion, the optimization of relevant physical parameters may increase the potential to perform difficult vaults. Early on, growth and maturation, and later, increases in lower body power lead to higher run-up speeds on vault across the different age-groups. Finally, specific, individual training recommendations should be derived from regular performance testing related to the performance on vault in order to optimize physical prerequisites.

On rings in male's artistic gymnastics, the importance of performing a high number of strength elements during the competition routine has increased within the last few years. The specific relative maximum strength required for this is commonly trained with specific eccentric strength exercises on rings. However, these exercises may lead to overuse-injuries of the upper extremities, due to the high strain during the execution. Therefore, in study 4 a novel specific eccentric-isokinetic strength training method (with a computer-controlled training device) was developed and their efficacy on the improvement of maximum strength and strength endurance for the elements swallow and support scale was investigated with nine elite athletes of the national team. After four weeks of training, maximum strength of both elements increased significantly (swallow: + 4.1%;  $d = 0.85$ ;  $p = 0.01$ ; support scale: + 3.6%;  $d = 2.47$ ;  $p = 0.0002$ ) and strength endurance tended to improve (swallow: + 104.8%;  $d = 0.60$ ;  $p = 0.07$ ; support scale: + 26.8%;  $d = 0.27$ ;  $p = 0.19$ ). Based on these results, it was concluded that the novel stimulus (highly specific, long time under maximal muscle tension) may have led to the improvement of the ring-specific maximum strength of these elite athletes. We recommended this training method as a change of stimulus in periods with low technical training load.

This doctoral thesis provides new findings on vault and rings in male's and female's artistic gymnastics for training, performance and competition as well as their interrelations. This knowledge may contribute to better control and optimize the training of junior and elite artistic gymnasts.

## 1 Allgemeine Einleitung

Citius, altius, fortius - das von Pierre de Coubertin 1894 entworfene Motto der modernen Olympischen Spiele spiegelt im Grundsatz das ständige Bestreben im Leistungssport wider, die eigene Leistung zu verbessern und sich dadurch im Wettkampf einen Vorteil gegenüber den Konkurrenten zu verschaffen. «Schneller, höher, stärker» ist aber auch Sinnbild für die Entwicklung im Leistungssport in den letzten Jahrzehnten. Insbesondere auch in technisch-kompositorischen Sportarten wie dem Kunstturnen ist eine rasante Leistungsentwicklung in den letzten Jahren bemerkbar (Naundorf, Brehmer, Knoll, Bronst & Wagner, 2008).

Das 1811 mit dem Aufbau der Hasenheide (Freiluftturnplatz) durch Turnvater Jahn ins Leben gerufene «Freiluftturnen» zur Ertüchtigung der Jünglinge und zum «Besiegen der Feinde der Freiheit» (Bartmuß, 1998) entwickelte sich rasch zum Volkssport und mit den ersten Olympischen Spielen 1896 zur Olympischen Spitzensportart Kunstturnen. So rücken die akrobatischen Leistungen der Athleten und Athletinnen heute insbesondere alle vier Jahre an den Olympischen Spielen ins Zentrum der Aufmerksamkeit der Medien und des Publikums.

Eine Besonderheit der Sportart Kunstturnen ist, dass beim Wettkampf der Männer an sechs Geräten (Boden, Pferdpauschen, Ringe, Pferdsprung, Barren, Reck) und bei den Frauen an vier verschiedenen Geräten (Pferdsprung, Stufenbarren, Balken, Boden) jeweils eine Übung gezeigt werden muss. Obwohl bei den Männern und Frauen ähnliche Geräte geturnt werden (Boden, Pferdsprung), unterscheidet sich die Leistungsstruktur an den einzelnen Geräten grundsätzlich in der Dauer, der Belastungsform sowie der massgeblich an der Leistungserbringung beteiligten Extremität (Jemni, 2018b). Genaue Kenntnisse der komplexen Leistungsstruktur im Kunstturnen sind nach Knoll (1999) Voraussetzung für die effektive Entwicklung hoher sportlicher Leistungen. Deshalb sollen im anschliessenden Kapitel die relevanten Komponenten der Leistungserbringung im Elite-Kunstturnen in Anlehnung an das Leistungsstrukturmodell von Bauersfeld und Schröter (1979) erläutert werden. In diesem Modell wurden die sieben Leistungsfaktoren der Struktur der sportlichen Leistung (materialtechnische Bedingungen, Wettkampfbedingungen, Konstitution, Kondition, Technik / Koordination, psychische Eigenschaften, Taktik) teilweise umbenannt sowie der Bereich Taktik, aufgrund der nicht so zentralen Bedeutung für die Leistung im Kunstturnen, weggelassen. Das folgende Kapitel Leistungsstruktur im Kunstturnen wird gemäss Bauersfeld und Schröter (1979) in die Unterkapitel Wettkampfvorschriften, Wettkampfgeräte, Konstitution, Kondition, sportliche Technik / Koordination und Psyche gegliedert, stellt jedoch einen aktualisierten, den heutigen Stand der Wissenschaft reflektierenden Ansatz dar.

## 1.1 Leistungsstruktur im Kunstturnen

### 1.1.1 Wettkampfvorschriften

Die Anforderungen an die Übungen an allen Geräten sowie die Vorschriften für deren Bewertung sind im 'Code de Pointage' (FIG, 2017a, 2017b) festgelegt. Dieser wird alle vier Jahre durch die 'Fédération Internationale de Gymnastique' (FIG) angepasst. Somit verändert sich in jedem Olympiazzyklus die Leistungsstruktur an den einzelnen Geräten zumindest leicht. Im Laufe der Jahre wurden aber auch mehrere grosse Veränderungen im Code de Pointage vorgenommen, welche das Wettkampfformat (Abschaffung der Pflichtübungen im Jahr 1996) und die Struktur der Leistung an den Wettkämpfen stark verändert haben (Abschaffung der Maximalnote «Zehn» und Einführung der nach oben offenen Notenskala im Jahr 2006) (Fetzer, Milbrandt, Karg, Hirsch & Wüstemann, 2007). Insbesondere die Abschaffung der Höchstnote «Zehn» führte zu einer «deutlichen Erhöhung der Schwierigkeit und der Länge der Übungen» sowie «zu einer besseren Differenzierung der Leistungen in allen Disziplinen» (Naundorf et al., 2008, S. 138 & S. 141 ). Insofern nimmt die FIG eine entscheidende Rolle in der Entwicklung der Sportart und der gerätespezifischen Leistungsstruktur ein.

Die Wettkampfübungen werden heute an internationalen Wettkämpfen von neun Kampfrichtern bewertet. Dabei sind zwei Kampfrichter für die Ermittlung des Schwierigkeitswertes (D-Wert) und fünf für die Bestimmung der Ausführungsnote (E-Wert) zuständig. Zudem bewerten zwei Referenzkampfrichter die Übung, um im Falle von Problemen mit der Bestimmung des E-Wertes diesen automatisch und zeitsparend korrigieren zu können (FIG, 2017a). Durch die D-Kampfrichter werden die Schwierigkeitsindizes der zehn (Männer) respektive acht (Frauen) am höchsten eingestuften Übungselemente zum D-Wert aufsummiert. Die E-Kampfrichter bestimmen durch Punkteabzüge vom maximalen E-Wert «Zehn» für haltungsmässige oder technische Abweichungen von der im Code de Pointage (FIG, 2017a, 2017b) definierten perfekten Ausführung der Elemente den E-Wert der Übung. Die Addition von D- und E-Wert ergibt schliesslich den Endwert (F-Wert).

Alle existierenden Elemente sind im Code de Pointage (FIG, 2017a, 2017b) in die Schwierigkeitsstufen von A bis I (analog dem Alphabet) eingeteilt und damit der entsprechenden Bonifikation für den D-Wert zwischen 0.1 und 0.9 Punkten zugeordnet. Ausserdem sind alle Elemente mit ähnlicher Bewegungsstruktur pro Gerät in eine der vier Strukturgruppen eingeteilt (drei Gruppen von Elementen und Abgängen). Eine Übung muss mindestens ein Element aus jeder Strukturgruppe enthalten, damit die entsprechende Bonifikation (2.0 Punkte) zum D-Wert addiert wird. Als Abgang muss mindestens ein Element mit der Schwierigkeitsstufe «D» gezeigt

werden, damit die Athleten die entsprechende Bonifikation erhalten. Mit Wettkampfübungen, die alle Strukturanforderungen erfüllen und D bis I-Elemente beinhalten, werden folglich höhere D-Werte erreicht als mit Übungen, welche A, B oder C-Elemente enthalten. Ein hoher D-Wert erhöht die Chance, an den Wettkämpfen einen hohen Endwert zu erturnen und somit erfolgreich zu sein. Dies ermutigt die Turner und Turnerinnen immer schwierigere Elemente in ihren Wettkampfübungen zu zeigen (Jemni, Sands, Friemel, Stone & Cooke, 2006). Ein Spezialfall in der Bewertung stellt der Pferdsprung dar. Am Pferdsprung muss nur ein Sprung (respektive zwei unterschiedliche Sprünge, falls eine Finalqualifikation angestrebt wird) gezeigt werden. Deshalb ist im Code de Pointage jedem existierenden Pferdsprung je nach Schwierigkeitseinstufung ein entsprechender D-Wert zugeordnet. Bei den Frauen variieren die D-Werte zwischen 2.0 (leichte Sprünge) und 6.0 Punkten (Höchstschwierigkeit) und bei den Männern zwischen 1.6 und 6.0 Punkten. Der E-Wert wird analog der anderen Geräte ermittelt und zur Berechnung des F-Wertes zum D-Wert addiert. Alle Pferdsprünge sind im Code de Pointage (FIG, 2017a, 2017b) fünf Sprunggruppen zugeteilt.

### 1.1.2 Wettkampfgeräte

Die FIG hat Normen für die Wettkampfgeräte entwickelt (FIG, 2019b), um an allen Wettkämpfen gleiche und damit gerechte, optimale und sichere Wettkampfbedingungen gewährleisten zu können. Zur Überprüfung der Einhaltung der Normen wurden standardisierte Testverfahren entwickelt (FIG, 2019a). Neu entwickelte Wettkampfgeräte müssen getestet werden und werden bei Erfüllung aller Bedingungen offiziell zertifiziert. Trotz der Normierung und der Zertifizierung sind die Federeigenschaften der Geräte der über zehn offiziell anerkannten Hersteller leicht unterschiedlich. Insofern ist es ein Vorteil für Athleten und Athletinnen, wenn sie sich auf den Geräten des offiziellen Ausrüsters der kommenden internationalen Wettkämpfe vorbereiten können. Da die Gerätelieferanten für die Grossanlässe häufig wechseln, ist es deshalb von Vorteil, wenn die einzelnen Nationen mehrere komplette Gerätesätze von verschiedenen Herstellern besitzen, um die Trainingshalle für die Vorbereitung mit den Geräten des entsprechenden Ausrüsters ausstatten zu können. In diesem Zusammenhang sind nationale Verbände in wirtschaftlich schwächeren Ländern klar benachteiligt, da sie sich nicht mehrere Gerätesätze leisten können (Bortoleto, 2019).

In den letzten Jahren mussten die FIG-Gerätenormen aufgrund der laufenden Verbesserungen der Federeigenschaften der Turngeräte immer wieder angepasst werden. Die Weiterentwicklung der Turngeräte kann einerseits durch die Einführung von neuen Regelungen durch die FIG initiiert werden. So wurde im Jahr 2001 das traditionelle Sprungpferd aus Sicherheitsgründen

durch den neuartigen Sprungtisch ersetzt. Die breitere Stützfläche verringert die Gefahr eines Abrutschens in der Abdruckphase insbesondere bei Rückwärtsüberschlägen (Yurchenkosprüngen) erheblich. Andererseits dürfen auch die Hersteller neu entwickelte (bessere) Geräte von der FIG zertifizieren lassen. Ein Beispiel dafür ist die Einführung der neuen Bodenfläche mit verbesserten Federeigenschaften im Jahr 2013.

Die laufende Verbesserung der Turngeräte trägt wesentlich zur Leistungsentwicklung und zur «zunehmenden Akrobatisierung im Kunstturnen» bei (Knoll, Knoll & Köthe, 2000; Lange, Halkin & Bury, 2005). Jedoch verändern sich mit den Federeigenschaften der Geräte auch die Zeit- und Muskelinnervationsmuster von Abstößen oder Absprüngen (Arampatzis, Stafilidis, Morey-Klapsing & Brüggemann, 2004) und somit die Anforderungen an die Athleten und Athletinnen. Folglich ist die optimale Ausnutzung der Federeigenschaften der Geräte und hiermit das Zusammenspiel zwischen den biologischen Eigenschaften der Muskel- und Sehnengewebe, der sportlichen Technik und den mechanischen Eigenschaften der Turngeräte ein kritischer Erfolgsfaktor im Kunstturnen (Mills, Yeadon & Pain, 2010; Naundorf, Brehmer, Körner & Seidel, 2017). Durch die Anpassungen der Turngeräte müssen auch laufend die bestehenden sportlichen Techniken reflektiert und an die neuen Bedingungen angepasst werden. So führte zum Beispiel die deutlich verbesserte Federleistung der neuen Bodenfläche und die daraus resultierende grössere Sprunghöhe dazu, dass Athleten und Athletinnen viel effizientere Schraubentechniken bei der Einleitung von Vorwärts- und Rückwärtssalti anwenden konnten (Naundorf, Brehmer, Körner, & Seidel, 2017). Die besseren Federeigenschaften der Geräte verhelfen Athleten und Athletinnen einerseits dazu, höhere Translations- und Rotationsenergien zu generieren und dadurch schwierigere Sprünge zu zeigen. Andererseits sind dadurch ihre Muskeln, Sehnen und Gelenke höheren Kräften ausgesetzt, was zu akuten und chronischen Verletzungen führen kann (Brüggemann, 2005).

Die Weiterentwicklung der Turngeräte erfordert auch eine laufende Verbesserung der Landematten, da die Athleten und Athletinnen aufgrund der höheren Translations- und Rotationsenergien beim Absprung und in der Flugphase bei den Landungen mehr Energie absorbieren müssen. Hierbei hat die Beschaffenheit (Energieabsorption, Reibung) der Landematten einen entscheidenden Einfluss auf die Verletzungshäufigkeit (Xiao, Hao, Li, Wan & Shan, 2017), denn über 70% der akuten Verletzungen ziehen sich die Athleten und Athletinnen bei Landungen zu (Xiao et al., 2017).

### 1.1.3 Konstitution

Die körperlichen Voraussetzungen sind im Kunstturnen von entscheidender Bedeutung. Arkaev und Suchilin (2004) erkennen klare Vorteile für kleine, leichte und starke Athleten und Athletinnen zur Erbringung von Spitzenleistungen sowie im Bereich der Belastungsresistenz im Training. Kunstturner und Kunstturnerinnen sind im Durchschnitt kleiner, leichter und später entwickelt, haben einen tieferen Körperfettanteil als die Normalbevölkerung sowie zu 90% einen Ecto-Mesomorphen Somatotyp (Amigó, Busquets, Evrard, Galilea Ballarini & Carrasco Marginet, 2009; Arkaev & Suchilin, 2004). Bis anhin konnte aber nicht abschliessend geklärt werden, ob die genannten konstitutionellen Eigenschaften der Turner und Turnerinnen eine Folge des langjährigen, umfangreichen und harten Trainings ist oder ob sich durch die natürliche Selektion nur diejenigen Athleten und Athletinnen durchsetzen können, welche die entsprechenden genetischen Veranlagungen haben (Baxter-Jones, Mafulli & Mirwald, 2003; Caine, Bass & Dali, 2003; Malina et al., 2013). Hierbei ist es schwierig, die natürliche Variation der Entwicklung und die negativen Effekte von hartem Training auf die Entwicklung wissenschaftlich zu differenzieren (Baxter-Jones, 2019).

Kunstturner und Kunstturnerinnen beginnen sehr früh mit dem Training und müssen schon im Kindes- und Jugendalter hohe Trainingsumfänge ertragen können. Die Kindheit gilt dabei als optimale Phase zum Erwerb der sportlichen Technik. Ausserdem galt bis vor einigen Jahren im Kunstturnen der Frauen die Mädchengestalt als optimale körperliche Voraussetzung für Spitzenleistungen (Barker-Ruchti, Kerr, Schubring, Georgia Cervin & Nunomura, 2017). Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken und um trainierende Kinder vor übermässigen Trainingsbelastungen zu schützen, hat die FIG im Jahre 1997 das Alterslimit für die Teilnahme an internationalen Grossanlässen für die Turnerinnen auf 16 Jahre und für Turner auf 18 Jahre angepasst. Hiermit soll gewährleistet werden, dass Athleten und Athletinnen mehr Zeit haben, sich körperlich und geistig zu entwickeln, bevor sie Höchstleistungen auf internationalem Niveau erbringen müssen (Atiković, Delaš Kalinski & Čuk, 2017). In der Folge konnte in den letzten Jahren eine Erhöhung des Durchschnittalters der männlichen und weiblichen Teilnehmenden an internationalen Grossanlässen beobachtet werden (Naundorf et al., 2017). Atiković et al. (2017) attribuieren diesen Trend aber nicht dem angepassten Alterslimit, sondern der sporttechnischen Weiterentwicklung der Sportart. So scheint es, dass Athleten und Athletinnen mehr Trainingszeit (Trainingsjahre) benötigen, um die hochkomplexen Elemente und Wettkampfübungen zu stabilisieren (Šibanc, Kalichová, Hedbávný, Bučar Pajek & Čuk, 2017).

#### 1.1.4 Kondition

In den letzten Jahren haben sich die konditionellen Voraussetzungen der Athleten und Athletinnen stark verbessert (Lange et al., 2005). Der Ausprägungsgrad der relevanten konditionellen Parameter definiert dabei das grundlegende Potential, sporttechnische Elemente im Kunstturnen erlernen zu können. Hierbei ist es entscheidend, dass die konditionellen Voraussetzungen optimal dosiert und auf die sporttechnischen Anforderungen des turnerischen Elementes abgestimmt und eingesetzt werden (Jemni, 2018a). Die Verbesserung der konditionellen Voraussetzungen dient aber auch der Prävention von Verletzungen (Sands, 2000).

Im Kunstturnen gelten Maximalkraft, Schnell- und Reaktivkraft, Kraftausdauer und Beweglichkeit als wichtige konditionelle Voraussetzungen für Spitzenleistungen (Jemni et al., 2006; Sands et al., 2016).

##### *Maximalkraft*

Die Maximalkraft «kennzeichnet die höchstmögliche Kraft, die vom Nerv-Muskelsystem willkürlich gegen einen Widerstand erzeugt werden kann» (Güllich & Krüger, 2013, S. 468). Nach Suchomel, Nimphius, Bellon und Stone (2018) ist die Maximalkraft abhängig von tendomuskulären (Muskelquerschnitt, Muskelarchitektur, Muskel- & Sehnensteifigkeit) und / oder neuronalen Eigenschaften des Nerv-Muskelsystems (Rekrutierung und Feuerungsrate von motorischen Einheiten, intramuskuläre Koordination, neuronale Hemmmechanismen).

Im Kunstturnen ist (wie in allen Sportarten, bei welchen nur der eigene Körper bewegt werden muss) die zum Körpergewicht relative Maximalkraft entscheidend. Insofern streben Athleten und Athletinnen danach, mit möglichst wenig Muskelmasse eine möglichst hohe Maximalkraft zu erreichen (Major, 1996). Der Ausprägungsgrad der relativen Maximalkraft hat insbesondere in den entsprechenden Halte-, Hebe- oder Senkbewegungen der geforderten Kraftelemente an den Ringen im Kunstturnen der Männer eine direkte leistungsdeterminierende Funktion. Auf die Bedeutung der Maximalkraft und die Wirksamkeit eines ringe-spezifischen Maximalkrafttrainings wird in Originalartikel 4 eingegangen.

Die Maximalkraft ist ausserdem eine wichtige Basiskomponente für die Schnellkraft (Bührle, 1989). Nach Hübner (2009) werden ausserdem zwischen 21% und 28% der Explosivkraft der unteren Extremitäten durch die Maximalkraft erklärt.



### *Schnell- und Reaktivkraft*

Die Schnellkraft wird generell definiert als «die Fähigkeit eines Sportlers bei willkürlicher Kontraktion die Muskelkraft schnell zu mobilisieren und das Kraftmaximum in optimal kurzer Zeit zu erreichen» (Schnabel, Harre & Krug, 2008). Innerhalb eines Schnellkrafteinsatzes entspricht die maximale Kraftzuwachsrate pro Zeit der Explosivkraft (Maffiuletti et al., 2016). Nach Güllich und Schmidtbleicher (1999) beinhalten bis zu 90% aller Schnellkraftleistungen im Sport einen Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVZ; z.B. Sprünge, Laufformen, Würfe). Während eines DVZ wird in der exzentrischen Phase die Muskulatur gedehnt. Dies führt zu einer erhöhten muskulären Aktivierung (Stiffness) und Reflexaktivität sowie zur Speicherung von elastischer Energie im tendo-muskulären System. Die gespeicherte Energie wird durch die Entladung des Dehnungsreflexes in der konzentrischen Phase des Sprunges freigesetzt und resultiert in einer Kraftzunahme (Komi, 2000). Schnellkräftige Aktionen im langen DVZ ( $> 200$  ms) werden in die Komponenten Startkraft ( $< 30$  ms), Explosivkraft und Kraftmaximum unterteilt. Absprünge im kurzen DVZ ( $< 200$  ms) werden hingegen der Reaktivkraft zugeordnet und sind grösstenteils unabhängig von den Schnellkraftfähigkeiten (Güllich & Schmidtbleicher, 1999).

Eine ausgeprägte Explosiv- und Reaktivkraft der oberen und unteren Extremitäten gilt als fundamentale Voraussetzung im konditionellen Profil von Kunstturnern und Kunstturnerinnen zur Erbringung einer guten Wettkampfleistung (Jemni et al., 2006). Ein Wettkampf wird deshalb als ein Aneinanderreihen von vielen kurzen, jedoch hochintensiven Aktionen charakterisiert (Jemni, Friemel, Lechevalier & Origas, 2000). Dies wird insbesondere bei der Betrachtung der geringen Aktivitätszeit (gesamthaft 12 – 15 min) während eines normalerweise drei Stunden dauernden Wettkampfes (inklusive Vorbereitung) ersichtlich. Die Explosiv- und Reaktivkraft sind insbesondere bei Anläufen, Absprüngen oder Abstössen (z.B. am Pferdsprung oder am Boden) entscheidend, um ausreichend Translations- und / oder Rotationsenergie für die anschliessende Flugphase zu generieren (Marina, 2018). Effektive Absprünge am Pferdsprung und Boden werden durch die Stiffness der Muskulatur der unteren Extremitäten (Steifigkeit der Muskulatur durch Vorinnervation), durch eine kurze Brett- / Bodenkontaktzeit ( $< 200$  ms) und durch eine effiziente Nutzung des kurzen DVZ charakterisiert (Bradshaw & Le Rossignol, 2004; Koperski, Kochanowicz & Słodkowski, 2010; McNeal, Sands & Shultz, 2007). Der Zusammenhang zwischen der Wettkampfleistung am Pferdsprung, der Anlaufgeschwindigkeit und konditionellen Voraussetzungen sowie deren Entwicklung über verschiedene Altersklassen wird in den Originalartikeln 1 und 3 untersucht.

### *Kraftausdauer*

«Die Kraftausdauer ist eine komplexe konditionelle Fähigkeit, die bei wiederholten Bewegungen (zyklisch, azyklisch, dynamisch und/oder statisch) mit Kraft- und Ausdaueranforderungen eine möglichst geringe Differenz zwischen dem maximal möglichen und dem durchschnittlich realisierten Kraftstoss sichert» (Schnabel et al., 2008, S. 190). Im Kunstturnen wird die gerätespezifische Ausdauer «durch die lokal dynamische und statische (vor allem an den Ringen) Kraftausdauer mit mittleren bis maximalen Krafteinsätzen charakterisiert» (Schnabel et al., 2008, S. 187). Einen entscheidenden Einfluss auf die gerätespezifische Ausdauer hat nach Arkaev und Suchilin (2004) insbesondere das Niveau der Maximalkraft der beanspruchten Extremität.

Die Wettkampfübungen an den Geräten unterscheiden sich in ihrer Art der Belastung sowie der Dauer (Pferdsprung: 6 s; Boden Männer: 70 s; Boden Frauen: 90 s) deutlich (Jemni et al., 2000). Die unterschiedlichen Übungslängen haben zur Folge, dass sich der anaerob-laktazide Anteil der Energiebereitstellung an den verschiedenen Geräten stark unterscheidet. So wurden bei der Disziplin Boden die höchsten Laktatwerte ( $> 7 \text{ mmol/l}$ ), am Pferdsprung jedoch die tiefsten Laktatwerte ( $3 \text{ mmol/l}$ ) festgestellt (Jemni et al., 2000; Rodríguez, Marina & Boucharin, 1999). Von 2003 bis 2015 hat die durchschnittliche Dauer der Übungen zwischen 24% (Ringe) und 56% (Barren) zugenommen. Somit erhöhten sich auch die Anforderungen an die gerätespezifische Ausdauer an den verschiedenen Geräten. Bei den Frauen ist dies nicht in diesem Ausprägungsgrad ersichtlich, da die Übungslängen am Boden (90 s) und Balken (90 s) vorgeschrieben sind (Naundorf et al., 2017). Zur Verbesserung der gerätespezifischen Kraftausdauer werden in der Trainingspraxis insbesondere die Wettkampfübungen oder Teile der Wettkampfübungen wiederholt trainiert. Dies ist insbesondere aus der Perspektive der Automatisierung der Bewegungsabläufe der Wettkampfübung sinnvoll (Arkaev & Suchilin, 2004).

### *Beweglichkeit*

Die Beweglichkeit ist ein wichtiger Leistungsaspekt im Kunstturnen. Sie wird definiert als der Bewegungsumfang eines oder mehrerer Gelenke, welcher schmerzfrei erreichbar ist (Sands et al., 2016). Turner und Turnerinnen benötigen bei vielen Elementen den vollen Bewegungsumfang der Gelenke. Eine eingeschränkte Beweglichkeit verlangsamt oder verunmöglicht den Lernprozess sogar (Jemni, 2018c). Deshalb wird in Selektionsverfahren bereits bei Kindern die Beweglichkeit als Selektionskriterium miteinbezogen. Die notwendige Beweglichkeit sollte im Kindesalter erarbeitet und während der gesamten Karriere erhalten werden (Sands & McNeal, 2000).

### 1.1.5 Sportliche Technik / Koordination

Fünf elementare spezielle koordinative Fähigkeiten bilden nach Prassas, Kwon und Sands (2006) die Basis zum Erwerb von sporttechnischen Fertigkeiten im Kunstturnen: Flughöhe generieren, rotieren (Längs- und Breitenachse), schwingen, landen und das Gleichgewicht halten. Aufbauend auf diesen grundlegenden Fähigkeiten werden in der Kindheit zuerst die Grundtechniken des Kunstturnens erlernt und stabilisiert. In der Folge lernen die Turner und Turnerinnen laufend neue Elemente dazu, welche dann in der Wettkampfübung aneinandergereiht gezeigt werden können (Arkaev & Suchilin, 2004). Die Vorgaben zur Ausführung der Elemente im Code de Pointage (FIG, 2017a, 2017b) definieren hierbei das sporttechnische Leitbild. Die Anforderung, dass in einer Wettkampfübung zehn (Männer) respektive acht (Frauen) unterschiedliche Elemente geturnt werden müssen, bedeutet für Athleten und Athletinnen eine grosse Herausforderung. Jedes Element stellt unterschiedliche biomechanische, sporttechnische und konditionelle Anforderungen an die Turner und Turnerinnen. Einige Elemente erfordern von den Athleten und Athletinnen einen maximalen Krafteinsatz, andere müssen mit optimalem Kraftimpuls, abgestimmt auf die sporttechnischen Fertigkeiten des Athleten oder der Athletin, geturnt werden. In einer Wettkampfübung werden schliesslich all diese Anforderungen vereint (Arkaev & Suchilin, 2004).

In den letzten Jahren ist das sporttechnische Niveau im Kunstturnen stark angestiegen. Dies wirkte sich insbesondere bei den Männern darauf aus, dass die Bedeutung des D-Wertes für die Rangierung deutlich zugenommen hat. Dieser Trend konnte bei den Frauen, bei welchen ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen D- und E-Wert besteht, nicht beobachtet werden (Naundorf et al., 2017). Neben dem Anstieg der Anzahl Höchstschwierigkeiten in den Übungen werden laufend neue (schwierigere) Elemente kreiert, welche die Athleten und Athletinnen immer näher an die biologischen und biomechanischen Grenzen des menschlichen Leistungsvermögens bringen (Brüggemann, 2005). In diesem Zusammenhang wurden zum Beispiel maximale Drehgeschwindigkeiten bei Salti von bis zu 1200 °/s in der Breiten – und Längsachse gemessen (Knoll et al., 2000).

Die hohe Anzahl an unterschiedlichen Elementen in der Wettkampfübung sowie die vom Code de Pointage (FIG, 2017a, 2017b) verlangten vier verschiedenen Elementstrukturen pro Gerät erfordern ein sehr breites sporttechnisches Elemente-Repertoire. Die Elemente werden dabei in einem hochstrukturierten methodischen Aufbau gelernt (Irwin & Kerwin, 2007). Hierbei sollte das Training durch und durch geplant und darauf ausgerichtet sein, die bestmögliche (exzellente) und stabile Ausführung der sportlichen Technik anzustreben (Dowdell, 2010). In diesem

Zusammenhang konnte gezeigt werden, dass Eliteathleten und -athletinnen eine tiefere Variabilität von entscheidenden biomechanischen Merkmalen der Bewegungen aufweisen, als Athleten und Athletinnen mit tieferem sporttechnischem Niveau (Hiley, Zuevsky & Yeadon, 2013). Nach Sands (2018) ist der motorische Lernprozess stark abhängig von der Zusammenarbeit zwischen Trainer oder Trainerin und Athlet oder Athletin. Hierbei bildet für ihn das spezifische Wissen über Methodik die Grundlage für ein gutes Coaching. Im Trainingsprozess sind Trainer oder Trainerin und Athlet oder Athletin in einer «kooperativen Situation», in welcher dem Athleten oder Athletin Konzepte im Bereich Fitness, Sporttechnik, Taktik, mentale Orientierung und Philosophie des Turnens gelehrt werden (Sands, 2018).

Wie bei allen Bewegungslernaufgaben ist auch im Kunstturnen Feedback unerlässlich. Im Training mit Kindern werden häufig verbale Feedbacks oder Demonstrationen angewendet. Mit zunehmender Komplexität der Elemente sind neben den mündlichen Rückmeldungen vor allem Videoanalysen entscheidend, um Fortschritte zu erzielen. Hierbei haben sich vor allem kombinierte Feedback-Methoden aus Videoanalyse und Modelldarstellungen (Boyer, Miltenberger, Batsche & Fogel, 2009) als wirksam erwiesen.

#### 1.1.6 Psyche

Die Psyche spielt neben der Kondition und der sportlichen Technik eine zentrale Rolle für die Leistungserbringung am Wettkampf im Kunstturnen (und somit auch für die Resultate der vier Originalartikel dieser Arbeit). Sie sollte, so wie die anderen beiden Leistungsvoraussetzungen, systematisch trainiert werden (Miltiadis, Fotios & Michalis, 2012).

Das umfangreiche Training bereits im Kindes- und Jugendalter fordert ein hohes Mass an intrinsischer Motivation. Die Befriedigung der drei grundlegenden psychologischen Bedürfnisse (Autonomie-, Kompetenz- und Sozialbedürfnis) (Ryan & Deci, 2000) sichert dabei die Erhaltung der intrinsischen Motivation sowie das Wohlergehen der Athleten und Athletinnen im Trainingsprozess (Gagné, Ryan & Bargmann, 2003; Hagger & Chatzisarantis, 2007). Zweifels- ohne spielt auch die Kooperation und Loyalität zwischen Athlet oder Athletin und Trainer oder Trainerin im täglichen Training eine zentrale Rolle für die Entwicklung von Höchstleistungen (Arkaev & Suchilin, 2004).

Die schwierigen Elemente, die im Training und an den Wettkämpfen geturnt werden, bergen für die Athleten und Athletinnen ein gewisses Risiko, sich zu verletzen. Eng verbunden mit Verletzungen ist auch die Angst, sich zu verletzen. Nach Cartoni, Minganti und Zelli (2005) ist die Angst im Kunstturnen ein komplexes Muster, welches massgeblich durch Erfahrungen geprägt wird sowie von persönlichen Dispositionen und spezifischen Selbstevaluationsprozessen

(Selbstwirksamkeitsüberzeugung) abhängt. Für Turner und Turnerinnen kann die Angst vor Verletzungen zu einer psychischen Barriere werden, die sie daran hindert, neue Elemente zu lernen oder bereits gelernte Elemente weiter zu verbessern.

Um die sporttechnisch komplexen Elemente zu perfektionieren, sollten Athleten und Athletinnen eine differenzierte interne Repräsentation der einzelnen Elemente, aber auch der gesamten Wettkampfübung entwickeln. Dies ist zum Beispiel durch gezieltes kognitives Funktionstraining zu erreichen. Nach Schack und Bar-Eli (2007) ist dabei die Bewegungsrepräsentation und -regulation auf vier Ebenen organisiert (Ebene 1: sensomotorische Kontrolle, Ebene 2: sensomotorische Repräsentation, Ebene 3: mentale Repräsentation, Ebene 4: mentale Kontrolle).

Damit die Übungen an den Wettkämpfen (in dem einen, zur Verfügung stehenden Versuch) perfekt geturnt werden können, sollten Athleten ihr Erregungsniveau kontrollieren können (Lee, 1982) und im Moment der Leistungserbringung Distraktoren (Selbstzweifel, Angst, Schmerzen, störendes aus der Aussenwelt) ausblenden können (Grandjean, Taylor & Weiner, 2002). Dafür müssen nach Lee (1982) Athleten und Athletinnen fähig sein, ihren Zustand während eines Wettkampfes laufend wahrzunehmen (störende Einflüsse zu identifizieren) sowie Bewältigungsstrategien anwenden zu können, mit welchen ein optimaler Wettkampfstand möglichst bald wiederhergestellt werden kann.

## 2 Wissenslücken und Fragestellungen

In der Folge sollen die für diese Dissertation relevanten gerätespezifischen Leistungsstrukturen am Pferdsprung und an den Ringen erläutert, Wissenslücken aufgezeigt und schliesslich die dieser Arbeit zugrundeliegenden Fragestellungen daraus abgeleitet werden. Die einzelnen Artikel beantworten Fragestellungen, die für das sportliche Training, die sportliche Leistung und den sportlichen Wettkampf sowie deren Wechselbeziehungen untereinander von Bedeutung sind. In Originalartikel 1 werden die Relationen zwischen sportlicher Leistung und dem Wettkampfergebnis am Pferdsprung berechnet. Originalartikel 2 validiert eine Messmethode zur Bestimmung von relevanten Komponenten der sportlichen Leistung (Flughöhe und -weite) am Pferdsprung. In Originalartikel 3 werden durch die Analyse von leistungsdiagnostischen Daten in Bezug auf die Wettkampfleistung die notwendigen konditionellen Voraussetzungen am Pferdsprung definiert und daraus Konsequenzen für das konditionelle Training in verschiedenen Altersklassen gezogen. Originalartikel 4 untersucht die Wirksamkeit einer neuen spezifischen Krafttrainingsmethode auf die Verbesserung der Maximalkraft an den Ringen und somit zur Steigerung der sportlichen Leistung im Wettkampf.

### 2.1 Originalartikel 1

Der Pferdsprung kann trotz seiner kurzen Dauer in sieben Phasen unterteilt werden (Bučar Pajek, Čuk, Pajek, Kovač & Leskošek, 2013): 25 m Anlauf, Einsprung ins Sprungbrett, Absprung vom Sprungbrett, erste Flugphase, Abstoß vom Sprungtisch, zweite Flugphase und Landung (Atiković & Smajlović, 2011). An den Wettkämpfen werden heutzutage vor allem Sprünge aus den Sprunggruppen Überschlag, Tsukahara und Yurchenko gezeigt. Die drei Sprunggruppen unterscheiden sich in der Art des Einsprungs ins Sprungbrett und/oder des Abstosses vom Sprungtisch. Bei Überschlag- und Tsukaharasprüngen erfolgt der Absprung vom Sprungbrett vorwärts, der Abstoß bei Überschlagsprüngen frontal, jedoch bei Tsukaharasprüngen seitlich ( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{2}$  Drehung in der ersten Flugphase). Bei Yurchenkosprüngen wird nach dem Anlauf eine Radwende auf das Sprungbrett und ein Rückwärtsüberschlag geturnt. Um einen hohen D-Wert am Pferdsprung zu erreichen und somit die Erfolgchance an den Wettkämpfen zu erhöhen, ist es vor allem entscheidend, in welcher Körperposition (gehockt, gebückt, gestreckt) wie viele Breiten- und Längsachsenrotationen in der zweiten Flugphase geturnt werden (Atiković & Smajlović, 2011). Die Anzahl der möglichen Längen- und Breitenachsenrotationen ist dabei direkt abhängig von der Umwandlung der während des Anlaufes generierten horizontalen Energie in ein optimales Mass von Translations- (Flughöhe) und Rotationsenergie (Längen- und Breitenachse) beim Absprung und Abstoß vom Sprungbrett und -

tisch (Brüggemann, 2005; Prassas et al., 2006). Hierbei sind die Abstösse nach Höhe des generierten Gegendrehmomentes zu unterteilen (Knoll, 2004). Ein Abstoss mit einem hohen Gegendrehmoment resultiert in einer grossen Flughöhe mit kleinem Drehimpuls (z. B. Sprünge mit einem Dreifachsalto in der zweiten Flugphase). Im Gegensatz dazu wird bei einem kleinen Gegendrehmoment beim Abstoss der Drehimpuls weitestgehend erhalten, was eine kleinere Flughöhe zur Folge hat, aber optimal ist, um einfache gestreckte Salti mit Längsachsendrehungen in der zweiten Flugphase zu turnen.

Da der Hauptanteil der Energie für ausreichende Translations- und Rotationsenergie in der zweiten Flugphase mit dem Sprunganlauf erzeugt wird, ist die Höhe der Anlaufgeschwindigkeit ein Schlüsselfaktor, um überhaupt schwierige Sprünge turnen zu können (Atiković & Smajlović, 2011; Fujihara, 2016; Krug, Knoll, Köthe & Zocher, 1998). Obwohl aus den zahlreichen wissenschaftlichen Analysen am Pferdsprung angenommen werden kann, dass signifikante positive Zusammenhänge zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem D- und E-respektive F- Wert bestehen, wurden diese Zusammenhänge bisher nie mit einer grossen Probandengruppe an einem internationalen Grossanlass untersucht. Um ein ganzheitliches, aber differenziertes Bild der Anforderungen am Pferdsprung zu erhalten, werden in dieser Arbeit die Auswertungen nach Geschlecht, Alter (Junioren-, Juniorinnen-, Eliteathleten und -athletinnen) und Sprunggruppe (Überschlag-, Tsukahara-, Yurchenkosprünge) aufgeteilt. Dies erlaubt Rückschlüsse über Entwicklungsprozesse (Junioren versus Eliteathleten) aber auch über Unterschiede in der Leistungsstruktur zwischen Frauen und Männern.

## 2.2 Originalartikel 2

3D-Videoanalysen werden im Kunstturnen unter anderem verwendet, um Referenzwerte von wichtigen biomechanischen Parametern schwieriger Elemente zu erstellen. So wurden in der Untersuchung von Brehmer und Naundorf (2014) die notwendigen Flughöhen bestimmt, um am Pferdsprung einen Tsukahara mit Doppelsalto gebückt sicher turnen zu können. Ungenügende Flughöhen in der zweiten Flugphase haben häufig Stürze zur Folge und stellen somit ein potentiell Verletzungsrisiko für die Athleten und Athletinnen dar. Diese Referenzwerte sind aber nur nützlich, wenn auch im Training diese Parameter erhoben werden können. Um die Flughöhe genau bestimmen zu können, waren bisher aufwändige 3D-Videoanalysen notwendig, die weder im Trainingsalltag noch durch Trainer oder Trainerinnen durchgeführt werden konnten. Mit der ständigen Verfügbarkeit von Smartphones und Tablets in den Trainingshallen wäre es praktisch, wenn präzise Videoanalysen auch im Training mit den vorhandenen Geräten und mit wenig Aufwand durchgeführt werden könnten. Kürzlich entwickelte Applikationen zur

2D-Videoanalyse versprechen hierbei eine genaue Bestimmung von einfachen biomechanischen Parametern (Flughöhen, -weiten, Bewegungsgeschwindigkeiten). Um solche einfachen Tools im täglichen Training anwenden zu können, müssen Trainer und Trainerinnen die Gewissheit haben, dass die Analysen verlässlich sind. Die Messgenauigkeit dieser Applikationen wurde aber noch nie bei hochkomplexen Elementen im Kunstturnen wissenschaftlich überprüft. Aus diesem Grund wurden in der vorliegenden Arbeit die Gütekriterien einer einfachen 2D-Videoanalyse-Methode zur Bestimmung von Flughöhe und -weite während der zweiten Flugphase am Pferdsprung durch den Vergleich mit einer komplexen 3D-Videoanalyse-Methode überprüft.

### 2.3 Originalartikel 3

Der Pferdsprung hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt. Die breitere Stützfläche des neuen Sprungtisches erlaubt eine funktionell-anatomisch bessere Position beim Abstoß vom Sprungtisch. Dies ermöglicht es den Athleten und Athletinnen mit einer höheren Geschwindigkeit anzulaufen (Naundorf et al., 2008). Beides wirkt sich positiv auf die Höhe der Translations- und Rotationsenergie in der zweiten Flugphase aus (Čuk & Ferkolj, 2008; Irwin & Kerwin, 2009). Die Folge davon ist, dass die Schwierigkeit der gezeigten Sprünge in den letzten Jahren markant angestiegen ist (Naundorf et al., 2008). Zudem lassen die vereinfachten Bedingungen beim Abstoß durch den neuen Sprungtisch vermuten, dass der Anlaufgeschwindigkeit heute eine noch höhere Bedeutung zukommt. Deshalb ist es notwendig, sich mit den konditionellen Voraussetzungen einer hohen Anlaufgeschwindigkeit auseinanderzusetzen. Der Sprunganlauf wird generell als standardisierter Kurz sprint mit einer 20m-Beschleunigungs- und 5m-Geschwindigkeits-Erhaltungsphase bezeichnet (Naundorf et al., 2008). Dabei wird das Schrittmuster aufgrund der limitierten Anlaufdistanz (25 m) und des technisch anspruchsvollen Pferdsprunges am Ende des Anlaufes kaum variiert (Bradshaw, 2004). Hinsichtlich der Schritt- und Geschwindigkeitsgestaltung beim Sprunganlauf wurden Unterschiede zwischen Top-Athleten und Athleten mit mittlerem turntechnischem Niveau festgestellt (Veličković, Petković & Petković, 2011). Trotzdem ist bis heute nicht klar, welche Bedeutung das Schrittmuster in Bezug auf die Höhe der Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung hat.

Bei normalen linearen Kurzsprints wird eine hohe Geschwindigkeit in kurzen Sprints eng mit dem Ausprägungsgrad von Maximal-, Explosiv- und Reaktivkraft verbunden (Debaere, Jonkers & Delecluse, 2013; Delecluse et al., 1995; Meyers, Oliver, Hughes, Lloyd & Cronin, 2017). Im Kunstturnen werden die Explosiv- und Reaktivkraft für die Erbringung der Wettkampfleistung



als zentral betrachtet (French et al., 2004), jedoch wurde der Einfluss dieser Parameter auf die Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung nicht umfassend wissenschaftlich untersucht.

Zwar haben Brehmer und Naundorf (2011) die Entwicklung der Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung über verschiedene Altersklassen beschrieben, jedoch wurde die Entwicklung der dafür notwendigen Schnelligkeits- und Schnellkraftparameter über verschiedene Altersklassen noch nie analysiert. Dieses Wissen wäre in Bezug auf die Trainingssteuerung und Trainingsoptimierung im Elite- und insbesondere im Juniorenbereich sehr nützlich. Daher wird in der vorliegenden Arbeit erstens der Zusammenhang zwischen dem D-Wert und der Anlaufgeschwindigkeit sowie zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und deren konditionellen Voraussetzungen (Schrittkinematik, Sprintgeschwindigkeit, Explosiv- und Reaktivkraft) berechnet. Zweitens wird die Entwicklung dieser Parameter über verschiedene Altersklassen untersucht.

## 2.4 Originalartikel 4

Die Wettkampfübung an den Ringen setzt sich aus Schwung- und Kraftelementen sowie einem Abgang zusammen. Dabei dürfen in der Wettkampfübung bis zu acht dynamische (heben oder senken) oder statische Kraftelemente gezeigt werden. Um eine Übung mit einem hohen D-Wert zeigen zu können, sind die beiden schwierigen Krafthalteelemente Schwalbe und Stützwaage wichtig (Campos, 2009). Das Halten dieser Kraftelemente erfordert von den Athleten ein hohes Niveau an relativer Maximalkraft der oberen Extremitäten und eine gute Gleichgewichtsfähigkeit in den spezifischen Haltepositionen (Schärer & Hübner, 2016). Um diese Kraftelemente während den geforderten zwei Sekunden in der perfekten Position halten zu können und um ein Absenken des Körpers zu verhindern, muss während der Haltezeit konstant die Schwerkraft überwunden werden. Die Muskulatur der oberen Extremitäten verrichtet deshalb während der Haltezeit eine bremsende Arbeit, welche wohl (zumindest teilweise) einer exzentrischen Belastung ähnlich ist. Deswegen wurden in der letzten Zeit immer häufiger spezifische exzentrische Krafttrainingsübungen an den Ringen ins Krafttraining eingebaut. Exzentrisches Krafttraining ist im Allgemeinen ein effektiver und energie-effizienter Stimulus zur Verbesserung der Maximalkraft (Armstrong, Ogilvie & Schwane, 1983; Cowell, Cronin & Brughelli, 2012). Das spezifische exzentrische Krafttraining an den Ringen hat sich aber in der Trainingspraxis als potentiell schädlich für die Sehnen und Gelenke der Athleten erwiesen. Mit der externen Überlast kommen Beschleunigungen und damit Kraftspitzen zustande, welche auf Grund der Instabilität der Ringe nicht in ausreichendem Mass kontrolliert werden können. Die Trainer sind jedoch überzeugt von der Wirksamkeit von exzentrischem Krafttraining zur Verbesserung der Maximalkraft in den entsprechenden Haltepositionen. Deshalb sollten neue, besser kontrollierbare,

aber dennoch spezifische Trainingsformen entwickelt und deren Wirksamkeit in Bezug auf die Verbesserung der spezifischen Maximalkraft bei Krafthalteelementen wissenschaftlich überprüft werden. In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine neue exzentrisch-isokinetische Krafttrainingsmethode mit einem neuartigen computergesteuerten Krafttrainingsgerät entwickelt und deren Wirksamkeit auf die Verbesserung von Krafthalteelementen an den Ringen mit einer vierwöchigen Trainingsintervention überprüft.

## 2.5 Fragestellungen

Folgende Fragestellungen wurden aus den zuvor erläuterten Wissenslücken im Kunstturnen erstellt:

### Originalartikel 1:

- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem D-, E-, und F-Wert sowie der Flughöhe und -weite in der zweiten Flugphase am Pferdsprung an einem internationalen Grossanlass?
- Wie sind die Leistungen (Anlaufgeschwindigkeit, D-, E-, F-Wert; Flughöhe und -weite) im Vergleich zwischen Männern und Frauen sowie Junioren- und Eliteathleten und -athletinnen?

### Originalartikel 2:

- Wie valide, reliabel und objektiv ist die Bestimmung der Flughöhe und -weite am Pferdsprung während der zweiten Flugphase mit einer einfachen 2D-Videoanalyse-Methode im Vergleich zu einer komplexen 3D-Videoanalyse-Methode?

### Originalartikel 3:

- Welcher Zusammenhang besteht (a) zwischen dem D-Wert und der Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung; (b) der Anlaufgeschwindigkeit und der Schrittkinematik während dem Anlauf; (c) der Anlaufgeschwindigkeit und Schnelligkeits- und Schnellkraftparametern der unteren Extremitäten bei Überschlag- / Tsukaharasprüngen respektive Yurchenkosprüngen?
- Wie verändern sich der Schwierigkeitswert und die Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung sowie Schnelligkeits- und Schnellkraftparameter der unteren Extremitäten über verschiedene Altersklassen während dem Junioren- und Elitealter?

### Originalartikel 4:

- Wie wirksam ist eine vierwöchige spezifische exzentrisch-isokinetische Krafttrainingsintervention zur Verbesserung der Maximalkraft und Maximalkraftausdauer von Eliteathleten bei den Elementen Schwalbe und Stützwaage?

### 3 Originalartikel 1

#### **The faster, the better? Relationships between run-up speed, the degree of difficulty (D-score), height and length of flight on vault in artistic gymnastics**

Christoph Schärer<sup>1,2\*</sup>, Thomas Lehmann<sup>3</sup>, Falk Naundorf<sup>3</sup>, Wolfgang Taube<sup>2</sup>, Klaus Hübner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Swiss Federal Institute of Sport Magglingen (SFISM), Department of Elite Sport, Magglingen, Switzerland,

<sup>2</sup> University of Fribourg, Department of Medicine, Movement and Sport Science, Fribourg, Switzerland,

<sup>3</sup> Institute of Applied Training Science Leipzig (IAT), Department Strength and Technique, Leipzig, Germany

\*Corresponding author: christoph.schaerer@baspo.admin.ch (CS)

**Citation:** Schärer, C., Lehmann, T., Naundorf, F., Taube, W., Hübner, K. (2019). The faster, the better? Relationships between run-up speed, the degree of difficulty (D-score), height and length of flight on vault in artistic gymnastics. *PLoS ONE* 14(3): e0213310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213310>

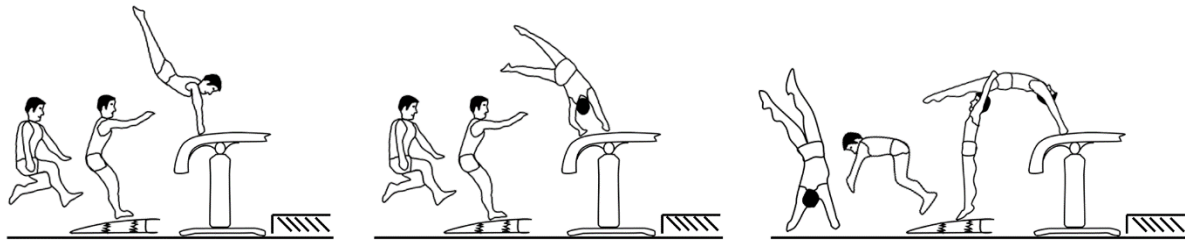
## Abstract

On vault in artistic gymnastics, a high run-up speed is thought to be important when performing difficult vaults. To test this assumption in a large cohort of elite athletes, we calculated the correlations between the run-up speed, scores, height and length of flight for handspring-, Tsukahara- and Yurchenko-style vaults and compared the performances of male and female elite and junior athletes ( $n = 407$ ) during the 2016 European Championships. In females, run-up speed correlated significantly with the difficulty (D) score and height of flight for all vaulting styles ( $r \leq 0.80$ ). In males, run-up speed correlated significantly with the D-score, height and length of flight of Tsukahara ( $r \leq 0.69$ ) and Yurchenko vaults only ( $r \leq 0.65$ ). Males reached 8-9% higher run-up speeds performing handspring and Tsukahara vaults than did females, but similar run-up speeds performing Yurchenko vaults. Elite females achieved higher run-up speeds than junior females performing Yurchenko vaults. Elite males displayed higher run-up speeds than junior males performing handspring and Tsukahara vaults. We conclude that, in females, more difficult vaults require higher run-up speeds than vaults with lower D-scores and thus, within the measured range of speeds, the faster the run-up, the better, regardless of vaulting style. Males, on the other hand, may not need to exhaust their sprinting capacity, even for the most difficult vaults. Finally, the knowledge of the required run-up speed for each vault helps coaches to estimate each athlete's potential and/or to focus the training on developing the required physical qualities.

## Introduction

In men's and women's artistic gymnastics, the gymnast with the highest final score (F-score) gets to stand on top of the podium. Since the F-score is the sum of the difficulty (D-score) and the execution score (E-score), the chance of a good ranking in competition increases when a difficult routine is attempted due to the higher start value. The vault is one of six apparatus for men and one of four for women. Despite its short duration ( $< 5$  s) [1], vaulting performance can be divided into seven phases: run-up, hurdle or round off, take-off, preflight, support, post flight and landing [2]. In competition, gymnasts can freely select a vault conforming to their skill level. According to official competition rules, difficult vaults are assigned a high difficulty score (D-score) [3, 4]. The D-score is mainly influenced by the degrees of rotation around the transversal and longitudinal axes in the second flight phase [2]. Further, because the attainable amount of rotation depends on the moments of inertia [5-7], flight time and initial angular momentum, a high kinetic energy leading up to the take-off and push-off from vaulting board and table is essential for high-difficulty vaults.

During take-off from the springboard and vaulting table, the horizontal kinetic energy that was gathered during the run-up, is converted into angular and vertical kinetic energy to facilitate an optimal second flight phase [8, 9]. Although the three most common vault styles handspring, Tsukahara (handspring with  $\frac{1}{4}$  or  $\frac{1}{2}$  turn in the first flight phase) and Yurchenko (Round-off entry vaults (with  $\frac{1}{2}$  turn) in the first flight phase) (Fig 1) have different technical and physical requirements [10], it is generally acknowledged that a high run-up speed is important for a successful execution of a difficult vault. In the last decade, the vault run-up speed seems to have increased significantly [10] in men's and women's elite artistic gymnastics. The introduction of the new vaulting table for safety reasons in 2001, and the implementation of the unlimited scoring system in 2006 may have potentiated this development. The unlimited scoring system rewards the demonstration of difficult vaults during competitions [10]. Further, the new vaulting table increases safety by providing a much larger surface for hand placement [11] while facilitating a more anatomically functional position of the arms during the table support phase [12], thus allowing a more effective transfer of horizontal kinetic energy from the run-up phase into vertical and angular kinetic energy for the second flight phase [12].



**Fig 1.** Different vault styles. The different first flight phases of the three most common vault styles in male and female artistic gymnastics. Left: Handspring; middle: Tsukahara; right: Yurchenko.

Although the relationship between run-up speed, biomechanical parameters and the performance (D-, E- and F-score) seems logical and has been assumed for the past four decades [13], the correlations between these factors have never been calculated with a large cohort of either elite or junior gymnasts. Further, the performances of male and female, junior and elite gymnasts at a high level international competition have never been compared in terms of run-up speed, height and length of flight.

Hence, the main purpose of our study was to quantify the relationships between run-up speed and the scores (D-, E- and F-score), the height and the length of flight of the second flight phase in a high-level competition. The additional aims were to compare males and females, elite and junior gymnasts and the different vault styles handspring, Tsukahara and Yurchenko with regard to the run-up speed, the competition results (D-, E- and F-score) and the height and length of flight.

## Materials and methods

The data collection occurred during the official competitions of the 2016 European Championships in Artistic Gymnastics (EC). The measurements were performed with approval of the men's and women's technical committee of the European Union of Gymnastics. The data were anonymized and made available to the national gymnastics federations. The institutional review board of the Swiss Federal Institute of Sport Magglingen (SFISM) approved this study, which was conducted in compliance to the current version of the Declaration of Helsinki, the ICH-GCP or ISO EN 14155 and with all national legal and regulatory requirements.

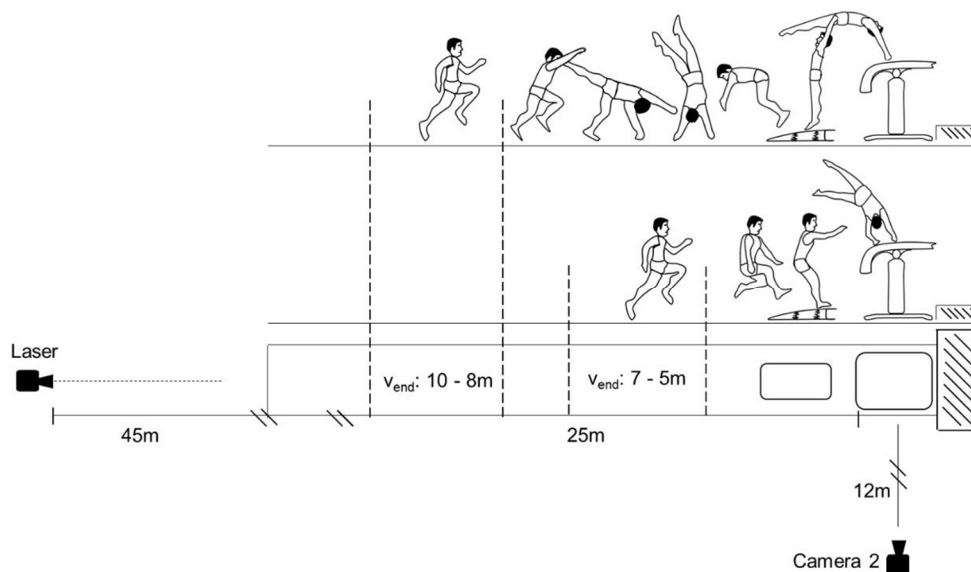
## Participants

In total, 195 female [elite (F):  $n = 89$ ; Age: 19.46,  $SD = 3.44$  y; juniors (FJ):  $n = 106$ ; Age: 14.52,  $SD = 0.59$  y] and 212 male gymnasts [elite (M):  $n = 89$ ; Age: 23.06,  $SD = 3.68$  y; juniors

(MJ):  $n = 123$ ; Age: 16.86,  $SD = 1.17$  y] performed 515 vaults during the official qualification competition of the EC. In order to qualify for the event finals, 31.4% of female and 22.6% of male participants, respectively, performed a second (different) vault.

## Procedures

Vault run-up speed was measured with a laser measurement system (LDM 301, Jenoptik, Rostock, Germany), placed behind the runway, 45 m from the vault table. The laser beam was aimed at the table with a height corresponding to gymnasts' lower back. The raw (100-Hz) position data were clustered into and averaged within consecutive 0.04-s bins, thus yielding a 25-Hz position-time signal. The final run-up speed before board contact ( $v_{\text{end}}$ ) was then calculated at the last step before the jump onto the springboard for handspring and Tsukahara (mean speed from 7 to 5 m in front of the vaulting table) and the last running step before the round-off for Yurchenko (mean speed from 10 to 8 m in front of the vaulting table), respectively [10] (Fig 2). D- (Difficulty), E- (Execution) and F-score (Final) were taken from the official ranking list [14, 15].



**Fig 2.** Recording conditions. Schematic representation of the recording conditions and the different measurement positions of run-up speed ( $v_{\text{end}}$ ) at the last step before the jump onto the springboard for Yurchenko (mean speed from 10 – 8 m in front of the vaulting table) and handspring or Tsukahara vaults (mean speed from 7 – 5 m) during the competitions of the 2016 European Championships in Men's and Women's Artistic Gymnastics.



Maximal height ( $h_{\max}$ ) and length (L) of flight were detected with two synchronized full HD cameras (Basler acA 1920-155 uc, USB 3.0, Basler AG, Ahrensburg, Germany; 100 fps; 1920x1200), placed orthogonal to each other in the spectator area. Camera one was behind the vault runway (distance: 45 m); camera two was beside the vaulting table (distance: 12 m and 5 m above). The motion volume was calibrated in front of and behind the vaulting table by digitizing a 3-dimensional calibration cube (1.89 x 1.89 x 2.26 m). Video analysis was run with Simi Motion 2D/3D (Simi Reality Motion System, Unterschleissheim, Germany). Based on the coordinates of the center of mass,  $h_{\max}$  was determined, whereas L was determined based on the position of the ankle, both relative to the defined point of origin. The ankle was labeled at the moment of landing and L was measured from the point intersecting the surface of the landing mat and the plumb line at the edge of the vaulting table. Interrater-reliability of tagging  $h_{\max}$  and L was assessed according to Hopkins (2000) [16] with randomly chosen vaults ( $n = 25$ ) and revealed a high accuracy of determining  $h_{\max}$  (Pearson's correlation coefficient:  $r = 0.92$ ) and L ( $r > 0.99$ ), a small typical error (TE) ( $h_{\max}$ : 0.07 m; L: 0.02 m), no systematic error (t-test) ( $h_{\max}$ :  $p = 0.90$ ; L:  $p = 0.17$ ) and small random errors (relative coefficient of variation: CV%) ( $h_{\max}$ : CV% = 3.33%; L: CV% = 0.85%).

### Statistical analyses

Descriptive statistics were run on all variables separately for the four groups (elite and junior, male and female) as well as for the vaulting styles handspring, Tsukahara and Yurchenko. Box-plots of  $v_{\text{end}}$  were constructed for each group to define the range of the optimal run-up speed (between lower to upper quartiles) for the different vaults ( $n \geq 3$ ). The relationships between run-up speed, D-, E- and F-Score, height and length of flight were assessed using Spearman's Rho and explained variance ( $R^2$ ). Mann-Whitney-U-Tests were used to determine differences between genders, age groups and vaulting styles. Effect sizes (ES) were calculated by dividing the standardized test statistic (z) by the square root of N (total number of cases) and classified as either small ( $< 0.1$ ), medium ( $> 0.3$ ) or large ( $> 0.5$ ) using the criteria according to Cohen [17]. Significance level was set to  $p < 0.05$ . All statistics were performed using SPSS 22 software (SPSS Inc., Chicago, IL).

### Results

In 21 of the 515 vaults, either  $v_{\text{end}}$ ,  $h_{\max}$  or L could not be determined due to disturbances by spectators and/or recording problems. The remaining 494 vaults were included in the data analysis.

### Male vs. female athletes

Altogether, 51% of vaults presented by females were Yurchenko-style vaults, 24.5% were handspring and 24.5% were Tsukahara vaults. Males predominantly performed Tsukahara (69%), followed by handspring (19%) and Yurchenko vaults (12%).

When performing handspring and Tsukahara vaults, males displayed significantly higher run-up speeds (elite: + 9%; juniors: + 8%;  $p < 0.001$ ;  $ES > 0.61$ ) as well as greater  $h_{\max}$  (elite: + 17%; juniors: + 12%;  $p < 0.001$ ;  $ES > 0.66$ ) and L (elite: + 37%; juniors: + 18%;  $p < 0.001$ ;  $ES > 0.49$ ) than females in their respective age category. In contrast, the run-up speeds for Yurchenko did not differ between males and females (elite:  $p = 0.32$ ; juniors:  $p = 0.18$ ;  $ES < 0.21$ ). Nonetheless,  $h_{\max}$  (+ 9%) and L (+ 16%) were significantly greater in male elite than female elite gymnasts ( $p < 0.01$ ;  $ES > 0.36$ ). Gymnasts performing two vaults displayed significantly lower run-up speed when performing Yurchenko compared to handspring or Tsukahara, regardless of gender or age category (all  $p < 0.05$ ). However, the decrease in run-up speed was more severe for males (elite: - 10.52%; juniors: - 8.48%) than for females (elite: - 3.60%; juniors: - 5.92%).

### Elite vs. junior athletes

Mean values and statistical differences between elite and junior females and between elite and junior males for all measured parameters are displayed in Tables 1 and 2.

**Table 1.** Descriptive statistics females.

Category	n	$v_{\text{end}} \pm \text{SD}$	$h_{\max} \pm \text{SD}$	$L \pm \text{SD}$	$D\text{-score} \pm \text{SD}$	$E\text{-score} \pm \text{SD}$	$F\text{-score} \pm \text{SD}$
Handspring F	28	$7.63 \pm 0.32$	$2.41 \pm 0.15$	$1.84 \pm 0.30$	$4.89 \pm 0.46^{**}$	$8.62 \pm 0.55$	$13.48 \pm 0.95^*$
Handspring FJ	32	$7.54 \pm 0.31$	$2.41 \pm 0.11$	$1.95 \pm 0.33$	$4.59 \pm 0.24$	$8.62 \pm 0.40$	$13.17 \pm 0.54$
Tsukahara F	25	$7.40 \pm 0.38$	$2.28 \pm 0.13$	$1.81 \pm 0.28$	$4.50 \pm 0.42^*$	$8.41 \pm 0.47$	$12.90 \pm 0.78$
Tsukahara FJ	35	$7.23 \pm 0.33$	$2.29 \pm 0.07$	$1.79 \pm 0.29$	$4.29 \pm 0.26$	$8.47 \pm 0.27$	$12.76 \pm 0.44$
Yurchenko F	62	$7.31 \pm 0.25^*$	$2.49 \pm 0.15$	$1.83 \pm 0.2$	$5.10 \pm 0.50^*$	$8.85 \pm 0.34^*$	$13.93 \pm 0.73^{**}$
Yurchenko FJ	64	$7.19 \pm 0.21$	$2.44 \pm 0.09$	$1.81 \pm 0.31$	$4.69 \pm 0.95$	$8.46 \pm 1.54$	$13.13 \pm 2.43$

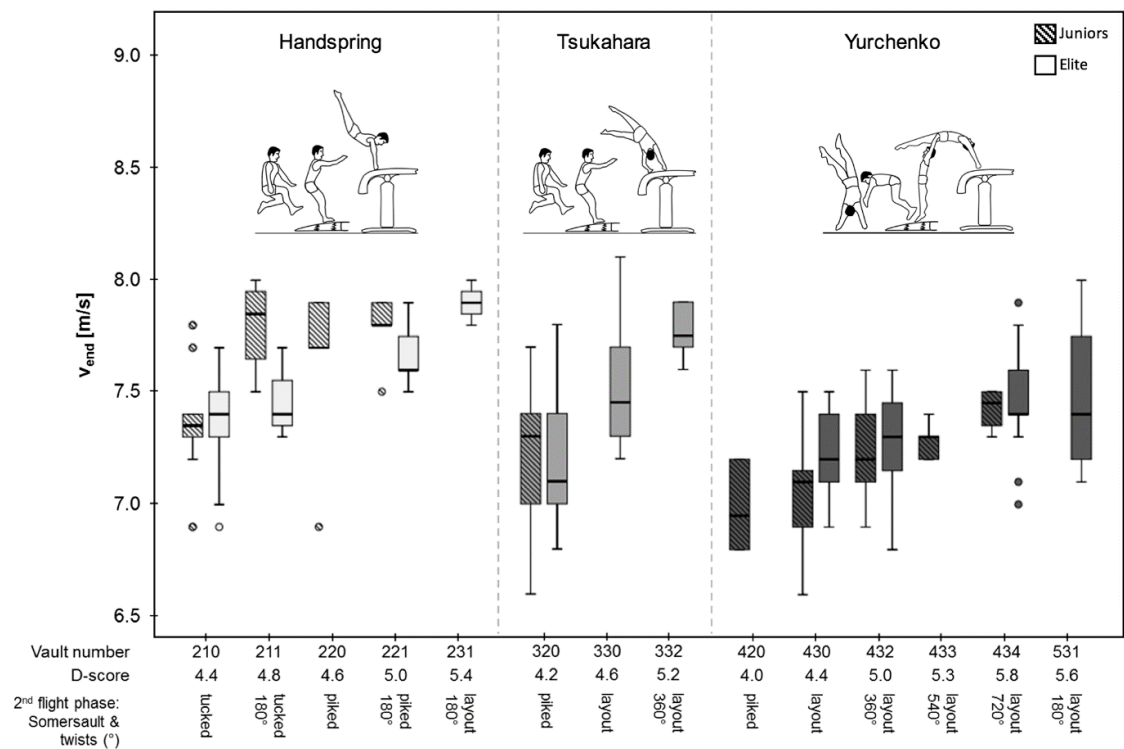
Mean values, standard deviation and statistical difference (Mann-Whitney-U-Test) between female elite and junior athletes of the run-up speed, height and length of flight and D-, E- and F-score on vault (n = number of participants;  $v_{\text{end}}$  = run-up velocity at the last step before the jump onto the springboard;  $h_{\max}$  = maximal height of flight; L = length of flight; D-score = Difficulty score; E-score = Execution score; F-score = Final score; F = Female elite athletes; FJ = Female junior athletes; \*: F is different from FJ ( $p < 0.05$ ); \*\*: F is different from FJ ( $p < 0.01$ )).

**Table 2.** Descriptive statistics males.

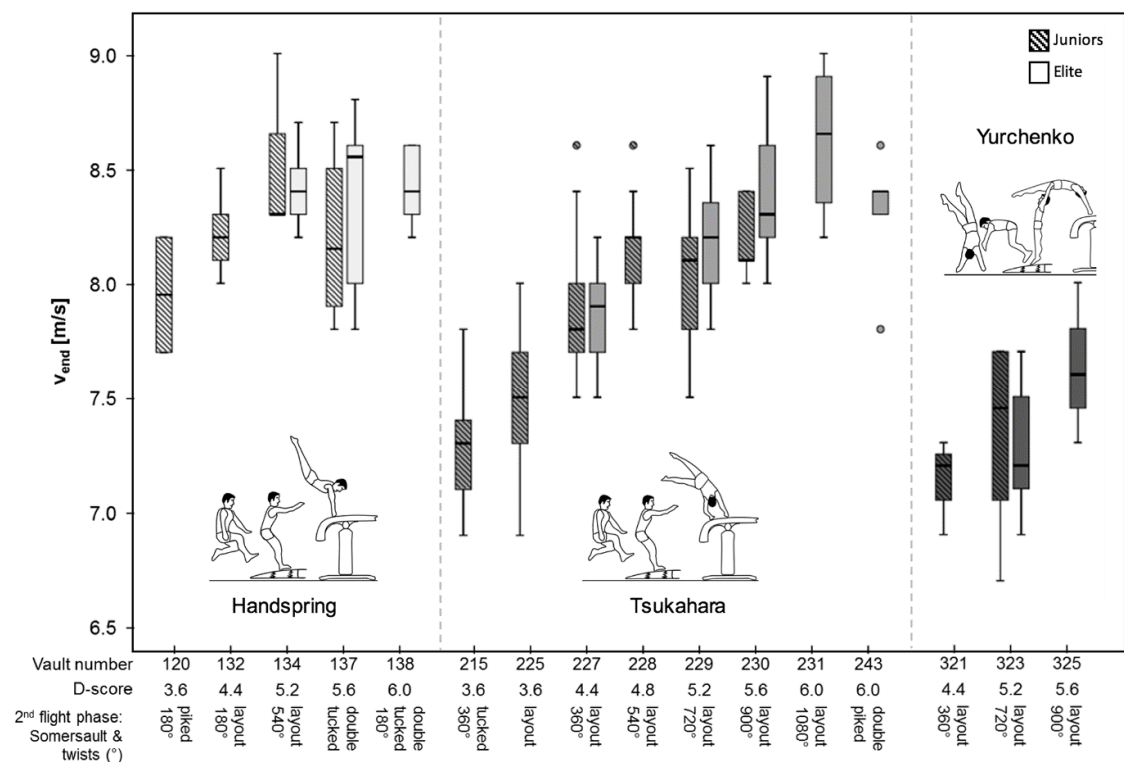
Category	n	$v_{\text{end}} \pm \text{SD}$	$h_{\text{max}} \pm \text{SD}$	$L \pm \text{SD}$	$\text{D-score} \pm \text{SD}$	$\text{E-score} \pm \text{SD}$	$\text{F-score} \pm \text{SD}$
Handspring M	23	$8.45 \pm 0.28^{**}$	$2.87 \pm 0.16^{**}$	$2.53 \pm 0.32$	$5.57 \pm 0.38^{**}$	$8.98 \pm 0.38^*$	$14.51 \pm 0.58^{***}$
Handspring MJ	25	$8.20 \pm 0.33$	$2.74 \pm 0.11$	$2.51 \pm 0.46$	$4.74 \pm 0.97$	$8.77 \pm 0.49$	$13.50 \pm 0.96$
Tsukahara M	63	$8.19 \pm 0.32^{***}$	$2.68 \pm 0.14$	$2.56 \pm 0.39^{***}$	$5.26 \pm 0.53^{***}$	$8.86 \pm 0.36$	$14.06 \pm 0.75^{***}$
Tsukahara MJ	108	$7.88 \pm 0.35$	$2.56 \pm 0.15$	$2.31 \pm 0.46$	$4.58 \pm 0.64$	$8.82 \pm 0.32$	$13.37 \pm 0.75$
Yurchenko M	16	$7.41 \pm 0.34$	$2.72 \pm 0.12^{**}$	$2.13 \pm 0.36$	$5.35 \pm 0.44^{***}$	$9.02 \pm 0.23$	$14.33 \pm 0.45^{***}$
Yurchenko MJ	13	$7.31 \pm 0.33$	$2.58 \pm 0.12$	$1.91 \pm 0.44$	$4.92 \pm 0.38$	$8.83 \pm 0.33$	$13.69 \pm 0.49$

Mean values, standard deviation and statistical difference (Mann-Whitney-U-Test) between male elite and junior athletes of the run-up speed, height and length of flight and D-, E- and F-score on vault (n = number of participants;  $v_{\text{end}}$  = run-up speed at the last step before the jump onto the springboard;  $h_{\text{max}}$  = maximal height of flight; L = length of flight; D-score = Difficulty score; E-score = Execution score; F-score = Final score; M = Male elite athletes; MJ = Male junior athletes; \*: M is different from MJ ( $p < 0.05$ ); \*\*: M is different from MJ ( $p < 0.01$ ); \*\*\*: M is different from MJ ( $p < 0.001$ )).

Boxplots of the run-up speed (separated into elite and junior categories) show the variation of  $v_{\text{end}}$  for the different vaults (Figs 3 and 4). Elite and junior gymnasts performing identical vaults did so with a similar  $v_{\text{end}}$  (all  $p > 0.05$ ).



**Fig 3.** Females' optimal run-up speed. Boxplots of the run-up speed ( $v_{end}$ ) of elite and junior female athletes separated into the different vault styles (handspring, Tsukahara, Yurchenko) and vaults (vault numbers) performed during the qualification of the 2016 European Championships in Men's and Women's Artistic Gymnastics.



**Fig 4.** Males' optimal run-up speed. Boxplots of the run-up speed ( $v_{end}$ ) of elite and junior male athletes separated into the different vault styles (handspring, Tsukahara, Yurchenko) and vaults (vault numbers) performed during the qualification of the 2016 European Championships in Men's and Women's Artistic Gymnastics.

For male and female elite and junior athletes,  $v_{\text{end}}$  correlated better with the D-score than with E- and F-Scores and better with  $h_{\text{max}}$  than with L (Table 3). Differences in  $v_{\text{end}}$  explained 64% (females) and 42% (males) of the variation in D-scores for females and males, respectively, whereas  $h_{\text{max}}$  explained 56% and 47% (males) of variation, respectively.

**Table 3.** Correlations.

$v_{\text{end}}$	n	D-score	E-score	F-score	$h_{\text{max}}$	L
Handspring F	28	0.80**	0.60**	0.74**	0.75*	0.00
Tsukahara F	25	0.72**	0.73**	0.79**	0.63**	0.58**
Yurchenko F	62	0.39**	0.15	0.31*	0.30*	0.22
Handspring FJ	32	0.65**	0.35*	0.57**	0.70**	0.08
Tsukahara FJ	35	0.53**	0.29	0.38*	0.58**	0.48**
Yurchenko FJ	64	0.48**	0.33**	0.46**	0.44**	0.29*
Handspring M	23	0.14	0.13	0.17	0.33	0.05
Tsukahara M	63	0.60**	0.43**	0.64**	0.69**	0.51**
Yurchenko M	16	0.65**	0.03	0.51*	0.46	0.54*
Handspring MJ	25	0.31	0.00	0.33	0.39	0.24
Tsukahara MJ	108	0.60**	0.19*	0.50**	0.57**	0.65**
Yurchenko MJ	13	0.27	0.15	0.37	0.00	0.61*

Correlation coefficients (Spearman's Rho) between run-up speed D-, E- and F-score as well as height and length of flight of male and female elite and junior athletes on vault (D-score = Difficulty score; E-score = Execution score; F-score = Final score;  $v_{\text{end}}$  = run-up speed at the last step before the jump onto the springboard;  $h_{\text{max}}$  = maximal height of flight; L = length of flight; F = Female elite athletes; FJ = Female junior athletes; M = Male elite athletes; MJ = Male junior athletes; \*: Significance at  $p < 0.05$ ; \*\*: Significance at  $p < 0.01$ ).

## Discussion

This is the first study to investigate the relationships between run-up speed and competition scores as well as height and length of flight on vault with a large cohort of international world-class athletes in artistic gymnastics. The long-held assumption of a strong relationship between run-up speed and the D-score on vault was confirmed in female gymnasts but appeared to be only conditionally true for males. Furthermore, run-up speed, height and length of flight were compared for the first time among males, females, juniors and elites within a very large sample during a high-level international competition.

## Correlations

In general, vault run-up speed and D-, E- and F-scores correlated stronger in females than in males. Up to 64% (females) and 42% (males) of variation in D-score ( $R^2$ ) could be explained by  $v_{\text{end}}$ . Consequently, a high run-up speed is a potentially stronger limiting factor of competition performance for female than for male gymnasts. Furthermore, since women may have less relative explosive power in the upper body [18] female gymnasts may need to generate a higher percentage of their final (in-flight) kinetic energy during the run-up. In contrast, male gymnasts seem to have a wider margin of error in adapting their run-up speed with respect to their maximum running speed and may be better able to augment kinetic energy at the jump and push-off due to superior explosive power in the upper body. For both male and female gymnasts, however, the question remains as to whether a higher run-up speed could further improve their performance or if a higher run-up speed would interfere with the push-off generated from the upper body.

In junior categories, the relationship between run-up speed and the other measured parameters tended to be lower than for the elite categories. The largest difference was observed for the correlation between run-up speed and E-scores. For mostly subjective reasons, the E-score given by the judges is influenced by the run-up speed and the height of the second flight phase [19]. Further, the E-score depends on the execution of twists and somersaults during flight and the quality of landing. Landing quality is influenced by the height of the center of mass above the landing mat at the first floor contact [20], a factor which benefits from a greater height of flight. Thus, when aiming for a successful transition from the junior to the elite level on vault, it seems crucial to increase run-up speed in order to increase flight time and height of flight and consequently improve the execution of the landing.

## Male vs. female athletes

The results show that male athletes reach 8-9% higher run-up speeds performing handspring or Tsukahara vaults than do female gymnasts of the same age group. This seems to correspond a general gender difference in sprint speed, similar to that observed in track and field sprint athletes [21, 22]. Gender differences in sprint speed are of a biological origin. In particular, higher relative maximal strength and power result in better sprint speed of male athletes. Nevertheless, it must be taken into consideration that female gymnasts are in general smaller and lighter than male gymnasts. Thus, the total amount of energy that has to be generated is smaller for females than for males when performing the same vault. In contrast, female and male athletes reach similar speeds when performing Yurchenko vaults. This may imply that Yurchenko vaults only

require a certain minimum  $v_{\text{end}}$  and that this minimum seems to be the same for both genders. However, this also means that females must attain run-up speeds closer to their maximal sprinting speed (only 6% lower compared to handspring or Tsukahara; males: - 10%) in order to perform these vaults. It might therefore be assumed that women have to take greater risks when executing these technically demanding vaults.

Males reach significantly greater heights and lengths of flight performing all vault styles than females, even though they display a similar run-up speed performing Yurchenko vaults. This demonstrates that creating flight height does not only depend on the run-up speed [23], but also strongly depends on the ability to push-off explosively from the vaulting table. Thus, it is reasonable to assume that the greater explosive strength in the upper body accounts at least partly for this. In addition, male athletes' vault table is slightly higher (10 cm).

Comparing the F-scores between groups, there were only small differences between elite and junior females but much greater gaps between elite and junior males. In males, these differences are mostly due to the higher D-scores (of all vault styles) of the elite gymnasts. In contrast, elite females only achieve higher D- and E-scores than juniors when performing Yurchenko vaults.

To summarize differences between male and female athletes, male athletes have a greater ability to produce and use muscular force and are able to create more horizontal and/or vertical kinetic energy, which enables them to demonstrate vaults with greater degrees of difficulty. However, it is important to note that run-up speed accounts only partly for these differences.

### **Elite vs. junior athletes**

Comparing the run-up speeds of elite and junior gymnasts performing identical vaults revealed no statistical differences. Consequently, it can be concluded that the optimal run-up speed for each vault is independent of age.

In general, there were only small differences found between elite and junior females in terms of run-up speed, height and length of flight, for all vault styles. It has been previously described how growth and weight gain during puberty negatively influence the strength-to-weight ratio [24, 25]. Consequently, younger female gymnasts may have similar or even better physical prerequisites for a good performance on vault than more mature gymnasts. Only  $v_{\text{end}}$  and  $h_{\text{max}}$  of Yurchenko vaults were higher for female elite compared to female junior athletes. Therefore, we assume that not physical abilities but the technical skill level is the limiting factor of the run-up speed of these vaults [26]. Hence, a superior technique executing the round-off and back handspring probably permits elite female gymnasts to run up with a higher speed than junior

females, which in turn improves the height of flight of their vaults, allowing them to perform more difficult vaults.

Contrary to the findings in females, male elite athletes had significantly higher  $v_{\text{end}}$  and  $h_{\text{max}}$  than junior gymnasts except when performing Yurchenko vaults. The reason for this is most likely related to the different and later biological development of males. Namely, there is a considerable increase in muscle mass between the junior and elite ages, which positively influences power and strength in general and sprinting abilities in particular. Aside from better technical skills [27] the improved sprinting ability and greater strength and power of the upper extremities may help explain the greater flight height in elite compared to junior male athletes. When it comes to Yurchenko vaults, it seems that males are able to attain the optimal run-up speed for Yurchenko vaults already as juniors, and that further increases in flight height and difficulty at the elite level are attained via improvements in upper body strength and technical skill.

## **Vault styles**

### *Handspring vaults*

Of all vaulting styles, handspring vaults are generally executed with the greatest run-up speed. Consequently, only gymnasts who can realize fast run-up speeds performed handspring vaults at the EC.

Further, no significant correlations were found between the run-up speed of handspring vaults and either the height of flight, D-, E-, or F-score for males. Handspring vaults must be distinguished into double rotation and layout vaults with turns around longitudinal axis. For layout somersaults compared to double somersaults in tucked position, a higher angular momentum has to be created at take-off and push-off from the vaulting board and table due the body's greater moment of inertia in the layout position [7]. In this context, similar run-up speeds were observed for double rotation handspring vaults and layout handspring vaults with  $540^\circ$  or only  $180^\circ$  of rotation, although the latter are assigned lower D-scores. Based on this consideration, one could suppose that training a double rotation handspring vault is more beneficial in terms of increasing the D-score than training layout vaults, since the latter require the same run-up speed but afford lower D-scores.



### *Tsukahara vaults*

Tsukahara vaults are the most common vaults among males, but the least common in female gymnasts. Compared to the other vaulting styles, Tsukahara vaults showed the greatest difference in run-up speed between simple and very difficult vaults, indicating the greatest dependence on run-up speed for increasing vault difficulty. This should be taken into account by coaches and athletes when the aim is to learn a more difficult Tsukahara vault.

Across all groups and especially in female categories, the height of the second flight phase of Tsukahara vaults is lower than that of handspring or Yurchenko vaults. The asynchronous hand contact on the vaulting table during Tsukahara vaults allow less horizontal momentum to be transformed into vertical momentum and more horizontal momentum to be preserved [28], which may also explain the significant correlation between  $v_{\text{end}}$  and  $L$  in all categories. Further, the push-off from the vaulting table, because it occurs mainly with one arm, makes it difficult for athletes with less upper body strength to reach sufficient height of flight in order to perform a difficult vault. This could be the main reason that female athletes only rarely perform Tsukahara vaults.

### *Yurchenko vaults*

Most females but only a few male gymnasts performed a Yurchenko vault. Compared to the other vault styles, Yurchenko vaults are performed with the lowest run-up speed. One explanation for this is certainly the truncated run-up distance due to the round-off executed in front of the springboard. Moreover, to perform the round-off and back handspring with a high velocity requires strong mental coping strategies due to the fact that the athletes do not see the vaulting table until just before the moment of push-off. Thus, anxiety might be another limiting factor for a high run-up speed. In addition, there was no difference in run-up speed between male and female gymnasts performing Yurchenko vaults. Since the upper limbs have a limiting mechanical behavior of locomotion [29], the maximum speed executing a round-off in front of the springboard may be restrained to a similar level for male and female gymnasts.

In consideration of the fact that female athletes reached higher flight heights with Yurchenko vaults compared to other vaulting styles, it can be deduced that the round-off in front of the springboard helps them to generate more angular momentum and vertical velocity than with other vault styles, despite a lower run-up speed.

### *Limitations*

In order to draw definitive conclusions on the importance of a high sprint-speed potential for a fast run-up speed and to perform difficult vaults, not only the run-up speed on vault but also the maximal 25m-sprint speed of the gymnasts should be included to the evaluations in future studies. Further, we only verified the hypothesis of linear relationships between the run-up speed and the other measured parameters. Further research should aim to calculate non-linear models in particular for handspring and Yurchenko vaults in males. Moreover, future studies should pay more attention on the undisputed importance of the push-off from the vaulting table and the consecutive height of the second flight phase for the landing characteristics and for the scores. In this manner, the requirements of successful vaulting could be described even more detailed.

### **Conclusions**

For female athletes, it can be concluded that, within the measured range of speeds, the faster the run-up, the better (in terms of D-, E- and F-score). For males on the other hand, although a strong relationship exists between run-up speed and performance for Tsukahara vaults, a certain minimum run-up speed seems indispensable, but not necessarily more in order to perform the most difficult vaults. Nevertheless, this study confirmed that a high run-up speed is one of the most important determining factors to succeed on vault in women's and men's artistic gymnastics competition. Further, we show that there is an optimal range of run-up speeds for each vault. This knowledge is important for coaches and athletes when choosing a competition vault for each gymnast with regard to their physical and technical abilities. This may help to focus the training regime on developing physical qualities (strength, explosiveness, sprint technique) in order to reach the required run-up speed, if necessary. Finally, male athletes have physical advantages that permit them to perform more difficult vaults than women. At the same time, female gymnasts are especially good at using their potential energy during Yurchenko vaults due to their excellent technique and their mental capacity to cope with the backwards approach of the table despite near maximum speed.

### **Acknowledgments**

We thank the European Union of Gymnastics (UEG) to have enabled this study.

## References

1. Bučar Pajek M, Čuk I, Pajek J, Kovač M, Leskošek B. Is the Quality of Judging in Women Artistic Gymnastics Equivalent at Major Competitions of Different Levels? *Journal of Human Kinetics*. 2013;37:173-81. doi: 10.2478.
2. Atiković A, Smajlović N. Relation between Vault Difficulty Values and Biomechanical Parameters in Mens Artistic Gymnastics. *Science of Gymnastics Journal*. 2011;3(3):91 - 105.
3. FIG. *Code de Pointage MAG (2013-2016)*. Lausanne: FIG; 2013.
4. FIG. *Code de Pointage WAG (2013-2016)*. Lausanne: FIG; 2013.
5. Farana R, Vaverka F. The effect of biomechanical variables on the assessment of vaulting in top-level artistic female gymnasts in world cup competitions. *Acta Univ Palacki Olomuc Gymn*. 2012;42(2):49-57.
6. Farana R, Uchytíl J, Zahradník D, Jandačka D. Kinematic analysis of “Lou Yun” Vaults performed by top level male gymnast: Relationship between kinematic variables and judges’ score. *Acta Univ Palacki Olomuc Gymn*. 2013;43(1):17-25.
7. Knoll K. Aufbau und Erhalt des Drehimpulses bei Absprünge und Abdrücke in technisch-akrobatischen Sportarten. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft*. 2004;11(1):72-83.
8. Prassas S, Kwon YH, Sands WA. Biomechanical research in artistic gymnastics: A review. *Sports Biomechanics*. 2006;5(2):261-91.
9. Bruggemann GP. *Biomechanical and Biological Limits in Artistic Gymnastics*. In XXIIIrd International Symposium on Biomechanics in Sport, edited by: Wang, Q.; 2005; Beijing, China: 15-24.
10. Naundorf F, Brehmer S, Knoll K, Bronst A, Wagner R. *Development of the velocity for vault runs in artistic gymnastics for the last decade*. In Proceedings of the XXVI International Symposium on Biomechanics in Sports, edited by: Kwon, Y. -H., Shim, J., Shim, J. K. and Shin, I. S.; 2008; Seoul, Korea: 481-484.
11. Irwin G, Kerwin DG. The influence of the vaulting table on the handspring front somersault. *Sports Biomech*. 2009;8(2):114-28. Epub 2009/08/27. doi: 10.1080/14763140902745027. PubMed PMID: 19705763.
12. Čuk I, Ferkolj SM. Changes in Technique of Handspring Double Salto Forward Tucked Performed on Horse and Vaulting Table. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis*. 2008;13:20-31.

13. Brüggemann, G.-P. *Biomechanical analysis of selected vaults on the longhorse*. In Science in Gymnastics, edited by Terauds, J.; 1984; Del Mar: Academic Publishers: 9-24.
14. UEG. *Results 32nd European Men's Artistic Gymnastics Championships - Bern/SUI 2016* [cited 2017 01/03]. Available from: <http://www.ueg.org/en/event/results.html?id=123>.
15. UEG. *Results 31st European Women's Artistic Gymnastics Championships - Bern/SUI 2016* [cited 2017 01/03]. Available from: <http://www.ueg.org/en/event/results.html?id=124>.
16. Hopkins WG. Measures of reliability in sports medicine and science. *Sports Medicine*. 2000;30:1-15.
17. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Second Edition ed. New York, USA: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.
18. Lange B, Halkin AS, Bury T. Exigences Physiologiques nécessaires a la Pratique de la Gymnastique de Haut Niveau. *Rev Med Liege*. 2005;60(12):939-45.
19. Bruggemann GP, Nissenen MA. Kinematics of the handspring vault. *Leistungssport*. 1981;11:537-47.
20. Marinšek M. Landing Characteristics in Men's Floor Exercise on European Championships 2004. *Science of Gymnastics Journal*. 2009;1(1):31-9.
21. Cheuvront SN, Carter R, Keith C, DeRuisseau KC, Moffatt RJ. Running Performance Differences between Men and Women. An Update. *Sports Med*. 2005;35(12):1017-24.
22. Thibault V, Guillaume M, Berthelot G, El Helou N, Schaal K, Quinquis L, et al. Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983. *Journal of Sports Science and Medicine*. 2010;9:214-223.
23. Sands WA, Smith SL. A Comparative Case Study of Roche Vaults performed by elite male gymnasts. *Technique*. 2004;8:6-9.
24. Erceg T, Delaš Kalinski S, Milić M. The score differences between elite European junior and senior female gymnasts. *Kinesiology*. 2014;46(1):88-94.
25. Claessens AL, Lefevre J, Beunen GP, Malina RM. Maturity-associated variation in the body size and proportions of elite female gymnasts 14-17 years of age. *Eur J Pediatr*. 2006;165(3):186-92. Epub 2005/12/14. doi: 10.1007/s00431-005-0017-8. PubMed PMID: 16344993.
26. Hedbávny P, Kalichová M. Optimization of velocity characteristics of the yurchenko vault. *Science of Gymnastics Journal*. 2015;7(1):37-49.

27. Takei Y, Blucker E, Dunn J, Myers S, Fortney V. A three dimensional analysis of the men's compulsory vault performed at the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics*. 1996;12:237-57.
28. Knoll K, Naundorf F, Bronst A, Wagner R, Brehmer S, Lehmann T,. *3 Decades of force measurement on vault in gymnastics*. Proceedings of the 32nd International Conference of Biomechanics in Sports, edited by Sato, K., Sands, W.A., Mizuguchi, S.; 2014; Johnson City, USA.
29. Glasheen JW, McMahon TA. Arms are different from legs: mechanics and energetics of human hand-running. *J Appl Physiol*. 1995;78(4):1280-7. Epub 1995/04/01. doi: 10.1152/jappl.1995.78.4.1280. PubMed PMID: 7615434.

## 4 Originalartikel 2

### Simple Assessment of Height and Length of Flight in Complex Gymnastic Skills: Validity and Reliability of a Two-Dimensional Video Analysis Method

Christoph Schärer <sup>1,2,\*</sup>, Luca von Siebenthal <sup>1</sup>, Ishbel Lomax <sup>1</sup>, Micah Gross <sup>1</sup>, Wolfgang Taube <sup>2</sup> and Klaus Hübner <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Elite Sport, Swiss Federal Institute of Sport (SFISM), 2532 Magglingen, Switzerland; lvsiebenthal@gmail.com (L.S.); ishbel.lomax@gmail.com (IL); micah.gross@baspo.admin.ch (M.G.); huebner@baspo.admin.ch (K.H.)

<sup>2</sup>Department of Neuroscience and Movement Science, University of Fribourg, 1700 Fribourg, Switzerland; wolfgang.taube@unifr.ch

\*Correspondence: christoph.schaerer@baspo.admin.ch; Tel.: +41 58 467 65 04 (C.S.)

**Keywords:** two-dimensional video analysis; validity; reliability; quantitative biomechanical parameters; artistic gymnastics

**Citation:** Schärer, C.; von Siebenthal, L.; Lomax, I.; Gross, M.; Taube, W.; Hübner, K. (2019). Simple Assessment of Height and Length of Flight in Complex Gymnastic Skills: Validity and Reliability of a Two-Dimensional Video Analysis Method. *Appl. Sci.*, 9, 3975. <https://doi.org/10.3390/app9193975>

## Abstract

In artistic gymnastics, the possibility of using 2D video analysis to measure the peak height ( $h_{\text{peak}}$ ) and length of flight (L) during routine training in order to monitor the execution and development of difficult elements is intriguing. However, the validity and reliability of such measurements remain unclear. Therefore, in this study, the  $h_{\text{peak}}$  and L of 38 vaults, performed by top-level gymnasts, were assessed by 2D and 3D analysis in order to evaluate criterion validity and both intrarater and interrater reliability of the 2D method. Validity calculations showed higher accuracy for  $h_{\text{peak}}$  ( $\pm 95\%$  LoA:  $\pm 3.6\%$  of average peak height) than for L ( $\pm 95\%$  LoA:  $\pm 7.6\%$  of average length). Minor random errors, but no systematic errors, were observed in the examination of intrarater reliability ( $h_{\text{peak}}$ : CV% = 0.44%,  $p = 0.81$ ; L: CV% = 0.87%,  $p = 0.14$ ) and interrater reliability ( $h_{\text{peak}}$ : CV% = 0.51%,  $p = 0.55$ ; L: CV% = 0.72%,  $p = 0.44$ ). In conclusion, the validity and reliability of the 2D method are deemed sufficient (particularly for  $h_{\text{peak}}$ , but with some limitations for L) to justify its use in routine training of the vault. Due to its simplicity and low cost, this method could be an attractive monitoring tool for gymnastics coaches.

## Introduction

Video analysis is common in elite sports and covers different areas of application. In individual sports, especially acrobatic sports, video analysis is used to compare and improve complex skills [1]. For quantifying biomechanical aspects of such skills, such as score-relevant kinematic variables of vaults in artistic gymnastics, 3D motion capture (3D video analysis) is used. [2,3]. By means of video analyses, Brehmer and Naundorf [4] created reference values for kinematic parameters, indicating the safe execution of vaults. To make use of such reference values, measuring certain kinematic parameters in routine training becomes crucial, so that gymnasts' performances can be compared with the requirements of certain vaults. In regard to monitoring training progress, using video analysis during routine training is intriguing [2,3].

The gold standard for complex kinematic analyses is 3D motion capture, with which movements can be analyzed in sagittal, frontal, and transversal planes simultaneously [5]. However, precise 3D motion capture is associated with considerable financial, spatial, and temporal issues, and is therefore uncommon in routine training settings [6]. Two-dimensional video analysis (2D analysis), if sufficiently accurate, could offer a more practical alternative for measuring kinematics during training, especially since advancements in smartphone and tablet technology are continually making high-definition video capture and analysis more convenient. Aside from convenience while capturing motion, 2D video is faster, cheaper, and requires less prior knowledge compared to 3D analysis [1,7]. Nonetheless, although multiple studies showed moderate validity compared to 3D motion capture and high intrarater reliability of 2D analysis when examining joint angles during simple movements, such as single-leg squats and running [1,5–7], the validity and reliability of 2D video analysis for complex skills in acrobatic sports are unclear and must be scientifically assessed before this method can be recommended for gymnastics. The validity and reliability of 2D analysis were deemed sufficient for measuring the flight time and height of vertical jumps, when compared to optical measurement systems (Opto Jump, Microgate, I) [9] or to a force plate [8]. Further, 2D analysis was deemed valid ( $ICC = 0.8$ ) and reliable ( $ICC > 0.85$ ) for measuring joint angles during the more complex skill of baseball pitching, as long as the camera was placed properly [1], so the possibility of it being useful in gymnastics seems worthy of investigation.

In summary, the studies mentioned above offer justification for using simple, time-saving, and cost-effective 2D analysis for simple lower-extremity movements based on good validity and reliability compared to gold-standard methods. However, in contrast to movements in previous studies, artistic gymnastics involve highly complex movements that are performed with high



accelerations and velocities. Therefore, the aim of this study was to investigate criterion validity (comparison of 2D to 3D analysis) and both intrarater (test-retest) and interrater (equivalence of two assessors) reliability of 2D video analysis for the peak height ( $h_{\text{peak}}$ ) and length of flight (L) of vaults in artistic gymnastics.

## Materials and Methods

Twenty-two junior and international elite gymnasts (female:  $n = 5$ ; male:  $n = 17$ ) volunteered to participate in the study. All subjects gave written informed consent before participating in the study. All study procedures were approved by the ethics committee Bern (17.01.2017; Project-ID: 2016-01970) and conducted in accordance with the current version of the Declaration of Helsinki, the ICH-GCP, ISO EN 14155, and all national legal and regulatory requirements.

In total, 38 vaults were used for assessment. These included vaults from the three most important vault categories (handspring, Tsukahara, and Yurchenko) and comprised a variety of different sagittal plane rotations (tuck/double tuck, pike/double pike, and layout), which were combined with up to three turns around the longitudinal axis. These vaults were simultaneously recorded with conventional 2D video and a 3D motion capture system (Vicon Motion System, Denver, CO, USA) and analyzed to determine  $h_{\text{peak}}$  and L in the second flight phase.

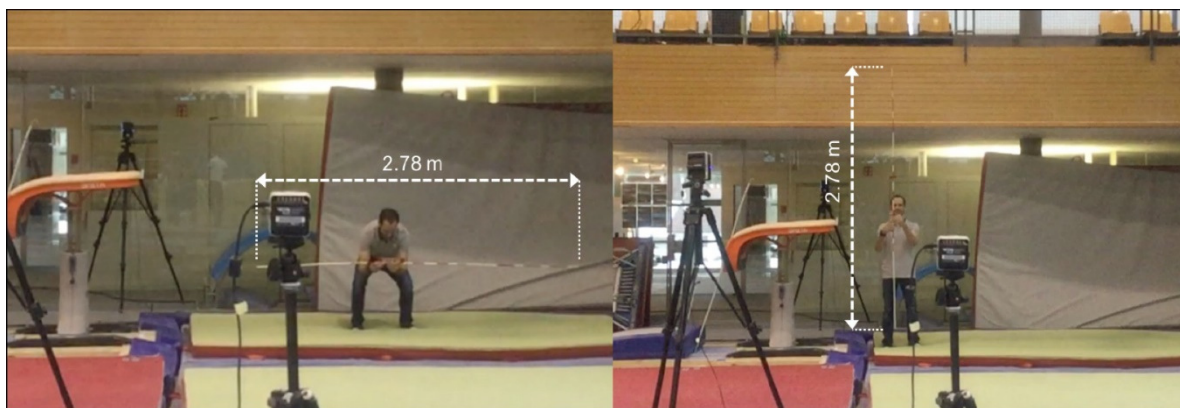
For 2D analysis, vaults were filmed using an iPad (iPad Pro 9.7", Apple Corporation, Cupertino, USA) at 100 frames/s. The lens of the iPad was placed at a height of 1.55 m and at a distance of 10 m from the vaulting table, so that the take-off, first and second flight phases, and landing were all visible. The height and width of the image were calibrated within the analytical software (Dartfish SA, Fribourg, CH) by using a rod of known length (2.78 m) that was held vertically and horizontally along the landing zone (Figure 1). With the Dartfish software,  $h_{\text{peak}}$  was measured as the vertical distance between the landing mat and the gymnast's center of gravity at its highest point during the second flight phase of the vault. For this, the gymnast's center of gravity was estimated visually in the video frame at which the maximal height was deemed to have occurred. L was determined as the horizontal distance between the ankle at the foot's first contact with the mat upon landing and the end of the vaulting table (Figure 2). The software then automatically calculated  $h_{\text{peak}}$  and L by using the reference height and length.

For the 3D analysis, all vaults were captured by 14 Vicon Vantage Cameras (Vicon Motion System, Denver, CO, USA) that were arranged in two planes: eight cameras were placed at a height of 5.50 m and six were placed at a height of 1.70 m (Figure 3) above ground level. Forty-three reflective markers were placed on the gymnasts' bodies, according to the Vicon Plug-in

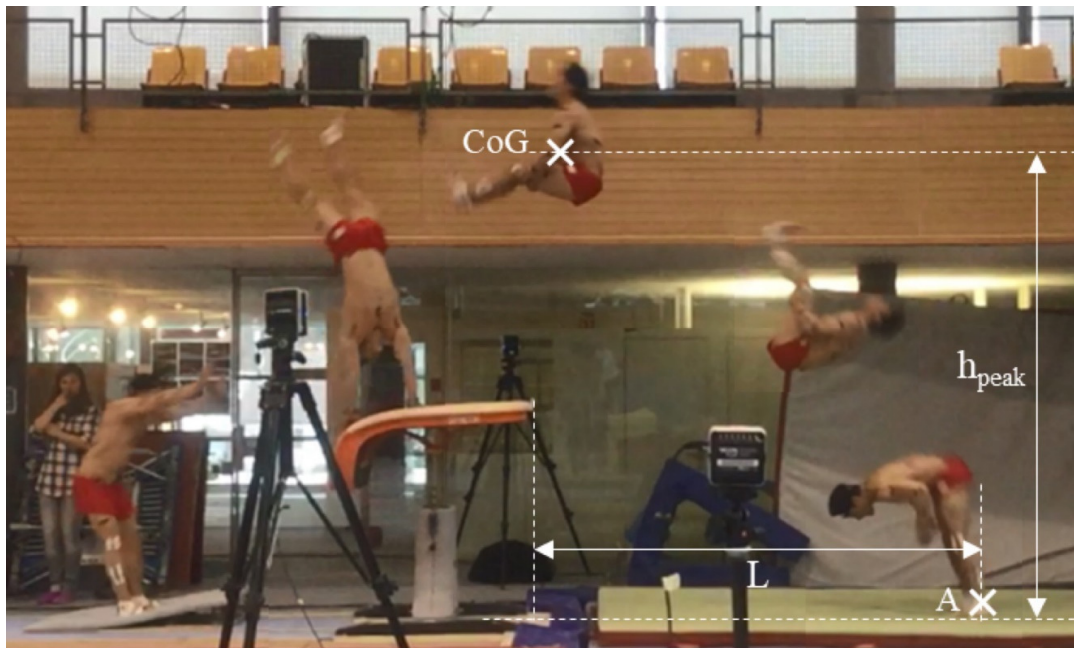
Gait model [10] (Figure 4). For capturing and, afterward, determining  $h_{\text{peak}}$  and  $L$ , Vicon Nexus, version 2.6, Vicon Motion System, Denver, CO, USA) software was used.

The 2D videos were analyzed by a first-time assessor and an experienced assessor. The first-time assessor was only briefly introduced to the relevant functions of the software (reference measurements) and the important aspects of the measurement of  $h_{\text{peak}}$  and  $L$  (e.g., determination of the center of gravity at the maximum height of flight) before evaluating the trials.

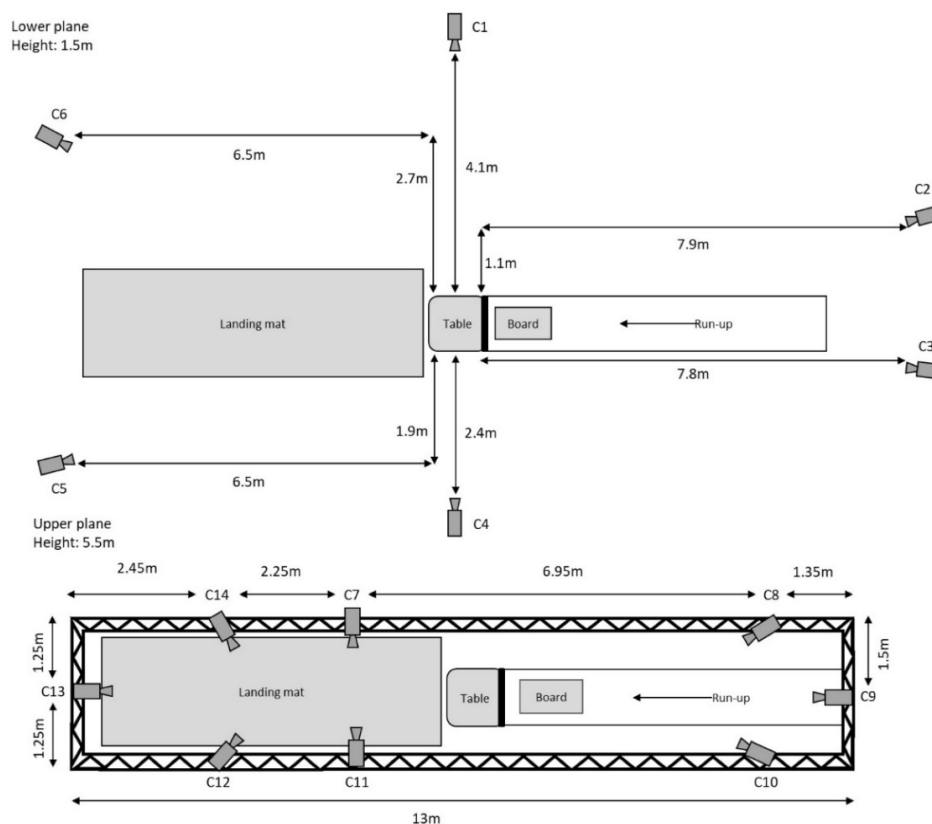
The parameters determined by the first-time assessor ( $2D_1$ ) were compared to those obtained by 3D analysis to assess criterion validity of 2D analysis ( $2D_1$  vs. 3D). Further, the parameters were determined with Dartfish (Dartfish SA, Fribourg, CH) by the same assessor at two different points in time (first measurement:  $2D_1$ ; second measurement:  $2D_2$ ) and by an experienced assessor ( $2D_e$ ) to verify intrarater ( $2D_1$  vs.  $2D_2$ ) and interrater reliability ( $2D_1$  vs.  $2D_e$ ).



**Figure 1.** 2D calibration: calibration of measuring range by definition of reference height and width with the calibration rod (2.78 m) in the 2D-video software Dartfish (Dartfish SA, Fribourg, CH).



**Figure 2.** 2D measurements: determination of peak height ( $h_{\text{peak}}$ ) and length of flight ( $L$ ) for a “Yeo” Vault (CoG: position of center of gravity at the highest point of the second flight phase; A: position of the ankle at first foot contact).



**Figure 3.** Placement of 3D cameras: positioning of the 14 Vicon Vantage Cameras (C1–C14) in an upper and lower plane for three-dimensional recording of vaults.



**Figure 4.** Plug-in Gait model: positioning of 43 markers for 3D analysis, attached to the athlete according to Vicon Plug-in Gait model [10].

Mean, standard deviation, Pearson's correlation coefficient ( $r$ ), random error (CV%), typical error (TE), and systematic error (t-test:  $p$ ) of  $h_{\text{peak}}$  and  $L$  measurements were calculated to determine criterion validity (3D vs. 2D<sub>1</sub>) and both intrarater (2D<sub>1</sub> vs. 2D<sub>2</sub>) and interrater reliability (2D<sub>1</sub> vs. 2D<sub>e</sub>), according to Hopkins et al. [11]. The comparison between the 3D and 2D<sub>1</sub> measurements (criterion validity) is displayed in a Bland–Altman diagram [12]. In order to determine the influence of lateral displacement at landing on the accuracy of the 2D measurements, the relationship between the difference in  $L$  (2D–3D measurement) and displacement along the  $x$  axis (to the left or right) was calculated. The level of statistical significance was set to  $p < 0.05$ . Data analysis was conducted using Microsoft Excel spreadsheets (Microsoft Excel 2016, Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA).

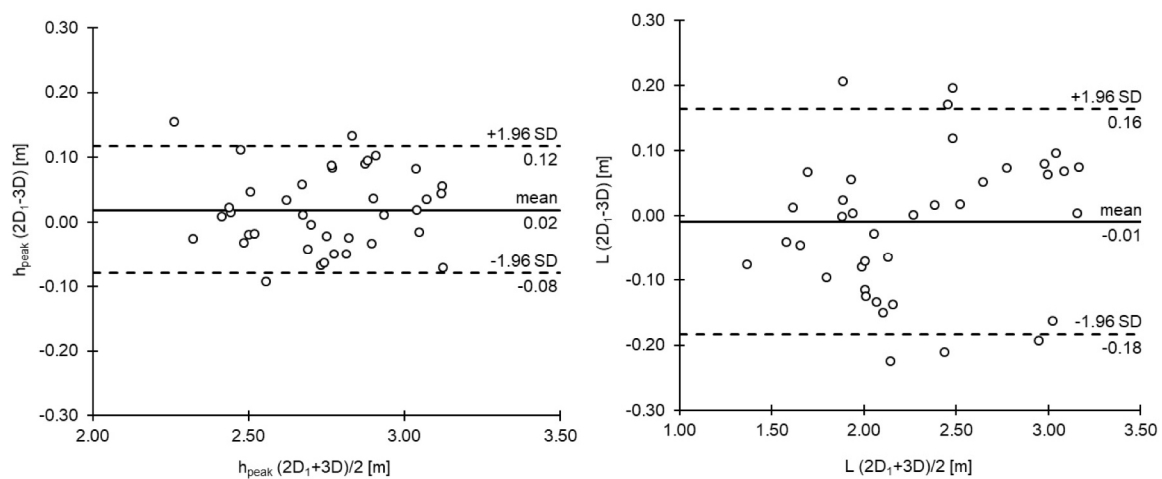
## Results

Two-dimensional analysis (2D<sub>1</sub>) showed small differences in mean compared to 3D analysis (Table 1). The  $\pm 95\%$  limits of agreement corresponded to measurement errors of  $\pm 3.6\%$  for  $h_{\text{peak}}$  and  $\pm 7.6\%$  for  $L$  (Figure 5). Regarding the validity and reliability of 2D analysis, high correlation coefficients and minor random errors for the  $h_{\text{peak}}$  and  $L$  of vaults were found (Table 2). In contrast, there was a tendency for a systematic error for  $h_{\text{peak}}$  with 2D compared to 3D analysis. Further, we found a significant correlation between the lateral displacement ( $x$  axis) at landing and the difference in  $L$  between 2D and 3D analysis ( $r = 0.58$ ;  $p < 0.01$ ). The ex post

facto power analysis revealed a power of  $\sim 1$  for all investigated correlations. The data of all measurements in this study can be found in the supplementary material (Table S1).

**Table 1.** Mean ( $\pm$  standard deviation) of peak height ( $h_{\text{peak}}$ ) and length of flight ( $L$ ) of all recorded vaults ( $n = 38$ ) for 3D (Vicon Motion System, Denver, USA) and 2D analyses (Dartfish SA, Fribourg, CH; 2D<sub>1</sub>: first-time assessor; 2D<sub>2</sub>: second measurement of first-time assessor; 2D<sub>e</sub>: expert assessor).

	$h_{\text{peak}} \pm \text{SD (m)}$	$L \pm \text{SD (m)}$
3D	$2.73 \pm 0.24$	$2.29 \pm 0.49$
2D <sub>1</sub>	$2.75 \pm 0.24$	$2.28 \pm 0.51$
2D <sub>2</sub>	$2.75 \pm 0.24$	$2.27 \pm 0.51$
2D <sub>e</sub>	$2.75 \pm 0.24$	$2.27 \pm 0.52$



**Figure 5.** Validity: Bland–Altman diagrams comparing 2D and 3D analyses of peak height ( $h_{\text{peak}}$ ) and length of flight ( $L$ ) of vaults ( $n = 38$ ). 2D<sub>1</sub>: two-dimensional video analysis with Dartfish SA of a first-time assessor); 3D: three-dimensional motion capture with Vicon Motion System).

**Table 2.** Random error (CV%), typical error (TE), correlation coefficient, and systematic error (p) of peak height ( $h_{\text{peak}}$ ) and length of flight (L) of vaults, when comparing first 2D video analysis (2D<sub>1</sub>) evaluations to 3D motion capture (validity) and to second 2D analysis (intrarater reliability), as well as second 2D video analysis (2D<sub>2</sub>) and expert 2D video analysis (2D<sub>e</sub>) (interrater reliability).

	$h_{\text{peak}}$				L			
	CV%	TE (cm)	r	p	CV%	TE (cm)	r	p
Validity	2.24	6.16	0.97	0.06	4.64	10.59	0.98	0.43
Intrarater reliability	0.44	1.21	0.99	0.81	0.87	1.98	0.99	0.14
Interrater reliability	0.51	1.40	0.99	0.55	0.72	1.63	0.99	0.44

## Discussion

This paper is the first to evaluate the validity and reliability of 2D video analysis of the  $h_{\text{peak}}$  and L of vaults in artistic gymnastics. Compared to 3D analysis (validity), 2D analysis showed smaller  $\pm 95\%$  limits of agreement for  $h_{\text{peak}}$  ( $\pm 3.6\%$ ) than for L ( $\pm 7.6\%$ ). Further, we found smaller random errors for  $h_{\text{peak}}$  (CV% = 2.24%) than for L (CV% = 4.64%). In contrast, there was a tendency toward a systematic error of  $h_{\text{peak}}$  (p = 0.06), but not for L (p = 0.43). Regarding reliability, the  $h_{\text{peak}}$  and L of vaults can be repeatedly (intrarater reliability:  $h_{\text{peak}}$ : CV% = 0.44%; r = 0.99; L: CV% = 0.87%; r > 0.99) and independently (interrater reliability:  $h_{\text{peak}}$ : CV% = 0.51%; r = 0.99; L: CV% = 0.72%; r > 0.99) determined by 2D analysis.

The results support 2D video analysis as a valid measurement tool—particularly for determining the  $h_{\text{peak}}$ , but slightly less so for the L, of vaults in gymnastics. Our findings are in line with those of Balsalobre-Fernandez, Tejero-Gonzalez, del Campo-Vecino, and Bavaresco [9], who have shown that 2D analysis is a valid technique for accurately measuring the flight height of vertical jumps. Thus, under the described measurement conditions, an increase of at least 6.16 cm in  $h_{\text{peak}}$  or of at least 10.59 cm in L, measured by 2D video analysis, can be considered a true performance increase.

Differences in the validity between the  $h_{\text{peak}}$  and L of vaults, as shown in the Bland–Altman diagram, may have several reasons. The most obvious is that 2D analysis measures the height and length of flight in the sagittal plane only. Accordingly, lateral displacement at the landing cannot be detected by 2D analysis and presents a possible confounding factor. This was shown by the significant relationship between lateral displacement upon landing and the difference between 2D and 3D determinations of L. This result supports research by Oyama, Sosa, Campbell, and Correa [1], who compared 2D to 3D analysis of joint angles during complex move-

ments. They found that 2D analysis is a valid measure only when cameras are placed perpendicular to the segment of interest. This limitation of 2D analysis was less important for the measurement of  $h_{\text{peak}}$ , because the lateral displacement is at its maximum at landing, long after the attainment of  $h_{\text{peak}}$ . Further, since  $L$  was determined as the distance between the vaulting table and the ankle, even straddled legs at landing may result in a lateral displacement and may lead to a measurement error of 2D analysis. In contrast,  $h_{\text{peak}}$  was measured vertically from the landing mat to the center of gravity. Therefore, the determination of  $h_{\text{peak}}$  did not depend on the position of one single extremity but on the highest point on the center of gravity's smooth trajectory.

Another reason for the less accurate measurement of  $L$  could be the quality of the 2D videos (resolution and frame rate). The still frame at landing was often slightly blurred due to the velocity of the recorded movement. Therefore, it was difficult in some cases to determine the position of the ankle precisely, and, for this reason, small measurement errors may have occurred. In contrast, the slightly blurred image did not affect the determination of the center of gravity for the measurement of  $h_{\text{peak}}$ , since the determination of the center of gravity depends on a global view of the body and not on a small single part of the body.

One more reason for the larger inaccuracy in the determination of  $L$  may be the slight bend in the calibration rod when it was held horizontally to scale the image width (Figure 1). This would have caused the reference length to be slightly too long, although this effect was too small to be apparent in our results (nonsignificant  $p$ -value).

In this study, we observed a tendency toward a systematic underestimation of  $h_{\text{peak}}$  with 2D analysis. Since the measurements of the experienced assessor were not statistically different from the values of the first-time assessor, it can be assumed that both assessors encountered the same basic problem that may have led to this tendency. In particular, it was difficult to determine the zero-point on the landing mat vertically underneath the highest point of the center of gravity during the second flight phase. We assume that this was the reason for the (almost significant) underestimation of  $h_{\text{peak}}$ . Nonetheless, considering the small measurement error when determining  $h_{\text{peak}}$ , 2D analysis may be considered a valid method. This knowledge is especially worthwhile since the height of flight dictates the potential to perform somersaults and twists during the second flight phase, and it is therefore an important performance-determining factor for vaults.

When comparing 2D analysis at two consecutive points in time, the variation coefficients of the  $h_{\text{peak}}$  and  $L$  of vaults were very low. For instance, the differences of 2D analysis were only

1.21 cm ( $h_{\text{peak}}$ ) and 1.98 cm (L), at a mean height of 2.75 m and a mean length of 2.28 m. These minor random errors are likely due to slightly different definitions of the zero-points (on the landing mat or at the end of the vaulting table), or of the gymnast's center of gravity ( $h_{\text{peak}}$ ) or ankle (L), rather than a different determination of the frame at which  $h_{\text{peak}}$  or L were determined. Therefore, the almost perfect correlation of the first and second 2D analysis and the low variation coefficient values demonstrate a very high intrarater reliability. Thus, 2D analysis using Dartfish (Dartfish SA, Fribourg, CH) is a reliable and reproducible measure for the  $h_{\text{peak}}$  and L of vaults. This result is in line with the findings of Maykut, Taylor-Haas, Paterno, DiCesare, and Ford (2015), who, among other things, examined intrarater reliability of 2D analyses of joint angles during running. They measured kinematic variables during running on a treadmill with the same video analytical software we used (Dartfish SA, Fribourg, CH), and they reported excellent intrarater reliability [7]. Other studies have also shown 2D analyses to be reliable for measuring joint angles [6] and flight height [9].

Lastly, we compared the values of  $h_{\text{peak}}$  and L evaluated by an experienced assessor with those evaluated by a first-time assessor. Our results show that the  $h_{\text{peak}}$  and L of vaults are similar, as the coefficients of variance are low and the correlations are high. In this context, it should be mentioned that a brief introduction to the measurement software and determination of center of gravity is sufficient but indispensable. Therefore, 2D analysis is a straightforward measurement tool, where values of an inexperienced assessor, for example, those evaluated by a coach, are comparable to those of an expert. Therefore, our results show good interrater reliability with 2D analysis.

When evaluating data-collection procedures, it is important to evaluate practicality and not only validity and reliability. As there are few studies regarding the validity and reliability of 2D analysis, comparisons are difficult. Nevertheless, our results are similar to the results reached by Brehmer and Naundorf [4], as well as Schurr, Marshall, Resch, and Saliba [5], in regard to validity. As such, 2D analysis seems to be a reasonable, inexpensive, and portable alternative to 3D motion capture analysis. Furthermore, 2D analysis is time efficient, as video analysis of the  $h_{\text{peak}}$  and L of complex skills only takes about one minute for practiced evaluators. Additionally, the equipment needed for 2D analysis (video camera, tripod, analytical software, and calibration rod) is normally readily available in an artistic-gymnastics facility, making the described method an easy and cost-effective analytical tool. Lastly, even first-time assessors can precisely determine the important parameters of complex skills if they are briefly introduced to the measurement method. Thus, 2D analysis is a useful analytical tool for practical use in training and for scientific research, as the financial, spatial, and temporal costs are minimal.



## Conclusions

This study evaluated the validity and reliability of 2D video analysis of the  $h_{\text{peak}}$  and L of vaults in artistic gymnastics. We conclude that 2D video analysis is a valid and reliable alternative to 3D motion capture, particularly for determining the  $h_{\text{peak}}$ , but slightly less so for the assessment of the L, of vaults. Thus, the ease of use and cost-effectiveness of 2D analysis, along with the results from this study, support the use of 2D analysis in routine training and scientific research.

**Author Contributions:** Conceptualization, C. S. and L. vS.; methodology, C. S. and L. vS.; formal analysis, C. S. and L. vS.; investigation, C. S., L. vS., and M. G.; data curation, C. S., L. vS., and M. G.; writing—original-draft preparation, C. S. and I. L.; writing—review and editing, K. H. and W. T; supervision, K. H. and W. T; project administration, C. S.

**Funding:** This research received no external funding.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

- Oyama, S.; Sosa, A.; Campbell, R.; Correa, A. Reliability and validity of quantitative video analysis of baseball pitching motion. *J. Appl. Biomech.* 2017, 33, 64-68.
- Farana, R.; Uchytíl, J.; Zahradník, D.; Jandacka, D. The "akopian" vault performed by elite male gymnasts: Which biomechanical variables are related to a judge's score? *Acta. Gymnica.* 2015, 45, 33-40.
- Farana, R.; Vaverka, F. The effect of biomechanical variables on the assessment of vaulting in top-level artistic female gymnasts in world cup competitions. *Acta. Univ. Palacki. Olomuc. Gymn.* 2012, 42, 49-57.
- Brehmer, S.; Naundorf, F. *Key parameters of the 2nd flight phase of the tsukahara with salto backward piked.* In proceedings of 32nd International Conference of Biomechanics in Sports, Johnson City, TN, USA, 2014.
- Schurr, S.A.; Marshall, A.N.; Resch, J.E.; Saliba, S.A. Two-dimensional video analysis is comparable to 3d motion capture in lower extremity movement assessment. *Int. J. Sports.Phys. Ther.* 2017, 12, 163-172.
- Gribble, P.; Hertel, J.; Denegar, C.; Buckley, W. Reliability and validity of a 2-d video digitizing system during a static and a dynamic task. *J. Sport Rehabil.* 2005, 14, 137-149.
- Maykut, J.N.; Taylor-Haas, J.A.; Paterno, M.V.; DiCesare, C.A.; Ford, K.R. Concurrent validity and reliability of 2d kinematic analysis of frontal plane motion during running. *Int. J. Sports Phys. Ther.* 2015, 10, 136-146.
- Balsalobre-Fernandez, C.; Glaister, M.; Lockey, R.A. The validity and reliability of an iphone app for measuring vertical jump performance. *J. Sports Sci.* 2015, 33, 1574-1579.
- Balsalobre-Fernandez, C.; Tejero-Gonzalez, C.M.; del Campo-Vecino, J.; Bavaresco, N. The concurrent validity and reliability of a low-cost, high-speed camera-based method for measuring the flight time of vertical jumps. *J. Strength Cond. Res.* 2014, 28, 528-533.
- Vicon. *Vicon plug-in gait product guide—foundation notes revision.* Vicon Motion Systems Ltd.: Oxford, UK, 2010.
- Hopkins, W.G.; Schabert, E.J.; Hawley, J.A. Reliability of power in physical performance tests. *Sports Med.* 2001, 31, 211-234.
- Bland, J.M.; Altman, D.G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986, 1, 307-310.

## 5 Originalartikel 3

### Physical determinants of vault performance and their age-related differences across male junior and elite top-level gymnasts

Christoph Schärer <sup>1,2\*</sup>, Nils Haller <sup>1</sup>, Wolfgang Taube <sup>2</sup>, Klaus Hübner <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Swiss Federal Institute of Sport Magglingen (SFISM), Department of Elite Sport, 2532 Magglingen, Switzerland

<sup>2</sup> University of Fribourg, Department of Neuroscience and Movement Science, 1700 Fribourg, Switzerland

\*Corresponding author: christoph.schaerer@baspo.admin.ch

Short title: Physical determinants of vault performance and their age-related differences of male gymnasts

**Citation:** Schärer, C., Haller, N., Taube, W., Hübner, K. (2019). Physical determinants of vault performance and their age-related differences across male junior and elite top-level gymnasts. *PLOS ONE* 14(12): e0225975. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225975>

## Abstract

In order to perform difficult vaults in artistic gymnastics, athletes have to achieve high run-up speeds within the limited run-up distance (25 m). However, the physical parameters that contribute to a high run-up speed and their age-related differences remain elusive.

Hence, the aim of this study was 1) to investigate interrelations between difficulty value (D-score) and run-up kinematics of Handspring/Tsukahara and Yurchenko vaults as well as lower body power (25m-sprint, explosive and reactive strength) and 2) to explore age-related differences of these parameters across junior and elite gymnasts performing Handspring/Tsukahara vaults.

For this purpose, the data (of the above mentioned parameters) of 47 top-level male elite and junior gymnasts aged 14.3 to 28.3 of performance testing, gathered over three years, were analysed.

We found that D-score of Handspring/Tsukahara ( $n = 33$ ) was strongly correlated with run-up speed ( $r = 0.79$ ;  $p < 0.01$ ). Further, 25m-sprint speed ( $r = 0.85$ ;  $p < 0.01$ ) was significantly associated with run-up speed of Handspring/Tsukahara-vaults. There were no significant relationships with the D-score of Yurchenko ( $n = 14$ ). Looking at the age-related differences of Handspring/Tsukahara, D-score increased significantly from junior to elite level (+ 11.6%;  $p < 0.01$ ). The comparison between consecutive age-groups revealed that the U19 group had higher run-up speeds, step lengths, body weights and heights than the U17 group, while the U21 group achieved significantly higher speeds (run-up, 25m-sprint) and explosive strength than the U19 group.

We concluded 1) that the optimization of important physical determinants may increase the potential to perform more difficult Handspring/Tsukahara vaults and 2) that first growth and maturation and later improvements of lower body power led to higher run-up speeds of Handspring/Tsukahara in the subsequent age-group. Therefore, based on performance testing of the lower limbs, training recommendations should be given specifically to the requirements of the competition vault.

## Introduction

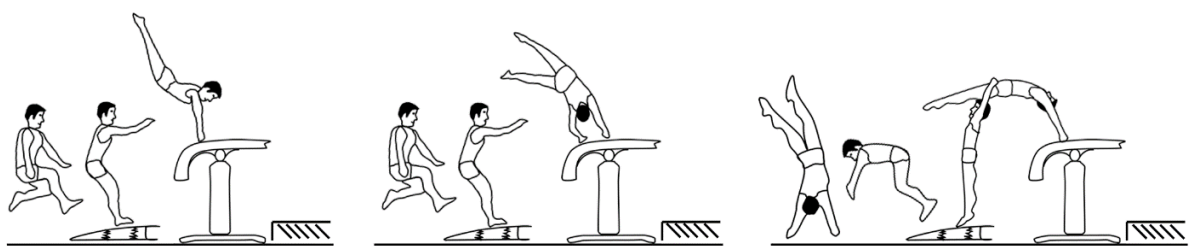
Artistic gymnastics has evolved rapidly since the introduction of the unlimited scoring system in 2006 [1]. On vault for example - improvements of spring characteristics of the vaulting table and spring board, as well as continuously increasing run-up speeds, have led to a large number of very difficult vaults performed at international competitions in the last decade [2].

Difficult vaults are assigned to a high difficulty score (D-score) in the official competition rules [3]. The vault D-score is determined, among other factors, by the number of turns around transversal and longitudinal axis during the second flight phase [4]. Since run-up speed is the most important phase of energy production [5], a high run-up speed is crucial to perform difficult vaults in competitions [4-6]. In this context it must be mentioned that the different vault styles Handspring, Tsukahara and Yurchenko (Fig 1) require different levels of run-up speed. Handspring and Tsukahara (Ha/Ts) style vaults are generally performed with higher run-up speeds than Yurchenko (Yu) style vaults [7]. Contrary to Ha/Ts vaults (forward take-off from vaulting board), for Yu vaults, the gymnasts perform a round-off in front of the vaulting board and backwards handspring on the vaulting table. On the one hand, these elements allow the athlete to generate the necessary angular momentum and vertical velocity for the second flight phase, but on the other hand they also restrain the run-up speed due to the limiting mechanical behavior of locomotion of the upper limbs [8]. Nevertheless, in order to perform a more difficult vault and thus to have a better chance to achieve a high final score, in general a greater run-up speed is required [7]. The vault run-up was previously described as a 20m-acceleration followed by 5 m of maintaining the speed in order to hit the vault board optimally and to be able to perform the planned vault [2]. Further, Veličković, Petković (9) found that top gymnasts have different velocity patterns during the vault run-up than less skilled gymnasts. Nevertheless, the vault run-up seems to be a highly standardized target-directed sprint [10], due to the limited run-up distance and the performance of a complex skill at the end of the run-up. However, to this day it is unclear to what extent step kinematics during the run-up are important to attain a high run-up speed and to perform a difficult vault. Further, the contribution of physical parameters, such as sprint speed, explosive strength (muscular power, rate of force development) and reactive strength (performance in a short (< 200 ms) stretch-shortening cycle) to a high run-up speed remain elusive. In general for linear short sprints in other sports (e.g. athletics, football), step kinematics and explosive and reactive strength are considered to be important in order to achieve a high sprint speed [11-13]. In artistic gymnastics, the importance of lower body power (sprint speed, explosive strength, reactive strength) for the performance on vault is generally recognised as essential [14] but remains mostly unexplored. In this context, Tashiro, Takata

(15) showed that 25m-sprint speed, run-up speed and scores on vault are significantly correlated. Further, Koperski, Kochanowicz (16) found that a take-off from the spring board is similar to a drop jump and additionally Bradshaw and Le Rossignol (17) showed that an effective use of the stretch-shortening-cycle during take-off from the vaulting board results in a better vaulting performance of 8 to 15 years old girls.

A complete overview of the physical parameters that determine run-up speed and therefore, the potential to perform difficult vaults, would help coaches to compile even more specific training programs for their athletes in order to succeed. Moreover, it is important to observe the development of the physical parameters, in order to optimize the training programs and the individual progress of each gymnast during his career.

Hence, the first aim of our study was to explore the physical determinants of vault performance and for this purpose to investigate how run-up kinematics on vault (maximal speed, step length and frequency, floor contact time) interrelate with the D-score and how maximal run-up speed on vault is correlated with lower body power (maximal 25m-sprint speed, 25m-sprint kinematics, explosive and reactive strength). The second purpose was to investigate age-related differences in physical determinants of vault performance across junior and elite top-level gymnasts. The analyses were done separately for the vault styles Ha/Ts and Yu (Fig. 1) as it might be assumed that the performance depends on different factors for these two categories of vaults [7].



**Fig 1.** Different vault-styles. The different first flight phases of the three most important vault styles in male's artistic gymnastics. Left: Handspring; middle: Tsukahara; right: Yurchenko [7].

## Material and methods

### Subjects

The data of 47 gymnasts of the male junior and elite national team ( $19.18 \pm 3.42$  years; age range: 14.3 to 28.3 years; height:  $166.69 \pm 5.51$  cm; weight:  $62.23 \pm 7.56$  kg) were included to the analysis. The Ethics Committee Bern approved the study (Project-ID: 2018-00742) and permitted the publication of the anonymized data for “further use without consent” according to paragraph 32 of the declaration of Helsinki and to Art. 34 of the Human Research Ordinance (HRO) of the Swiss Confederation. Gymnasts were not recruited specifically, but the performance testing procedures were an annual recurring part of the usual preparation of all members of the Swiss national gymnastics teams. Athletes were informed about the testing procedures before the different tests. The study was conducted in accordance with the current version of the Declaration of Helsinki, the ICH-GCP, ISO EN 14155, and all national legal and regulatory requirements. The individual in this manuscript has given written informed consent (as outlined in PLOS consent form) to publish these case details (Fig 2).

### Procedures

For the purpose of performance testing, maximal run-up speed, run-up kinematics and D-score on vault as well as lower body power (maximal 25m-sprint speed, 25m-sprint kinematics, explosive- and reactive strength) of the members of the male junior and elite national team were assessed during three consecutive years. The testing procedures were performed in accordance to the ‘Manual of Performance Testing for Swiss Olympic Medical Centers’ [18] in an early preparatory phase, in order to provide training recommendations for athletes and coaches. Within two consecutive days at the beginning of the week and after an individual warm-up, the athletes performed two competition vaults under training conditions (soft landing mat allowed), two maximal linear 25m-sprints as well as an explosive and reactive strength test. During vault run-up and 25m-sprint, maximal speed and step kinematics were assessed. Maximal speed ( $v_{\text{peak\_vault}}$ ;  $v_{\text{peak\_sprint}}$ ) was measured using a laser measurement system (LDM301a, Jenoptik, Rostock, Germany) placed 30 m away from the vaulting table (height: 1 m). For the calculation of maximum speed, the raw (100-Hz) laser position data were clustered into and averaged within consecutive 0.04-s bins, thus yielding a 25-Hz position-time signal. Step kinematics of vault run-ups and 25m-sprints were assessed with Opto Jump Next (Microgate, I) with a measuring frequency of 1000 Hz (Fig 2). Mean step frequency ( $SF_{\text{vault}}$ ;  $SF_{\text{sprint}}$ ), mean step length ( $SL_{\text{vault}}$ ;  $SL_{\text{sprint}}$ ) and mean ground contact time ( $t_{\text{cont\_vault}}$ ;

t\_cont\_sprint) of the last four steps of the vault run-up and 25m-sprint were included in the evaluations. Moreover, the D-score of the performed vaults were recorded. From these measurements only the vault with the better execution (judged by an expert) and the faster 25m-sprint were included for the analyses. If a gymnast was able to perform vaults from both vault styles (Ha/Ts and Yu) only the vault with the highest D-score and best execution was chosen for the evaluations. If a gymnast participated more than once at the performance testing, only the results of the test with the highest D-score was used for the calculations of the study. Explosive strength was determined executing three Countermovement jumps (CMJ), three Squat jumps (SJ) and three single leg Countermovement jumps (mean between left and right: SL-CMJ) and reactive strength was measured from two drop jumps (DJ) from a 20, 40 and 60 cm step onto a force plate (MLD Test Evo 2, SPSport, Innsbruck, Austria). The maximal value of the three CMJ, SJ and SL-SJ (relative peak power:  $P_{max\_rel}$ ; W/kg) and the maximal value of DJ's (reactive index: jump height / ground contact time; cm/10 s) were included in the calculations.



**Fig 2.** Experimental set-up. Measurement of maximal run-up speed (laser: LDM301a, Jenoptik, Rostock, Germany) and step kinematics (step frequency, step length, ground contact time) on vault (Opto Jump, Microgate, Italy). The individual in this figure has given written informed consent (as outlined in PLOS consent form) to publish these case details.



## Statistical Analysis

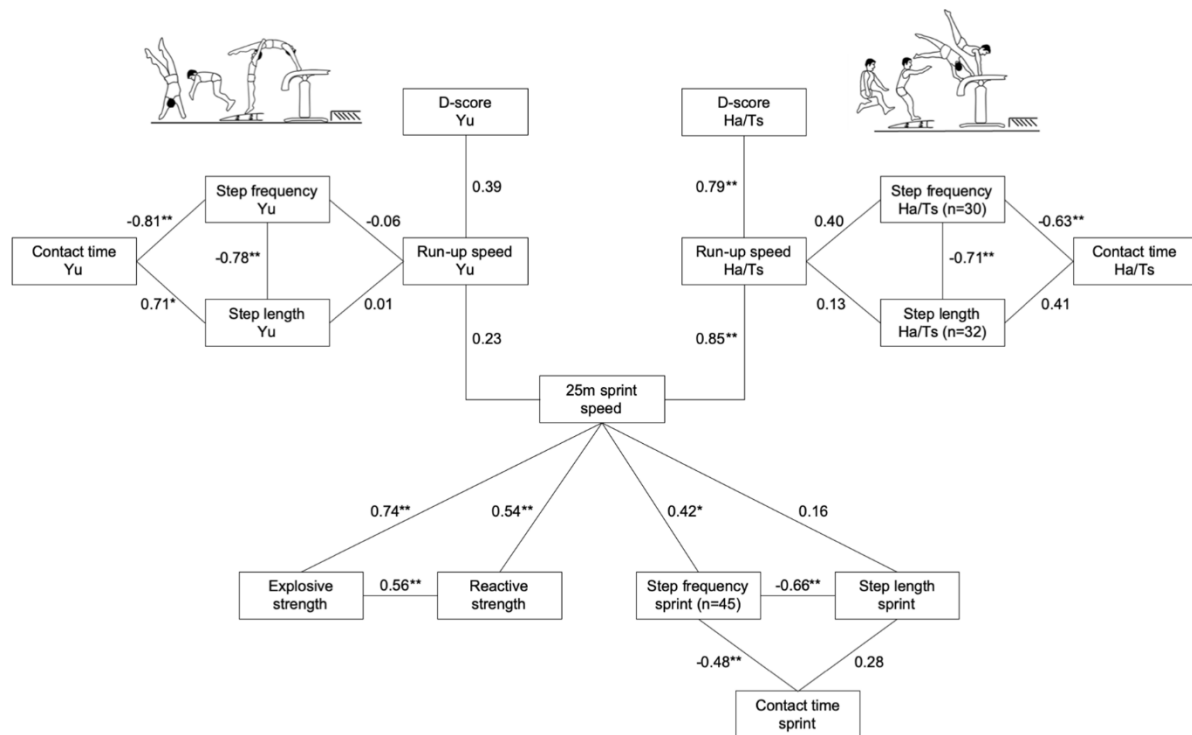
Descriptive statistics were performed summarized per vault style (Ha/Ts; Yu) and age-group (under (U) 17; U19; U21; >21 years). In order to calculate the physical determinants of D-score, the data was separated into Ha/Ts ( $n = 33$ ) and Yu style vaults ( $n = 14$ ). The relationships between the measured parameters were calculated using Spearman's Rho ( $r$ ) and explained variance ( $R^2$ ) and displayed in a deterministic model of D-score. Correlation coefficients were compared according to Eid et al. [19]. The model was created based on findings of previous studies that found 1) that D-score on vault is closely related with run-up velocity [7], 2) that maximal sprint speed represents the exploitable potential during run-up, 3) that (any) sprint speed is determined as the product of step length and step frequency [13] and 4) that lower body power is important in order to perform fast sprints over short distances [20]. Age-related differences of D-score, run-up speed, run-up kinematics and lower body power were calculated only for Ha/Ts vaults, due to the small number of athletes that performed Yu vaults. Kruskal Wallis test was used to calculate the differences across all age-groups and Mann-Whitney-U-Tests (post hoc) and effect sizes were calculated ( $r = Z/\sqrt{N}$ ) [21] (rated according to Cohen (22): small:  $\geq 0.1$ ; medium:  $\geq 0.3$ ; large:  $\geq 0.5$ ) to assess differences between consecutive age-groups. The level of statistical significance was set to  $p < 0.05$ . P-values were adjusted using the Holm-Bonferroni correction [23]. All calculations were performed using SPSS 22 software (SPSS, Inc., Chicago, IL).

## Results

Due to measurement errors, the step frequency of three vault run-ups (Ha/Ts) and two 25m-sprints as well as the step length of one run-up were excluded before the evaluations.

### Physical determinants of vault performance

The run-up speed of Ha/Ts and Yu explained 62% and 15% of the variance of D-score ( $R^2$ ), respectively. The variation of run-up speed was explained from 5% (Yu) to 72% (Ha/Ts) by the 25m-sprint speed. Further, explosive strength, reactive strength and step frequency explained 55%, 29% and 17% of the variation of sprint speed (Fig 3). Step frequency of Ha/Ts and 25m-sprint correlated slightly better (non-significant:  $p = 0.15$ ) with run-up speed and 25m sprint speed than step length.



**Fig 3.** Deterministic model of vault performance. Deterministic model (relationships = Spearman's Rho) of the D-score of male's Handspring/Tsukahara- (Ha/Ts) and Yurchenko-style vaults (Yu) (\*:  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p < 0.01$ ) (Yu:  $n = 14$ ; Ha/Ts:  $n = 33$ ; 25m-sprint kinematics, explosive and reactive strength:  $n = 47$ ).

There were no significant differences of lower body power (maximal 25m-sprint speed, 25m-sprint kinematics, explosive- and reactive strength) between gymnasts performing Ha/Ts and Yu, but significant differences between the run-up kinematics of these two different vault styles (Table 1).

**Table 1.** Differences between athletes performing Handspring/Tsukahara and Yurchenko.

	<b>Ha/Ts</b> (n = 33)	<b>Yu</b> (n = 14)
D-score [points]	4.67 ± 0.51	4.86 ± 0.52
v_peak_vault [m/s]	8.01 ± 0.39*** <sup>L</sup>	7.49 ± 0.18
SF_vault [Hz]	4.63 ± 1.02*** <sup>M</sup>	4.17 ± 0.42
SL_vault [m]	1.64 ± 0.27* <sup>M</sup>	1.83 ± 0.21
t_cont_vault [s]	0.12 ± 0.01* <sup>M</sup>	0.13 ± 0.03
v_peak_sprint [m/s]	8.19 ± 0.39	8.22 ± 0.39
SF_sprint [Hz]	4.41 ± 0.76	4.50 ± 0.22
SL_sprint [m]	1.73 ± 0.10	1.77 ± 0.08
t_cont_sprint [s]	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.01
CMJ (Pmax_rel) [W/kg]	60.85 ± 8.02	61.44 ± 6.27
SJ (Pmax_rel) [W/kg]	55.33 ± 6.13	56.29 ± 5.25
SL-CMJ (Pmax_rel) [W/kg]	37.14 ± 4.16	37.26 ± 4.83
DJ [cm/10·s]	22.75 ± 4.08	24.65 ± 3.15
Body weight [kg]	62.47 ± 7.89	61.66 ± 6.98
Height [m]	1.67 ± 0.06	1.67 ± 0.05
Age [y]	19.10 ± 3.59	19.36 ± 3.09

**Legend:** Mean values (± standard deviation) and significant differences (Mann-Whitney-U-Test) between athletes performing Handspring/Tsukahara (Ha/Ts) and Yurchenko (Yu) vaults of difficulty value (D-score), vault run-up and 25m-sprint kinematics (v\_peak: maximal speed, SL: mean step length of the last four steps; SF: step frequency of the last four steps; t\_cont: mean ground contact time of the last four steps) explosive strength (Countermovement- (CMJ), Squat- (SJ) and single leg Countermovement Jump: SL-CMJ), reactive strength (DJ) as well as anthropometric parameters (\*:  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p < 0.01$ ; \*\*\*:  $p < 0.001$ ; <sup>M</sup>: medium effect size:  $r > 0.3$ ; <sup>L</sup>: large effect size:  $r > 0.5$  in relation to Athletes performing Yurchenko vaults).

**Age-related differences across junior and elite level gymnasts**

Kruskal Wallis test showed significant differences across the different age categories for all measured parameters ( $p < 0.05$ ) except for step length, step frequency and contact time of vault run-up and 25m-sprint (range of p-value: 0.08 to 0.23).

Post-hoc analysis (Mann-Whitney-U) revealed a significant increase of the D-score (+ 11.6%;  $p < 0.01$ ), when considering the overall development (U17 vs. >21). Between consecutive age-groups the D-score rose in mean 4% ( $p > 0.05$ ).

In general, the best performance for most of the physical parameters was measured for the >21 age-group. The run-up speed was significantly higher with increasing age (U17 vs. U19; U19 vs. U21). Anthropometric parameters (body weight and height) were only significantly different between the U17 and U19 age-groups and lower body power (sprint speed, explosive strength) was only significantly higher in the U21 compared to U19 (Table 2).

**Table 2.** Age-related differences.

	<b>U17</b> <b>(n = 8)</b>	<b>U19</b> <b>(n = 11)</b>	<b>U21</b> <b>(n = 7)</b>	<b>&gt;21</b> <b>(n = 7)</b>
D-score [points]	4.40 ± 0.43	4.51 ± 0.44	4.86 ± 0.67	5.03 ± 0.21
v_peak_vault [m/s]	7.60 ± 0.38	7.94 ± 0.28 <sup>*M</sup>	8.27 ± 0.21 <sup>*L</sup>	8.31 ± 0.16
SF_vault [Hz]	4.64 ± 0.42	4.63 ± 0.26	4.81 ± 0.46	4.93 ± 0.29
SL_vault [m]	1.63 ± 0.11	1.71 ± 0.10 <sup>M</sup>	1.71 ± 0.11	1.69 ± 0.10
t_cont_vault [s]	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.01 <sup>M</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>M</sup>
v_peak_sprint [m/s]	7.94 ± 0.34	8.10 ± 0.25	8.31 ± 0.28 <sup>*L</sup>	8.47 ± 0.12 <sup>M</sup>
SF_sprint [Hz]	4.54 ± 0.24	4.50 ± 0.23	4.67 ± 0.32	4.68 ± 0.26
SL_sprint [m]	1.67 ± 0.08	1.76 ± 0.12 <sup>*L</sup>	1.74 ± 0.06	1.75 ± 0.09
t_cont_sprint [s]	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.01 <sup>M</sup>	0.11 ± 0.01 <sup>M</sup>
CMJ (Pmax_rel) [W/kg]	55.43 ± 7.82	58.73 ± 6.73 <sup>M</sup>	65.31 ± 6.39 <sup>*M</sup>	65.93 ± 7.38
SJ (Pmax_rel) [W/kg]	51.26 ± 6.53	53.70 ± 5.63	59.75 ± 4.84 <sup>M</sup>	58.14 ± 3.95
SL-CMJ (Pmax_rel) [W/kg]	33.77 ± 3.58	36.19 ± 3.04 <sup>M</sup>	39.91 ± 3.75 <sup>*M</sup>	39.72 ± 3.78
DJ [cm/10·s]	19.03 ± 3.90	22.11 ± 3.62 <sup>M</sup>	24.46 ± 2.24 <sup>M</sup>	26.31 ± 2.63 <sup>M</sup>
Body weight [kg]	51.69 ± 6.39	64.81 ± 4.37 <sup>***L</sup>	67.17 ± 6.11	66.41 ± 2.50
Height [m]	1.60 ± 0.05	1.69 ± 0.04 <sup>**L</sup>	1.68 ± 0.05	1.69 ± 0.04
Age [y]	16.39 ± 0.28	18.35 ± 0.58 <sup>***L</sup>	20.46 ± 0.93 <sup>***L</sup>	24.76 ± 1.93 <sup>***L</sup>

**Legend:** Mean values (± standard deviation) and significant differences (Mann-Whitney-U-Test) between age-groups of difficulty value of Handspring / Tsukahara vaults (D-score), vault run-up and 25m-sprint kinematics (v\_peak: maximal speed, SL: mean step length of the last four steps; SF: step frequency of the last four steps; t\_cont: mean ground contact time of the last four steps) explosive strength (Countermovement- (CMJ), Squat- (SJ) and single leg Countermovement Jump: SL-CMJ), reactive strength (DJ) as well as anthropometric parameters. (\*: p < 0.05; \*\*: p < 0.01; \*\*\*: p < 0.001; <sup>M</sup>: medium effect size: r > 0.3; <sup>L</sup>: large effect size: r > 0.5 in relation to previous age group).

## Discussion

This is the first study to calculate the physical determinants of D-score on vault separately for Ha/Ts and Yu-style vaults. Secondly, age-related differences of D-score, maximal run-up speed, run-up kinematics and lower body power (25m-sprint kinematics, explosive and reactive strength) were analyzed across male junior and elite top-level gymnasts performing Ha/Ts-style vaults.

The cross-sectional data in this study that was gathered over a period of three years, may influence the results. Therefore, interpretations for the longitudinal development of athletes' performance should be made carefully. However, our data show the actual performance level of different age-groups of a large cohort of top-level gymnasts. Therefore, the level of the different physical parameters at the different age-groups can be used as reference values to verify the longitudinal development of each athlete.

### Physical determinants of vault performance

The data revealed strong relationships between D-score of Ha/Ts vaults and run-up speed. Therefore, the importance of a high run-up speed to perform difficult Ha/Ts vaults could be confirmed. Further, the run-up speed of Ha/Ts was correlated significantly with 25m-sprint speed. Therefore, our results are in line with Tashiro, Takata (15) that also reported strong relationships between these three parameters ( $r > 0.72$ ). Hence, it may be assumed that general sprinting ability represents the exploitable speed potential for the vault run-up and therefore for the performance on vault. In addition, this corresponds with the findings of Gross, Büchler Greeley (24) that found similar relationships between the performance (jump height), approach speed and sprint performance of female pole vault athletes. These similarities may be surprising, but both, pole vaulting and the gymnastics vault are technically very demanding disciplines, where athletes have to hit a target at the end of a submaximal sprint and where the approach speed determines to a large extent the performance. However, an important difference between these two disciplines is the limited run-up distance (25m) of the gymnastics vault. Within the run-up distance gymnasts rely on a fixed run-up pattern in order to hit the vault board optimally [25]. Consequently, a higher step frequency may be the only possibility to increase the run-up velocity when performing more difficult vaults. This may be confirmed with the slightly higher (but not significantly different) correlation coefficient between step frequency and run-up speed compared to the relationship between step length and run-up speed. Interestingly, the step frequency of the 25m-sprint in this study was similarly related to the 25m-speed. Therefore, gymnasts seem to use a similar sprint pattern to achieve a high 25m-sprint speed as if running-up to

perform a vault. These findings are opposite to the results of Tashiro, Takata (15) that observed different running techniques during the run-up on vault and a 25m-sprint of elite gymnasts. In addition, our results are contrary to general findings concerning the kinematics of linear short sprints. In this context, sprint speed is determined as the product of step length and step frequency [13], but usually, step length is considered - in particular during acceleration - to be more important for better sprint performances than step frequency [26, 27]. As a result, coaches should compile training programs particularly to improve the step frequency in order to increase the run-up speed on vault.

Further, our results showed significant correlations between 25m-sprint speed and explosive- as well as reactive strength. Sprint speed strongly depends on the horizontal force impact generated during the short ground contact time. Hence, peak power of the lower limbs can be considered a determining factor of high speeds during short linear sprints [11]. Thus, our results are in line with other studies that found strong correlations between maximum sprint speed over a short distance and relative power output performing Countermovement Jumps, Squat Jumps and Drop Jumps [26, 28]. Hence, explosive and reactive strength may be important (indirect) determinants of run-up velocity of Ha/Ts vaults. Therefore, coaches should be aware that the optimization of these parameters may enhance the potential to perform more difficult Ha/Ts vaults.

In contrast to Ha/Ts, we found no significant relationships between the D-score and run-up kinematics neither between run-up speed and 25m-sprint speed of Yu vaults. Hence, limiting factors of performing a difficult Yu vault are probably rather high technical and mental requirements of the round-off in front of the springboard and the backwards handspring on the vaulting table [7] than physical parameters. Hence, run-up speed and step pattern may be adapted to the mental and technical level of the gymnast. Nevertheless, lower body power (25m-sprint speed and kinematics, explosive and reactive strength) of gymnasts performing Yu vaults was not significantly different from gymnasts performing Ha/Ts. This suggests that the choice to perform a Yu vault is not primarily made because a gymnast has less lower body power but rather in consideration of the technical and / or mental abilities of the gymnast. Furthermore, lower body power is not only important to perform difficult vaults. It is even considered a general basic precondition in gymnastics and in particular, for the successful performance on floor [29, 30].

At this point it must be said that the results of Yu may be somewhat influenced by the small number of gymnasts that participated in this study. Nonetheless, all the athletes were members

of the national team and therefore the results represent the current status of international and national top-level gymnasts.

### **Age-related differences across junior and elite level gymnasts**

Our results show a significant increase of D-score ( $> 0.6$  points) over all age-groups (from U17 to  $>21$ ) and a continuous (but non-significant) increase between all consecutive age-groups across junior and elite level. In order to illustrate this, it can be said that compared to the U17, 50% of the  $>21$  gymnasts performed a  $180^\circ$  and 50% a  $360^\circ$  turn more around the longitudinal axis within the somersault during the second flight phase, since an additional half turn is generally rewarded with  $+ 0.4$  points in the CoP [3]. This indicates that already younger gymnasts are able to perform quite difficult vaults and that improving the D-score on vault occurs slowly but steadily. Since the performance of the vault is equally dependent of the execution, it may be assumed that gymnasts invest a lot of time to improve the execution of a vault before they try to perform a more difficult vault.

The comparison between the U17 and U19 age-group showed significantly higher maximal run-up speed, step length of 25m-sprint, height and weight for the U19. It can be assumed that training, growth and maturation are major influencing factors that have led to the significant differences between these two age-groups. Increased height and consequently longer limbs of the gymnasts result in a larger step length, which in turn leads to an improvement of sprint speed [13, 31]. However, for gymnasts, changes in step length during vault run-up entails an adaptation of their usual standardized run-up pattern. Therefore, gymnasts may become unsettled performing their vault as they have to relearn hitting the vault board with the new step pattern. Since the step length remains similar across the subsequent age categories (U21,  $>21$ ), it might be assumed that gymnasts always retain the same step length after growth is completed. Therefore, the relearning and subsequent stabilization of the new run-up pattern during and after maturation seems to be crucial. In this case the only possibility to increase run-up speed is, as previously mentioned, to run-up with a higher step frequency.

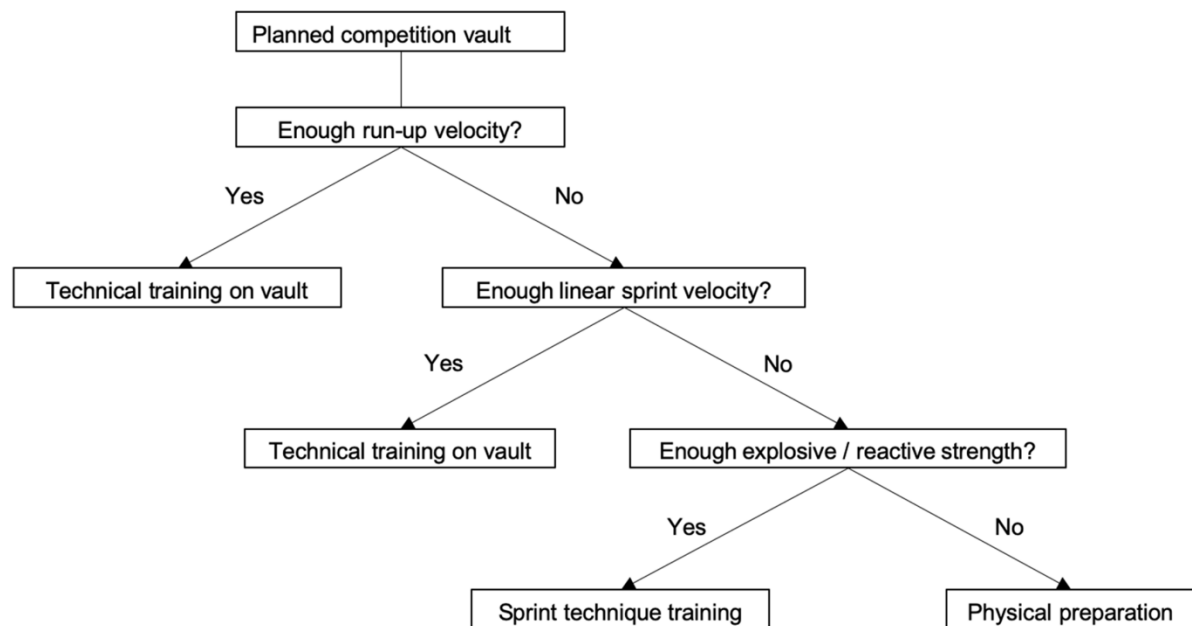
The U21 age-group showed significantly higher run-up speeds, 25m-sprint speeds and explosive strength than the U19 but similar height and weight. Previous studies have shown, that improvements of explosive strength are important to increase sprint speed over short distances [32]. Therefore, it is likely that the higher explosive strength of the U21 age-group enables these gymnasts to achieve a higher 25m-sprint and consequently to increase the potential to run-up with a higher speed performing Ha/Ts vaults.



Comparing the U21 and >21 age-groups, no significant differences could be found for any of the measured parameters. With regard to the similar run-up speed, this may indicate that a certain run-up speed is needed to achieve a certain D-score and that most gymnasts achieve this speed around the age of 21. Further, comparing the difference between run-up speed and 25m-sprint speed in the U21 age group and the >21, it is apparent that run-up speed for Ha/Ts of the U21 is only slightly lower than maximal 25m-sprint speed but there is a larger difference between run-up speed and 25m-sprint speed in the >21 age-group. Consequently, the younger athletes have to exploit almost their entire speed potential for their performance on vault. Running-up with an almost maximal speed may interfere with the execution of the vault and mistakes may happen more often. Therefore, the slightly higher (medium effect) 25m-sprint speed of the >21 age-group may enable the older gymnasts to run-up with a submaximal speed and this could contribute to a more consistent vault performance.

Finally, the >21 age-group achieved in general the highest values in most of the measured parameters. Therefore, it can be assumed that the major changes of lower body power and run-up speed occur up to the age of 21. This is contrary to the findings of Brehmer & Naundorf [33]. They observed a linear improvement of the run-up speed from 12 to 18 years of 0.2 m/s per year, but a stagnation from the age of 18.

Our results show the importance of run-up kinematics and lower body power for the vault performance. However, when training a new vault, coaches and athletes mainly focus on the enhancement of technical skills and often do not consider adequately the level of physical parameters that are required to reach sufficient run-up speed. In order to optimize the development of the vault performance and the individual physical training, it is important that physical parameters are regularly assessed in relation with the vault performance. From the performance testing, results detailed training recommendations should be derived on the basis of the decision tree displayed in Fig 4.



**Fig 4.** Flow-chart for training recommendations. Decision tree to derive training recommendations from a physical test battery of the lower body in consideration of the performance on vault.

## Conclusions

The results of this study revealed that the performance (D-score) of Ha/Ts (but not Yu vaults) strongly depends on a high run-up speed. In line with this, the run-up speed of Ha/Ts is closely related to 25m-sprint speed. Furthermore, to the ability to create a high step frequency may be an important factor to create high speeds within the limited run-up distance on vault. In addition, explosive and reactive strength are strongly correlated with the 25m-sprint speed. Consequently, an optimization of these determining physical parameters may contribute to a better vault performance.

When regarding the age-related differences of athletes performing Ha/Ts vaults, we found a slow but steady increase of D-score across all age-groups of junior and elite level. The high technical requirements of more difficult vaults and the concentration on improving the execution of already mastered vaults may be the reasons for the slow but steady progresses.

The major changes of the vault run-up speed occur up to the age of 21. In this context, we assumed that the significant differences of run-up speed between the U17 and U19 age-groups are mainly encompassed by the effects of growth and maturation and therefore by a greater step length during run-up. Whereas, the significant differences of run-up speed between the U19 and U21 age-groups may be attributed to the higher level of lower body power (25m-sprint speed and explosive strength) of the older gymnasts.

The gymnasts of the >21 age-group achieved the best performances of all age-groups in most of the measured parameters. The higher run-up speed and better lower body power of gymnasts may contribute to a more consistent vault performance.

Finally, a regular assessment of vault run-up kinematics and lower body power of elite gymnasts may enable coaches to observe the development of the athletes. Furthermore, the derivation of training recommendations from regular performance testing may contribute to the optimization and individualization of the training process.

## **Acknowledgements**

We would like to thank the athletes and coaches of the Swiss Artistic Gymnastics Team for the continuing trust in our scientific projects and to have enabled this study.

## References

1. Naundorf F, Brehmer S, Körner S, Seidel I. *Analyse aktueller Entwicklungstendenzen im Gerätturnen*. Wick J, Seidel I, Büsch D, editors. Leipzig: Meyer & Meyer Verlag; 2017. p. 129-141.
2. Naundorf F, Brehmer S, Knoll K, Bronst A, Wagner R. *Development of the velocity for vault runs in artistic gymnastics for the last decade*. In: Kwon Y, Shim J, Shim J, Shin I, editors. 26th ISBS Conference; Seoul 2008.
3. FIG. *Code of Points MAG (2017 - 2020)*. Lausanne: FIG; 2017.
4. Atiković A, Smajlović N. Relation between Vault Difficulty Values and Biomechanical Parameters in Mens Artistic Gymnastics. *Science of Gymnastics Journal*. 2011;3(3):91-105.
5. Krug J, Knoll K, Köthe T, Zocher H-D. *Running Approach Velocity and Energy Transformation in Difficult Vaults in Gymnastics*. In: Riehle H, Vieten M, editors. XVI International Symposium of Biomechanics in Sports; Konstanz: Universitätsverlag Konstanz.; 1998. p. 160-163.
6. Fujihara T. *Run-up Velocity in Gymnastics Vaulting*. In: Ae M, Enomoto Y, Fujii N, Takagi H, editors. 34th International Conference of Biomechanics in Sport; Tsukuba 2016. p. 593-596.
7. Schärer C, Lehmann T, Naundorf F, Taube W, Hübner K. The faster, the better? Relationships between run-up speed, the degree of difficulty (D-score), height and length of flight on vault in artistic gymnastics. *PLoS One*. 2019;14(3):e0213310. Epub 2019/03/08. doi: 10.1371/journal.pone.0213310. PubMed PMID: 30845256.
8. Glasheen JW, McMahon TA. Arms are different from legs: mechanics and energetics of human hand-running. *J Appl Physiol*. 1995;78(4):1280-1287. Epub 1995/04/01. doi: 10.1152/jappl.1995.78.4.1280. PubMed PMID: 7615434.
9. Veličković S, Petković D, Petković E. A Case Study about Differences in Characteristics of the Run-up Approach on the Vault between Top-Class and Middle-Class Gymnasts. *Science of Gymnastics Journal*. 2011;3(1):25-34.
10. Bradshaw EJ, Hume P, Calton M, Aisbett B. Reliability and variability of day-to-day vault training measures in artistic gymnastics. *Sports Biomech*. 2010;9(2):79-97. Epub 2010/09/03. doi: 10.1080/14763141.2010.488298. PubMed PMID: 20806844.
11. Debaere S, Jonkers I, Delecluse C. The contribution of step characteristics to sprint running performance in high-level male and female athletes. *J Strength Cond Res*.

- 2013;27(1):116-24. Epub 2012/03/08. doi: 10.1519/JSC.0b013e31825183ef. PubMed PMID: 22395270.
12. Delecluse C, Van Coppenolle H, Willems E, Van Leemputte M, Diels R, Goris M. Influence of high-resistance and high-velocity training on sprint performance. *Med Sci Sports Exerc.* 1995;27(8):1203-9. Epub 1995/08/01. PubMed PMID: 7476066.
  13. Meyers RW, Oliver JL, Hughes MG, Lloyd RS, Cronin JB. New Insights Into the Development of Maximal Sprint Speed in Male Youth. *Strength and Conditioning Journal.* 2017;39 (2):2-10.
  14. French DN, Gomez AL, Volek JS, Rubin MR, Ratamess NA, Sharman MJ, et al. Longitudinal Tracking of Muscular Power Changes of NCAA Division I Collegiate Women Gymnasts. *Journal of Strength and Conditioning Research.* 2004;18(1):101-107.
  15. Tashiro K, Takata Y, Harada M, Kano M, Yanagiya T. *Comparative Studies about Kinematics of Maximal Sprint Running and Running up in Horse Vaulting.* In: Kwon Y-H, Shim J, Shim JK, Shin I, editors. 26<sup>th</sup> International Conference of Biomechanics in Sports; Seoul 2008.
  16. Koperski A, Kochanowicz A, Słodkowski C. Gymnasts' Special Quickness-Force Abilities and the Indicators of Jump from a Springboard. *Baltic Journal of Health and Physical Activity.* 2010;2(2):139-142.
  17. Bradshaw EJ, Le Rossignol P. Anthropometric and biomechanical field measures of floor and vault ability in 8 to 14 year old talent-selected gymnasts. *Sports Biomech.* 2004;3(2):249-262. Epub 2004/11/24. doi: 10.1080/14763140408522844. PubMed PMID: 15552584.
  18. Maier T, Gross M, Trösch S, Steiner T, Müller B, Bourban P, et al. *Manual Leistungsdiagnostik.* Bern: Swiss Olympic Association; 2016. Available from: [https://www.swissolympic.ch/dam/jcr:b15b191a-eb0d-46e8-b9c0-417b887a440d/Leistungsdiagnostik\\_Manual\\_160201\\_DE.pdf](https://www.swissolympic.ch/dam/jcr:b15b191a-eb0d-46e8-b9c0-417b887a440d/Leistungsdiagnostik_Manual_160201_DE.pdf).
  19. Eid M, Gollwitzer M, Schmitt M. *Statistik und Forschungsmethoden.* Frank S, editor: Beltz Verlag, Weinheim; 2017.
  20. Comfort P, Stewart A, Bloom L, Clarkson B. Relationships between strength, sprint, and jump performance in well-trained youth soccer players. *J Strength Cond Res.* 2014;28(1):173-177. Epub 2013/04/02. doi: 10.1519/JSC.0b013e318291b8c7. PubMed PMID: 23542878.
  21. Fritz C, Morris P, Richler J. Effect Size Estimates: Current Use, Calculations, and Interpretation. *Journal of Experimental Psychology General.* 2012;141(1):2-18.

22. Cohen J. *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Second Edition ed. New York, USA: Lawrence Erlbaum Associates; 1988.
23. Holm S. A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*. 1979;6(2):65-70.
24. Gross M, Büchler Greeley N, Hübner K. Prioritizing Physical Determinants of International Elite Pole Vaulting Performance. *J Strength Cond Res*. 2019;34(1): 162-171. Epub 2019/01/29. doi: 10.1519/JSC.0000000000003053. PubMed PMID: 30688866.
25. Bradshaw EJ. Target-directed running in gymnastics: a preliminary exploration of vaulting. *Sports Biomech*. 2004;3(1):125-44. Epub 2004/04/15. doi: 10.1080/14763140408522834. PubMed PMID: 15079992.
26. Bissas AI, Havenetidis K. The use of various strength-power tests as predictors of sprint running performance. *J Sports Med Phys Fitness*. 2008;48(1):49-54. Epub 2008/01/24. PubMed PMID: 18212710.
27. Nagahara R, Naito H, Morin JB, Zushi K. Association of acceleration with spatiotemporal variables in maximal sprinting. *Int J Sports Med*. 2014;35(9):755-61. Epub 2014/03/01. doi: 10.1055/s-0033-1363252. PubMed PMID: 24577864.
28. Cronin JB, Hansen KT. Strength and power predictors of sports speed. *J Strength Cond Res*. 2005;19(2):349-357. Epub 2005/05/21. doi: 14323 [pii] 10.1519/14323.1. PubMed PMID: 15903374.
29. Marina M, Jemni M. Pliometric Training Performance in Elite-Oriented prepubertal female Gymnasts. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2014;28(4):1015-25.
30. Bradshaw E, Le Rossignol P. Anthropometric and Biomechanical Field Measures of Floor and Vault Ability in 8 to 14 year old Talent-selected Gymnasts. *Sports Biomechanics* 2004;3(2):249-262.
31. Monte A, Muollo V, Nardello F, Zamparo P. Sprint running: how changes in step frequency affect running mechanics and leg spring behaviour at maximal speed. *J Sports Sci*. 2017;35(4):339-345. Epub 2016/03/31. doi: 10.1080/02640414.2016.1164336. PubMed PMID: 27028346.
32. Lockie RG, Murphy AJ, Schultz AB, Knight TJ, Janse de Jonge XA. The effects of different speed training protocols on sprint acceleration kinematics and muscle strength and power in field sport athletes. *J Strength Cond Res*. 2012;26(6):1539-1550. Epub 2011/09/14. doi: 10.1519/JSC.0b013e318234e8a0. PubMed PMID: 21912294.
33. Brehmer S, Naundorf F. Age related development of run up velocity on vault. *Science of Gymnastics Journal*. 2011;3(3):19-27.

## 6 Originalartikel 4

### Specific Eccentric–Isokinetic Cluster Training Improves Static Strength Elements on Rings for Elite Gymnasts

Christoph Schärer <sup>1,2,\*</sup>, Lisa Tacchelli <sup>2</sup>, Beat Göpfert <sup>3</sup>, Micah Gross <sup>1</sup>, Fabian Lüthy <sup>1</sup>,

Wolfgang Taube <sup>2</sup> and Klaus Hübner <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Elite Sport, Swiss Federal Institute of Sport Magglingen (SFISM), 2532 Magglingen, BE, Switzerland; micah.gross@baspo.admin.ch (M.G.); fabian.luethy@baspo.admin.ch (F.L.); klaus.huebner@baspo.admin.ch (K.H.)

<sup>2</sup>Department of Neurosciences and Movement Sciences, University of Fribourg, 1700 Fribourg, Switzerland; lisa.tacchelli@bluewin.ch (L.T.); wolfgang.taube@unifr.ch (W.T.)

<sup>3</sup>Department Biomedical Engineering (DBE), University of Basel, 4123 Allschwil, BL, Switzerland; beat.goepfert@unibas.ch

\*Correspondence: christoph.schaerer@baspo.admin.ch; Tel.: +41-58-467-6504

**Keywords:** strength training; eccentric; isokinetic; upper limbs; artistic gymnastics; rings; males

**Citation:** Schärer, C., Tacchelli, L., Göpfert, B., Gross, M., Lüthy, F., Taube, W., Hübner, K. (2019). Specific Eccentric–Isokinetic Cluster Training Improves Static Strength Elements on Rings for Elite Gymnasts. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 4571. <https://doi.org/10.3390/ijerph16224571>

## Abstract

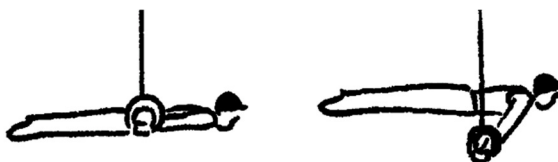
In gymnastics, coaches are constantly searching for efficient training methods in order to improve the athletes' performance. Therefore, in this study we aimed to investigate the effects of a novel, four-week, gymnastic-specific, eccentric–isokinetic (0.1 m/s) cluster training on a computer-controlled training device on the improvement of two static strength elements on rings (swallow and support scale). Nine elite male gymnasts participated in this study. Outcome parameters were maximum strength and strength endurance in maintaining the static position of both elements. After four weeks of training, specific maximum strength increased significantly (swallow: + 4.1%;  $d = 0.85$ ;  $p = 0.01$ ; support scale: + 3.6%;  $d = 2.47$ ;  $p = 0.0002$ ) and strength endurance tended to improve (swallow: + 104.8%;  $d = 0.60$ ;  $p = 0.07$ ; support scale: + 26.8%;  $d = 0.27$ ;  $p = 0.19$ ). Our results demonstrate that top athletes can considerably improve ring-specific strength and strength endurance in only four weeks. We assumed that the high specificity but also the unfamiliar stimulus of slow eccentric movements with very long times under maximal muscle tension led to these improvements. We suggest to use this type of training periodically and during phases in which the technical training load is low.



## Introduction

Elite athletes have to train in a very specific way in order to achieve optimal performance. In this context, the optimization of specific physical prerequisites, such as strength, power, or muscular endurance, is indispensable in many sports [1]. At the same time, athletes face the problem of overuse injuries due to the high overall volume of their sport-specific and preparatory (e.g., resistance) training. In gymnastics, where the acquisition of technical skills is the main aim of the training, very high training loads have been previously reported [2]. In this context, it was shown that top female gymnasts train up to 40 h per week and perform up to 400,000 elements (gymnastics skills that are assigned to a value in the code of points [3]) per year [2]. Together with the improvement of technique and the acquisition of more difficult skills, physical prerequisites must be developed simultaneously. Therefore, coaches and athletes are constantly looking for even more efficient preparatory exercises that allow the athletes to improve their sport-specific performance in a short period of time. For this reason, male artistic gymnastics coaches recently added specific eccentric exercises on rings (e.g., lowering from handstand to swallow on rings) to maximize the specific maximum strength.

Maintaining a static strength element on rings may be at least partly considered an eccentric muscle contraction due to the decelerating muscle work required in order to overcome gravity while maintaining the static positions. Consequently, the adjunct of ring-specific eccentric exercises in gymnastics may be useful. Further, a high level of relative maximum strength of the upper limbs and advanced balance skills in the hold positions are crucial to be able to perform these elements [4–6]. In order to perform a maximum number of strength elements in a competition routine (up to eight are allowed), a high level of specific strength endurance is required. Within the existing strength elements on rings in the code of points [3], the swallow and support scale are important hold elements in order to achieve a high difficulty score in competitions (Figure 1).



**Figure 1.** Swallow and support scale. Perfect execution of the swallow (left) and support scale (right) strength hold elements on rings, which must be maintained for 2 s according to the code of points [3].

Eccentric training is a highly efficient method for increasing maximum strength. In particular, it is a low-energy-cost method to overload the muscles [7] and may be advisable for sports with high loads and subtle coordination [8]. Eccentric exercises are generally executed with high loads that exceed the maximal concentric force of the muscles, resulting in a stretching of the muscle while it contracts [9]. The overload and the eccentric contraction provokes muscle damage and delayed onset muscle soreness [10], but results in longer-term improved maximal strength [11] and muscle coordination [8]. Furthermore, in order to develop the same force for a given external load [12], fewer motor units are recruited with eccentric compared to concentric contractions. As a result, eccentric exercises provoke a higher mechanical stress per motor unit than concentric training methods [13].

Despite the possible benefits of performing eccentric strength exercises on rings, these may pose a considerable injury risk. The rings are an unstable apparatus, and therefore gymnasts need to constantly control the position of the rings so that they do not lose their balance during the lowering of the body. Together with the high joint torque due to the acceleration of the eccentric movement under “isoinertial” (constant load) conditions [14], ring-specific eccentric exercises may provoke torque on the joints of the upper limbs that is hard to control without damaging the muscle tendon structures.

Coaches are convinced of the effectiveness of eccentric training for increasing the specific strength of hold elements on rings, but the applied methods and exercises on rings pose a risk of injury or may cause shoulder pain. Further, it is very difficult to control the load of these traditional isoinertial eccentric exercises. Therefore, we intended to implement a novel and effective strength training method for elite gymnasts to boost their specific strength for the swallow and support scale elements by means of a computer-controlled device. By using very slow isokinetic execution for an exercise in the supine position that involves similar muscle groups as when performing the swallow and support scale strength elements, we removed the two factors (instability of the rings and acceleration under isoinertial conditions) that are difficult to control in the traditional ring-specific eccentric training.

Hence, the aim of this study was to investigate the effects of a four-week training intervention with this specific eccentric–isokinetic training method on maximal strength and strength endurance for the swallow and support scale elements.

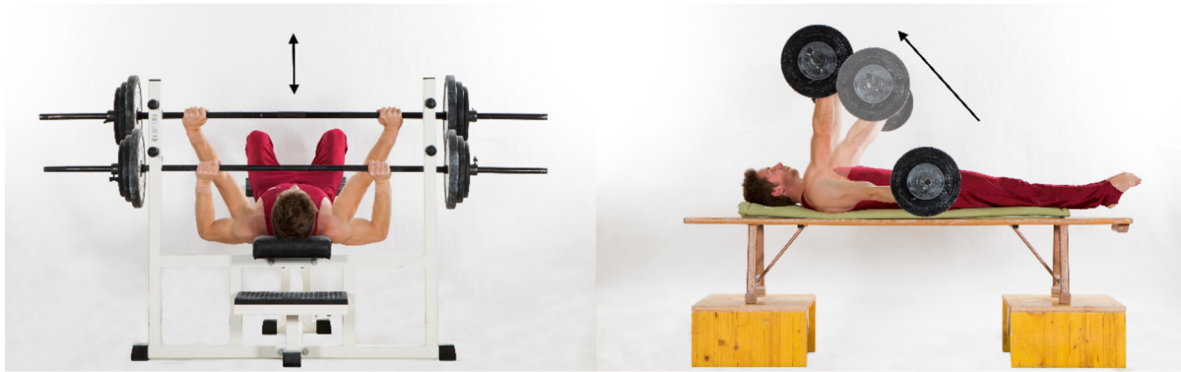
## Materials and Methods

### Subjects

Nine international or national top-level gymnasts (members of the national team) (age:  $21.47 \pm 1.96$  y; height:  $169.84 \pm 5.47$  cm; weight:  $69.4 \pm 7.0$  kg) volunteered to participate in this study. All athletes trained professionally (weekly training volume: 24 h) and were free of injury. They were informed of the benefits and risks of the investigation prior to signing an informed consent to participate in the study. The measurements were approved by the Ethics Committee of Bern (Project-ID: 2017-01891) and conducted in accordance with the current version of the Declaration of Helsinki, the guidelines for good clinical practice (ICH-GCP ISO EN 14,155), and all national legal and regulatory requirements.

### Procedures

The athletes completed a four-week training intervention, including two ring-specific eccentric–isokinetic training sessions per week. The tests and intervention took place in an early preparatory phase for competitions with rather low but similar training load for all of the participants. One week before (pre-test), as well as one (one-week post-test) and three weeks (three-week post-test) after the intervention, three specific maximal strength tests took place to test the acute and delayed effects (transformation to sport-specific performance) of the applied strength training [15]. In order to ensure recovery, the day before the tests the gymnasts only trained in the morning and had a half-day off in the afternoon. For each test, the gymnasts warmed-up individually (general gymnastics warm-up) and then first performed a one-repetition-maximum test (1RM) of the preconditioning strengthening exercises, namely the bench press and “swallow supine position”, according to Hübner and Schärer (Figure 2) [16]. Both exercises were executed in a supine position. For bench press, the barbell was lowered until it touched the gymnast’s chest and then pushed up until the arms were straight. The swallow supine position started with straight arms and the hands positioned on the bar one hand-width wider than the shoulders. Then, with fully extended arms, the barbell was lifted until arms were vertical (90 degrees), while maintaining contact between the bench and the back and head at all times. The starting weight was chosen individually by the gymnasts (approximately 90% of the 1RM) and increased by 2.5 kg after each successful attempt until the athletes failed to lift it. Athletes had a five-minute rest between attempts.



**Figure 2.** Preconditioning strengthening exercises. Execution of the one-repetition maximum test for the bench press (left) and swallow supine position (right) exercises.

Next, the maximum strength for the swallow and support scale exercises was assessed on the rings. For this, either a pulley-system with a counterweight (resistance less than body mass) or a weight belt (resistance greater than body mass) were used (Figure 3) to determine the maximal strength (body mass + additional weight from weight belt or counterweight) when maintaining the exercises for five seconds [6]. Finally, in order to assess changes in strength endurance at one-week and three-week post-test, athletes performed a maximal duration hold of both elements using the maximum load obtained (over 5 s) in the pre-test. For each hold, time measurement started when the stable hold position was reached during at least two subsequent video frames and stopped when the athlete departed from the hold position. After each tested exercise, the athletes had at least five minutes of recovery.



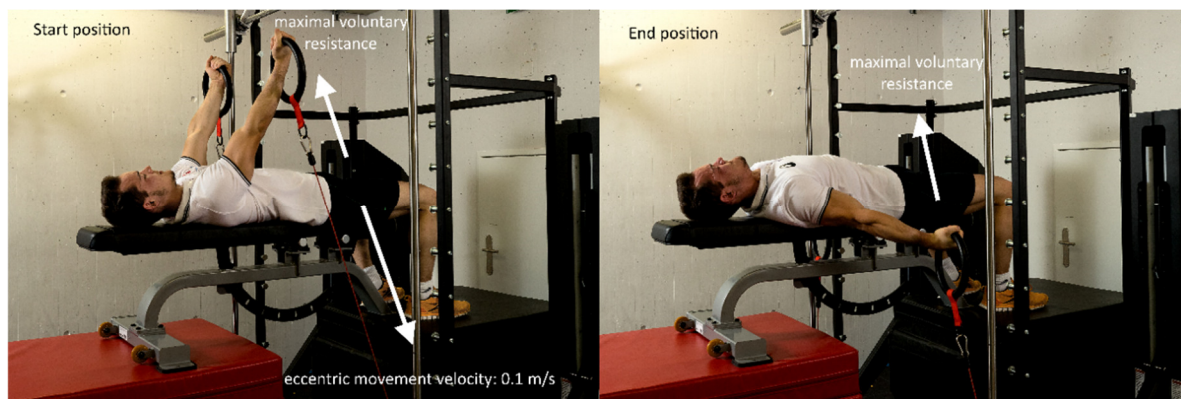
**Figure 3.** Test conditions for static exercises. The swallow (left) and support scale (right) exercises were performed with maximum resistance for five seconds. These examples show the use of additional weight (left) and the pulley and counterweight (right).

Trials were only valid if the angular deviation of the performed elements was smaller than  $45^\circ$ , in accordance with the requirements for recognition of strength elements in the international gymnastics federation's code of points [3].

In order to monitor the execution of the performed elements, trials were captured with nine 3D-cameras (Vicon Vantage, Vicon Motion Systems Ltd., Oxford, UK), operating at 120 Hz and placed around the rings in an upper (height: 4.6 m) and lower plane (height: 0.4–1.4 m). Forty-three reflective markers (14 mm diameter) were placed on the gymnasts' lower and upper limbs, according to the plug-in-gait model [17]. Angular deviations from the prescribed perfect hold positions were analyzed using modeled markers (ProCalc, Vicon Motion Systems Ltd., UK) midway between the two proximal wrist markers, the two shoulder markers, the two ankle markers, and the four hip markers, resulting in a two-dimensional stick figure, which displayed the relevant body angles. All trials that were included in the study met the abovementioned requirements for recognition (5 s holding time, angular deviations within the requirements). Further, the execution of both swallow and support scale elements was statistically similar (mean deviation of relevant body angles from the perfect position:  $8.56^\circ \pm 7.66^\circ$ ) across all tests (one-way ANOVA with repeated measures:  $p > 0.05$ ).

### **Eccentric–Isokinetic Training**

The four-week eccentric–isokinetic training was performed on a computer-controlled training device (1080 Quantum Syncro, 1080 Motion, Lidingö, Sweden). Despite the unfamiliar training setting, the intention was to create a training exercise that was as similar as possible to the execution of the swallow and support scale elements. To this end, gymnasts lay supine on a bench with arms outstretched holding a set of rings, which were fixed to synchronized cables. As seen in Figure 4, the start position was with a shoulder angle of  $50^\circ$ – $70^\circ$  (corresponding to that while performing the support scale) and the end position was at a shoulder angle of  $-15^\circ$  to  $-30^\circ$  (corresponding to the maximum range of motion while performing the swallow). During the execution of each eccentric–isokinetic contraction, the cables were reeled in synchronously with a constant velocity of 0.1 m/s, while athletes provided maximal voluntary resistance with fully extended arms. The very slow eccentric velocity of 0.1 m/s was chosen in order to simulate the muscle work while holding a strength element on rings (maximal and nearly isometric contraction with decelerating muscle work). Further, the mean duration of one repetition at the chosen velocity was  $4.81 \pm 1.18$  s, which corresponds to a typical holding duration for strength elements during training on rings. In order to limit rest between repetitions, athletes had to return to the starting position as fast as possible after each repetition.



**Figure 4.** Training exercise. Start (left) and end positions (right) of the eccentric–isokinetic training exercise for the swallow and support scale elements performed on the 1080 Quantum Syncro (1080 Motion, Lidingö, Sweden). The movement velocity of 0.1 m/s yielded a mean eccentric duration of ~5 s per repetition.

During the intervention, the number of sets and total repetitions per session varied from week to week, with an overall increase across the intervention (Table 1). Sets were separated by five minutes of recovery and were performed as 3–4 clusters of four repetitions each, where clusters were separated by brief rest periods of 20 s. The aim of the rest periods between clusters was to maximize the number of repetitions while maintaining the highest possible quality (applied maximum force) for each repetition [18]. In addition, the few repetitions per cluster would allow the athletes to maximize applied force throughout the set.

In order to ensure complete recovery between the training sessions, athletes did not perform strength elements on rings during the intervention. Further, to ensure a controlled and standardized training protocol, athletes were asked to avoid other maximum strength training exercises for the upper extremities from pre-test to three-week post-test. The technical training load aside from the intervention (24 h per week) was similar for all participating athletes.

**Table 1.** Eccentric–isokinetic training protocol. Sets, clusters, repetitions (reps), rest duration, and time under tension (mean duration per rep ~ 5 s) for the four-week eccentric–isokinetic training for the swallow and support scale elements.

Week	Trainings per Week	Sets–Clusters–Reps per Training (Rest Duration)	Time under Tension Per Training (Per Week)
1	2	2–4–4 (5 min–20 s–none)	~ 2 min 40 s (5 min 20 s)
2	2	3–3–4 (5 min–20 s–none)	~ 3 min (6 min)
3	2	2–3–4 (5 min–20 s–none)	~ 2 min (4 min)
4	2	3–4–4 (5 min–20 s–none)	~ 4 min (8 min)

Ten days before the first training session, athletes were familiarized with the training device and the eccentric–isokinetic exercise by performing one set with four clusters of four repetitions each. The familiarization session was intended to serve as practice in the correct execution of the exercise and in order to limit muscle soreness (common following unfamiliar eccentric exercise) during the four-week training intervention (repeated bout effect) [19,20].

### Statistical Analyses

Descriptive statistics were performed on all variables. Normal distribution of the data was confirmed with Shapiro–Wilk test. One-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to calculate overall effects. T-tests (post-hoc) and effect sizes (Cohen’s *d*) were used to assess changes between the three tests. Effect sizes were classified according to Cohen [21] as small (0.2 – 0.49), medium (0.5 – 0.79), or large ( $\geq 0.8$ ). The level of statistical significance was set to  $p < 0.05$ . P-values were adjusted using the Holm-Bonferroni correction [22]. All calculations were performed using SPSS 22 software (SPSS, Inc., Chicago, IL, USA).

### Results

Due to the absence of one athlete (training camp abroad), only eight athletes were present at three-weeks post-test. Further, three gymnasts did not perform the preconditioning bench press exercise in any of the tests, and one athlete did not perform the third 1RM swallow supine position test due to shoulder pain (only when performing this exercise) unrelated to investigated training intervention. Where an athlete did not perform an exercise at all three time points, the data from that exercise were excluded from analysis.

During the four weeks of training, body mass did not change significantly. One-way ANOVA of the preconditioning exercises revealed a strong tendency towards improvement for swallow supine position ( $d = 0.58$ ;  $p = 0.06$ ), but a smaller effect for bench press ( $d = 0.37$ ;  $p = 0.28$ ). Post-hoc tests showed tendencies (large effects) towards improvement for both exercises (Table 2).

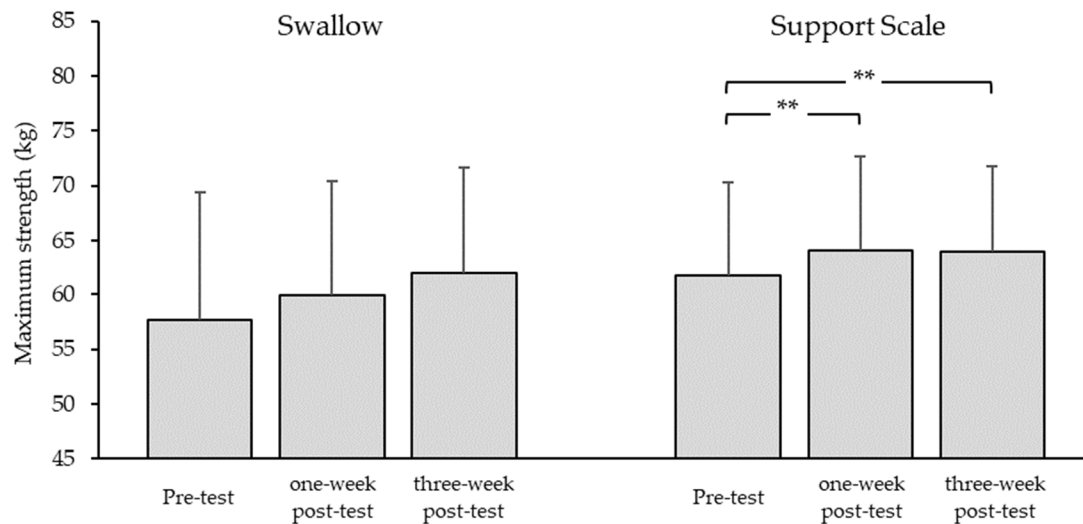
**Table 2.** Body mass and preconditioning exercises. Mean values  $\pm$  standard deviations (SD) of the body mass and the one-repetition-maximum (1RM) for the preconditioning exercises bench press and swallow supine position (swallow sup) before (Pre) and one and three weeks after (1-w-post and 3-w-post) the 4-week eccentric–isokinetic training, as well as effect sizes (Cohen’s  $d$ ) and significance of changes ( $p$ -values from  $t$ -tests).

	n	Mean $\pm$ SD (kg)	Pre vs. 1-w-Post $d$ (p)	Pre vs. 3-w-Post $d$ (p)	1-w Post vs. 3-w-Post $d$ (p)
Body mass					
Pre	8	68.6 $\pm$ 7.1			
1-w-post	8	68.5 $\pm$ 6.8	0.21 (0.58)	0.03 (0.93)	0.14 (0.70)
3-w-post	8	68.6 $\pm$ 7.3			
Bench press (1RM)					
Pre	5	105.0 $\pm$ 16.6			
1-w-post	5	106.5 $\pm$ 19.1	0.29 (0.55)	0.73 (0.36)	1.10 (0.21)
3-w-post	5	108.0 $\pm$ 18.5			
Swallow sup (1RM)					
Pre	7	43.9 $\pm$ 10.0			
1-w-post	7	45.7 $\pm$ 10.6	0.75 (0.23)	0.80 (0.23)	0.21 (0.60)
3-w-post	7	46.1 $\pm$ 10.7			

## Maximum Strength

One-way ANOVA showed large effects and significant improvements in maximum strength for swallow ( $d = 0.85$ ;  $p = 0.01$ ) and support scale ( $d = 2.47$ ;  $p = 0.0002$ ). Post-hoc tests ( $t$ -tests) revealed a tendency towards improvement of maximum strength for swallow (+ 4.1%) from pre-test to three-week post-test ( $d = 0.98$ ;  $p = 0.08$ ) and a medium effect size between pre-test and one-week post-test ( $d = 0.69$ ;  $p = 0.14$ ). Further, maximum strength for the support scale exercise increased significantly and with a large effect size from pre-test to one-week post-test (+ 3.6%;  $d = 1.76$ ;  $p = 0.06$ ), and from pre-test to three-week post-test ( $d = 1.50$ ;  $p = 0.08$ ; Figure 5).

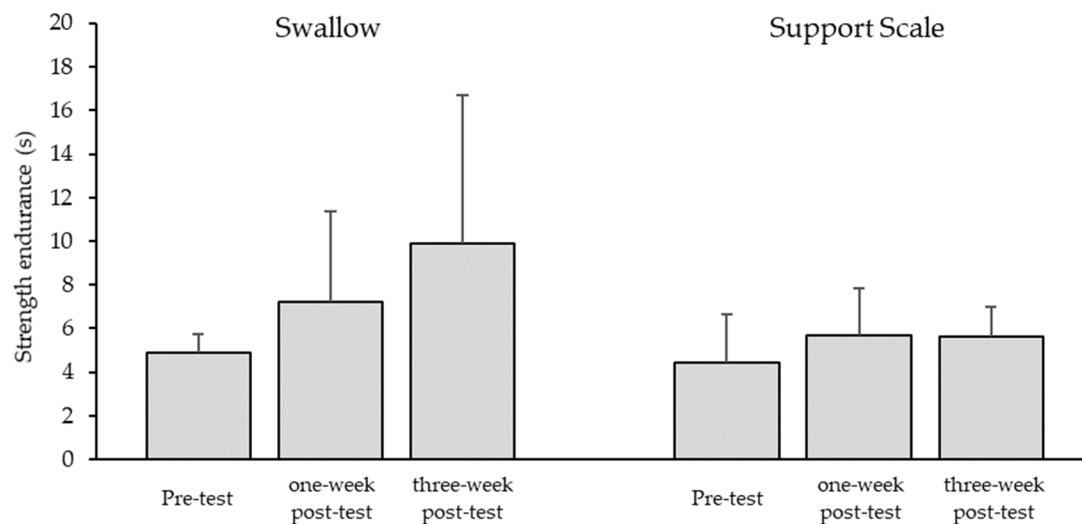




**Figure 5.** Maximum strength. Mean values and standard deviations for maximal strength (body mass – counter-weight or body mass + additional weight) for the swallow and support scale elements when held for 5 s on rings ( $n = 8$ ). Pre-test = before training; one-week post-test and three-week post-test = one and three weeks after the four-week eccentric–isokinetic training intervention, respectively; \*\* significant change:  $p < 0.01$ .

### Strength Endurance

One-way ANOVA revealed a tendency towards improvement in strength endurance for the element swallow ( $d = 0.60$ ;  $p = 0.07$ ) and a small effect for support scale ( $d = 0.27$ ;  $p = 0.19$ ). Post-hoc analysis showed that the increase in strength endurance for the element swallow (+ 104.8% from pre- to three-week post-test) was non-significant and of medium effect size between all tests (pre-test vs. one-week post-test:  $p = 0.20$ ,  $d = 0.59$ ; pre-test vs. three-week post-test:  $p = 0.20$ ;  $d = 0.75$ ; one-week post-test vs. three-week post-test:  $p = 0.20$ ,  $d = 0.77$ ). However, a large effect on strength endurance for support scale was found between pre-test and three-week post-test (+ 26.3%;  $p = 0.12$ ,  $d = 0.88$ ), and a medium effect between pre-test and one-week post-test ( $p = 0.37$ ,  $d = 0.52$ ) was found, whereas no change occurred between one-week and three-week post-test ( $p = 0.98$ ,  $d = 0.01$ ) (Figure 6).



**Figure 6.** Strength endurance. Mean values and standard deviations for the maximum holding time, with the maximum resistance attained in pre-test (reference) for the swallow and support scale elements on rings ( $n = 8$ ). Pre-test = before training; one-week and three-week post-test = one and three weeks after the four-week eccentric–isokinetic training, respectively.

## Discussion

To the best of our knowledge, this is the first study to analyze the effects of a four-week, ring-specific, eccentric–isokinetic training intervention on maximum strength and strength endurance for the swallow and support scale elements in male elite gymnasts. Despite the fact that the athletes were highly trained and competed at an international or national level, the four-week eccentric–isokinetic cluster training was able to further improve their performance. Specifically, athletes demonstrated significantly improved maximum strength and a tendency towards improvement in strength endurance for the swallow and support scale elements following training. Furthermore, 1RM for the bench press and “swallow supine position” preconditioning strengthening exercises tended to improve.

Concerning the effects of eccentric strength training, no general consensus can be found in the scientific literature. Most studies show positive effects of eccentric training on strength or performance, but some authors have questioned the generalizability of its effects for well-trained athletes [8]. Further, greater maximum strength gains have been attributed to eccentric–isoinertial (constant load) training than to eccentric–isokinetic (constant velocity) training [8,23]. While these previous studies mostly investigated the effect of rather unspecific training exercises on highly specific sport performance, we intended to create a training exercise that was as

similar as possible to the sport-specific performance, yet in a highly controlled setting. Therefore, the ring-specific adaptations may have been strongly dependent on the similarity between the demands of the trained movement and the static strength elements on rings. Furthermore, the slow isokinetic execution of the training exercise may have evoked similar muscle activation as during a static hold element, due to the decelerating muscle work while maintaining the static position in order to overcome gravity. Moreover, the slightly smaller adaptations in the (concentric) 1RM for the swallow supine position and bench press preconditioning exercises support the conclusion of Vogt and Hoppeler [9] that the magnitude of strength gains with eccentric training is higher when tested eccentrically than concentrically.

In general, our results indicate that eccentric (in our case, isokinetic) training can improve the performance of even highly trained elite athletes. One prerequisite for this may be that the movement and the movement velocity of the applied exercise is similar to the sport-specific performance. This may be an important factor for coaches (and scientists) if they intend to implement novel, efficient “preparatory” exercises to improve athletes’ performance.

In men’s artistic gymnastics, ring-specific strength is traditionally trained by either (a) concentric barbell exercises [16,24], (b) holding the static position of the elements with the help of the coach, or (c) eccentric–isoinertial exercises (e.g., lowering from handstand to swallow). In this context, it should be mentioned that all of the traditional training methods have different advantages and disadvantages. Barbell exercises are rather unspecific (unspecific movements and concentric muscle work), but may be indispensable to improve the maximum strength in the upper extremities. Performing static strength elements on rings with the help of the coach may be important to improve the balance skills in the static position, but due to the dependence on the coach’s help, it is difficult to control the intensity of the performed exercise. Eccentric exercises on rings may be very specific but the instability of the rings and the acceleration of the isoinertial condition may provoke excessive torque on the shoulder joints, thus posing a risk for injury. The athletes who participated in the current study had employed each of the aforementioned training methods repeatedly over the prior years. Since exposing athletes to a variety of stimuli has been shown to be crucial for ensuring a continuous improvement in maximal strength [1], it could be that the very well-trained athletes in this study were so accustomed to the traditional training methods that they would have been unable to experience further improvements in specific maximum strength using these methods. On the other hand, the eccentric–isokinetic method employed in this study represented a novel and unfamiliar yet specific training stimulus for the athletes, and this could be the reason for the improvements of the ring-specific strength the athletes experienced within such a short period of time. One example to

illustrate this is the performance of athlete 9 (see Table S1). The holding position for the swallow element of this athlete changed considerably after the four week of training. At pre-test he performed the swallow with slightly bent arms (execution error). Probably due to the training exercise that was executed with completely straight arms, he could only perform the element with perfectly straight arms (without execution error) at the one- and three-week post-tests. This incidental improvement in holding technique made it difficult for him to hold the swallow element with the maximum resistance (body mass + counterweight) of the pre-test (resulting in 0 s holding time for strength endurance at one- and three-week post-test). A few months later, after having gotten used to this new and better technique, he was able to perform the swallow element with perfectly straight elbows at competitions. In order to prevent injuries and due to the high load on the shoulder joints while performing static strength elements on rings, these elements are usually maintained for a total only 30 to 60 s at most in one training session (e.g., 3 series of  $3 \times 5$  s). The time under maximal tension per strength training session in this study (2 to 4 min per training) was up to four times greater than usual holding times per training with other methods. This may be another reason for the observed improvements in maximal strength and strength endurance in the static holding positions. Improved ring-specific endurance may help the gymnasts to increase the number of strength elements performed in their routines on rings, and therefore increase their chances of success in competitions.

In elite sports and especially in individual sports, it is difficult to recruit an adequate number of athletes for studies. Further, all elite athletes want to benefit from new training methods, and therefore in intervention studies with elite athletes, control groups are very rare. Hence, these studies are limited to describe the effects of the applied method, and cannot compare the effectiveness of different methods. However, the “few” athletes that participated in our study were not only national team members but some of them were even medalists at European Championships. Therefore, the results of our study may be considered representative, even for top-level gymnasts.

## Conclusions

The four-week eccentric–isokinetic training intervention employed in the current study increased the specific (static) maximal strength and revealed a tendency towards improvement in strength endurance for the swallow and support scale elements of elite male gymnasts, probably due to the fact that it was a new and highly specific stimulus (regarding the involved muscle groups, slow eccentric movement, long time under maximal muscle tension) for these well-trained athletes. Nevertheless, the high physical strain on the upper limbs from the eccentric–

isokinetic intervention could have acute negative effects on the athletes' performance in their regular (technical) training on the apparatus. For this reason, and in order to prevent injuries, the volume of technical training during this type of eccentric–isokinetic strength training should be prescribed according to the fatigue of the athletes. Further, we suggest that this type of training should be used periodically, not continuously, for example during an early preparatory phase in which the technical training load is usually lower.

**Author Contributions:** Conceptualization, C.S., F.L., and K.H.; methodology, C.S., F.L., M.G., B.G., and K.H.; formal analysis, C.S. and L.T.; investigation, C.S., L.T., M.G., B.G., and K.H.; data curation, C.S., L.T., M.G., B.G., and K.H.; writing—C.S.; writing—review and editing, W.T., M.G., and K.H.; supervision, W.T. and K.H.; project administration, C.S.

**Funding:** This research received no external funding.

**Acknowledgments:** We would like to thank the athletes and coaches of the Swiss Artistic Gymnastics Team for the continuing trust in our scientific projects and for having enabled this study.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Wilmore, J.H.; Costill, D.L.; Kenney, W.L. *Physiology of Sport and Exercise, 4th ed.*; Human Kinetics: Champaign, IL, USA, 2008.
2. Sands, W.A. Injury prevention in women's gymnastics. *Sports Med.* 2000, 30, 359-373.
3. FIG. *Code of points MAG (2017–2020)*. FIG: Lausanne, Switzerland 2017.
4. Bango, B.; Sillero-Quintana, M.; Grande, I. New tool to assess the force production in the swallow. *Science of Gymnastics Journal.* 2013, 5, 47-58.
5. Dunlavy, J.K.; Sands, W.A.; McNeal, J.A.; Stone, M.H.; Smith, S.L.; Jemni, M.; Haff, G.G. Strength performance assessment in a simulated men's gymnastics still rings cross. *J. Sports Sci. Med.* 2007, 6, 93-97.
6. Schärer, C.; Hübner, K. Accuracy of prediction of maximum resistance at increased holding times based on a three seconds maximum static strength test of the three main strength elements on rings. *Science of Gymnastics Journal* 2016, 8, 125-134.
7. Isner-Horobeti, M.E.; Dufour, S.P.; Vautravers, P.; Geny, B.; Coudeyre, E.; Richard, R. Eccentric exercise training: Modalities, applications and perspectives. *Sports Med.* 2013, 43, 483-512.
8. Vogt, M.; Hoppeler, H.H. Eccentric exercise: Mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct. *J. Appl. Physiol.* 2014, 116, 1446-1454.
9. Hedayatpour, N.; Falla, D. Physiological and neural adaptations to eccentric exercise: Mechanisms and considerations for training. *Biomed Res. Int.* 2015, 2015, 1-7.
10. Higino, W.P.; Aparecido de Souza, R.; Cavalcanti Fde, S.; Cardoso Ados, S.; Vasconcelos, M.V.; Fernandes da Silva, F.; Leme, J.A. Influence of repeated bouts of eccentric exercise on high-Intensity aerobic performance. *J. Phys. Ther. Sci.* 2016, 28, 2369-2372.
11. Roig, M.; O'Brien, K.; Kirk, G.; Murray, R.; McKinnon, P.; Shadgan, B.; Reid, W.D. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: A systematic review with meta-analysis. *Br. J. Sports Med.* 2009, 43, 556-568.
12. Cowell, J.F.; Cronin, J.; Brughelli, M. Eccentric muscle actions and how the strength and conditioning specialist might use them for a variety of purposes. *Strength Cond. J.* 2012, 34, 33-48.
13. Armstrong, R.B.; Ogilvie, R.W.; Schwane, J.A. Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle. *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.* 1983, 54, 80-93.
14. Douglas, J.; Pearson, S.; Ross, A.; McGuigan, M. Eccentric exercise: Physiological characteristics and acute responses. *Sports Med.* 2017, 47, 663–675.

15. Zatsiorsky, V.M.; Kraemer, W.J. *Krafttraining-Praxis und Wissenschaft. 3. Überarbeitete und Ergänzte Auflage, 2008 ed.*; Meyer & Meyer Verlag: Aachen, NRW, Germany, 2006; p. 328.
16. Hübner, K.; Schärer, C. Relationship between swallow, support scale and iron cross on rings and their specific preconditioning strengthening exercises. *Science of Gymnastics Journal* 2015, 7, 59-68.
17. Vicon Motion Systems Ltd., *Plug-in Gait Reference Guide—Foundation Notes Revision*; Vicon Motion Systems Ltd.: Oxford, UK. 2010; Volume 2.
18. Haff, G.G.; Hobbs, R.; Sands, W.A.; Pierce, K.; Stone, M.H. Cluster training: A novel method for introducing training program variation. *Strength Cond. J.* 2008, 30, 67-76.
19. Behringer, M.; Montag, J.; Kilian, Y.; McCourt, M.; Mester, J. The repeated bout effect: Is the blunted creatine kinase response an effect of an altered enzyme inactivation kinetic? *J. Sports Med. Phys. Fit.* 2015, 55, 1431-1437.
20. McHugh, M.P.; Connolly, D.A.; Eston, R.G.; Gleim, G.W. Exercise-Induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Med.* 1999, 27, 157-170.
21. Cohen, J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd ed.*; Lawrence Erlbaum Associates: New York, NY, USA, 1988.
22. Holm, S. A simple sequentially rejective multiple test procedure. *Scand. J. Stat.* 1979; 6, 65-70.
23. Guilhem, G.; Cornu, C.; Guevel, A. Neuromuscular and muscle-tendon system adaptations to isotonic and isokinetic eccentric exercise. *Ann. Phys. Rehabil. Med.* 2010, 53, 319-341.
24. Bernasconi, S.M.; Tordi, N.R.; Parratte, B.M.; Rouillon, J.D.; Monnier, G.G. Effects of two devices on the surface electromyography responses of eleven shoulder muscles during azarian in gymnastics. *J. Strength Cond. Res.* 2006, 20, 53-57.

## **7 Zusammenfassung der Resultate und Diskussion**

In Originalartikel 1 dieser Dissertation wurden die Zusammenhänge zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem D-, E- und F-Wert sowie der Flughöhe und -weite in der zweiten Flugphase am Pferdsprung berechnet. Ausserdem wurden die Leistungen (Anlaufgeschwindigkeit, D-, E-, F-Wert; Flughöhe und -weite) von Männern und Frauen sowie Junioren- und Eliteathleten und -athletinnen an einem internationalen Grossanlass miteinander verglichen.

In Originalartikel 2 wurden die Validität, Reliabilität und Objektivität einer einfachen 2D-Videoanalyse-Methode (Dartfish, Dartfish SA, Fribourg, Schweiz) zur Bestimmung von Flughöhe und -weite am Pferdsprung untersucht.

In Originalartikel 3 wurden einerseits (a) die Zusammenhänge zwischen der Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung und dem D-Wert; (b) der Anlaufgeschwindigkeit und Schrittkinematik während dem Pferdsprunganlauf und (c) der Anlaufgeschwindigkeit und Schnellkeits- und Schnellkraftparameter der unteren Extremitäten bei Überschlag- / Tsukaharasprüngen respektive Yurchenkosprüngen analysiert. Andererseits wurde die Entwicklung des Schwierigkeitswertes und der Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung sowie der konditionellen Voraussetzungen (Schnellkeits- und Schnellkraftparameter) über verschiedene Altersklassen im Elite-Kunstturnen untersucht.

In Originalartikel 4 wurde die Wirksamkeit einer neuartigen vierwöchigen spezifischen exzentrisch-isokinetischen (0.1 m/s) Trainingsintervention mit einem computergesteuerten Trainingsgerät (1080 Quantum Syncro, 1080 Motion, Lidingö, Schweden) auf die Verbesserung der Maximalkraft und der Kraftausdauer bei den Krafthaltelementen Schwalbe und Stützwaage an den Ringen bei Eliteathleten ( $n = 9$ ) überprüft.

### **7.1 Originalartikel 1**

Die Resultate dieser Studie haben gezeigt, dass bei den Turnerinnen im Elite- ( $n = 89$ ) und Juniorenalter ( $n = 106$ ) im Allgemeinen höhere Korrelationen zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem D-, E- respektive F-Wert bestehen als bei den Männern (Elite:  $n = 89$ ; Junioren:  $n = 123$ ). Die Anlaufgeschwindigkeit erklärte bei den Frauen bis zu 64% und bei den Männern bis zu 42% die Variation des D-Wertes. Folglich hat die maximale Anlaufgeschwindigkeit bei den Frauen eine höhere Bedeutung für die Wettkampfleistung am Pferdsprung als bei den Männern. Im Gegensatz zu den Frauen müssen Männer nicht ihr gesamtes Geschwindigkeitspotential ausnutzen, um während dem Sprunganlauf genügend horizontale Energie für einen



erfolgreichen Pferdsprung zu erzeugen. Es bleibt aber offen, ob eine höhere Anlaufgeschwindigkeit wirklich zu einer Verbesserung der Leistung führen würde oder ob sich diese negativ auf die Abstosstechnik auf dem Sprungtisch auswirken würde.

In den Juniorenkategorien resultierten insgesamt tiefere Korrelationskoeffizienten zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem D-, E- respektive F-Wert als in den Elitekategorien. Der grösste Unterschied wurde dabei bei der Korrelation zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem E-Wert beobachtet. Der E-Wert ist insbesondere abhängig von der Ausführung der Salti und Schrauben in der zweiten Flugphase sowie der Qualität der Landung. Die Qualität der Landung hängt von der Höhe des Körperschwerpunktes beim ersten Kontakt mit der Landematte ab (Marinšek, 2009). Die Voraussetzung dafür ist vor allem eine ausreichende Flughöhe. Für den erfolgreichen Übergang von der Junioren- zur Elitekategorie erscheint es deshalb wichtig, dass die Steigerung der Anlaufgeschwindigkeit in mehr Flughöhe umgewandelt und somit der Sprung mit einer sauberen Landung beendet werden kann.

Die Resultate zeigen weiter, dass Männer zwischen 8% und 9% höhere Anlaufgeschwindigkeiten erreichen als Frauen bei Überschlag- und Tsukaharasprüngen, jedoch ähnliche Anlaufgeschwindigkeiten bei Yurchenkosprüngen. Trotzdem erreichen die Männer bei allen Sprunggruppen in der zweiten Flugphase grössere Flughöhen (+ 9%) und -weiten (+ 16%) als die Frauen. Der Geschwindigkeitsunterschied zwischen den Geschlechtern hat biologische Gründe und ist vergleichbar mit den Unterschieden in leichtathletischen Sprintdisziplinen (Cheuvront, Carter, Keith, DeRuisseau & Moffatt, 2005; Thibault et al., 2010). Generell muss in diesem Zusammenhang beachtet werden, dass Frauen eine geringere Körpermasse beschleunigen müssen und auch deshalb die notwendige Anlaufgeschwindigkeit im Vergleich zu den Männern geringer ist. In Bezug auf die unterschiedliche Flughöhe kann angenommen werden, dass Männer aufgrund des höheren Explosivkraftniveaus in den oberen Extremitäten in der Lage sind, sich kräftiger (vertikal) vom Sprungtisch abzudrücken, was (unter anderem) zur grösseren Flughöhe in der zweiten Flugphase beiträgt.

Da bei Yurchenkosprüngen kein signifikanter Unterschied der Anlaufgeschwindigkeit zwischen Männern ( $7.41 \pm 0.34$  m/s) und Frauen ( $7.31 \pm 0.25$  m/s) besteht, kann angenommen werden, dass, unabhängig vom Geschlecht, die optimale Anlaufgeschwindigkeit bei Yurchenkosprüngen tiefer ist als bei den anderen beiden Sprunggruppen. Dies bedeutet aber auch, dass die Anlaufgeschwindigkeit der Frauen bei Yurchenkosprüngen näher an ihrer Maximalgeschwindigkeit liegt als bei den Männern. Somit müssen Frauen höhere Risiken eingehen, um Sprünge aus dieser technisch schwierigen Sprunggruppe zeigen zu können.

Weiter konnte demonstriert werden, dass Junioren- und Eliteathleten, welche den gleichen Sprung turnen, ähnliche Anlaufgeschwindigkeiten aufweisen ( $p > 0.05$ ). Somit kann gefolgert werden, dass die optimale Anlaufgeschwindigkeit für jeden einzelnen Sprung altersunabhängig ist.

Zwischen Junioren- und Eliteathletinnen konnten nur bei Yurchenkosprüngen signifikante Unterschiede der Anlaufgeschwindigkeit (Elite:  $7.31 \pm 0.25$  m/s; Juniorinnen:  $7.19 \pm 0.21$  m/s;  $p < 0.05$ ) beobachtet werden. Folglich scheinen jüngere Athletinnen ähnliche konditionelle Voraussetzungen am Pferdsprung zu haben wie Eliteathletinnen. Die Unterschiede zwischen Junioren- und Eliteathletinnen bei der Anlaufgeschwindigkeit für Yurchenkosprünge sind folglich nicht auf bessere konditionelle Voraussetzungen, sondern wahrscheinlich vielmehr auf das technische Niveau der Athletinnen zurückzuführen.

Bei den Männern wurden zwischen Junioren- und Eliteathleten signifikante Unterschiede der Anlaufgeschwindigkeit bei Tsukahara- (Elite:  $8.19 \pm 0.32$  m/s; Junioren:  $7.88 \pm 0.35$  m/s;  $p < 0.001$ ) und Überschlagsprüngen (Elite:  $8.45 \pm 0.28$  m/s; Junioren:  $8.20 \pm 0.33$  m/s;  $p < 0.01$ ) festgestellt. Yurchenkosprünge wurden hingegen von den Athleten beider Altersklassen mit ähnlichen Anlaufgeschwindigkeiten geturnt. Folglich scheinen die Juniorenathleten bei Yurchenkosprüngen die optimale Anlaufgeschwindigkeit bereits im Juniorenalter zu erreichen. Grössere Flughöhen und somit das Potential, schwierigere Sprünge zu turnen, können bei dieser Sprunggruppe anscheinend vor allem durch eine Verbesserung der sportlichen Technik und/oder der durch die Verbesserung der Explosivkraftfähigkeiten der oberen Extremitäten (grössere Abdruckkraft resultiert in grösserer Flughöhe) erreicht werden.

Die Resultate zeigten weiter, dass nur 24% der Frauen und 19% der Männer Überschlagsprünge zeigen und diese generell mit der höchsten Anlaufgeschwindigkeit ausführen. Folglich werden Überschlagsprünge nur von Athleten und Athletinnen gezeigt, welche fähig sind, hohe Anlaufgeschwindigkeiten zu erreichen. Bei den Überschlagsprüngen bestanden bei den Männern ausserdem keine signifikanten Korrelationen zwischen der Anlaufgeschwindigkeit und dem D-, E- respektive F-Wert. Dies lässt vermuten, dass es ab einer gewissen (hohen) Anlaufgeschwindigkeit möglich ist, auch die schwierigsten Pferdsprünge zu turnen.

Tsukaharasprünge wurden von 69% der Männer und 24.5% der Frauen gezeigt. Bei Tsukaharasprüngen wurde die grösste Differenz der Anlaufgeschwindigkeit zwischen Sprüngen mit tiefem und hohem D-Wert beobachtet. Das Lernen eines schwierigeren Tsukaharasprunges erfordert somit auch die Erhöhung der Anlaufgeschwindigkeit. Bei Tsukaharasprüngen erreichen

Athleten und Athletinnen (aufgrund des mehrheitlich einhändigen Abdruckes auf dem Sprungtisch) zudem generell kleinere Flughöhen als bei Sprüngen aus den anderen beiden Sprunggruppen.

Yurchenkosprünge wurden am häufigsten (51%) von Frauen und am seltensten (12%) von Männern gezeigt. Yurchenkosprünge werden mit der geringsten Anlaufgeschwindigkeit aller Sprunggruppen ausgeführt. Erklärt werden kann dies dadurch, dass die Radwende vor dem Brett die zur Verfügung stehende Anlaufdistanz verkürzt. Weitere Gründe dafür könnten der technisch und mental schwierig zu bewältigende Rückwärtsabdruck auf dem Tisch sowie die limitierten mechanischen Federeigenschaften der Muskeln und Sehnen der oberen Extremitäten (Glasheen & McMahon, 1995) sein.

## 7.2 Originalartikel 2

Die Berechnungen der Validität haben gezeigt, dass mit der 2D-Videoanalyse-Methode verglichen mit der 3D-Videoanalyse (Vicon, Vicon Motion Systems, Denver, CO, USA), die Flughöhe genauer bestimmt werden kann ( $\pm 95\%$  Konfidenzintervall:  $\pm 3.6\%$  der mittleren Flughöhe) als die Flugweite ( $\pm 95\%$  Konfidenzintervall:  $\pm 7.6\%$  der mittleren Flugweite). Ausserdem ergab die Bestimmung der Flughöhe kleinere Variationskoeffizienten ( $CV\% = 2.24\%$ ) als die Flugweite ( $CV\% = 4.64\%$ ). Im Gegensatz dazu konnte eine Tendenz zur systematischen Überschätzung ( $p = 0.06$ ) der Flughöhe, jedoch nicht der Flugweite ( $p = 0.43$ ), erkannt werden.

Weiter konnte festgestellt werden, dass die Flughöhe und -weite mit der 2D-Videoanalyse-Methode reliabel (Intrarater Reliabilität: Flughöhe:  $CV\% = 0.44\%$ ,  $r = 0.99$ ; Flugweite:  $CV\% = 0.87\%$ ,  $r > 0.99$ ) und objektiv (Flughöhe:  $CV\% = 0.51\%$ ,  $r = 0.99$ ; Flugweite:  $CV\% = 0.72\%$ ,  $r > 0.99$ ) bestimmt werden können.

Die Resultate dieser Studie erweitern somit die Erkenntnisse von Balsalobre-Fernandez, Tejero-Gonzalez, del Campo-Vecino und Bavaresco (2014), welche gezeigt haben, dass die Flughöhe von einfachen vertikalen Sprüngen mittels 2D-Videoanalyse valide bestimmt werden kann. Insofern kann bei einer Veränderung der Flughöhe und -weite von mehr als 6.16 cm respektive 10.59 cm von einer Verbesserung oder Verschlechterung der Flughöhe respektive einer unterschiedlichen Flugweite ausgegangen werden. Die Unterschiede in der Genauigkeit der Bestimmung von Flughöhe und -weite können darauf zurückgeführt werden, dass mit der 2D-Videoanalyse-Methode nur Distanzen in der Sagittalebene bestimmt werden können. Seitliche Abweichungen scheinen deshalb zu den Messfehlern zu führen, welche bei der Flugweite beobachtet wurden. Dies konnte in dieser Studie mit dem signifikanten Zusammenhang zwischen

der seitlichen Abweichung bei der Landung und der Differenz zwischen der 2D- und 3D-Messung gezeigt werden ( $r = 0.58$ ;  $p < 0.01$ ). Ein weiterer Grund für die grössere Ungenauigkeit der Bestimmung der Flugweite könnte in der Qualität des Standbildes liegen, welches für die Bestimmung der Flugweite herangezogen wurde. Die Unschärfe erschwerte dabei teilweise die exakte Bestimmung der Position des Knöchels. Diese Probleme stellten sich bei der Bestimmung der Flughöhe nicht, da einerseits die laterale Abweichung im höchsten Punkt der Flugphase sicherlich kleiner war als bei der Landung und weil andererseits kein spezifischer Gelenkpunkt, sondern die visuelle Bestimmung des Körperschwerpunktes die Referenz für die Bestimmung der Flughöhe darstellte. Weiter könnte die leichte Krümmung des Referenzmessstabes, mit welchem eine Referenzlänge in das 2D-Video gezeichnet wurde, die 2D-Messungen leicht beeinflusst haben.

Die Resultate zeigten zudem eine Tendenz zur Unterschätzung der Flughöhe. Da die Messungen der Objektivität (zwei unterschiedliche Auswerter) keine signifikanten Unterschiede ergeben hat, muss angenommen werden, dass die beiden Auswerter mit den gleichen Problemen bei der Bestimmung der Flughöhe konfrontiert waren. Es wird deshalb angenommen, dass die Schwierigkeit der Bestimmung des Nullpunktes (senkrecht unter dem höchsten Punkt des Körperschwerpunktes) auf der Landematte der Grund für diese Tendenz sein könnte. Da die Abweichungen im Vergleich mit der 3D-Messmethode aber gering sind, kann die angewandte 2D-Methode trotzdem als valide bezeichnet werden.

Die Bestimmung der (Intrarater) Reliabilität (Messwiederholung) und Objektivität in dieser Studie ergaben äusserst geringe Abweichungen zwischen den jeweiligen Messungen. Damit konnte gezeigt werden, dass die Bestimmung der Flughöhe und -weite mit der angewandten 2D-Videoanalyse-Methode wiederholt und unabhängig vom Auswerter sehr genau gelingt. Hervorzuheben ist, dass ein Auswerter in dieser Studie diese Methode zum ersten Mal angewandt hat. Somit ist es denkbar, dass auch unerfahrene Personen (z.B. Trainer und Trainerinnen oder Athleten und Athletinnen) diese Methode nach einer kurzen Einführung anwenden können und dass diese zum gleichen Ergebnis kommen wie ein Experte.

In Bezug auf die Praktikabilität hat die angewandte 2D-Analyse-Methode viele Vorteile. Sie ist einfach in der Anwendung und Durchführung der Messung und das benötigte Material beschränkt sich auf ein Tablet und einen Referenzmessstab. Beides ist in den meisten Turnhallen vorhanden oder kann schnell besorgt werden. Zudem dauert die Auswertung für einen Pferdsprung bei geübten Personen nicht mehr als eine Minute. Folglich ist die überprüfte 2D-Vide-

oanalyse-Methode eine praktikable Lösung, welche von Trainern und Trainerinnen im täglichen Training angewandt werden und eine 3D-Videoanalyse (insbesondere zur Bestimmung der Flughöhe) ersetzen kann.

### **7.3 Originalartikel 3**

Die Resultate zeigten, dass die Anlaufgeschwindigkeit bei Überschlag- / Tsukaharasprüngen 62% und bei Yurchenkosprüngen 15% der Varianz des D-Wertes erklärt. Die Varianz der Anlaufgeschwindigkeit wurde zu 72% (Überschlag- / Tsukahara) respektive 5% (Yurchenko) von der maximalen 25m-Sprintgeschwindigkeit erklärt. Damit konnte die Annahme bestätigt werden, dass die maximale 25m-Sprintgeschwindigkeit das Potential für eine hohe Anlaufgeschwindigkeit bei Überschlag- und Tsukaharasprüngen darstellt. Die auf 25 Meter beschränkte Anlaufdistanz am Pferdsprung sowie das standardisierte Schrittmuster während des Sprunganlaufes haben zur Folge, dass die Erhöhung der Schrittfrequenz die einzige Möglichkeit ist, die Anlaufgeschwindigkeit zu steigern. Dies kann dadurch erkannt werden, dass in dieser Studie die Anlaufgeschwindigkeit zu 16% durch die Schrittfrequenz erklärt wird.

Bei Yurchenkosprüngen ist aufgrund der Resultate anzunehmen, dass eher die hohen sporttechnischen und mentalen Anforderungen als die konditionellen Voraussetzungen die limitierenden Faktoren für die Anlaufgeschwindigkeit sind.

Weiter konnte demonstriert werden, dass die maximale 25m-Sprintgeschwindigkeit zu 55% durch die maximale vertikale Sprungleistung beim Countermovement Jump und zu 29% von der Reaktivkraft (Drop Jump) erklärt wird. Demzufolge können Explosiv- und Reaktivkraft als bedeutende (indirekte) konditionelle Voraussetzungen für die Leistung am Pferdsprung betrachtet werden. Trainer und Trainerinnen sollten sich bewusst sein, dass die Optimierung dieser konditionellen Parameter zur Verbesserung der Leistung am Pferdsprung beitragen kann.

Der Vergleich der Leistung der verschiedenen Altersklassen (U17, U19, U21, >21) in Bezug auf den D-Wert am Pferdsprung hat gezeigt, dass sich der D-Wert von der Altersklasse U17 zu >21 um 0.6 Punkte signifikant steigert. Dies bedeutet, dass der D-Wert nur sehr langsam gesteigert werden kann und dass bereits junge Athleten in der Lage sind, schwierige Sprünge zu zeigen. Es kann deshalb angenommen werden, dass Athleten viel Zeit in die Stabilisierung und Perfektionierung ihres Wettkampfsprunges investieren, bevor sie einen neuen (schwierigeren) Pferdsprung erlernen.

Der Vergleich zwischen den Altersklassen U17 und U19 hat gezeigt, dass die U19-Athleten eine signifikant höhere Anlaufgeschwindigkeit und eine grössere Schrittlänge aufweisen. Zudem nimmt auch die Körpergrösse und das Gewicht signifikant zu. Diese Resultate lassen erahnen, dass Wachstum und Reifung in dieser Phase die wichtigsten Faktoren sind, durch welche die genannten Parameter verbessert werden. Die Veränderung der Schrittlänge hat zur Folge, dass die Athleten ihr standardisiertes Schrittmuster beim Sprunganlauf ändern müssen. Da die Schrittlänge über die folgenden Altersklassen gleichbleibt, kann angenommen werden, dass das Schrittmuster, welches nach Beendigung des Wachstumes angewandt wird, während der ganzen weiteren Karriere beibehalten wird.

Der Vergleich der Altersklassen U19 und U21 hat gezeigt, dass die älteren Athleten signifikant höhere Maximalgeschwindigkeiten beim Sprunganlauf und 25m-Sprint erreichen und dass die vertikale Sprungleistung signifikant zunimmt. In diesem Zusammenhang erscheint es plausibel, dass die verbesserte Explosivkraft zu einer höheren Sprint- sowie in der Folge auch zu einer höheren Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung führt.

Zwischen den Altersklassen U21 und >21 wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Es kann folglich angenommen werden, dass Athleten im Alter von 21 Jahren die optimale Anlaufgeschwindigkeit am Pferdsprung erreichen. Der Vergleich zwischen der Anlauf- und Sprintgeschwindigkeit bei der Altersklasse U21 zeigte jedoch, dass die Athleten beinahe ihr gesamtes Geschwindigkeitspotential ausnutzen müssen, um ihren Wettkampfsprung zeigen zu können. Der Unterschied zwischen Sprint- und Anlaufgeschwindigkeit ist bei der Altersklasse >21 grösser. Folglich können die älteren Athleten mit einer (relativ betrachtet) niedrigeren Geschwindigkeit am Pferdsprung anlaufen, wodurch sie sicherlich den Pferdsprung technisch sauberer turnen können.

Insgesamt erreicht die Altersklasse >21 bei allen gemessenen Parametern die höchsten Werte, jedoch wurden keine signifikanten Unterschiede zur vorangehenden Altersklasse festgestellt. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass die hauptsächliche Entwicklung der konditionellen Parameter, welche zur Leistung am Pferdsprung beitragen, bis zum Alter von 21 erfolgt.

#### **7.4 Originalartikel 4**

Die Resultate dieser Untersuchung zeigten, dass sich die Maximalkraft nach der vierwöchigen Trainingsintervention bei beiden Krafthalteelementen signifikant gesteigert hat (Schwalbe: + 4.1%;  $d = 0.85$ ;  $p = 0.01$ ; Stützwaage: + 3.6%;  $d = 2.47$ ;  $p = 0.0002$ ) und dass sich die Kraftausdauer beim Element Schwalbe tendenziell verbessert hat (+ 104%;  $d = 0.60$ ;  $p = 0.07$ ). Beim

Element Stützwaage hingegen konnten nur leichte Verbesserungen der Kraftausdauer festgestellt werden (+ 26%;  $d = 0.27$ ;  $p = 0.19$ ). Ausserdem konnte auch die Maximalkraft bei der vorbereitenden Krafttrainingsübung «Schwalbe liegend» tendenziell verbessert werden ( $d = 0.58$ ;  $p = 0.06$ ).

Die Resultate legen nahe, dass das angewandte spezifische exzentrisch-isokinetische Training die Maximalkraft in den entsprechenden Haltepositionen bei den Krafthalteelementen Schwalbe und Stützwaage sogar bei Eliteathleten verbessern kann. In der Literatur bestehen jedoch unterschiedliche Meinungen bezüglich der Wirkung von exzentrischem Training. Einzelne Autoren stellten sogar dessen Wirksamkeit für die sportliche Leistung von Spitzenathleten in Frage (Vogt & Hoppeler 2014). Da in den meisten Studien aber die Effekte von unspezifischen Trainingsübungen auf die sportspezifische Leistung überprüft wurde, sind die Resultate dieser Studie nicht mit den bisherigen Resultaten zu vergleichen. Die für diese Studie neu entwickelte Trainingsübung war spezifisch im Sinne der involvierten Muskelgruppen, der Bewegungsrichtung und der Bewegungsgeschwindigkeit im Vergleich zur Zielübung (Krafthalteelemente an den Ringen). Dies ist ein wichtiger Aspekt, welcher beachtet werden muss, wenn neue Trainingsübungen kreiert und getestet werden. Diese neu entwickelte Trainingsform stellte ausserdem für alle Elite Athleten in dieser Studie einen neuen Trainingsreiz dar, was deren Wirksamkeit erklären könnte. Ein weiterer Vorteil dieser Trainingsform ist, dass die Dauer der maximalen spezifischen Muskelanspannung im Vergleich zum traditionellen Ringekrafttraining deutlich erhöht werden konnte. Krafthalteelemente werden im Kunstturntraining insgesamt während 30 s bis maximal 60 s pro Training gehalten. In unserer Intervention betrug die Dauer, in welcher die involvierte Muskulatur unter maximaler Spannung war, zwischen 2 min und 4 min. Dies könnte ein weiterer Grund für die Effektivität dieser Trainingsform sein.

Die in dieser Studie angewandte Trainingsmethode könnte aufgrund ihrer Wirksamkeit die bisher angewandten ringspezifischen exzentrischen Trainingsformen (zumindest teilweise) ersetzen. Viele Athleten beklagten sich nach dem traditionellen exzentrischen Training an den Ringen über Schulterschmerzen. In der in dieser Studie angewandten Trainingsmethode werden die potentiell für Verletzungen verantwortlichen Faktoren des traditionellen exzentrischen Trainings (Instabilität der Ringe und Beschleunigung durch exzentrische-isoinertiale Ausführung) durch eine besser kontrollierbare Ausführung der Trainingsübung in Rückenlage sowie durch eine konstante Bewegungsgeschwindigkeit ersetzt. Somit kann angenommen werden, dass die neue Krafttrainingsübung weniger belastend für die Sehnen und Gelenke der oberen Extremitäten ist als die traditionelle Methode.

Trotz der hohen Wirksamkeit dieser neuen Trainingsmethode kann vermutet werden, dass sie nicht fortlaufend im Trainingsprozess angewendet werden sollte, da diese Trainingsform hochintensiv ist. Daher wird vorgeschlagen, diese Trainingsform vor allem als Reizwechsel in Aufbauphasen einzusetzen.



## 8 Praktische Konsequenzen

Die vier Originalartikel dieser Dissertation liefern, basierend auf den Leistungen von 471 internationalen und nationalen Junioren- und Elite-Kunstturnern und -Kunstturnerinnen bedeutende Erkenntnisse für das sportliche Training, die sportliche Leistung und den sportlichen Wettkampf sowie deren Beziehungen untereinander. Sie leisten daher einerseits einen Beitrag zur Kenntnis der notwendigen konditionellen Voraussetzungen (und deren Entwicklung über verschiedene Altersklassen) zur Erbringung der sportlichen Leistung am Pferdsprung (Originalartikel 1 bis 3), andererseits wurde eine neue, wirksame Krafttrainingsmethode zur Verbesserung der spezifischen Leistungsvoraussetzungen an den Ringen entwickelt (Originalartikel 4).

Insgesamt konnte in den Originalartikeln 1 und 3 die generelle Wichtigkeit einer hohen Anlaufgeschwindigkeit für die Leistung am Pferdsprung bestätigt werden. Bei den Turnerinnen wurde eine hohe Relation zwischen Anlaufgeschwindigkeit und D-, E- sowie F-Wert für alle Sprunggruppen festgestellt. Bei den Turnern scheint insbesondere bei Überschlagsprüngen eine hohe Mindestgeschwindigkeit (oder Optimalgeschwindigkeit) unerlässlich zu sein, um auch die schwierigsten Sprünge turnen zu können. Ausserdem konnte gezeigt werden, dass für alle unterschiedlichen Pferdsprünge ein optimaler Bereich der Anlaufgeschwindigkeit besteht, innerhalb welchem diese Sprünge absolviert werden können / sollten. In Bezug auf Geschlechterunterschiede wurde festgestellt, dass Turnerinnen aufgrund hervorragender sportlicher Technik und mentaler Bewältigungsstrategien bei den technisch sehr anspruchsvollen Yurchenkosprüngen mit beinahe maximaler Geschwindigkeit anlaufen. Männer haben hingegen konditionelle Vorteile (Maximal- und Explosivkraft der oberen und unteren Extremitäten), welche es ihnen ermöglichen mit einer (relativ zur Maximalgeschwindigkeit) tieferen Geschwindigkeit anzulaufen als die Frauen und trotzdem schwierigere Sprünge zu turnen (Originalartikel 1). Um Pferdsprünge mit hohem D-Wert zeigen zu können, muss (neben dem optimalen Drehimpuls) ausreichend Flughöhe generiert werden. Diese kann, dank der Erkenntnisse in Originalartikel 2, valide, reliabel und objektiv mittels einer einfachen, kostengünstigen und mit wenig Aufwand verbundenen 2D-Videoanalyse-Methode erfasst werden. Der Vergleich mit Referenzflughöhen aus der Literatur kann hierbei zur Sicherheit der Athleten und Athletinnen beim Erlernen eines neuen Pferdsprunges beitragen.

In Bezug auf die notwendigen konditionellen Voraussetzungen, um im Männerkunstturnen einen hohen D-Wert am Pferdsprung erreichen zu können, konnte in Originalartikel 3 festgestellt werden, dass eine hohe maximale 25m-Sprintgeschwindigkeit sowie eine hohe Schrittfrequenz beim Sprunganlauf die Höhe der Anlaufgeschwindigkeit bei Überschlag- / Tsukaharasprüngen

direkt beeinflussen. Zudem wurde erkannt, dass Explosiv- und Reaktivkraft wichtige, indirekte konditionelle Voraussetzungen für die Leistung am Pferdsprung sind.

In Bezug auf die Erhöhung des D-Wertes über die verschiedenen Altersklassen (Originalartikel 3), konnte festgestellt werden, dass dieser nur langsam, dafür kontinuierlich gesteigert wird. Gründe dafür könnten der hohe Zeitaufwand zur Verbesserung der Ausführung von bereits beherrschten Sprüngen sowie die hohen technischen Anforderungen von neuen, schwierigeren Sprüngen sein. Die Anlaufgeschwindigkeit erhöht sich hingegen massgeblich bis zum Alter von 21 Jahren, zuerst durch Wachstum und Entwicklung und später durch Verbesserung von Sprintgeschwindigkeit und Explosivkraft. Folglich kann die Leistung am Pferdsprung ab dem Alter von 21 Jahren stabilisiert werden.

In Originalartikel 1 bis 3 konnte gezeigt werden, dass die differenzierte Betrachtung, Erfassung und Beurteilung der Leistung und ihrer Relation mit dem Wettkampffresultat am Pferdsprung von hoher Bedeutung sind. Schliesslich helfen die Erkenntnisse in Originalartikel 1 sowohl den Trainern und Trainerinnen als auch den Athleten und Athletinnen dabei, einen den konditionellen Voraussetzungen angemessenen Pferdsprung auswählen zu können. Die Grundlage dafür bildet eine regelmässige leistungsdiagnostische Überprüfung von Schnelligkeits- und Schnellkraftparametern der unteren Extremitäten in Bezug auf die Leistung am Pferdsprung. Die Ableitung von Trainingsempfehlungen ist dabei zentral für die Optimierung und die Individualisierung des Trainingsprozesses und zur Weiterentwicklung der konditionellen Voraussetzungen während der gesamten Sportkarriere. Der in Originalartikel 3 entwickelte Entscheidungsbaum zur Ableitung von Trainingsempfehlungen, sollte dabei helfen die richtigen Ableitungen fürs optimale Training der Athleten zu treffen.

Die Wirksamkeit der in Originalartikel 4 angewandten exzentrisch-isokinetischen Trainingsform auf die spezifische (statische) Maximalkraft bei den Elementen Schwalbe und Stützwaage zeigt, dass neue, aber dennoch hochspezifische (involvierte Muskelgruppen, langsame exzentrische Bewegung, lange maximale Spannungsdauer der Muskulatur) Trainingsreize entscheidend sind für Eliteathleten, um ihre Leistung an den Ringen weiter verbessern zu können. Aufgrund der hohen Intensität dieser Trainingsform sind negative Einflüsse auf die Leistung im normalen (sporttechnischen) Training möglich. Um Verletzungen vorzubeugen, wird deshalb vorgeschlagen den sporttechnischen Trainingsumfang während intensiven Krafttrainingsphasen dem aktuellen Ermüdungsgrad der einzelnen Athleten anzupassen. Ausserdem wird empfohlen, dass diese Art von Training periodisch als Reizwechsel (und nicht als Dauermethode) angewendet wird.

«Citius, altius, fortius» – das Motto der olympischen Spiele könnte – pauschal ausgedrückt – für viele Sportarten die Leitlinien für deren Leistungsstruktur darstellen. Die heutzutage hohe Leistungsdichte im Spitzensport verlangt aber eine maximale Ausprägung der komplexen Leistungsfähigkeit im Wettkampf. Daher ist eine laufende, differenzierte Erforschung der Leistungsstruktur einer Sportart unerlässlich zur Schaffung von neuem Wissen. Dieses soll zur Trainingssteuerung im Nachwuchssport dienen, um die Voraussetzungen für künftige Leistungen zu schaffen und um sportliche Höchstleistungen bei Eliteathleten und -athletinnen zu ermöglichen. Die Überprüfung der Gültigkeit von bestehendem Wissen oder das Nutzen von Wissen zur Akzentuierung einzelner Aspekte von Leistung, Training oder Wettkampf ist dabei die Aufgabe der Trainingswissenschaft im Spitzensport. Pferdsprung und Ringeturnen sind somit eine schöne Analogie zu «Citius, altius? Fortius!».

## Literaturverzeichnis

- Amigó, A. I., Busquets, A. F., Evrard, M. M., Galilea Ballarini, P. A. & Carrasco Marginet, M. (2009). Height, weight, somatotype and body composition in elite Spanish gymnasts from childhood to adulthood. *Apunts Mede Sport* 161, 18-28.
- Arampatzis, A., Stafilidis, S., Morey-Klapsing, G. & Brüggemann, G. P. (2004). Interaction of the human body and surfaces of different stiffness during drop jumps. *Med Sci Sports Exerc*, 36(3), 451-459. doi:10.1249/01.mss.0000117166.87736.0a.
- Arkaev, L. Y. & Suchilin, N. G. (Eds.). (2004). *Gymnastics How to create champions* (2nd ed.): Meyer & Meyer Sport (UK) Ltd.
- Armstrong, R. B., Ogilvie, R. W. & Schwane, J. A. (1983). Eccentric exercise-induced injury to rat skeletal muscle. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 54(1), 80-93. doi:10.1152/jappl.1983.54.1.80.
- Atiković, A., Delaš Kalinski, S. & Čuk, I. (2017). Age trends in artistic gymnastics across world championships and the olympic games from 2003 to 2016. *SCI GYM J*, 9(3), 251-263.
- Atiković, A. & Smajlović, N. (2011). Relation between Vault Difficulty Values and Biomechanical Parameters in Mens Artistic Gymnastics. *SCI GYM J*, 3(3), 91-105.
- Balsalobre-Fernandez, C., Tejero-Gonzalez, C. M., del Campo-Vecino, J. & Bavaresco, N. (2014). The concurrent validity and reliability of a low-cost, high-speed camera-based method for measuring the flight time of vertical jumps. *J Strength Cond Res*, 28(2), 528-533. doi:10.1519/JSC.0b013e318299a52e.
- Barker-Ruchti, N., Kerr, R., Schubring, A., Georgia Cervin, G. & Nunomura, M. (2017). “Gymnasts Are Like Wine, They Get Better With Age”: Becoming and Developing Adult Women’s Artistic Gymnasts. *Quest*, 69(3), 348-365. doi:10.1080/00336297.2016.1230504.
- Bartmuß, H.-J. (1998). Turnvater“ Friedrich Ludwig Jahn und die Befreiungskriege. Retrieved from [http://www.jahn-museum.de/images/jahn/wissenschaft/bartmuss\\_befreiungskriege.pdf](http://www.jahn-museum.de/images/jahn/wissenschaft/bartmuss_befreiungskriege.pdf)
- Bauersfeld, K.-H. & Schröter, G. (1979). *Grundlagen der Leichtathletik* (Vol. 6. aktualisierte Auflage 2016). Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Baxter-Jones, A. (2019). Physical Growth and Development in Young Athletes: Factors of Influence and Consequence. *Kinesiology Review*, 8(3), 211–219. doi:10.1123/kr.2019-0024.

- Baxter-Jones, A., Mafulli, N. & Mirwald, R. L. (2003). Does Elite Competition Inhibit Growth and Delay Maturation in Some Gymnasts? Probably not. *Pediatric Exercise Science*, 15.
- Bortoleto, M. A. (2019). *The Importance of Technology for Artistic Gymnastics*. Paper presented at the 13. Freiburger Gerätturntage, Freiburg im Breisgau.
- Boyer, E., Miltenberger, R. G., Batsche, C. & Fogel, V. (2009). Video modeling by experts with video feedback to enhance gymnastics skills. *J Appl Behav Anal*, 42(4), 855-860. doi:10.1901/jaba.2009.42-855.
- Bradshaw, E. J. (2004). Target-directed running in gymnastics: a preliminary exploration of vaulting. *Sports Biomech*, 3(1), 125-144. doi:10.1080/14763140408522834.
- Bradshaw, E. J. & Le Rossignol, P. (2004). Anthropometric and biomechanical field measures of floor and vault ability in 8 to 14 year old talent-selected gymnasts. *Sports Biomech*, 3(2), 249-262. doi:10.1080/14763140408522844
- Brehmer, S. & Naundorf, F. (2011). Age related development of run up velocity on vault. *SCI GYMNI*, 3(3), 19-27.
- Brehmer, S. & Naundorf, F. (2014). *Key parameters of the 2nd flight phase of the Tsukahara with salto backward piked*. Paper presented at the 32nd International Conference of Biomechanics in Sports, Johnson City, TN, USA.
- Brüggemann, G. P. (2005). *Biomechanical and Biological Limits in Artistic Gymnastics*. Paper presented at the International Symposium of Biomechanics in Sports, Beijing, China.
- Bučar Pajek, M., Čuk, I., Pajek, J., Kovač, M. & Leskošek, B. (2013). Is the Quality of Judging in Women Artistic Gymnastics Equivalent at Major Competitions of Different Levels? *J Hum Kinet*, 37, 173-181. doi:10.2478.
- Bührle, M. (1989). Maximalkraft - Schnellkraft - Reaktivkraft: Kraftkomponenten und ihre dimensionale Struktur. *Sportwissenschaft*, 19(3), 311-325.
- Caine, D., Bass, S. L. & Dali, R. (2003). Does Elite Competition Inhibit Growth and Delay Maturation in Some Gymnasts? Quite Possibly. *Pediatr Exerc Sci*, 15, 360-372.
- Campos, M. J. A. (2009). The importance of the swallow on structuring and valuing rings exercises of mens artisite gymnastics. *Palestrica Mileniului III – Civilizație și Sport*, 10(2), 190-195.
- Cartoni, A. C., Minganti, C. & Zelli, A. (2005). Gender, Age, and Professional-Level Differences in the Psychological Correlates of Fear of Injury in Italian Gymnasts. *J. Sport Behav.*, 28 (1), 3-17.

- Cheuvront, S. N., Carter, R., Keith, C., DeRuisseau, K. C. & Moffatt, R. J. (2005). Running Performance Differences between Men and Women. An Update. *Sports Med*, 35(12), 1017-1024.
- Cowell, J. F., Cronin, J. & Brughelli, M. (2012). Eccentric Muscle Actions and How the Strength and Conditioning Specialist Might Use Them for a Variety of Purposes. *Strength Cond J*, 34(3), 33–48. doi:10.1519/SSC.0b013e318253f578.
- Čuk, I. & Ferkolj, S. M. (2008). Changes in Technique of Handspring Double Salto Forward Tucked Performed on Horse and Vaulting Table. *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis*, 13, 20-31.
- Debaere, S., Jonkers, I. & Delecluse, C. (2013). The contribution of step characteristics to sprint running performance in high-level male and female athletes. *J Strength Cond Res*, 27(1), 116-124. doi:10.1519/JSC.0b013e31825183ef.
- Delecluse, C., Van Coppenolle, H., Willems, E., Van Leemputte, M., Diels, R. & Goris, M. (1995). Influence of high-resistance and high-velocity training on sprint performance. *Med Sci Sports Exerc*, 27(8), 1203-1209.
- Dowdell, T. (2010). Characteristics of Effective Gymnastics Coaching. *SCI GYM J*, 2(1), 15-24.
- Fetzer, J., Milbrandt, J., Karg, S., Hirsch, A. & Wüstemann, S. (2007). Rahmentrainingskonzeption Nachwuchs Gerätturnen männlich. Retrieved from <http://www.btb-kutu.de/Service/2008/Rahmentrainingskonzeption.PDF>
- FIG. (2017a). *Code of Points MAG (2017 - 2020)*. Lausanne: FIG.
- FIG. (2017b). *Code of Points WAG (2017 - 2020)*. Lausanne: FIG.
- FIG. (2019a). Apparatus Norms IV Testing procedures. Retrieved from [https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en\\_Apparatus%20Norms%20IV%20Testing%20procedures.pdf](https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_Apparatus%20Norms%20IV%20Testing%20procedures.pdf)
- FIG. (2019b). FIG Apparatus Norms. Retrieved from [https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en\\_Apparatus%20Norms.pdf](https://www.gymnastics.sport/publicdir/rules/files/en_Apparatus%20Norms.pdf)
- French, D. N., Gomez, A. L., Volek, J. S., Rubin, M. R., Ratamess, N. A., Sharman, M. J., . . . Kraemer, W. J. (2004). Longitudinal Tracking of Muscular Power Changes of NCAA Division I Collegiate Women Gymnasts. *J Strength Cond Res*, 18(1), 101-107.
- Fujihara, T. (2016). *Run-up Velocity in Gymnastics Vaulting*. Paper presented at the 34th International Conference of Biomechanics in Sport, Tsukuba.
- Gagné, M., Ryan, R. M. & Bargmann, K. (2003). Autonomy Support and Need Satisfaction in the Motivation and Well-Being of Gymnasts. *J Appl Sport Psychol*, 15, 372-390.

- Glasheen, J. W. & McMahon, T. A. (1995). Arms are different from legs: mechanics and energetics of human hand-running. *J Appl Physiol*, 78(4), 1280-1287. doi:10.1152/jappl.1995.78.4.1280.
- Grandjean, B. D., Taylor, P. & Weiner, J. (2002). Confidence, Concentration, and Competitive Performance of Elite Athletes: A Natural Experiment in Olympic Gymnastics. *J Sport Exerc Psychol*, 24, 320-327.
- Güllich, A. & Krüger, M. (2013). *Sport. Das Lehrbuch für das Sportstudium*. Berlin: Springer Spektrum.
- Güllich, A. & Schmidtbleicher, D. (1999). Struktur der Kraftfähigkeiten und ihrer Trainingsmethoden. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, Jahrgang 50(7/8)*, 223-234.
- Hagger, M. S. & Chatzisarantis, N. L. D. E. (2007). *Intrinsic motivation and self-determination in exercise and sport*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Hiley, M., Zuevsky, V. & Yeadon, M. (2013). Is skilled technique characterized by high or low variability? An analysis of high bar giant circles. *Hum Movement Sci*, 32(1), 171-180. doi:10.1016/j.humov.2012.11.007.
- Hübner, K. (2009). *Veränderung der Explosivkraft der unteren Extremitäten in Abhängigkeit vom Widerstand: Studie bei Schweizer Spitzensportlern aus Sportarten mit hohem Explosivkraftanteil*. (Dissertation), Universität Leipzig, Leipzig.
- Irwin, G. & Kerwin, D. G. (2007). Inter-segmental coordination in progressions for the longswing on high bar. *Sports Biomech*, 6(2), 131-144. doi:10.1080/14763140701323117.
- Irwin, G. & Kerwin, D. G. (2009). The influence of the vaulting table on the handspring front somersault. *Sports Biomech*, 8(2), 114-128. doi:10.1080/14763140902745027.
- Jemni, M. (2018a). Motor learning in gymnastics. In M. Jemni (Ed.), *The science of gymnastics. Advanced Concepts* (pp. 223-224). Abingdon: Routledge.
- Jemni, M. (2018b). Physiology for gymnastics. In M. Jemni (Ed.), *The science of Gymnastics. Advanced Concepts* (pp. 3-4). Abingdon: Routledge.
- Jemni, M. (2018c). Specific physical and physiological assessments of gymnasts. In M. Jemni (Ed.), *The science of gymnastics. Advanced Concepts* (pp. 55-61). Abingdon: Routledge.
- Jemni, M., Friemel, F., Lechevalier, J.-M. & Origas, M. (2000). Heart rate and blood lactate concentration analysis during a high level men's gymnastics competition. *J Strength Cond Res*, 14(4), 389-394.

- Jemni, M., Sands, W. A., Friemel, F., Stone, M. H. & Cooke, C. B. (2006). Any effect of gymnastics training on upper-body and lower-body aerobic and power components in national and international male gymnasts? *J Strength Cond Res*, 20(4), 899-907. doi:10.1519/R-18525.1.
- Knoll, K. (1999). *Entwicklung von Biomechanischen Messplätzen und Optimierung der Sporttechnik im Kunstturnen*. Köln: Sport und Buch Strauss.
- Knoll, K. (2004). Aufbau und Erhalt des Drehimpulses bei Absprüngen und Abdrücken in technisch-akrobatischen Sportarten. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft*, 11(1), 72-83.
- Knoll, K., Knoll, K. & Köthe, T. (2000). Grenzen der Leistungsfähigkeit des Menschen in den technisch-kompositorischen Sportarten. *Leistungssport*, 1/2000, 33-38.
- Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *J Biomech*, 33(10), 1197-1206. doi:10.1016/s0021-9290(00)00064-6
- Koperski, A., Kochanowicz, A. & Słodkowski, C. (2010). Gymnasts' Special Quickness-Force Abilities and the Indicators of Jump from a Springboard. *Baltic Journal of Health and Physical Activity*, 2(2), 139-142.
- Krug, J., Knoll, K., Köthe, T. & Zocher, H.-D. (1998). *Running Approach Velocity and Energy Transformation in Difficult Vaults in Gymnastics*. Paper presented at the XVI International Symposium of Biomechanics in Sports, Konstanz.
- Lange, B., Halkin, A. S. & Bury, T. (2005). Exigences Physiologiques necessaires a la Pratique de la Gymnastique de Haut Niveau. *Rev Med Liege*, 60(12), 939-945.
- Lee, C. (1982). Self-efficacy as a Predictor of Performance in Competitive Gymnastics. *J Sport Psychol*, 4, 405-409.
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N. & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol*, 116(6), 1091-1116. doi:10.1007/s00421-016-3346-6.
- Major, J. J. (1996). Strength training fundamentals in gymnastics conditioning. *Technique*, 16(8), 1-15.
- Malina, R. M., Baxter-Jones, A., Armstrong, N., Beunen, G. P., Caine, D., Daly, R. M., . . . Russell, K. (2013). Role of Intensive Training in the Growth and Maturation of Artistic Gymnasts. *Sports Med*. doi:10.1007/s40279-013-0058-5.
- Marina, M. (2018). Jumping skills. Importance, assessment and training. In M. Jemni (Ed.), *The science of Gymnastics. Advanced concepts* (pp. 62-69). Abingdon: Routledge.



- Marinšek, M. (2009). Landing Characteristics in Men's Floor Exercise on European Championships 2004. *SCI GYM J*, 1(1), 31 -39.
- McNeal, J. R., Sands, W. A. & Shultz, B. B. (2007). Muscle activation characteristics of tumbling take-offs. *Sports Biomech*, 6(3), 375-390. doi:10.1080/14763140701491393.
- Meyers, R. W., Oliver, J. L., Hughes, M. G., Lloyd, R. S. & Cronin, J. B. (2017). New Insights Into the Development of Maximal Sprint Speed in Male Youth. *Strength Cond J*, 39 (2), 2-10.
- Mills, C., Yeadon, M. & Pain, M. (2010). Modifying landing mat material properties may decrease peak contact forces but increase forefoot forces in gymnastics landings. *Sports Biomech*, 9(3), 153-164. doi:10.1080/14763141.2010.524244.
- Miltiadis, P., Fotios, M. & Michalis, P. (2012). Proposal of Psychological Preparation in Artistic Gymnastics. *SCI GYM J*, 4(2), 53-64.
- Naundorf, F., Brehmer, S., Knoll, K., Bronst, A. & Wagner, R. (2008). *Development of the velocity for vault runs in artistic gymnastics for the last decade*. Paper presented at the 26th ISBS Conference, Seoul.
- Naundorf, F., Brehmer, S., Körner, S. & Seidel, I. (2017). Analyse aktueller Entwicklungstendenzen im Gerätturnen. In J. Wick, I. Seidel, & D. Büsch (Eds.), *Olympiaanalyse Rio 2016* (pp. 129-141). Leipzig: Meyer & Meyer Verlag.
- Prassas, S., Kwon, Y. H. & Sands, W. A. (2006). Biomechanical research in artistic gymnastics: A review. *Sports Biomech*, 5(2), 261-291.
- Rodríguez, F. A., Marina, M. & Boucharin, E. (1999). *Physiological demands of women's competitive gymnastic routines*. Paper presented at the 4th Annual Congress of the European College of Sport Science, Rome.
- Ryan, R. M. & Deci, E. L. (2000). Self-Determination Theory and the Facilitation of Intrinsic Motivation, Social Development, and Well-Being. *Am. Psychol*, 55(1), 68-78. doi:10.1037/110003-066X.55.1.68.
- Sands, W. A. (2000). Injury Prevention in Women's Gymnastics. *Sports Med*, 30(5), 359-373.
- Sands, W. A. (2018). Fundamental concepts and definitions in motor learning. In M. Jemni (Ed.), *The science of gymnastics. Advanced concepts*. (pp. 226-227). Abingdon: Routledge.
- Sands, W. A. & McNeal, J. R. (2000). Enhancing flexibility in gymnastics. *Technique*, 20, 6-9.

- Sands, W. A., McNeal, J. R., Penitente, G., Murray, S. R., Nassar, L., Jemni, M., . . . Stone, M. H. (2016). Stretching the Spines of Gymnasts: A Review. *Sports Med*, 46(3), 315-327. doi:10.1007/s40279-015-0424-6
- Schack, T. & Bar-Eli, M. (2007). Psychological Factors of Technical Preparation. In B. L. Blumenstein, R.; Tenenbaum, G (Ed.), *Psychology of Sport Training. Perspectives on Sport and Exercise Psychology* (Vol. 2, pp. 62-103). Aachen: Meyer & Meyer.
- Schärer, C. & Hübner, K. (2016). Accuracy of prediction of maximum resistance at increased holding times based on a three seconds maximum static strength test of the three main strength elements on rings. *SCI GYMNI*, 8(2), 125-134.
- Schnabel, G., Harre, H.-D. & Krug, J. (2008). *Trainingslehre - Trainingswissenschaft. Leistung, Training, Wettkampf*. Aachen: Meyer & Meyer Verlag.
- Šibanc, K., Kalichová, M., Hedbávný, P., Bučar Pajek, M. & Čuk, I. (2017). Comparison of morphological characteristics of top level male gymnasts between the years of 2000 and 2015. *SCI GYMNI*, 9(2), 201 - 211.
- Suchomel, T. J., Nimphius, S., Bellon, C. R. & Stone, M. H. (2018). The Importance of Muscular Strength: Training Considerations. *Sports Med*, 48(4), 765-785. doi:10.1007/s40279-018-0862-z
- Thibault, V., Guillaume, M., Berthelot, G., El Helou, N., Schaal, K., Quinquis, L., . . . Toussaint, J.-F. (2010). Women and men in sport performance: The gender gap has not evolved since 1983. *J Sport Sci Med*, 9, 214-223.
- Veličković, S., Petković, D. & Petković, E. (2011). A Case Study about Differences in Characteristics of the Run-up Approach on the Vault between Top-Class and Middle-Class Gymnasts. *SCI GYMNI*, 3(1), 25-34.
- Xiao, X., Hao, W., Li, X., Wan, B. & Shan, G. (2017). The influence of landing mat composition on ankle injury risk during a gymnastic landing: a biomechanical quantification. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 19(1). doi:10.5277/ABB-00583-2016-02.

## Danksagung

Im Jahr 2013 erhielt ich glücklicherweise die Möglichkeit, an der EHSM in Zusammenarbeit mit der Universität Freiburg mein Doktorat zu absolvieren. Dafür möchte ich mich bei der EHSM-Leitung aber insbesondere bei einem meiner Doktorväter, Dr. Klaus Hübner, bedanken. Er hat mich bereits bei der Bachelor- und Masterarbeit aussergewöhnlich gut betreut, sich insbesondere im Jahr 2013 dafür eingesetzt, dass meine 50/50-Anstellung an der EHSM als wissenschaftlicher Mitarbeiter in Kombination mit dem Trainerposten im Nationalkader möglich wurde und mich schlussendlich auch während meiner Dissertation betreut. Dabei war er stets verfügbar, hat mir immer innert kürzester Zeit Rückmeldungen gegeben und durch seine Erfahrung und sein Wissen mein wissenschaftliches Arbeiten und Denken inspiriert. Zudem konnte er mich immer motivieren und hat mir geholfen, wenn eines meiner Projekte mal ins Stocken geraten war. Das ist sicherlich alles andere als selbstverständlich und hat den Abschluss meiner Dissertation überhaupt erst ermöglicht. Tausend Dank, lieber Klaus!

Ein weiterer grosser Dank gilt meinem «universitären Doktorvater» Prof. Dr. Wolfgang Taube. Er hatte, auch wenn ich ein «externer» Doktorand war, immer Zeit für meine Anliegen. Ausserdem hat er es mit seinen Anregungen immer verstanden, meine teilweise hochkomplexen und mit Kunstturnbegriffen gespickten Manuskripte allgemein verständlicher zu machen, auf den Punkt zu bringen und so «suitable for publication» zu machen.

Ein grosses «Dankeschön» gebührt auch meinen beiden Arbeitskollegen der «Gruppe Kraft» der EHSM, Dr. Micah Gross und Fabian Lüthy. Micah hat mich bei fast allen Studien bei den Messungen und Datenauswertungen unterstützt und war der «Proofreader» für alle Artikel. Fabian hat mich insbesondere bei den Themen Krafttraining und Schnelligkeitsentwicklung mit seinen Ideen inspiriert.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei den Athleten und Trainern des Schweizerischen Kunstturnnationalkaders bedanken, einerseits für ihr mir entgegengebrachtes Vertrauen und andererseits, dass sie an all meinen Studien teilgenommen haben. Ohne sie wäre diese Dissertation nicht zustande gekommen.

Einen letzten Dank möchte ich an meine Familie richten. Sie haben mir während den langen (fast) vier Jahren durch ihren Rückhalt die notwendige Kraft und Ausdauer gegeben, um das Projekt «Dissertation» abzuschliessen.

## Lebenslauf

### Angaben zur Person

Name: Schärer Christoph  
Geburtsdatum: 14.08.1980  
Zivilstand: Verheiratet, zwei Söhne (2016, 2019)  
Nationalität: Schweiz

### Ausbildung und akademische Grade

Seit 2016: Doktorat an der Eidgenössischen Hochschule für Sport in Magglingen (EHSM) in Kooperation mit der Universität Freiburg  
2012: Master of Science EHSM in Spitzensport  
2010: Bachelor of Science EHSM in Sports  
2000: Matura (Typus D) Deutsches Gymnasium Biel

### Ehrungen

2019: «Swiss Olympic Science Award» 2. Preis:  
«Sprints mit «optimalem» Zugwiderstand verbessern die Sprunganlauf- und Sprintgeschwindigkeit sowie die vertikale Sprungleistung bei Kunstturnerinnen»  
2018: «Swiss Olympic Science Award» 2. Preis:  
«Exzentrisches Krafttraining verbessert die Maximalkraft der oberen Extremitäten»  
2012: «Wissenschaftlicher Preis der EHSM» Beste Masterarbeit 2012:  
«Standardisierte Bodenübung im Kunstturnen. Zusammenhang zwischen Sprunghöhen einer Serie von sieben Salti rückwärts gestreckt und physiologischen Parametern»  
2010: «Wissenschaftlicher Preis der EHSM» Beste Bachelorarbeit 2010:  
«Auswirkungen zweier Kraftprogramme auf die Haltezeit und Ausführungsqualität von Ringkraftelementen»

### Berufliche Tätigkeiten

Seit 09.2016: Wissenschaftlicher Mitarbeiter EHSM (50%) und Doktorand EHSM / Universität Freiburg (50%)  
06.2013-08.2016: Wissenschaftlicher Mitarbeiter EHSM (50%) und Trainer Nationalkader Kunstturnen Männer (50%)  
01.2009-12.2012: Trainer Kunstturnen Männer Regionales Leistungszentrum Solothurn  
01.1999-12.2008: Mitglied der Schweizerischen Kunstturnnationalmannschaft

### Besondere Kenntnisse

Diplomierter Trainer Spitzensport, Trainerbildung Schweiz

## Publikationsverzeichnis

- Hübner, K. & Schärer, C. (2015). Relationship between the Elements Swallow, Support Scale and Iron Cross on rings and their specific preconditioning strengthening exercises. *Science of Gymnastics Journal*, 7(3): 59-68.
- Citation: Schärer, C., Haller, N., Taube, W., Hübner, K. (2019). Physical determinants of vault performance and their age-related differences across male junior and elite top-level gymnasts. *PLOS ONE* 14(12): e0225975. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225975>
- Schärer, C. & Hübner, K. (2016). Accuracy of prediction of maximum resistance at increased holding times based on a three seconds maximum static strength test of the three main strength elements on rings, *Science of Gymnastics Journal*, 8(2): 125-134.
- Schärer C, Lehmann T, Naundorf F, Taube W, Hübner K (2019). The faster, the better? Relationships between run-up speed, the degree of difficulty (D-score), height and length of flight on vault in artistic gymnastics. *PLoS ONE* 14(3): e0213310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213310>.
- Schärer C, Tacchelli L, Göpfert B, Gross M, Lüthy F, Taube W, Hübner K (2019). Specific eccentric-isokinetic cluster training improves static strength elements on rings of elite gymnasts. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16, 4571; doi:10.3390/ijerph16224571.
- Schärer C, von Siebenthal L, Lomax I, Gross M, Taube W, Hübner K (2019). Simple Assessment of Height and Length of Flight in Complex Gymnastic Skills: Validity and Reliability of a Two-Dimensional Video Analysis Method. *Applied Sciences*, 9(19), 3975; <https://doi.org/10.3390/app9193975>.

## Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel «Citius, altius? Verhältnis zwischen Schwierigkeitsindex, Anlaufgeschwindigkeit und konditionellen Voraussetzungen in verschiedenen Altersklassen beim Pferdsprung im Elite-Kunstturnen – Fortius! Wirkung von spezifischem exzentrischem Training auf Kraftelemente an den Ringen» ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs- beziehungsweise Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Magglingen, den 23.03.2020



Christoph Schärer