

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM

Fakultät für Sportwissenschaft

Lehr- und Forschungsbereich Trainingswissenschaft

**Der Aufschlag im Nachwuchsleistungstennis –
Leistungsstruktur, Bewegungsanalyse und orthopädische
Beanspruchung**

Von der Fakultät für Sportwissenschaft der Ruhr-Universität Bochum
genehmigte kumulative Dissertation zur Erlangung des
akademischen Grades eines Doktors der Sportwissenschaft
im Fach Trainingswissenschaft

vorgelegt von

Janina Fett

janina.fett@rub.de

Gutachter

Prof. Dr. Alexander Ferrauti

Prof. Dr. Daniel Hahn

Prof. Dr. Tobias Vogt

Eingereicht am 30.06.2022

Disputation am 13.12.2022

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Urheberschaftserklärung	II
Danksagung	III
1 Einleitung	4
2 Theoretischer Hintergrund	5
2.1 Leistungsstruktur des Tennisaufschlags	7
2.2 Bewegungsanalytische Aspekte des Tennisaufschlags	9
2.3 Orthopädische Beanspruchung im Tennis unter besonderer Berücksichtigung des Tennisaufschlags	14
3 Arbeitsprogramm und Zielstellung	18
3.1 Studienübersicht.....	19
4 Publikationen	20
4.1 Artikel 1	21
4.2 Artikel 2.....	22
4.3 Artikel 3.....	23
5 Gesamtdiskussion	24
6 Schlussfolgerungen und Praxisempfehlungen	36
7 Zusammenfassung	40
7.1 Abstract	42
8 Literaturverzeichnis	45
9 Abbildungsverzeichnis	56
10 Abkürzungsverzeichnis	57
11 Anhang	58

Urheberschaftserklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich die eingereichte kumulative Dissertation selbstständig und ohne andere als die angegebenen Co-Autor*innen, Quellen, Hilfsmittel (z. B. Auswertungsprogramme) und Unterstützung durch Publikations-, Statistik-, Übersetzungs- oder ähnliche Dienste verfasst habe. Aus bereits publizierten Quellen direkt oder indirekt übernommene Aussagen, Konzepte, Daten, Grafiken und Tabellen etc. sind unter Angabe der Quellen gekennzeichnet; ganz oder annähernd wörtlich entnommene Stellen sind deutlich als solche kenntlich gemacht. Außerdem versichere ich, dass die vorgelegte elektronische mit der schriftlichen Version der Dissertation übereinstimmt und die Abhandlung in dieser oder ähnlicher Form noch nicht anderweitig als Promotions- oder sonstige Prüfungsleistung bei einer akademischen oder staatlichen Abschlussprüfung vorgelegt und bewertet wurde.

Ein besonderer Dank gilt meinem Erstbetreuer Prof. Dr. Alexander Ferrauti sowie meinem Zweitbetreuer Prof. Dr. Daniel Hahn, die mir stets mit wertvollem und professionellem Rat zur Seite standen.

Eine detaillierte Darstellung der Co-Autorenbeiträge ist im Anhang dokumentiert. Die englischen Manuskripte der Zeitschriftenartikel wurden vor der Einreichung jeweils durch den Proofreading Service Scribendi (<https://www.scribendi.com>) sprachlich Korrektur gelesen.

Einige Teilstudien dieses Promotionsvorhabens wurden durch das Bundesinstitut für Sportwissenschaft (<https://www.bisp.de>) gefördert. Die Forschung wurde im Rahmen des Serviceforschungsprojekts „Der schnelle Arm im Tennis – trainings- und bewegungswissenschaftliche Analysen zur Optimierung der Aufschlagqualität im Nachwuchstennis“ (ZMVI4-072017/16) realisiert. Die Projektleiter Prof. Dr. Alexander Ferrauti und Prof. Dr. Daniel Hahn (Ruhr-Universität Bochum) waren für die Einwerbung der Fördermittel verantwortlich. Darüber hinaus sind Teilstudien innerhalb eines langjährigen Kooperationsprojekts mit dem Deutschen Tennis Bund – Der DTB-Konditionstest – umgesetzt worden.

Ein Zeitschriftenartikel wurde mithilfe des Open Access Publikationsfonds der Ruhr-Universität Bochum unter der Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0) veröffentlicht.

Die Untersuchungen wurden von den lokalen Ethikkommissionen der Medizinischen Fakultät (4621-13) bzw. der Fakultät für Sportwissenschaft der Ruhr-Universität Bochum (EKS24072017) genehmigt und nach den Richtlinien der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

Bochum, den 30.06.2022

Ort, Datum



Janina Fett

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Alexander Ferrauti, der mich für die Trainingswissenschaft und das wissenschaftliche Arbeiten begeistern konnte und somit meine akademische Laufbahn prägte. Als Betreuer und Doktorvater stand er mir jederzeit mit seiner Expertise zur Seite und unterstützte mich mit seiner konstruktiven Kritik in allen Belangen bei der Erstellung dieser Arbeit. Dank seiner unermüdlichen Unterstützung hat er einen Großteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein großer Dank gebührt auch den aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehr- und Forschungsbereichs Trainingswissenschaft, die mir mit ihrer Expertise, ihrem Rat und auch als Freunde unterstützend zur Seite standen. Insbesondere möchte ich Jo-Lam Vuong, Dr. Christoph Schneider, Dr. Florian Hanakam, Antonia Edel, Dr. Thimo Wiewelhove, Nicola Volk, Dr. Alexander Ulbricht, Dr. Christian Raeder, Dr. Jennifer Kappenstein, Heike Wiehe-Bilda und Monika Plaumann-Damberg für die beste Zusammenarbeit und große Hilfe danken.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Dr. Alexander Ulbricht bedanken, der mich im Rahmen eines wissenschaftlichen Praktikums für die „DTB-Tour“ begeistern konnte, die wir jahrelang gemeinsam mit Jo-Lam Vuong bestritten haben und die u. a. der Datengenerierung dieser Arbeit diente. Auch Jo-Lam Vuong danke ich herzlich für seine unschätzbare Unterstützung und für unzählige, spaßige Tennis-Touren quer durch die Bundesrepublik. In diesem Zusammenhang möchte ich mich auch bei den vielen Studierenden bedanken, die die Touren begleitet haben, insbesondere bei Nils Oberschelp und Thea Fühner. Ebenso danke ich dem Deutschen Tennis Bund und den Verantwortlichen der Landesverbände für die gute Zusammenarbeit und den Proband*innen für ihre Teilnahme.

Von ganzem Herzen danke ich vor allem meiner Familie, allen voran meinen Eltern, die mich bedingungslos unterstützen, mir die akademische Ausbildung ermöglichten sowie stets mit Vertrauen und Liebe zur Seite stehen. Insbesondere auch während der Fertigstellung dieser Arbeit haben sie mir stets den Rücken freigehalten. Ganz besonderen Dank dafür, dass sie immer das Beste für mich tun. Auch möchte ich mich herzlich bei meinen Geschwistern für ihre Unterstützung und stets aufmunternden Worte bedanken – insbesondere bei Daniela Fett. Ein weiterer Dank gilt Birgit Herrmann-Fischer und Wolfgang Fischer, die mich in jeder Hinsicht unterstützen und mir immer mit Rat und Tat zur Seite stehen. Weiter möchte ich mich auch bei Karin Freund bedanken, ohne die ich wahrscheinlich schon bei der Aufnahmeprüfung zum Studium am Turnreck gescheitert wäre.

Darüber hinaus danke ich der Konrad-Adenauer-Stiftung für jegliche finanzielle und ideelle Förderung.

1 Einleitung

Der Tennissport erlebte in den letzten beiden Jahrzehnten eine rasante Entwicklung, da insbesondere durch die Steigerung der Schlaggeschwindigkeit das Spiel technisch und athletisch anspruchsvoller geworden ist (Abrams et al., 2011; Kovacs, 2007; Weber et al., 2010). Aufgrund der grundsätzlich komplexen Leistungsstruktur des Tennissports und der nunmehr zusätzlich gestiegenen Belastung und Beanspruchung (external und internal Load) sind moderne Konzepte der Leistungssteuerung für Leistungssteigerung und Verletzungsprophylaxe unverzichtbar.

Der Tennisaufschlag stellt nach Meinung zahlreicher Expert*innen heutzutage den wichtigsten und spielentscheidendsten Schlag im Tennis dar (Martin et al., 2014; Reid et al., 2010). Daher richtet sich ein großes Interesse der Trainer*innen, Spieler*innen, Sportwissenschaftler*innen, Physiotherapeut*innen und Athletiktrainer*innen auf eine Optimierung dieser einzigartigen und hochkomplexen Schlagbewegung, die als einzige Bewegung unter vollständiger Kontrolle und ohne Gegnereinwirkung stattfindet. Die zunehmende leistungslimitierende Bedeutung einer hohen Aufschlaggeschwindigkeit einerseits und die mit dem Aufschlag einhergehende Verletzungsinzidenz und -prävalenz bringen Trainer- und Betreuer*innen im Nachwuchsleistungssport in ein Dilemma hinsichtlich der Priorisierung von Trainingszielen. Nach dem theoretischen Modell der wissenschaftlichen Leistungssteuerung müssen für eine zielgerichtete Optimierung der Trainingsqualität im Rahmen der Trainingssteuerung daher in einem ersten Schritt die für die Aufschlagleistung relevanten Prädiktoren identifiziert und hierarchisiert werden. Aufbauend auf der Definition grundsätzlicher Leitlinien eröffnet die individuelle Leistungsdiagnostik die Chance zur Identifizierung möglicher Leistungsreserven (Ferrauti, 2020).

Besondere Aufmerksamkeit gebührt in diesem Kontext den athletischen, anthropometrischen sowie kinematischen Einflussgrößen der Aufschlaggeschwindigkeit, der Betrachtung kinematischer Bewegungsmerkmale verschiedener Aufschlagstechniken (Vergleich der Aufschlagseiten) sowie der Auseinandersetzung mit Verletzungsprävalenzen für die am Aufschlag primär beteiligten Strukturen des aktiven und passiven Bewegungsapparats. Ziel der vorliegenden Dissertation ist es daher, sich dem Forschungsfeld mittels eines mehrstufigen untersuchungsmethodisch variablen Zugangs zu nähern und aus den Ergebnissen praxisnahe Handlungsempfehlungen hinsichtlich dieser aufgeführten Einflussgrößen des Tennisaufschlags abzuleiten. Die zugrundeliegenden Fragestellungen wurden in drei aufeinander aufbauenden Studien untersucht und deren Ergebnisse in drei internationalen wissenschaftlichen Fachjournals veröffentlicht.

2 Theoretischer Hintergrund

Der professionelle Tennissport zeigt hinsichtlich seiner Spielentwicklung in den vergangenen Dekaden eine Veränderung von einer vorrangig technikdominierten Sportart zu einer solchen, die athletisch deutlich anspruchsvoller geworden ist. Schnellere Aufschläge, kürzere Ballwechsel sowie ein erhöhter Zeitdruck für Grundschläge kennzeichnen diese Veränderungen zum heutigen modernen Tennissport (Kovacs, 2007; Weber et al., 2010; Weber & Born, 2012; Wong et al., 2014). Nach Meinung vieler Expert*innen ist der Aufschlag der bedeutsamste Schlag im professionellen Tennissport, der häufig über Sieg oder Niederlage entscheidet (Elliott et al., 1995; Ferrauti et al., 2018; Girard et al., 2005; Reid et al., 2010; Vuong 2017). Des Weiteren nimmt er auch im Hinblick auf die verschiedenen Schlagtechniken im Tennis eine besondere Stellung ein, da er als geschlossene Bewegung ohne Gegnereinwirkung und Zeitdruck zugleich die erste Möglichkeit zum Punktgewinn darstellt (Koya et al., 2022; Kovacs & Ellenbecker, 2011a; Oberschelp, 2017).

Die Generierung hoher Aufschlaggeschwindigkeiten scheint eines der Hauptelemente für den Spielerfolg zu sein. So werden im heutigen Herrentennis konstante Aufschlaggeschwindigkeiten von 200 km/h gemessen (Behringer et al., 2013; Girard et al., 2005; Kovacs & Ellenbecker, 2011a; Vaverka & Cernosek, 2013). Analysen der Grand Slam Turniere (French Open) von 2002 zu 2009 zeigten erhebliche Zunahmen der Aufschlaggeschwindigkeiten im Herrentennis ($165,1 \pm 8,6$ km/h vs. $188,9 \pm 11,7$ km/h). Gleichermäßen stieg die Zahl der Asse pro Match ($2,2 \pm 0,6$ vs. $8,6 \pm 6,8$) sowie die Wahrscheinlichkeit des Punktgewinns bei einer Spieleröffnung mit dem 1. Aufschlag (67,4 % vs. 71,5 %) (Cross & Pollard, 2009; Weber et al., 2010). Des Weiteren zeigt sich ebenfalls eine eindeutige Entwicklung zu einer erhöhten Variabilität der Aufschlagrichtung (nach außen, in die Spielfeldmitte oder auf den Körper). Sind in jüngeren Jahren hier vor allem die Richtungen auf die vermeintlich schwächere Rückhandseite des Gegners priorisiert, so lässt sich nun eine höhere Variabilität in der Aufschlagrichtung mit einhergehendem Anstieg in der Aufschlaggültigkeit erkennen (Weber et al., 2010). Folglich nehmen somit auch Faktoren wie Präzision und Differenzierungsfähigkeit im Mosaik der leistungsbeeinflussenden Faktoren an Bedeutung zu (Kolman et al., 2021). Aufgrund einer Verkürzung der Ballwechseldauer und damit einhergehend einer Verringerung der Schlaghäufigkeit pro Ballwechsel (Weber et al., 2010) zeigt sich, dass der Aufschlag auch quantitativ an Bedeutung gewinnt (Ferrauti et al., 2018). Spielanalytische Untersuchungen bei heranwachsenden Juniorenspieler*innen ergaben dabei eine steigende Bedeutung des Aufschlags im Altersgang von den jüngeren zu den älteren Klassen (z. B. von der U12 bis zur U16 bzw. U18) (Hizan et al., 2017).

Neben diesen spielanalytischen Faktoren untermauern auch korrelationsanalytische Studienergebnisse die Bedeutsamkeit des Aufschlags für die komplexe Spielleistung im Tennis (Sögüt, 2016; Ulbricht et al., 2016). In Untersuchungen von Ulbricht et al. (2016) zeigte sich deutlich, dass die Aufschlaggeschwindigkeit und die Weite bei Medizinballwürfen aus einer Vielzahl an konditionellen Teilfaktoren den höchsten Zusammenhang zur Ranglistenposition aufwiesen. Ebenfalls ließen die Ergebnisse erkennen, dass bereits leistungsselektierte nationale Kaderspieler*innen in diesen Parametern signifikante Unterschiede zu ihren gleichaltrigen Mitspieler*innen auf niedrigerem regionalen Selektionsniveau aufwiesen (Kramer et al., 2016; Ulbricht et al., 2016). Vergleichbare Ergebnisse ermittelten auch Kramer und Kollegen (2017) im europäischen Ausland. In ihren Untersuchungen zum Aufklärungspotenzial aktueller und zukünftiger Tennis-Performance (abhängige Variable: Ranglistenplatzierung) ist u. a. ebenfalls die Schnellkraft („upper body power“) als bedeutsamer Prädiktor ausgewiesen (Kramer et al., 2017).

Aufgrund der beschriebenen Bedeutsamkeit des Tennisaufschlags auf die komplexe Wettkampfleistung sowie seiner Besonderheit der weitgehenden Autonomie (fehlende Gegnereinwirkung und fehlender Zeitdruck) der Schlagauführung erscheint eine Priorisierung der Aufschlagverbesserung zur Eröffnung von Leistungsreserven im Rahmen der langfristigen Leistungssteuerung bereits im Jugendalter dringend empfehlenswert. Andererseits zeigen hohe Verletzungsprävalenzen im Bereich des Schultergelenks bei Sportarten mit zahlreichen Wurf- und Überkopfschlagaktivitäten, dass eine Gratwanderung zwischen Leistungsoptimierung und Verletzungsprophylaxe notwendig erscheint.

Zusammenfassend kommen (1.) einer differenzierten Identifikation von grundlegenden leistungsbestimmenden Prädiktoren, (2.) einer vertieften kinematischen Betrachtung von Qualitätsmerkmalen verschiedener Aufschlagstechniken sowie (3.) auch der Auseinandersetzung mit möglichen limitierenden Faktoren und Verletzungsprävalenzen für die am Aufschlag primär beteiligten Elemente des aktiven und passiven Bewegungsapparats eine hohe Bedeutung für die Leistungssteuerung im Nachwuchstennis zu. Diese drei Aspekte bilden somit in den folgenden Kapiteln die Grundstruktur der theoretischen Auseinandersetzung mit der Thematik und werden ferner durch die drei im Zentrum stehenden internationalen Publikationen adressiert.

2.1 Leistungsstruktur des Tennisaufschlags

Die Zunahme einer leistungslimitierenden Bedeutung der Aufschlagqualität und insbesondere der Aufschlaggeschwindigkeit wird durch zahlreiche Studienergebnisse belegt (Girard et al., 2005; Ulbricht et al., 2016; Weber et al., 2010). So rücken neben den bedeutsamen technisch-taktischen sowie psychischen Leistungsfaktoren auch immer stärker athletische und anthropometrische Faktoren in den Vordergrund (Kovacs, 2007).

Daher ist es für die Trainingspraxis von hoher Relevanz, leistungsbestimmende Einflussgrößen auf die Aufschlagqualität, insbesondere die Aufschlaggeschwindigkeit, zu quantifizieren (Kolman et al., 2021) und entsprechende Leistungsstrukturmodelle zu entwickeln (Ferrauti, 2020). Eine frühzeitigere und zielgerichtete Fokussierung auf Interventionsbemühungen zur Verbesserung und Optimierung der Qualität des Aufschlags ist somit erstrebenswert. Allerdings fehlen alters- und geschlechtsspezifische Erkenntnisse über die hierfür erforderlichen konditionellen sowie anthropometrischen Voraussetzungen im Nachwuchsleistungstennis (Ferrauti et al., 2018).

Zur Identifizierung von Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit ist der Aufschlag bereits Gegenstand vieler wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen (Baiget et al., 2016; Elliott et al., 2003; Fernandez-Fernandez et al., 2013; Girard et al., 2005; Kovacs & Ellenbecker, 2011a; Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Viele Studien fokussierten hierbei vor allem biomechanische Aspekte der Bewegungsausführung mit dem Schwerpunkt auf kinematische Faktoren (z. B. Segment-, Winkel- und Rotationsgeschwindigkeiten, Range of Motion (ROM)) (Chow et al., 2009; Elliott et al., 1995; Elliott, 2006; Fleisig et al., 2003; Tanabe & Ito, 2007; Wagner et al., 2014; Whiteside et al., 2013b). Mittels dreidimensionaler Bewegungsanalyse können elementare Bewegungsparameter differenziert werden, um Ableitungen für eine Gestaltung des Aufschlagtrainings aus technischer und konditioneller Sicht vorzunehmen (Elliott et al., 2003; Vuong, 2017).

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung der vorliegenden Thematik innerhalb dieses Dissertationsvorhabens fokussierte nur eine begrenzte Zahl an wissenschaftlichen Untersuchungen die Beziehung zwischen anthropometrischen Charakteristika und konditionellen Faktoren, insbesondere Kraftparameter, und der Aufschlaggeschwindigkeit (Zeitraum 2016/2017). In diesem Kontext evaluierten die meisten Studien den Zusammenhang zwischen isokinetischen und isometrischen Kraftparametern der oberen sowie unteren Extremität und der Aufschlaggeschwindigkeit (Baiget et al., 2016; Cohen et al., 1994; Ellenbecker, 1991; Perry et al., 2004; Pugh et al., 2003; Signorile et al., 2005) und weniger den Zusammenhang zu funktionalen Performance-Tests/sportmotorischen Tests (z. B. Sprungkraft- und Wurfkrafttests) (Bonato et al., 2015).

Derartige Ergebnisse zeigten bislang ein uneinheitliches Bild bezüglich ihrer Prädiktionskraft für die Aufschlagleistung. Die vorliegenden Ergebnisse sind zum Teil kontrovers und folgen keinem einheitlichen Trend. Hinsichtlich der oberen Extremität konnten signifikante Zusammenhänge zwischen den isokinetischen Kraftwerten der Schulterinnen- und Schulteraußenrotation, der isokinetischen Kraft der diagonalen Wurfbewegung sowie der Ellenbogenextension zur Aufschlaggeschwindigkeit ermittelt werden (Cohen et al., 1994; Perry et al., 2004; Signorile et al., 2005). Gleichzeitig zeigten weitere Studienergebnisse keine Beziehungen hinsichtlich der isokinetischen Schulterinnen- und -außenrotation, Schulterflexion und -extension, Pronation/Supination des Unterarms, Handgelenksexension und -flexion sowie Handkraft zur Schlaggeschwindigkeit (Ellenbecker, 1991; Pugh et al., 2003). Bezogen auf isometrische Kraftparameter fanden Baiget et al. (2016) einen positiven Zusammenhang zwischen der Schulterinnenrotation und der Aufschlaggeschwindigkeit, allerdings nicht zu weiteren Parametern wie der isometrischen Kraft der Schulteraußenrotation, Schulterflexion und -extension, Ellenbogenflexion und -extension sowie Handgelenksexension und -flexion.

Bei Betrachtung des Zusammenhangs zwischen Parametern der unteren Extremität und der Aufschlagleistung zeigte der Großteil der Studien keinen direkten Prädiktionswert an, unabhängig von der eingesetzten Messmethodik. Untersuchungen von Bonato et al. (2015) (funktionaler Sprungkrafttest), Baiget et al. (2016) (isometrische Kniestreckung) als auch der Arbeitsgruppe von Pugh et al. (2003) (isokinetische Testung der Kniestrecker) konnten keine signifikanten Zusammenhänge zur Aufschlaggeschwindigkeit aufzeigen.

Neben den kontrovers diskutierten kraftbetonten Einflüssen auf die Aufschlagleistung kann ebenfalls der Einfluss anthropometrischer Faktoren zum Aufklärungsgrad der Aufschlagleistung beitragen. Erkenntnisse aus dem Profiteennisport zeigten bereits deutliche Zusammenhänge zur Körpergröße der Spieler*innen auf (Bonato et al., 2015; Sögüt, 2018; Vaverka & Cernosek, 2013). Untersuchungen von Gale-Watts & Nevill (2016) sowie Wong et al. (2014) ließen zudem auch den Einfluss des Body-Mass-Index auf die Spielleistung von professionellen männlichen Tennisspielern erkennen. Die publizierten Ergebnisse basieren jedoch überwiegend auf Untersuchungen, die mit erwachsenen Tennisspieler*innen oder sogar im Profiteennis durchgeführt wurden (Bonato et al., 2015; Gale-Watts & Nevill, 2016; Sögüt, 2018; Vaverka & Cernosek, 2013; Wong et al., 2014), nur wenige Studien fokussierten heranwachsende Nachwuchsspieler*innen (Sögüt, 2016), sodass sich die Frage der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den Juniorenbereich stellt. Eine detaillierte Analyse anthropometrischer Faktoren sowie eine differenzierte Betrachtung in Abhängigkeit verschiedener Altersklassen und des Geschlechts sind bislang nicht erfolgt.

Erst in den Folgejahren der vorliegenden Untersuchung schärfte sich das weitere Interesse an dieser Fragestellung hinsichtlich anthropometrischer und konditioneller Einflüsse auf die Aufschlaggeschwindigkeit – unter anderem auch im Nachwuchsleistungstennis (Colomar et al., 2020; Fernandez-Fernandez et al., 2019; Hayes et al., 2021; Koya et al., 2022; Palmer et al., 2018; Sánchez-Pay et al., 2021).

Problemstellung

Aufgrund der großen Bedeutung des Tennisaufschlags auf die komplexe Spielleistung im Tennis ist eine frühzeitige und zielgerichtete Fokussierung auf Trainingsinterventionen zur Verbesserung der Aufschlagqualität zu fordern. Eine differenzierte Betrachtung leistungslimitierender konditioneller und anthropometrischer Prädiktoren der Aufschlagleistung ist im Juniorenbereich bislang nur lückenhaft erfolgt und die vorliegenden Erkenntnisse folgen keinem einheitlichen Trend. Ziel der ersten Studie der vorliegenden kumulativen Dissertation war folglich die Identifikation und Quantifizierung des Einflusses von anthropometrischen und konditionellen Voraussetzungen für die Realisation hoher Aufschlaggeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht im Nachwuchsleistungstennis (Entwicklung eines Leistungsstrukturmodells).

2.2 Bewegungsanalytische Aspekte des Tennisaufschlags

Der Tennisaufschlag ist nicht nur einer der bedeutsamsten Schläge innerhalb der verschiedenen Schlagtechniken im Tennis, sondern auch – obwohl er als geschlossene Bewegung ohne Gegnereinwirkung und Zeitdruck ausgeführt wird – die am schwersten durchzuführende Bewegungstechnik (Kovacs & Ellenbecker, 2011a; Oberschelp, 2017). Dieser Komplexität zugrunde liegend ist die Notwendigkeit, verschiedene Einzelbewegungen sowohl parallel als auch seriell koordiniert anzusteuern, um die in den Körpersegmenten erzeugte Kraft vom Unterkörper bis zum Schläger und schließlich auf den Ball zu übertragen (Fernandez-Fernandez et al., 2013; Kibler et al., 2007; Kibler, 2014; Kovacs, 2007; Kovacs & Ellenbecker, 2011a; Kovacs & Ellenbecker, 2011b; Oberschelp, 2017). Dieser Vorgang wird auch als kinetische Kette¹ bezeichnet und ist gekennzeichnet durch eine ansteigende lineare Segmentgeschwin-

¹ Die Begriffe kinetische und kinematische Kette werden – obwohl sie unterschiedliche Bedeutungen aufweisen (Kinetik: Bewegungslehre unter dem Einfluss von Kraft; Kinematik: beschreibt die räumlichen und zeitlichen Bewegungen von Körpern im dreidimensionalen Raum) – in der Literatur mit Bezug zu Bewegungsanalysen sehr häufig synonym verwendet. In Anlehnung an die englischsprachige Literatur wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff der kinetischen Kette verwendet, der aber auch die kinematischen Faktoren miteinschließt (Kibler et al., 2014).

digkeit vom Knie bis zum Schläger sowie durch eine Summation und Übertragung der produzierten Kraftmomente (Abrams et al., 2011; Fernandez-Fernandez et al., 2013; Girard et al., 2005; Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Für das Bewegungsziel eines effizienten Aufschlags – definiert aus maximaler Leistung und minimalem Verletzungsrisiko – ist folglich eine optimale Aktivierung aller beteiligten Segmente erforderlich (synchroner Einsatz und Koordinierung ausgewählter Muskelgruppen, segmentale Rotationen) (Elliott, 2006; Vuong, 2017).

Für eine detaillierte bewegungsanalytische Betrachtung und Differenzierung wird der Tennisaufschlag phänomenologisch von Expert*innen in verschiedene Phasen eingeteilt. Ein in diesem Zusammenhang häufig genutztes Modell stellt das 8-Stage-Modell von Kovacs & Ellenbecker (2011b) dar (Abb. 1). In dem 8-Stage-Modell wird die Aufschlagbewegung in drei funktionale Phasen eingeteilt: die *Vorbereitungsphase* (4 Abschnitte), die *Beschleunigungsphase* (2 Abschnitte) sowie die *Durchschwungphase* (2 Abschnitte). Die Vorbereitungsphase dient dabei zur Speicherung der Energie, die in der sich anschließenden Phase der Beschleunigung freigesetzt wird und in der Phase des Durchschwungs abgebremst wird.

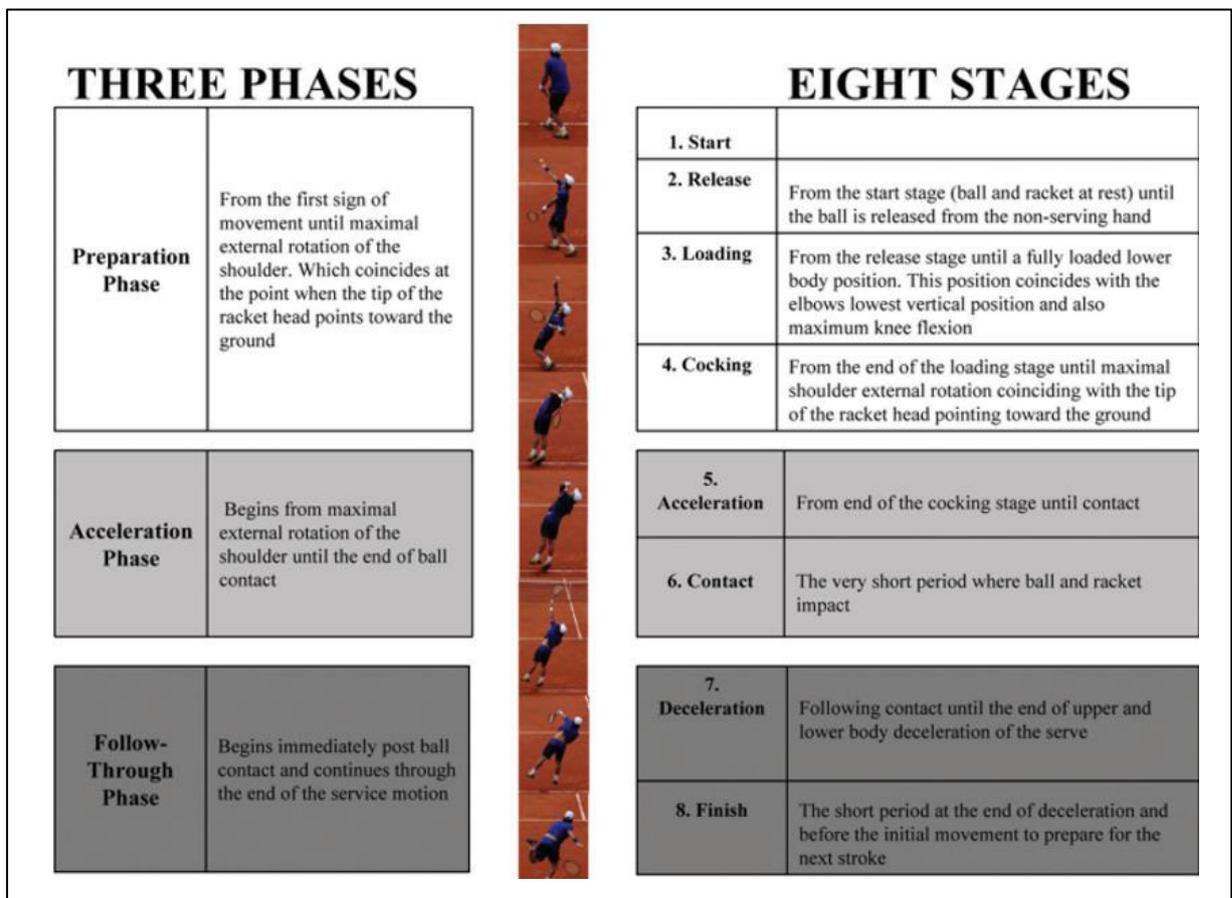


Abb. 1. 8-Stage-Modell nach Kovacs und Ellenbecker 2011b, S. 505

Vorbereitungsphase. Der Tennisaufschlag beginnt mit der Einnahme der Startposition; diese kann individuelle Ausrichtungen besitzen (*Start*). In diesem Zusammenhang wird häufig die Empfehlung gelehrt (Rechtshänder), den vorderen Fuß zum rechten Netzpfosten und den hinteren Fuß parallel zur Grundlinie auszurichten und dabei die Zehen des hinteren Fußes in einer Linie mit der Ferse des vorderen Fußes zu positionieren (Hoskins, 2003; Tennisgate, 2020). Nach einer grundsätzlichen Positionierung der Spieler*innen an der Grundlinie erfolgt die Einleitung der Aufschlagbewegung mit dem Ballwurf (*Release/Freigabe*). Nach dem Verlassen des Balls aus der Wurfhand erfolgt der dritte Abschnitt dieser Phase (*Loading/Laden*). Der Wurfarm folgt dem Ball, während der Schlagarm eine Flexion im Ellenbogen sowie eine Außenrotation in der Schulter erfährt. Des Weiteren ist dieser Abschnitt des Ladens durch das Abkippen der Schulter und des Beckens, Verschieben der Hüfte, eine Lateralflexion sowie Rotation des Rumpfes entgegen der Schlagrichtung sowie mit einer einhergehenden Flexion der Knie gekennzeichnet (Kovacs & Ellenbecker, 2011b; Oberschelp, 2017).

Hinsichtlich des Beineinsatzes (*leg drive*) lassen sich generell zwei verschiedene Techniken unterscheiden: die *Foot-up*- (hinterer Fuß wird an den vorderen Fuß herangezogen) und *Foot-back*-Technik (der hintere Fuß verbleibt in der Ausgangsposition). Diese beiden Varianten differieren vorrangig hinsichtlich kinetischer und kinematischer Faktoren, ohne determinierende Effekte auf die Aufschlaggeschwindigkeit zu nehmen (Elliott & Wood, 1983; Reid et al., 2008). Der Beineinsatz ist von großer Relevanz für die Erzeugung eines optimalen Kraftimpulses, seine effizienten Folgebewegungen sowie für die Realisierung hoher Schlägergeschwindigkeiten (Kovacs & Ellenbecker, 2011a; Reid et al., 2008). Mit Abschluss dieses Abschnitts nimmt der/die Spieler*in die sogenannte *Trophy-Position* ein. Der letzte Abschnitt der Vorbereitungsphase umfasst das *Spannen (Cocking)*, welcher von der *Trophy-Position* bis zu dem Zeitpunkt der maximalen Außenrotation der Schlagschulter andauert. Zum letztgenannten Zeitpunkt ist der Schlagarm so ausgerichtet, dass sich der Schläger parallel zum Rumpf befindet und dieser eine Hyperextension einnimmt. Die Schulter steht hierbei in einer Abduktion von durchschnittlich 101° sowie in einer Außenrotation von 172° . Die Ellenbogenflexion wird mit 104° , die Handgelenksexension mit 66° angegeben (Fleisig et al., 2003).

Dieser Teil der Aufschlagbewegung dient der größtmöglichen Speicherung der Energie vor der folgenden Beschleunigungsphase. Durch eine starke Vordehnung der Innenrotatoren der Schulter kann der Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus optimal ausgenutzt werden (Kovacs & Ellenbecker, 2011b; Roetert et al., 1996). Zu dem Zeitpunkt der maximalen Schulteraußenrotation ist die Vordehnung der unteren Extremität bereits nahezu aufgelöst und die Beine sind nach dem Absprung nahezu vollständig gestreckt. Mit dem durch die Bein Streckung generier-

ten Impuls erfolgt die Kraftübertragung nach kranial mit steigenden Segmentgeschwindigkeiten bis zum Schläger (Fleisig et al., 2003; Kovacs & Ellenbecker, 2011b; Oberschelp, 2017; Vuong, 2017).

Beschleunigungsphase. Die Beschleunigungsphase umfasst den Punkt von der maximalen Außenrotation des Schlagarms bis zum Zeitpunkt des Treffpunkts (*Beschleunigung/Acceleration*). Professionelle männliche Tennisspieler realisieren diese in weniger als 1/100 Sekunde (Fleisig et al., 2003). Während der Beschleunigung des Schlägers erfolgt aus der rechtsrotierten Hyperextension des Oberkörpers eine linksrotierte Flexion, die nach rechts gerichtete Lateralflexion kehrt sich zu einer Lateralflexion nach links um (Schlagarm rechts) (Abrams et al., 2011). Diese – auch als Korkenzieher beschriebene – Bewegung überträgt bedeutsame kinetische Energie in den Schlagarm (Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Auch in den Strukturen des Schlagarms werden die Bewegungen umgekehrt, so wird der gebeugte Arm gestreckt, das Handgelenk flektiert, und auf die maximale Außenrotation der Schulter folgt die Innenrotation sowie Pronation des Unterarms (Oberschelp, 2017). Die während der vorangegangenen Aufschlagphasen gespeicherte Energie wird somit in den sich anschließenden konzentrischen Verkürzungen freigesetzt und auf den Schläger und Ball projiziert (Abrams et al., 2011). Die Kraftproduktion während der Beschleunigungsphase hängt dabei im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: der Kraft und neuromuskulären Koordination. Dabei wird eine vertikale Kraft produziert, die das 1,68- bis 2,12-Fache des eigenen Körpergewichts umfassen kann (Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Diese beschriebene Beschleunigungsphase bewirkt insbesondere große Drehmomente im Schultergelenk mit Blick auf die Innenrotation und die horizontale Adduktion (Bahamonde, 1989; Vuong, 2017). Dabei unterscheidet sich die Größe der maximalen Drehmomente im Zuge der Schulterinnenrotation zwischen Frauen und Männern sowie auch der Rotationsgeschwindigkeit, bei der Männer Winkelgeschwindigkeiten von bis zu 2400 °/s erreichen (Frauen: 2000°/s) (Elliott et al., 2003; Fleisig et al., 2003; Oberschelp, 2017). Zum Zeitpunkt des *Balltreffpunktes (Impact)* befindet sich der professionelle männliche Tennisspieler schließlich in einer durchschnittlichen Rumpfneigung von 48°, die Schulter ist um 101° abduziert; Ellenbogen, Handgelenk und das vordere Knie befinden sich in einer leichten Beugung (Fleisig et al., 2003).

Durchschwungphase. Ab dem Zeitpunkt des Balltreffpunkts setzt die letzte Phase der Aufschlagbewegung ein. Die maximal beschleunigte Bewegung muss nun in kürzester Zeit abgefangen werden. Dies erfolgt durch ein weiteres Durchschwingen mit einhergehender weiterer Schulterinnenrotation und Unterarmpronation. Kovacs & Ellenbecker (2011b) heben dabei hervor, dass die Schulter (Außenrotatoren) dabei gegen Kräfte stabilisieren muss, die das 0,75-Fache des Körpergewichts erreichen können (*Abbremsung/ Deceleration*). Die Ab-

schlussbewegung des Tennisaufschlags stellt die einbeinige Landung dar, die wiederum erneut exzentrische Kräfte auf die untere Extremität generiert (*Ende/Finish*). Diese Phase nimmt keinen direkten Einfluss auf die Aufschlagqualität ein, ist aber für die schnelle Ausrichtung auf die folgende Spielsituation entscheidend (Kovacs & Ellenbecker, 2011a; Kovacs & Ellenbecker, 2011b).

In der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit diesen bewegungswissenschaftlichen Schwerpunkten der Aufschlagbewegung evaluierte eine große Anzahl von Untersuchungen kinematische Faktoren der oberen und unteren Extremität sowie des Rumpfes (Chow et al., 2009; Elliott et al., 1995; Fleisig et al., 2003; Girard et al., 2005; Girard et al., 2007; Kibler, 1995; Reid et al., 2008; Wagner et al., 2014; Whiteside et al., 2013a). Kibler et al. (1995) konnten in ihren Untersuchungen feststellen, dass 51–55 % der kinetischen Energie in den Beinen und dem Rumpf erzeugt werden. Des Weiteren spielt der Schlagarm bei der Erzeugung der Schlägergeschwindigkeit eine bedeutende Rolle. Elliott et al. (1995) zeigten in einer Untersuchung zum Einfluss der oberen Extremität auf den Tennisaufschlag, dass zum Zeitpunkt des Balltreffpunkts die Innenrotation der Schulter (54,2 %), die Handgelenksflexion (31,0 %) sowie die horizontale Flexion und Schulterabduktion (12,9 %) den größten Anteil an der Generierung der Schlaggeschwindigkeit ausmachen. Weitere Untersuchungen setzten den Fokus auf die Ball- und Schlägerkinematik (Carboch et al., 2018; Reid et al., 2010, 2011, 2013; Whiteside et al., 2013b), auf kinematische Faktoren mit Bezug zu Leistungsstand, Geschlecht, Alter und Verletzungen (Abrams et al., 2011; Campbell et al., 2013; Chow et al., 2009; Martin et al., 2014; Whiteside et al., 2013b) sowie auf die Differenzierung verschiedener Aufschlagarten (Abrams et al., 2011, 2014; Reid et al., 2007; Sheets et al., 2011). Nur eine begrenzte Anzahl an wissenschaftlichen Untersuchungen berücksichtigte die Aufschlagrichtung (Carboch et al., 2018; Reid et al., 2011), aber bislang wurde in keiner Studie die Kinematik der Aufschlagbewegung mit Blick auf die zwei verschiedenen Aufschlagseiten (Einstand- und Vorteilseite) untersucht.

Nach dem internationalen Regelwerk der ITF (International Tennis Federation) schlagen die Spieler*innen alternierend von der Einstand- (rechte Seite) und Vorteilseite (linke Seite) in das diagonal gegenüberliegende Aufschlagfeld auf (International Tennis Federation, 2020). Dabei ist die prozentuale Verteilung der Aufschläge von beiden Aufschlagseiten während eines Matches nahezu identisch (47,6 % Vorteilseite; 52,4 % Einstandseite). Lediglich Spiele, die nach einem 40:15 oder 15:40 enden, resultieren in eine geringfügig höhere Anzahl an Schlägen von der Einstandseite. Der Aufschlag in das gegnerische Aufschlagfeld kann dabei in drei verschiedene Richtungen erfolgen: durch die Mitte, nach außen oder auf den Körper des Gegners. Interessanterweise ist für diese variablen Ausführungsbedingungen bislang kein biomechanisches Technikmodell bekannt, das den Einfluss der Aufschlagseite berücksichtigt. Bei

der Annahme einer ähnlichen Bewegungsausführung von der rechten und linken Spielfeldseite ändern sich die Körperposition und der Winkel zum anvisierten Zielpunkt, sodass sich kinematische Unterschiede in der Bewegungsausführung des Tennisaufschlags vermuten lassen. Derartige Kenntnisse könnten hilfreiche Schlussfolgerungen für die Trainingspraxis, insbesondere im Rahmen des Technikerwerbstrainings zulassen.

Problemstellung

Aufgrund der komplexen koordinativ-technischen Ausführung ist der Tennisaufschlag Gegenstand vieler bewegungsanalytischer und biomechanischer Untersuchungen. Während kinematische Faktoren mit Blick auf die obere und untere Extremität, den Rumpf sowie hinsichtlich des Leistungsstands, Verletzungen, des Alters, des Geschlechts und vereinzelt hinsichtlich der angespielten Richtungen bereits untersucht wurden, gibt es bislang keine Studie, die die verschiedenen Aufschlagvariationen und die Vielzahl an Anwendungsszenarien (z. B. den Einfluss der Aufschlagseite, also Einstand- und Vorteilseite) biomechanisch-bewegungsanalytisch untersucht. Bisherige biomechanische Technikmodelle lassen diese Form der variablen Bewegungsausführung vollständig unberücksichtigt. Ziel der zweiten Studie der vorliegenden kumulativen Dissertation war es daher, mittels Motion-Capturing-Verfahren kinematische Bewegungsmerkmale der Aufschlagbewegung von männlichen Nachwuchstennisspielern differenzierter als bislang in der Literatur verfügbar von der Einstand- und Vorteilseite zu analysieren und zu vergleichen.

2.3 Orthopädische Beanspruchung im Tennis unter besonderer Berücksichtigung des Tennisaufschlags

Die Entwicklung im Tennissport hin zu einem vermehrt schnelligkeits- und schnellkraftbetonten Spiel, lässt diesen Sport zwar für die Zuschauer*innen attraktiver und faszinierender werden, allerdings stellt sie aufgrund der sich hierdurch ergebenden höheren Belastungsintensität in Training und Wettkampf mitunter auch ein höheres Verletzungsrisiko für den/die Athlet*in dar. Dies ist u. a. der repetitiven Ausführung struktur-beanspruchender Bewegungsausführungen wie z. B. schnellen Starts, Stopps, Richtungswechseln und der Aufschlagbewegung geschuldet (Fernandez-Fernandez et al., 2013; Ferrauti et al., 2013; Johnson et al., 2006; Kekelekis et al., 2020). So berichten Abrams et al. (2011), dass die Anzahl von Verletzungen mit dieser Spielentwicklung gestiegen ist. Damit einhergehend werden auch eine frühzeitige Spezialisierung und intensives Training im heranwachsenden Alter als potenzielle Risikofaktoren für

Überlastungen und Verletzungen angesehen (DiFiori et al., 2014; Fernandez-Fernandez et al., 2019; Jayanthi et al., 2013).

Obwohl viele Verletzungen, die beim Tennis auftreten, auch in anderen Sportarten vorkommen, weist der Tennissport – bedingt durch die Biomechanik, Ausrüstung und die körperlichen Anforderungen – ein Verletzungsprofil auf, welches sich von anderen Schlag- und Wurfsporarten unterscheidet (Kekelekis et al., 2020; Pluim et al., 2006). Innerhalb der veröffentlichten Daten besteht eine hohe Variabilität hinsichtlich der ermittelten Inzidenzen von Verletzungen, diese reichen von 0,04 bis zu 3,0 Verletzungen pro 1000 Spielstunden bei Spieler*innen aller Altersklassen (McCurdie et al., 2017; Pluim et al., 2006). Hjelm et al. (2010) geben sogar Inzidenzen von 0,04 bis 21,5 Verletzungen/1000 h an. Diese großen Unterschiede ergeben sich durch die Methodik, das Studiendesign sowie die verschiedenen untersuchten Populationen (Moreno-Pérez et al., 2019). In epidemiologischen Untersuchungen wurde zudem festgestellt, dass akute Verletzungen eher in den unteren Extremitäten auftreten, während chronische Überlastungsschäden dagegen häufiger in den oberen Extremitäten vorkommen (Abrams et al., 2012; McCurdie et al., 2017). Die meisten Verletzungen treten im Tennissport innerhalb der unteren Extremität auf (31–67 %), gefolgt von Verletzungen der oberen Extremität (20–49 %) und des Rumpfs (3–21 %) (Abrams et al., 2012; Changstrom & Jayanthi, 2016; Ellenbecker et al., 2009; Hjelm et al., 2010; Pluim et al., 2006, 2016; Salzmann et al., 2018).

In Bezug auf die verschiedenen Schlagtechniken im Tennis birgt vor allem der Aufschlag mit seiner Überkopfbewegung ein vergrößertes Verletzungspotential bzw. die Gefahr von Überlastungsschäden (Abrams et al., 2011; Johnson et al., 2006). Auf der Grundlage mechanischer Analysen sind es hierbei vor allem die distalen Elemente der kinetischen Kette (Schulter, Ellenbogen, Handgelenk), welche hohe Lasten und Bewegungsumfänge tolerieren müssen, um in Sekundenschnelle aus der Ruhe Aufschlaggeschwindigkeiten von bis zu 200 km/h zu erzeugen (Johnson et al., 2006; Kibler et al., 2007; Kovacs & Ellenbecker, 2011b; van der Hoeven & Kibler, 2006). Diese exzessiven Lasten sind entscheidende Risikofaktoren für die Entstehung von Mikrotraumata, welche ursächlich verantwortlich für Verletzungen und Überlastungsschäden der oberen Extremitäten sind (Martin et al., 2014). Während der Aufschlagbewegung stellt vor allem der abduzierte Schlagarm in der Außenrotation während der Vorbereitungsphase (Abschnitt Spannen) und in der sich anschließenden Beschleunigungsphase mit beginnender Innenrotation ein erhöhtes Verletzungsrisiko dar. Der vordere Teil der Schulterkapsel muss dabei eine Belastung von 40 % des Körpergewichts aushalten (Abrams et al., 2011; Elliott et al., 2003; Göktepe et al., 2009). Dieser Abschnitt des Spannens und damit einhergehend die Position der Schulter ist daher auch aus gesundheitlicher Sicht von großer Bedeutung, da mit steigender Abduktion des Arms bei Überkopfbewegungen das Impingement-Risiko steigt (Oberschelp, 2017; Wuelker et al., 1998). Weiter wies auch Kibler (2014)

darauf hin, dass während dieser genannten Zeitpunkte Drehmomente auf die entsprechenden Strukturen wirken, die das potentielle Auftreten von Überlastungserscheinungen wahrscheinlicher machen (> 50 Nm). Auch in der der sich anschließenden Abbremsbewegung wirken Kräfte von bis zu 300 Nm auf die Schulterstrukturen (Kibler, 2014).

Neben der hohen mechanischen Last folgt zudem die sich stetig wiederholende Charakteristik der Aufschlagbewegung. Während eines Matches schlägt ein/e Spieler*in zwischen 50–150 erste und zweite Aufschläge. Im Zusammenhang mit der Anzahl an gespielten Matches mit durchschnittlich 60 Einzelspielen pro Jahr wird deutlich, warum Überlastungsschäden im Tennis ein immer größer werdendes Problem darstellen. Dabei ist das erhebliche Volumen der in den Trainingseinheiten absolvierten Schläge noch nicht inbegriffen (Abrams et al., 2012; Fernandez-Fernandez et al., 2019; Martin et al., 2014; Reid et al., 2008; Roetert et al., 2009). Einige Autor*innen postulieren auch einen Zusammenhang zwischen dem Trainingsvolumen und der Verletzungshäufigkeit. Ein Trainingsumfang von mehr als 16 Stunden pro Woche steht in signifikanter Beziehung zu einem erhöhten Verletzungsrisiko (DiFiori et al., 2014). Zur Prävention von Verletzungen und Überlastungsschäden sprechen DiFiori et al. (2014) einer gut ausgebildeten Muskulatur eine wichtige Rolle zu. So kann ein entsprechendes konditionelles Training zur Verletzungsprophylaxe dieser Problematik entgegenwirken. Diese zugesprochene Bedeutsamkeit eines tennisspezifischen Konditionstrainings wird auch von weiteren Autoren bestätigt (Elliott, 2006; Fernandez-Fernandez et al., 2013; van der Hoeven & Kibler, 2006).

Aufgrund der dargestellten Bedingungen ist es demnach nicht verwunderlich, dass u. a. die oberen Extremitäten mit am häufigsten von Verletzungen betroffen sind (Perkins & Davis, 2006; Pluim et al., 2006). Daten aus epidemiologischen Studien zeigen, dass bei Männern 28 % und bei Frauen 23 % aller Verletzungen der oberen Extremität zuzuordnen sind (Kekelekis et al., 2020; McCurdie et al., 2017), wovon die Schulter die höchstfrequentierte Körperregion darstellte (Kibler & Safran, 2005). Fu und Kollegen (2018) berichten von 8,2 Verletzungen der oberen Extremität pro 1000 h Spielzeit in einem Tennismatch. Weitere Studien untersuchten die Inzidenz und/oder Prävalenz explizit von Schulterbeschwerden bei Tennisspieler*innen. Abrams et al. (2012) berichten in diesem Zusammenhang von Studien, in denen der Anteil von Schulterverletzungen 4 bis 17 % betrug.

Detaillierte Daten über orthopädische Verletzungsprävalenzen sowie Trainingsvolumen und -inhalte sind besonders im deutschen Nachwuchsbereich nur unzureichend erfasst. Ebenfalls liegen keine Erkenntnisse über den Einfluss des Performance-Levels auf die Verletzungsprävalenz sowie Trainingsdaten vor.

Problemstellung

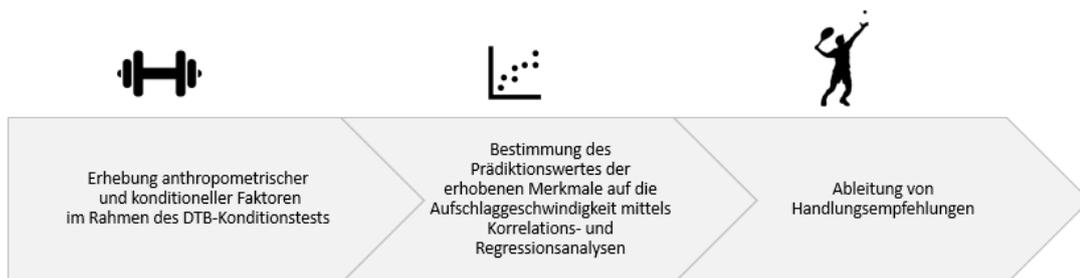
Der Tennissport hat sich zu einer explosiven und schnellkräftigen Sportart entwickelt, die mit hohen Anforderungen an die Physis, einem hohen Trainingsvolumen und steigender Verletzungsprävalenz einhergeht. In diesem Kontext liegen im deutschen Tennis-Nachwuchsbereich jedoch nur lückenhafte Informationen über entsprechende Verletzungshäufigkeiten und Trainingscharakteristika vor. Gleichzeitig stellen nach wissenschaftlichen Befunden sowohl der Aufschlag als auch hohe Trainingsvolumina Risikofaktoren für potenzielle Verletzungen dar. Folglich wurde in der dritten Studie der vorliegenden kumulativen Dissertation – neben physischen Leistungsdaten – eine Bestandsaufnahme von Trainingscharakteristika sowie von Verletzungsprävalenzen mit besonderem Fokus auf die obere Extremität und den Tennisaufschlag vorgenommen. Vor diesem Hintergrund sind die Daten höchstselektierter Spitzennachwuchsathleten (deutsche Junioren-Davis-Cup-Spieler) erhoben und darüber hinaus einer vergleichenden Analyse hinsichtlich des Leistungsstandes unterzogen worden (Landeskaderspieler*innen vs. Junioren-Davis-Cup-Spieler).

3 Arbeitsprogramm und Zielstellung

Das dieser Dissertationsschrift zugrunde liegende Arbeitsprogramm (Abb. 2) bestand aus drei verschiedenen Untersuchungsansätzen, dessen Ergebnisse im Rahmen von drei Beiträgen in internationalen Peer-Review-Fachzeitschriften publiziert wurden. Jede Studie beinhaltete dabei einen eigenen Forschungsansatz mit entsprechender Zielstellung und Forschungsmethodologie.

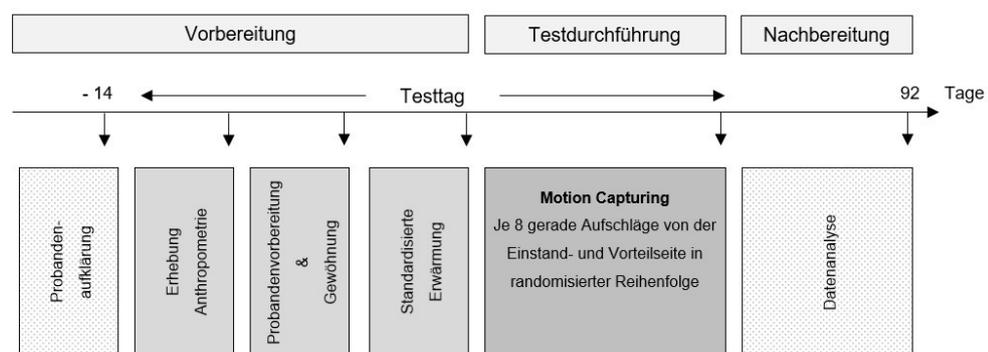
Studie 1 (Entwicklung eines Leistungsstrukturmodells des Tennisaufschlags):

Einfluss konditioneller und anthropometrischer Merkmale auf die Aufschlaggeschwindigkeit bei Nachwuchskaderathlet*innen im Tennis



Studie 2 (Motion Capturing und Bewegungsanalyse)

Vergleichende Analyse kinematischer Bewegungsparameter des Tennisaufschlags von der Einstand- und Vorteilseite



Studie 3 (Systematische Befragung und Monitoring)

Erhebung orthopädischer Verletzungen, Trainings- und Leistungsdaten von Bundes- und Landeskader-spieler*innen

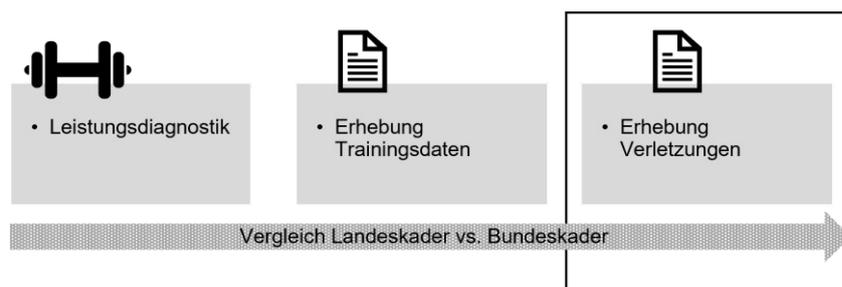


Abb. 2. Gesamtdesign des Arbeitsprogramms

3.1 Studienübersicht

Nachfolgend werden die zentralen Zielstellungen der im Arbeitsprogramm dargestellten Teilstudien beschrieben.

Studie 1

Aufgrund der großen Bedeutsamkeit des Tennisaufschlags auf die komplexe Spielleistung im Tennis ist es für die Trainingspraxis von hoher Relevanz, leistungsbestimmende Einflussgrößen auf die Aufschlaggeschwindigkeit zu quantifizieren. Hierzu mangelt es jedoch bislang an alters- und geschlechtsspezifischen Kenntnissen über die hierfür erforderlichen allgemeinmotorischen und konditionellen sowie anthropometrischen Voraussetzungen. Ziel der ersten Studie war folglich die Identifikation und Quantifizierung des Einflusses von anthropometrischen und konditionellen Voraussetzungen für die Realisation hoher Aufschlaggeschwindigkeiten in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht im Nachwuchsleistungstennis (Entwicklung eines Leistungsstrukturmodells).

Studie 2

Nach den offiziellen Regeln erfolgt der Aufschlag im Tennismatch abwechselnd von der Einstand- und Vorteilseite in das diagonal gegenüberliegende Aufschlagfeld. In Konsequenz ergeben sich variable externe Ausführungsbedingungen, die allerdings bislang nicht in biomechanischen Technikmodellen der Aufschlagbewegung berücksichtigt werden. Ziel der zweiten Studie war es, mittels Motion-Capturing-Verfahren kinematische Bewegungsmerkmale der Aufschlagbewegung von männlichen Nachwuchstennisspielern von der Einstand- und Vorteilseite zu analysieren und zu vergleichen.

Studie 3

Der Tennissport hat sich zu einer explosiven und schnellkräftigen Sportart entwickelt, die mit hohen Anforderungen an die Physis, einem hohen Trainingsvolumen und steigender Verletzungsprävalenz einhergeht. In diesem Kontext wird der Tennisaufschlag in der Fachliteratur als einer der Schläge bezeichnet, der große mechanische Lasten auf die umliegenden Strukturen einwirken lässt. Ziel der dritten Studie war es, neben athletischen Leistungsdaten sowohl die allgemeine Verletzungsprävalenz unter besonderer Berücksichtigung der oberen Extremität und des Aufschlags als auch Trainingsdaten von Junioren-Davis-Cup-Spielern zu erfassen und darüber hinaus einen Vergleich zu regionalen Landeskaderspieler*innen vorzunehmen.

4 Publikationen

Die Ergebnisse der beschriebenen Studien wurden im Rahmen von drei Beiträgen in internationalen Fachzeitschriften publiziert.

Manuskript 1

Fett, J., Ulbricht, A. & Ferrauti, A. (2020). Impact of physical performance and anthropometric characteristics on serve velocity in elite junior tennis players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 34(1), 192-202.

Epub ahead of print: Oktober 2018

Zugriff unter:

https://journals.lww.com/nsca-jscr/Abstract/2020/01000/Impact_of_Physical_Performance_and_Anthropometric.22.aspx

Manuskript 2

Fett, J., Oberschelp, N., Vuong, J., Wiewelhove, T. & Ferrauti, A. (2021). Kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court service positions in elite junior players. *PLOS ONE*, 16 (7): e0252650.650.

Zugriff unter:

<https://journals.plos.org/plosone/article/authors?id=10.1371/journal.pone.0252650>

Manuskript 3

Fett, J., Ulbricht, A., Wiewelhove, T. & Ferrauti, A. (2017). Athletic performance, training characteristics and Orthopedic Indications in junior tennis Davis Cup players. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 12 (1), 119-129.

Zugriff unter:

<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1747954116684393>

4.1 Artikel 1

Titel: Impact of physical performance and anthropometric characteristics on serve velocity in elite junior tennis players

Kurztitel: Impact on serve velocity in tennis

Autor*innen: Janina Fett ¹, Alexander Ulbricht ¹, Alexander Ferrauti ¹

¹ Fakultät für Sportwissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

Journal: The Journal of Strength and Conditioning Research

Impactfactor: 3,775

Art des Artikels: Originalarbeit

Keywords: tennis, service, fitness, anthropometrics, testing

Zitation: Fett, J., Ulbricht, A. & Ferrauti, A. (2020). Impact of physical performance and anthropometric characteristics on serve velocity in elite junior tennis players. *J Strength Cond Res.* 34(1), 192-202.

DOI: 10.1519/JSC.0000000000002641

Veröffentlicht online: Oktober 2018

4.2 Artikel 2

Titel: Kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court service positions in elite junior players

Kurztitel: Kinematic comparison of the tennis serve from the ad and deuce court

Autor*innen: Janina Fett ¹, Nils Oberschelp ¹, Jo-Lam Vuong ¹, Thimo Wiewelhove ¹ & Alexander Ferrauti ¹

¹ Fakultät für Sportwissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

Journal: PLOS ONE

Art des Artikels: Research Article

Keywords: tennis serve, ad court side, deuce court side, biomechanics, skill development, serve kinematics

Editor: Marc H. E. de Lussanet (University of Münster, Germany)

Peer Review History: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650>

Zitation: Fett, J., Oberschelp, N., Vuong, J-L., Wiewelhove, T., Ferrauti, A. (2021). Kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court service positions in elite junior players. *PLOS ONE* 16(7), Article e0252650.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650>

4.3 Artikel 3

Titel: Athletic performance, training characteristics, and orthopedic indications in junior tennis Davis Cup players

Kurztitel: Athletic performance, training characteristics, and orthopedics in tennis

Autor*innen: Janina Fett ¹, Alexander Ulbricht ¹, Thimo Wiewelhove ¹ & Alexander Ferrauti ¹

¹ Fakultät für Sportwissenschaft, Ruhr-Universität Bochum, Deutschland

Journal: International Journal of Sports Science & Coaching

Art des Artikels: Original research

Impactfactor: 2,029

Keywords: Age, orthopedic assessment, physical fitness, sports injury prevention, tennis serve, training volume, youth sport

Zitation: Fett, J., Ulbricht, A., Wiewelhove, T. & Ferrauti, A. (2017). *International Journal of Sports Science & Coaching*, 12(1), 119-129.

DOI: 10.1177/1747954116684393

5 Gesamtdiskussion

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit der Leistungsstruktur, der Bewegungsanalyse sowie mit der orthopädischen Beanspruchung des Tennisaufschlags im Nachwuchsleistungstennis. Im Mittelpunkt steht dabei die Identifikation von leistungsbestimmenden anthropometrischen und konditionellen Faktoren, die vertiefte kinematische Betrachtung von Qualitätsmerkmalen der Aufschlagtechnik sowie die Auseinandersetzung mit möglichen limitierenden Faktoren und Verletzungsprävalenzen für die am Aufschlag primär beteiligten aktiven und passiven Strukturen des Bewegungsapparats. Die Ergebnisse der drei Studien sind in internationalen wissenschaftlichen Fachjournalen publiziert worden. Vor diesem Hintergrund erfolgt an dieser Stelle eine übergreifende Darstellung und Diskussion der Ergebnisse sowie deren Bedeutung für die Leistungssportpraxis.

Allgemeine Leistungsstruktur im Tennis

Bevor die konditionellen und anthropometrischen Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit im nächsten Abschnitt differenziert betrachtet werden (Leistungsstruktur des Tennisaufschlags), soll zuvor ein kurzer Blick auf die allgemeine Leistungsstruktur im Tennis gerichtet werden, da einzelne Ergebnisse aus den Studien 1 und 3 diese übergreifend tangierten.

Für eine optimale Leistungssteuerung mit dem Ziel einer Leistungsmaximierung wird der Fokus daher auf die komplexe Leistungsstruktur im Tennis mit ihren vielschichtigen Leistungskomponenten gerichtet. Diese zeichnen sich dabei heterogen in Abhängigkeit des Alters und des Geschlechts ab (Ferrauti et al., 2014). Das in früheren Dekaden vorrangig technik-dominierte Spiel entwickelte sich zu einem schnellkraft-betonteren Spiel mit deutlich kürzeren Ballwechseln (Gillet et al., 2009; Kovacs, 2007; Reid & Schneiker, 2008; Weber et al., 2010). Die konditionellen Faktoren rücken daher immer stärker in den Vordergrund. Innerhalb einer homogenen Gruppe leistungsselektierter Spieler*innen zeigte sich, dass bei sich einstellender Technikangleichung und -perfektionierung die Bedeutung der konditionellen Faktoren im Altersgang zunehmend entscheidend für den Spielerfolg sein kann (Fett, 2012; Ulbricht, 2015). Hinsichtlich einer Hierarchisierung der konditionellen Faktoren ist ein Paradigmenwechsel von dem Bereich Laufschnelligkeit/Agility zum Bereich Schlagschnelligkeit/Power zu beobachten (Kramer et al., 2017; Ulbricht et al., 2016).

Dies verdeutlichen auch die konditionellen Leistungsdaten der dritten Publikation. Hier zeigten die höchstselektierten Spieler (Junior-Davis-Cup-Spieler) in den kraft- und schnellkraftbetonten Parametern (u. a. Medizinballwürfe, Aufschlaggeschwindigkeit, Handkraft) sehr hohe

Perzentilbereiche bezogen auf zugrunde liegende Normwerte sowie deutliche Leistungsunterschiede zu den Landeskaderspielern. Im Altersgang ließ sich sowohl der bedeutende Einfluss konditioneller Parameter auf die komplexe Spielleistung (Ulbricht et al., 2016) sowie die Aufschlaggeschwindigkeit (Ergebnisse Publikation 1) vor allem ab und um den Zeitpunkt der Pubertät erkennen, was mit dem einsetzenden veränderten Hormonstatus (Testosteron, Östrogen) und dessen Einfluss auf die Kraftentwicklung zu begründen ist (Draper, 2014; Grosser & Schönborn, 2002). Daher ist der Aufklärungsgrad der Aufschlagleistung in Abhängigkeit anthropometrischer und konditioneller Faktoren hier am größten, während z. B. bei der Altersklasse U12 biologisch bedingt die Spezifität von Kraft, Schnellkraft und Anthropometrie weniger determinierend ist als technische Fähigkeiten innerhalb der Schlagausführung (Ferrauti et al., 2014).

Generell fiel der Prädiktionwert der anthropometrischen und konditionellen Parameter bei der männlichen Stichprobe größer aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass vor allem kraft- und schnellkraftbetonte Parameter in die Regressionsmodelle einfließen, die bei männlichen Spielern wiederum entwicklungsbedingt genetisch höher determiniert sind (Draper, 2014). Dieser Einfluss zeichnet sich auch in dem Spielprofil von Frauen und Männern ab (u. a. schnellere Schläge, schnellere Bewegungsgeschwindigkeiten, kürzere Ballwechsel bei Männern im Vergleich zu Frauen).

Anthropometrische und konditionelle Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit

Die Ergebnisse der ersten Studie zeigten, dass von den verschiedenen untersuchten konditionellen (u. a. Sprints, Sprünge, Medizinballwürfe, Handkraft, Rumpfkraft, Ausdauer) und anthropometrischen (u. a. Gewicht, Größe, BMI, Spannweite) Faktoren innerhalb der komplexen Leistungsdiagnostik vor allem die Weite der Medizinballwürfe (MB) ($r = 0,49-0,63$ ♂; $r = 0,20-0,60$ ♀), die Handkraft ($r = 0,43-0,59$ ♂; $r = 0,27-0,37$ ♀), die Armspannweite ($r = 0,37-0,56$ ♂; $r = 0,24-0,36$ ♀), die Körpergröße ($r = 0,31-0,52$ ♂; $r = 0,26-0,38$ ♀) und das Körpergewicht ($r = 0,44-0,57$ ♂; $r = 0,35-0,39$ ♀) die engsten Zusammenhänge zur Aufschlaggeschwindigkeit aufwiesen. Die multiplen Regressionsanalysen ergaben, dass mit einer Kombination einzelner Prädiktoren (Medizinballwürfe, Handkraft, Armspannweite und Körpergewicht) 41–66 % der Varianz der Aufschlaggeschwindigkeit bei den Jungen und 19–45 % der Varianz in der weiblichen Stichprobe erklärt werden konnten. Die hier dargestellten Erkenntnisse fußen auf einer in der Literatur einzigartigen Stichprobe ($N = 1019$), welche differenziert und engmaschig die Altersentwicklung (U12–U18) sowie das Geschlecht berücksichtigte.

Angesichts der wachsenden Bedeutung der Aufschlagleistung im modernen Tennissport stellt die Identifikation möglicher Leistungsreserven und Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit

einen entscheidenden Mehrwert für die Trainingssteuerung in der Sportpraxis dar (Kolman et al., 2021; Signorile et al., 2005). Wissenschaftliche Untersuchungen zu potenziellen konditionellen und anthropometrischen Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit zielten bislang vorrangig auf isolierte isokinetisch und isometrisch erfasste Kraftparameter der oberen und unteren Extremität ab, deren Ergebnisse als kontrovers und als keinem einheitlichen Trend folgend beschrieben werden können. Zudem sind diese vor allem bei erwachsenen männlichen Tennisspielern erfolgt. Wenige bis keine Studien berücksichtigten weder den Zusammenhang zu funktionellen konditionellen Leistungsdaten (z. B. Fitnessstests), verschiedene Altersklassen im Entwicklungsgang der Juniorenspieler*innen noch eine differenzierte Betrachtung des Geschlechts, sodass eine Übertragbarkeit vorhandener Erkenntnisse auf den Junior*innenbereich fraglich erscheint und bis dato nicht eindeutig geklärt werden konnte (Baiget et al., 2016; Bonato et al., 2015; Cohen et al., 1994; Ellenbecker, 1991; Gale-Watts & Nevill, 2016; Perry et al., 2004; Pugh et al., 2003; Signorile et al., 2005; Sögüt, 2016; Vaverka & Cernosek, 2013; Wong et al., 2014). Erst in den Folgejahren dieser vorliegenden Publikation (Zeitraum 2018-2022) nahm die Betrachtung letztgenannter Aspekte deutlich zu (Colomar et al., 2020; Fernandez-Fernandez et al., 2019; Hayes et al., 2021; Koya et al., 2022; Palmer et al., 2018; Sánchez-Pay et al., 2021; Sögüt, 2018), sodass zum jetzigen Zeitpunkt eine solidere Diskussionsbasis gegeben ist. Ein Großteil dieser Studien bildeten nun ebenfalls auch funktionelle athletische Testungen (z. B. Medizinballwürfe, Sprünge, Sprints) ab.

Die Ergebnisse der ersten Studie unterstreichen die Bedeutung der Power/Schnellkraft der oberen Extremität, ausgedrückt durch die Medizinballwürfe, auf die Aufschlaggeschwindigkeit in allen Altersklassen beider Geschlechter unabhängig von der Wurfausführung (über Kopf (üK), Vorhand (VH)- und Rückhandseite (RH)). Bei den Medizinballwürfen handelt es sich um (semi-) spezifische explosive Bewegungsmuster der oberen Extremitäten, die dabei auch auf einer sequenzierten und koordinierten Kraftübertragung (kinetische Kette) basieren. Der Prädiktionwert der Medizinballwürfe und daraus abgeleitet der Schnellkraft der oberen Extremität wird in den letzten drei Jahren durch weitere Untersuchungen, u. a. auch bei Juniorenspieler*innen, belegt (Fernandez-Fernandez et al., 2019; Koya et al., 2022; Sánchez-Pay et al., 2021). Auch in den letztgenannten Studien wurde die Leistung bei Medizinballwürfen als starker Prädiktor identifiziert. Während die vorliegenden Ergebnisse mit denen von Fernandez-Fernandez et al. (2019) vergleichbar sind, zeigten die Daten von Koya et al. (2022) bei männlichen Juniorenspielern (Alter $14,7 \pm 2,0$ Jahre) sogar deutlich höhere Korrelationskoeffizienten (MB üK $r = 0,81$).

Neben dieser determinierenden Schnellkraft-/Power-Komponente sowie der damit einhergehenden sequenziellen Bewegungskoordination spielt auch die (Maximal-)Kraft der oberen Extremität eine bedeutende Rolle. In den Ergebnissen dieser Studie durch die Handkraft ($r =$

0,43–0,59 ♂; $r = 0,27–0,37$ ♀) repräsentiert, zeigten viele weitere Studienergebnisse signifikante Zusammenhänge zwischen u. a. der Kraft der Schulterinnenrotation, Ellenbogenextension sowie ebenfalls der Handkraft und der Aufschlaggeschwindigkeit auf (Baiget et al., 2016; Cohen et al., 1994; Fernandez-Fernandez et al., 2019; Hayes et al., 2021; Perry et al., 2004; Signorile et al., 2005). Diese Befunde unterstreichen die Bedeutung der Kraft der oberen Extremität für die Realisierung und Entwicklung hoher Ballgeschwindigkeiten. Allerdings stehen sie kontrovers zu weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen, die diesen genannten Prädiktionwert nicht nachweisen konnten (Ellenbecker, 1991; Pugh et al., 2003). Diese Diskrepanz zu den Ergebnissen der vorliegenden Studie sowie auch in Bezug zu den weiteren aufgeführten Untersuchungen kann u. a. durch die eingesetzte Messmethodik erklärt werden. Spezifische Messverfahren, wie z. B. isokinetische Kraftmessungen unter konstanter Bewegungsgeschwindigkeit oder statische isometrische Krafttestungen, weisen Rahmenbedingungen auf, z. B. die Isolierung einzelner Bewegungsmuster, die wenig mit der realen Ausführung der Aufschlagbewegung zu tun haben (Fernandez-Fernandez et al., 2014). Darüber hinaus liegen oft differierende Stichprobenpopulationen (z.B. bezüglich Altersspanne oder Leistungsstand) sowie kleine Stichproben vor, denen die statistische Power fehlt.

Interessanterweise scheint die Schnellkraft der unteren Extremität weniger direkten Einfluss auf die Aufschlaggeschwindigkeit zu nehmen. Die erhobenen Parameter im Rahmen des Countermovement Jump (CMJ), der Wiederholungssprünge sowie des Standweitsprungs weisen in Abhängigkeit der Altersklassen und des Geschlechts kleine bis moderate und – im Vergleich zur oberen Extremität – deutlich geringere Effekte zur Aufschlaggeschwindigkeit auf. Diese Tendenz konnte mittlerweile auch in weiteren Studien festgestellt werden und bestätigt die eigenen Erkenntnisse aus dem Jahr 2018 (Baiget et al., 2016; Bonato et al., 2015; Colomar et al., 2020; Dossena et al., 2018; Palmer et al., 2018; Pugh et al., 2003). In gewisser Weise erscheinen diese Ergebnisse überraschend, da u. a. nach Kibler (2014) in den Beinen und im Rumpf 51–55 % der kinetischen Energie und Kraft entwickelt wird und die Bewegung der unteren Extremität erheblich zur Kraftentfaltung beiträgt, die für einen Aufschlag erforderlich ist (Koya et al., 2022). Bereits in Kapitel 2.2 ist die Komplexität der Aufschlagbewegung dargestellt worden, inklusive der Beteiligung der Beinarbeit sowie ihrer Bedeutung zur Unterstützung der Effektivität der kinetischen Kette. Es zeigt sich, dass die (Schnell-)Kraft-Parameter der unteren Extremität möglicherweise nicht so entscheidend sind wie ihre entsprechenden koordinativen Aspekte innerhalb der Aufschlagbewegung. Für diese Annahme sprechen auch die Befunde von Dossena et al. (2018). Sie stellten heraus, dass die Spieler beim Tennisaufschlag nur 27–33 % ihrer maximalen Sprunghöhe realisieren.

Hinsichtlich des Einflusses anthropometrischer Prädiktoren auf die Aufschlaggeschwindigkeit zeigten sich Zusammenhänge zur Körpergröße, Spannweite sowie zum Körpergewicht. Während bei den Jungen moderate bis hohe Zusammenhänge beobachtet wurden, sind diese bei den Mädchen geringer ausgeprägt (m: $r = 0,31-0,57$; w: $r = 0,24-0,39$). Bereits vor der zugrunde liegenden Untersuchung zeigten erste Ergebnisse Zusammenhänge von anthropometrischen Merkmalen – vorrangig der Körpergröße – zur Aufschlaggeschwindigkeit auf. Diese Erkenntnisse beziehen sich allerdings auf erwachsene und professionelle sowie männliche Tennisspieler (Bonato et al., 2015; Gale-Watts & Nevill, 2016; Söğüt, 2018; Vaverka & Cernosek, 2013; Wong et al., 2014). Die eigenen Ergebnisse untermauern die Bedeutsamkeit ausgewählter anthropometrischer Charakteristika nun auch im Juniorenbereich sowie für beide Geschlechter. In diesem Zusammenhang scheint eine größere Körperlänge einen positiven Effekt auf den Aufschlag auszuüben. Dies lässt vermuten, dass sich z. B. durch längere Segmentverbindungen oder günstigere Hebelwirkungen biomechanische Vorteile in der Kraftentwicklung und -übertragung ergeben, die es ermöglichen, eine größere Kraftübertragung auf den Tennisball zu realisieren (Bonato et al., 2015).

Bei Annahme solcher biomechanischer Vorteile würde eine Spezialisierung auf den Aufschlag und somit eine weitere Priorisierung und Umsetzung eines Aufschlagtrainings diese weiter verstärken. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Höhe des Treffpunkts von verschiedenen Größen abhängt, wie u. a. der vertikalen Sprunghöhe, der Höhe und Position der Schlagschulter und der Segmentlängen des Arm-Schläger-Komplexes (Bonato et al., 2015). Bei der Betrachtung der Länge des Schlagarms und des Schlägers konnte in Untersuchungen von Bonato et al. (2015) allerdings kein Zusammenhang zur Geschwindigkeit des 1. und 2. Aufschlags festgestellt werden. Darüber hinaus ermöglichen eine große Körperhöhe und große Spannweite – beide Faktoren interkorrelieren stark miteinander – einen höheren Balltreffpunkt und damit einhergehend eine größere Fläche im gegnerischen Aufschlagfeld, in der der Ball platziert werden kann, sodass die Wahrscheinlichkeit eines gültigen Aufschlags ansteigt. Aus theoretischer und biomechanischer Betrachtung muss der Balltreffpunkt idealerweise in einer Höhe von 2,74 m erfolgen, um einen erfolgreichen Aufschlag zu realisieren (Chow et al., 2003; Vaverka & Cernosek, 2013). Mit steigender Treffpunkthöhe vergrößert sich das Feld, in dem der Ball platziert werden kann. Vaverka und Cernosek (2013) resümieren, dass größere Spieler*innen durch einen höheren Balltreffpunkt mit höheren Aufschlaggeschwindigkeiten servieren können als kleinere Spieler*innen bei der gleichen Wahrscheinlichkeit eines erfolgreichen Aufschlags.

Bei der differenzierten geschlechtsspezifischen Betrachtung fällt auf, dass bei den Spielerinnen das Körpergewicht ebenfalls ein starker Prädiktor in den Regressionsmodellen darstellte. Mit Blick auf das biomechanische Prinzip der Krafterzeugung kann sich eine größere Masse

positiv auswirken (Wong et al., 2014). Aufgrund der biologischen Entwicklung bei Frauen nach der Pubertät kommt es zu einer physiologisch bedingten Zunahme der Körpermasse (Draper, 2014), bei der es schwieriger ist, eine hohe aktive Körpermasse im Vergleich zu ihren männlichen Pendanten zu erreichen. Betrachtet man den Somatotyp der Tennisspieler*innen, so zeigt sich bei den männlichen Spielern ein ektomorpher, bei den weiblichen Spielerinnen ein endomorpher Körperbau (Sánchez-Muñoz et al., 2007). Aufgrund der Vorteile hinsichtlich der Kraftproduktion scheint eine tendenziell höhere Körpermasse im Nachwuchsleistungstennis bei den Mädchen toleriert zu werden – einhergehend mit limitierenden Effekten auf die Schnelligkeit/Agility sowie die Ausdauer (Fernandez-Fernandez et al., 2019; Ferrauti et al., 2014) – während bei den Jungen eine athletische Körperzusammensetzung als zwingende Voraussetzung erscheint. Dies spiegelt sich auch in dem unterschiedlichen Spielprofil von Männern und Frauen wider (u. a. schnellere Schlag- und Laufgeschwindigkeiten, kürzere Ballwechsel, größere Anzahl gewonnener Punkte mit dem Aufschlag bei den Männern) (Fernandez-Fernandez et al., 2019; Reid et al., 2016). Die hier dargelegten Erkenntnisse wurden in der Zwischenzeit auch bereits von weiteren Studien bestätigt (Fernandez-Fernandez et al., 2019; Hayes et al., 2021; Koya et al., 2022; Sánchez-Pay et al., 2021). Diese untermauern den relevanten Einfluss der Körperhöhe sowie insbesondere des Körpergewichts bei der weiblichen Stichprobe (Fernandez-Fernandez et al., 2019) im Nachwuchsleistungstennis.

Kinematische Qualitätsmerkmale des Tennisaufschlags

Die Regressionsmodelle aus Studie 1 zeigten auf, dass mit ausgewählten konditionellen und anthropometrischen Faktoren die Varianz zu 41–66 % und 19–45 % in der männlichen und weiblichen Stichprobe erklärt werden kann. Ähnliche Befunde ließen sich auch in Untersuchungen von Fernandez-Fernandez et al. (2019) anhand ebenfalls anthropometrischer und konditioneller Faktoren feststellen (m U13: 71,3 %, m U15: 60,2 %, w U13: 17,1 %, w U15: 34,5 %). Diese Ergebnisse untermauern, dass viele weitere Einflussgrößen die Aufschlagleistung bestimmen können. Ein perfektes und nahezu vollständiges Prädiktionsmodell der Aufschlagleistung zu entwickeln scheint aufgrund der Komplexität der Bewegung nur schwer möglich (Fernandez-Fernandez et al., 2019). Weitere bedeutende Faktoren stellen in diesem Zusammenhang die individuellen technisch-kordinativen Fähigkeiten dar (Baiget et al., 2016).

Differenzierte Erfassungssysteme erlauben vertiefte Einblicke in bewegungswissenschaftliche kinematische Details der Aufschlagbewegung, die durch das bloße Trainerauge nicht erkennbar sind. Dies bekräftigt die Notwendigkeit und Dringlichkeit der Identifizierung kinematischer Prädiktoren mithilfe von Motion-Capturing-Systemen. Das im Rahmen dieser Dissertation durchgeführte Forschungsprojekt „Der schnelle Arm im Tennis – trainings- und bewegungs-

wissenschaftliche Analysen zur Optimierung der Aufschlagqualität im Nachwuchsleistungstennis“ (BISp-Forschungsförderung, ZMVI4-072017/16) fokussierte dieses beschriebene Problem. Erste Ergebnisse einer Pilotstudie (N = 10) zeigten u. a., dass während der Vorbereitungsphase (Laden) des geraden Aufschlags die Lateralflexion des Rumpfes einen wichtigen Prädiktor der Aufschlaggeschwindigkeit darstellt. Bei einem Vergleich schneller (SA) und langsamer Aufschläger (LA; Stichprobenaufteilung erfolgte in Abhängigkeit repräsentativer Normwerte, s. Ulbricht, 2015) ergab sich ein signifikanter Unterschied in diesem Parameter mit höherer Lateralflexion bei der schnellen Aufschlaggruppe (SA $16,9 \pm 2,5^\circ$, LA $10,5 \pm 5,4^\circ$). Des Weiteren zeigte sich die Tendenz ($p > 0,05$, Effektstärken (ES) $-0,78$ bis $-1,35$), dass auch die Winkelgeschwindigkeit der Knieextension (hinteres Bein; SA $544,4 \pm 69^\circ/s$, LA $470,9 \pm 51,9^\circ/s$), der Ellenbogenextension (SA $1729,5 \pm 195,5^\circ/s$, LA $1492,1 \pm 439,7^\circ/s$) sowie der Schulterinnenrotation (SA $2185,3 \pm 240,7^\circ/s$, LA $1911,7 \pm 239,6^\circ/s$) bei der schnellen Aufschlaggruppe höher war, ebenso wie die Lateralflexion des Rumpfes zum Zeitpunkt des Balltreffpunkts (SA $28,9 \pm 3,1^\circ$, LA $21,2 \pm 10,7^\circ$) (unveröffentlichte Daten).

Darüber hinaus offenbaren diese bewegungswissenschaftlichen Analysen Details, die bislang in der öffentlichen Wahrnehmung auch in Expertenkreisen verborgen blieben. Im Kontext der variablen Aufschlagbedingungen hinsichtlich der beiden Aufschlagseiten (Einstand- und Vorteilseite) existieren zu den bewegungsanalytischen Charakteristika bislang nur wenige Erkenntnisse, sodass bisherige Technikmodelle diese Aspekte (Technik in Abhängigkeit der Aufschlagseite) vollständig unberücksichtigt lassen.

So zeigten die Ergebnisse der zweiten Studie (Publikation 2), dass sich bei nahezu identischer Aufschlaggeschwindigkeit sowohl zahlreiche kinematische Bewegungsmerkmale als auch die Ballkinematik zwischen dem ersten geraden Aufschlag von der Einstand- und Vorteilseite unterschieden. Dies betraf die Ausgangsposition des vorderen Fußes zur Grundlinie (Einstandseite (ESS): $39,7 \pm 17,6^\circ$ vs. Vorteilseite (VS): $31,1 \pm 17,4^\circ$), den seitlichen Abstand zwischen den Füßen (ESS: $16,3 \pm 12,9$ cm vs. VS: $26,2 \pm 11,9$ cm) sowie die Rumpfrotation (ESS: $130,5 \pm 19,8^\circ$ vs. VS: $126,7 \pm 21,1^\circ$). Letztgenannter Unterschied zeigte sich vor allem bei der Footback-Aufschlagtechnik. Darüber hinaus differierte der Balltreffpunkt im Seitenvergleich (in Relation zum Fuß bei der Startposition) (ESS: $30,0 \pm 24,1$ cm vs. VS: $10,3 \pm 23,3$ cm). Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass Tennisspieler ihre Technik in Abhängigkeit der Aufschlagseite ohne erkennbare Notwendigkeit modifizieren und Unterschiede in der kinematischen Bewegungsausführung zu beobachten sind.

Bei seitenunabhängiger Betrachtung der kinematischen Daten sind diese vergleichbar mit bereits vorhandenen Literaturbefunden (Reid et al., 2010, 2011, 2013; Wagner et al., 2014). Die

identifizierten seitenbezogenen kinematischen Unterschiede sind zwar teilweise gering, können aber einen bedeutsamen Faktor für die Trainingspraxis darstellen. Die deskriptive Betrachtung des Unterschieds der Rumpffrotation ergab zudem, dass die Differenz bei der Foot-back-Aufschlagtechnik stärker ausgeprägt war. Dies ist damit zu erklären, dass die Spieler der Foot-up-Technik ihre Ausgangsfußposition durch das Heranziehen des hinteren Beins zu diesem Zeitpunkt bereits neutralisiert haben. Die beobachtete größere Rumpffrotation auf der Einstandseite kann vor allem aufgrund der Ausgangsposition von Fuß- und Rumpffposition sowie der entsprechenden Zielausrichtung des gegenüberliegenden Aufschlagfeldes erklärt werden.

Obwohl eine Änderung in der Startposition der Fuß- und Rumpfausrichtung – hin zu einer offeneren Position – auf der Einstandseite beobachtet wurde, konnten diese Anpassungen nicht zu einer identischen Bewegungskinematik des Rumpfes führen. Die Startpositionierung (Fußstellung und einhergehend Rumpffrotation zur Grundlinie) erfolgt vermutlich bei vielen Spieler*innen (und auch Trainer*innen) intuitiv in Bezug zur Grundlinie und weniger in Abhängigkeit der Schlagrichtung. Bei biomechanischer Betrachtung erscheint eine Positionierung unter Berücksichtigung der Aufschlagrichtung allerdings empfehlenswert. In diesem Fall (Einstandseite) würde eine weitere Anpassung zu einer offeneren Ausgangsposition (der hintere Fuß wird lateral weiter nach rechts positioniert) erfolgen. Dies würde die generelle Körperausrichtung zum Ziel verändern und mit einer identischeren Bewegungsausführung auf beiden Aufschlagseiten einhergehen. Ebenso könnte eine Angleichung der Aufschlagbewegung bezüglich der Rumpffrotation durch eine Anpassung auf der Vorteilseite erfolgen. In diesem Fall müsste die Ausgangsposition (Fuß- und Rumpffposition) zu einer stärker geschlossenen Ausrichtung adjustiert werden. In diesem Zusammenhang könnte ebenso eine Anpassung an die verschiedenen Aufschlagrichtungen innerhalb einer Seite diskutiert werden (Mitte, Körper, Außen). Allerdings würde dies zu taktischen Nachteilen führen, wenn der/die Gegenspieler*in anhand der Körperausrichtung die Aufschlagrichtung antizipieren könnte. Bei einer Anpassung in Abhängigkeit von der Aufschlagseite entstünde hingegen kein taktischer Nachteil. In der Trainingspraxis könnte eine Angleichung zu einer identischeren Aufschlagbewegung auf beiden Aufschlagseiten vor allem im Technikerwerbstraining eine Rolle spielen und den Lernprozess gegebenenfalls vereinfachen und beschleunigen, ohne dass erkennbare Nachteile auftreten. Im Falle von erheblichen Aufschlagschwächen auf einer der beiden Seiten könnten selbst Spitzenspieler*innen im Einzelfall durch entsprechende Adaptationen profitieren.

Die Ergebnisse zeigten, dass der Balltreffpunkt im Seitenvergleich auf der Einstandseite deutlich stärker lateral links erfolgte. Die erhobenen Daten der Einstandseite sind vergleichbar mit weiteren Untersuchungsbefunden (Reid et al., 2010). Im Vergleich zu erwachsenen Spielern zeigte sich jedoch, dass diese einen weniger stark links-ausgerichteten Balltreffpunkt aufwei-

sen als Juniorenspieler. Aufgrund geringerer Körperhöhen bei Juniorenspieler*innen und damit einhergehenden niedrigeren Balltreffpunkten erfolgen die Aufschläge häufig mit einer größeren Spinrate zum Zweck einer ausreichenden Ballflugkurve über dem Netz, die mit weiter links ausgerichteten Balltreffpunkten einhergehen (Abrams et al., 2011; Carboch et al., 2018; Reid et al., 2011). Der Seitenunterschied in der Ausrichtung des lateralen Balltreffpunkts kann durch die geometrische Raumbeziehung zwischen den Ausgangspositionen und dem Aufschlagziel erklärt werden. Dies wird auch von Reid et al. (2011) sowie Carboch et al. (2018) bestätigt, die aufzeigten, dass bei Aufschlägen von der Einstandseite nach „Außen“ ein signifikant weiter links ausgerichteter Balltreffpunkt vorliegt (Balltreffpunkt an Zielrichtung ausgerichtet) als bei Aufschlägen durch die Mitte (T-Linie). Daher lässt sich schließen, dass der Balltreffpunkt an die Zielrichtung ausgerichtet ist. Dieser Argumentation folgend, ließe sich auch der weniger weit nach links ausgerichtete Balltreffpunkt von der Vorteilseite erklären. Der Balltreffpunkt in frontaler (Y) und vertikaler (Z) Ausrichtung zeigte keinen seitenbedingten Unterschied auf. Der geringfügig höhere Balltreffpunkt im Vergleich zu anderen Untersuchungen (Reid et al., 2010) kann auf die größere Körperlänge innerhalb der vorliegenden Stichprobe zurückzuführen sein und bestätigt die empfohlene Balltreffpunkthöhe von 150 % der Spieler*innengröße (Whiteside et al., 2013b).

Orthopädische Betrachtung

Die deskriptive Erfassung des Verletzungsstatus in Studie 3 ergab eine mittlere bis hohe Verletzungsprävalenz bei jungen Tennisspieler*innen, ohne dass Unterschiede hinsichtlich des Leistungsniveaus zwischen Landeskaderspieler*innen (LKS) und Junior-Davis-Cup-Spielern (DCS) festgestellt werden konnten. Dennoch ließ sich ein Trend zu höheren Verletzungszahlen bei den Junior-Davis-Cup-Spielern erkennen. Hinsichtlich des Effekts des Leistungsniveaus auf das Verletzungsrisiko besteht bislang kein Konsens. Während Baxter-Jones und Kollegen (1993) nicht davon ausgehen, dass leistungsstarke junge Athlet*innen (einhergehend mit intensivem Training) ein höheres Verletzungsrisiko aufweisen, zeigte sich in einem Review von Emery (2003) ein höheres Risiko mit steigendem Leistungsniveau in der Sportart Ringen. In der Sportart Tennis wiesen Studienergebnisse von Jayanthi et al. (2005) ebenfalls keine Unterschiede in Abhängigkeit verschiedener Leistungsklassen bei erwachsenen Tennisspielern auf. Die Tendenz zu geringfügig höheren Zahlen bei den Junioren-Davis-Cup-Spielern könnte mit den höheren Trainingsvolumina und der größeren Anzahl von Turnieren in dieser Gruppe erklärt werden. Diese genannten Trainings- und Wettkampfdaten (Volumen Tennistraining: DCS $15,1 \pm 4,3$ h/Woche (W), LKS $9,8 \pm 3,7$ h/W; Volumen Konditionstraining: DCS $7,6 \pm 3,7$ h/W, LKS $4,5 \pm 2,2$ h/W; Volumen Gesamttraining: DCS $22,7 \pm 6,8$ h/W, LKS $14,4 \pm 4,5$ h/W; Anzahl gespielter Matches: DCS $75,6 \pm 12,5$, LKS $57,2 \pm 18,7$) unterschieden

sich signifikant zwischen den beiden Leistungsgruppen ($p < 0,05$). Der Einfluss von Trainingsvolumen und -intensität auf das Verletzungsrisiko ist dabei bereits mehrfach bestätigt worden (DiFiori et al., 2014; Gruchow & Pelletier, 1979; Kitai et al., 1986).

Hinsichtlich der Lokalisation der erfassten Verletzungen stimmen die vorliegenden Daten mit bestehenden Literaturbefunden überein (Ellenbecker et al., 2009; Perkins & Davis, 2006; Pluim et al., 2006; Pluim et al., 2016). Mit Fokus auf die obere Extremität innerhalb der letzten 12 Monate zeigten die Ergebnisse der Landeskaderspieler*innen und Davis-Cup-Spieler, dass die Schulter (32 % und 44 %) am häufigsten von Beschwerden betroffen war, gefolgt von der Hand/dem Handgelenk (25 % und 33 %) sowie dem Ellenbogen (19 % und 0 %). Diese Verteilung innerhalb der oberen Extremität wiesen auch Untersuchungen von McCurdie et al. (2016) auf. Die eigenen Daten zeigten zudem, dass sich in 87 % der Fälle die Beschwerden vor allem beim Aufschlag abzeichnen und weniger bei Vorhand- (50 %) und Rückhandschlägen (11 %). Ebenfalls ergab sich in der Schulter die höchste Schmerzrate während der Ausführung des Tennisaufschlags. Dabei bestätigten die Ergebnisse die These, dass Schulterbeschwerden häufig mit dem Tennisaufschlag einhergehen (Elliott et al., 2003; Johnson et al., 2006; Martin et al., 2014).

Verletzungen der oberen Extremität/der Schulter sind überwiegend den chronischen, aus Überbeanspruchung resultierenden und weniger den akut eintretenden Verletzungen zuzuordnen (Kibler & Safran, 2005; Moreno-Pérez et al., 2019). Derartige Beschwerden stehen häufig in Zusammenhang mit Pathologien der Rotatorenmanschette, einer Scapula-Dyskinesie oder einem glenohumeralen Innenrotationsdefizit, welche mit Schulter-Impingement und Labrum-pathologien einhergehen (Abrams et al., 2012). Dass der Aufschlag nicht nur den bedeutsamsten Schlag bezogen auf die Spielleistung darstellt, sondern auch den, der die größte Beanspruchung für die involvierten Strukturen des aktiven und passiven Bewegungsapparats, insbesondere der Schulter, hervorruft, ist in der Literatur zweifelsfrei belegt (Elliott et al., 2003; Fernandez-Fernandez et al., 2019; Fu et al., 2018; Martin et al., 2014; Reid et al., 2007).

Die in diesem Kontext kritischen Phasen sowie Positionen sind bereits in den Kapiteln 2.2 und 2.3 beschrieben worden. In einem Komplex von Risikofaktoren (u. a. Trainingsvolumen, -intensität, Wettkampfbelastung, muskuläre Schwäche und Ungleichgewicht, Ausrüstung etc.) spielt die exzessive Last, die während des Aufschlags auf die Gelenke und sonstigen Strukturen wirkt, eine wichtige Rolle, da sie repetitive Mikrotraumata induzieren kann, die die Entstehung von Überlastungsschäden begünstigen (Martin et al., 2014). So bestehen signifikante Beziehungen zwischen der Gelenkbelastung und chronischen Verletzungen (Anz et al., 2010; Reid et al., 2007). Eine derartige Belastung scheint bei der Bewegungsausführung des Ten-

nisaufschlags zwar unvermeidlich, dennoch sollten vermeidbare hohe Lasten so weit wie möglich umgangen werden. Vor diesem Hintergrund zeigten Martin et al. (2014), dass bei professionellen Tennisspielern eine geringere Kraft (shoulder inferior force & anterior force, shoulder horizontal abduction torque) auf das Schultergelenk wirkte als bei leistungsschwächeren Spielern, ohne dass Verluste in der Aufschlaggeschwindigkeit zu verzeichnen waren. Somit kommt einem optimalen Bewegungsablauf der kinematischen Kette sowie damit einhergehend der technischen Ausführung eine bedeutende und auch präventiv wirkende Rolle zu. Vor diesem Hintergrund ist auch der sogenannte Leg-Drive (Beineinsatz) in der Vorbereitungsphase des Ladens zu beachten. Spieler mit einem effektiven Beineinsatz, die Autor*innen sprechen von einer Knieflexion von mehr als 15°, wiesen geringere Drehmomente in der Schulterinnenrotation auf als die Gruppe von Spielern mit einer Knieflexion von nur 8° (Elliott et al., 2003).

Durch die einseitige und sich stetig wiederholende Bewegungsausführung der Tennisschläge und speziell der -aufschläge kommt es zudem häufig zu Veränderungen in der Schulterbeweglichkeit (ROM) (Marcondes et al., 2013; Moreno-Pérez et al., 2015) sowie in der Schulterkraft der Schulterinnen- und Schulteraußenrotation (Cools et al., 2014). Das glenohumerale Innenrotationsdefizit (Verlust ROM-Innenrotation von mehr als 18-20° im Vergleich zur nicht dominanten Schulter), das glenohumerale Außenrotationsdefizit (Verlust ROM-Außenrotation > 5° im Vergleich zur nicht-dominanten Schulter) (Fernandez-Fernandez et al., 2019; Moreno-Pérez et al., 2019) und das Kraftverhältnis der Schulteraußenrotation/-innenrotation (< 60–85 %) (Chandler et al., 1992) stellen bedeutende Risikofaktoren für das Auftreten von Überlastungsschäden der Schulter dar. Das glenohumerale Innenrotationsdefizit ist dabei mit die häufigste Fehlanpassung und tritt bereits in frühem Alter auf (Kibler et al., 1996; Kibler & Safran, 2005; Roetert et al., 2000). Dies ist der Hauptauslöser für weitere biomechanische Veränderungen, die zu einer veränderten Humerusposition während der Rotation führen und Schulterverletzungen prädisponieren (Kibler & Safran, 2005; Vad et al., 2003).

Die vorliegenden Ergebnisse der allgemeinen Verletzungsprävalenzen zeigten bei den Junior-Davis-Cup-Spielern zudem häufige Beschwerden im unteren Rücken an (67 %). Somit lagen diese – gemeinsam mit den Schulterbeschwerden – auf Platz zwei hinter den Knieverletzungen. Auch im Zuge der Rückenbeschwerden muss der Tennisaufschlag als potenzieller Risikofaktor angesehen werden (Abrams et al., 2011; Campbell et al., 2013; Dines et al., 2015). Während der Lade- und Spannphase der Vorbereitung befindet sich der/die Tennisspieler*in in einer Hyperextension des Rumpfes sowie einer ipsilateralen Flexion und Rotation. Diese Position belastet die Facettengelenke der Wirbelkörper und stellt dabei einen potenziellen Faktor für die Entwicklung einer Spondylolyse dar (Alyas et al., 2007; Kovacs & Ellenbecker, 2011b). Ebenfalls ergeben die wiederholten Rotationskräfte in Verbindung mit der Hyperextension ein erhöhtes Risiko für eine lumbale Bandscheibendegeneration (Dines et al.,

2015). In diesem Zusammenhang zeigten auch die Rumpffrotationsumfänge aus Studie 2 deutlich höhere Werte als bislang in der Literatur beschrieben (Reid et al., 2013; Wagner et al., 2014), mit signifikant größerem Umfang auf der rechten Aufschlagseite. Sie sollten somit auch vor dem Hintergrund möglicher Risikofaktoren für Verletzungen Beachtung finden.

6 Schlussfolgerungen und Praxisempfehlungen

Die im Tennis zunehmende leistungslimitierende Bedeutung einer hohen Aufschlaggeschwindigkeit einerseits und die mit dem Aufschlag einhergehende Verletzungsprävalenz bringen Trainer*innen und Betreuer*innen im Nachwuchsleistungssport in ein Dilemma bei der Priorisierung von Trainingszielen. Dies wird zusätzlich noch dadurch verstärkt, dass die Leistungsstruktur im Altersgang von der U12 zur U16 erheblichen Änderungen unterliegt und vergleichsweise plötzlich die Erfolgsrelevanz des Aufschlags steigt. Der Tennisaufschlag stellt einen hochkomplexen Schlag im Tennissport dar, welcher von einer Vielzahl an Einflussgrößen und Determinanten bestimmt wird. Die vorliegende Arbeit hat sich auf eine differenzierte Betrachtung einzelner Faktoren des Tennisaufschlags im Nachwuchsleistungssport aus wissenschaftlicher Sicht fokussiert und dabei wesentliche Befunde für die Trainingspraxis und die Trainingssteuerung im Nachwuchsleistungstennis identifiziert.

Im Rahmen einer differenzierten Identifikation von grundlegenden leistungsbestimmenden Prädiktoren des Tennisaufschlags konnte die (Maximal-)Kraft und die Schnellkraft/Power der oberen Extremität aus einer Vielzahl an physischen Einflussfaktoren als bedeutsamste Determinante identifiziert werden. Neben diesen athletischen Faktoren kristallisierten sich ebenfalls die Körpergröße sowie das Körpergewicht als anthropometrische Prädiktoren heraus. Der Aufklärungsgrad der Regressionsanalysen zur Aufschlaggeschwindigkeit zeigte vor allem bei den weiblichen Spielerinnen, dass ein Großteil der Varianz auch von weiteren Faktoren abhängig ist. In diesem Kontext ist anzunehmen, dass aufgrund der genetisch geringer ausgebildeten Kraftkomponenten im Vergleich zu männlichen Spielern vor allem auch technisch-koordinative Faktoren von großer Bedeutung sind. Dies spiegelt sich auch hinsichtlich des Altersgangs wider. Die kinematische Bewegungsanalyse des Tennisaufschlags unter Berücksichtigung der verschiedenen Aufschlagseiten untermauerte, dass sich bei gleicher Aufschlaggeschwindigkeit zahlreiche kinematische Bewegungsmerkmale im Seitenvergleich der Aufschlagseiten (Einstand- vs. Vorteilseite) unterschieden. Die vorgenommenen geringfügigen, aber unzureichenden Änderungen der Startposition konnten dies nicht kompensieren. Die Daten zur Verletzungsprävalenz in der vorliegenden Arbeit sowie die Befunde aus diversen Publikationen anderer Autor*innen lassen mit Blick auf die obere Extremität die Schulter als die Körperregion erkennen, an der die häufigsten Verletzungen auftreten, wobei Schulterbeschwerden dominant mit der Ausführung des Tennisaufschlags einhergehen.

Diese Ergebnisse sollten in der Praxis sowohl bei der Schwerpunktsetzung eines begleitenden Konditionstrainings zur Verbesserung der Aufschlagleistung in entsprechenden Trainingsinterventionen, in einem Techniktraining, in einem Verletzungspräventionsprogramm sowie in

der Talentselektion Berücksichtigung finden. Zunächst sollte im Nachwuchsbereich eine zielichere Prognose über die final zu erwartende Körperhöhe erfolgen, sodass genau die Spieler*innen frühzeitig identifiziert werden können, bei denen eine Schwerpunktsetzung im Hinblick auf die Aufschlagoptimierung im Vordergrund stehen sollte. Aufgrund biomechanischer Vorteile (z. B. Hebelwirkungen der Segmente) bei großen Spieler*innen sollten diese durch ein gezieltes Aufschlagtraining weiter verstärkt werden. Es empfiehlt sich, Schwächen und Defizite im Bereich der Schnellkraft/Power der oberen Extremität frühzeitig entgegenzuwirken. Dabei gilt es – auch wenn die Effekte am stärksten in dem Alter der Pubertät ausfallen – im Sinne des langfristigen Leistungsaufbaus eine altersentsprechende Vorbereitung sowie eine altersentsprechende Entwicklung der genannten Faktoren zu realisieren. Trainingsinterventionen zur Verbesserung der Schnellkraft/Power der oberen Extremität, u. a. mit Einsatz von Medizinbällen, sind in der Literatur bereits evaluiert (Escamilla et al., 2010; Fernandez-Fernandez et al., 2013; Fernandez-Fernandez et al., 2016). Diese sollten stets und in ausreichendem Maße durch verletzungspräventive Maßnahmen begleitet werden. Durch die Anwendung dieser Erkenntnisse und eine resultierende Schwerpunktsetzung im Training erfolgt zugleich eine zeitliche Ökonomisierung des Trainings auch für weitere wichtige Trainingsinhalte (u. a. Technik, Taktik etc.). Darüber hinaus ist es ebenfalls empfehlenswert, die Medizinballtests in regelmäßige Leistungsdiagnostiken einzubinden. Die Erfassung der Weite der Medizinballwürfe ist ein einfaches und ohne aufwendiges Equipment durchzuführendes Diagnostiktool mit hoher Spezifität zum Tennisaufschlag. Umfangreiche Normwerte zur Beurteilung des Leistungsstands liegen in der Literatur vor (Fernandez-Fernandez et al., 2014; Ulbricht, 2015; Ulbricht et al., 2016). Neben der bereits beschriebenen Beachtung der Körpergröße sollte des Weiteren mit Blick auf die Anthropometrie ein höheres Körpergewicht bei Tennisspielerinnen durchaus toleriert werden.

Im Hinblick auf die beschriebenen kinematischen Unterschiede im Seitenvergleich des Aufschlags sollten aus lernökonomischen Gründen die Lehrmethoden schon im Anfängerunterricht hinterfragt und gegebenenfalls anhand der vorliegenden Ergebnisse verändert werden. Beispielsweise scheint eine Körperausrichtung beim Tennisaufschlag in Anlehnung an die entsprechende Zielrichtung – und nicht wie bislang an die Grundlinie – erstrebenswert. Dies kann durch eine offeneren Startposition auf der Einstandseite oder durch eine geschlosseneren Startposition auf der Vorteilseite erreicht werden (Anpassung der Fuß- und Rumpfposition). Vor allem im Rahmen des Technikerwerbstrainings sollten diese Erkenntnisse Berücksichtigung finden, da sie den Lernprozess durch einen stabileren Fähigkeitserwerb mit geringerer Variabilität in der Aufschlagkinematik vereinfachen würden. Bei wiederholten und erheblichen Schwächen auf einer der beiden Aufschlagseiten könnten selbst Elitespieler*innen eine leichte

Anpassung reflektieren und durch entsprechende seitenabhängige Adaptationen eine verbesserte Bewegungskinematik realisieren.

Des Weiteren sind die Erkenntnisse der Identifikation von verletzungsanfälligen Körpersegmenten vor allem vor dem Hintergrund der Implementierung spezifischer präventiver und/oder rehabilitativer Programme von besonderer Bedeutung, da sich Verletzungen leistungslimitierend auswirken.

Aufgrund der großen Bedeutung des Tennisaufschlags auf die komplexe Gesamtleistung im Tennis gilt es, die identifizierten physischen wie auch anthropometrischen leistungslimitierenden Faktoren ebenfalls in die zukünftige Talentselektion zu integrieren, da sie eine entsprechende Talentsensitivität besitzen (Ulbricht, 2015; Ferrauti et al., 2014). Auch wenn dies nicht direkt aus den vorliegenden Daten abgeleitet werden kann, ist es wichtig, im Kontext der Beurteilung der konditionellen und anthropometrischen Parameter dem biologischen Entwicklungsstand (z. B. Peak-Height-Velocity (Mirwald et al., 2002)) gebührende Beachtung zu schenken, um gegebenenfalls retardierte Spieler*innen nicht unberücksichtigt zu lassen.

Zusammenfassende Schlussfolgerungen für die Praxis – 8-Punkte-Programm:

1. Optimierung der Technikvermittlung der Aufschlagbewegung (alle Varianten und von beiden Aufschlagseiten) bereits im frühen Lernalter und Investition eines größeren Zeitbudgets bei der Aufschlagvermittlung.
2. Integration von Überkopftätigkeiten (Würfe mit Bällen unterschiedlichen Gewichts) in das Nachwuchstraining bei Mädchen und Jungen, auch zu Lasten des tennisspezifischen Trainings und des Trainings der Grundlinienschläge. Entwicklung spielerischer und interessanter Trainingsinhalte hierzu.
3. Entwicklungsgerechte Vorbereitung athletischer Fähigkeiten mit Fokus auf Power/Schnellkraft der oberen Extremität.
4. Regelmäßige leistungsdiagnostische Überprüfung der Überkopfwurf- und Schlagleistung (z. B. Weitwurf oder technologisch unterstützte Radarmessung) im Entwicklungsverlauf.
5. Individuelle Schwerpunktsetzung der Trainingsinhalte in Abhängigkeit von anthropometrischen, entwicklungsprognostischen und spielstrategischen Besonderheiten.
6. Verletzungspräventive Maßnahmen bereits im Kindesalter unter Berücksichtigung von Schultergelenkstabilität und -beweglichkeit und unter beidseitiger (Schlagarm und Nichtschlagarm) sowie richtungsbalancierter Durchführung (d. h. Schulterinnen- und Schulteraußenrotation sowie rückwärtige Bewegungen).
7. Frühzeitige Erfassung der Schmerzsymptomatik durch validierte Erfassungssysteme und Periodisierung von Trainingsmaßnahmen unter Beschränkung der Umfänge maximaler Beschleunigungen.

8. Monitoring von Trainingsvolumen und Trainingsintensität zur Vermeidung trainingsinduzierter Überlastung.

7 Zusammenfassung

Der Tennisaufschlag hat sich zur wichtigsten Schlagtechnik im modernen Tennissport entwickelt. Aufgrund seiner Bedeutsamkeit für die komplexe Wettkampfleistung und auch seiner Besonderheit der weitgehenden Autonomie der Schlagausführung ist eine Priorisierung der Aufschlagverbesserung zur Eröffnung von Leistungsreserven im Rahmen der langfristigen Leistungssteuerung dringend empfehlenswert. Bisherige Studien zeigten a) ein uneinheitliches Bild hinsichtlich potenzieller Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit, b) eine geringe Beachtung kinematischer Technikmodelle in Abhängigkeit der variablen Ausgangsbedingungen (z. B. Aufschlagseite) und c) legten dar, dass leistungslimitierende Verletzungsprävalenzen vermehrt in den Vordergrund rücken. Dabei fokussierten sich diese Studien vorrangig auf erwachsene und professionelle Tennisspieler*innen. Vor diesem Hintergrund war es das Ziel dieser Dissertation 1) eine differenzierte Identifikation von grundlegenden leistungsbestimmenden Prädiktoren des Tennisaufschlags – speziell im Nachwuchsleistungstennis, 2) eine vertiefte kinematische Betrachtung von Qualitätsmerkmalen der Aufschlagtechnik sowie 3) die Erfassung möglicher leistungslimitierender Faktoren und Verletzungsprävalenzen für die am Tennisaufschlag primär beteiligten Strukturen des aktiven und passiven Bewegungsapparats vorzunehmen.

Ziel der ersten Studie war die Entwicklung eines Leistungsstrukturmodells des Tennisaufschlags. Im Rahmen einer umfangreichen multivariaten Leistungsdiagnostik wurden potenzielle anthropometrische und konditionelle Einflussfaktoren und deren Zusammenhang zur Aufschlaggeschwindigkeit untersucht. Die Identifizierung und Quantifizierung erfolgte dabei differenziert in Abhängigkeit des Geschlechts und der verschiedenen Altersklassen (U12-U18). Hierfür nahmen 1019 leistungsselektierte Juniorenspieler*innen (Landeskader) (m: N = 625, w: N = 394) an einer umfangreichen konditionellen Leistungsdiagnostik teil, in welcher anthropometrische (u. a. Körpergröße, Gewicht, Spannweite) und konditionelle (u. a. Handkraft, Medizinballwurfweite, Sprints, CMJ, Ausdauer) Parameter erfasst wurden. Mittels Korrelations- und Regressionsanalysen wurden die Zusammenhänge zur Aufschlaggeschwindigkeit bestimmt sowie Regressionsmodelle erstellt. Die Ergebnisse zeigten, dass hinsichtlich physischer Leistungsfaktoren vor allem die (Maximal-)Kraft und Schnellkraft/Power der oberen Extremität bedeutende Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit (Weite der Medizinballwürfe: $r = 0,49-0,63$ ♂; $r = 0,20-0,60$ ♀, Handkraft: $r = 0,43-0,59$ ♂; $r = 0,27-0,37$ ♀) darstellten. Hinsichtlich anthropometrischer Prädiktoren der Aufschlaggeschwindigkeit konnten die höchsten Zusammenhänge bei der Körpergröße ($r = 0,31-0,52$ ♂; $r = 0,26-0,38$ ♀), der Spannweite ($r = 0,37-0,56$ ♂; $r = 0,24-0,36$ ♀) sowie dem Körpergewicht ($r = 0,44-0,57$ ♂; $r = 0,35-0,39$

♀) gefunden werden. Multiple Regressionsanalysen ergaben, dass mit einer Kombination einzelner Prädiktoren (Medizinballwürfe, Handkraft, Armspannweite und Körpergewicht) 41–66 % der Varianz der Aufschlaggeschwindigkeit bei den Jungen und 19–45 % der Varianz in der weiblichen Stichprobe erklärt werden konnten.

Die zweite Studie erlaubte durch differenzierte Erfassungssysteme des Motion Capturings (8-Kamera-Vicon Motion System) bewegungsanalytische Details des Tennisaufschlags zu detektieren. Neben der Identifizierung grundsätzlicher leistungslimitierender kinematischer Größen (z. B. Rumpflateralflexion, Schulterinnenrotationsgeschwindigkeit) richtete sich der Fokus insbesondere auf die variablen Ausführungsbedingungen des Tennisaufschlags – dem Vergleich kinematischer Faktoren von der Einstand- und Vorteilseite. Hierfür absolvierten 14 männliche Juniorentennisspieler (Mittelwert \pm SD; Alter $14,6 \pm 1,8$ Jahre, Körpergröße $176,0 \pm 15,9$ cm, Körpergewicht $61,4 \pm 16,3$ kg) in randomisierter Reihenfolge acht gerade Aufschläge sowohl von der Einstand- als auch von der Vorteilseite in ein definiertes Zielfeld (auf den Körper des Gegenspielers). Die Ergebnisse zeigten bei identischer Aufschlaggeschwindigkeit sowohl zahlreiche kinematisch differierende Bewegungsmerkmale als auch eine differierende Ballkinematik zwischen dem Aufschlag von der Einstand- und Vorteilseite. Dies betraf u. a. die Ausgangsposition des vorderen Fußes zur Grundlinie (Einstandseite (ESS): $39,7 \pm 17,6^\circ$ vs. Vorteilseite (VS): $31,1 \pm 17,4^\circ$), den seitlichen Abstand zwischen den Füßen (ESS: $16,3 \pm 12,9$ cm vs. VS: $26,2 \pm 11,9$ cm) sowie die Rumpfrotation (ESS: $130,5 \pm 19,8^\circ$ vs. VS: $126,7 \pm 21,1^\circ$). Letztgenannter Unterschied zeigte sich vor allem bei der Foot-back-Aufschlagtechnik. Dabei bedingen sich Startposition und Rumpfrotation; unzureichende Kompensationen beim Seitenwechsel führen zu größeren Rumpfrotationen auf der Einstandseite.

In der dritten Studie wurden – neben athletischen Leistungsdaten – die allgemeine Verletzungsprävalenz unter besonderer Berücksichtigung der oberen Extremität und des Aufschlags sowie Trainingsdaten auf höchstem Leistungsniveau bei den besten deutschen Nachwuchsspieler*innen der U16 betrachtet. 12 Junioren-Davis-Cup-Spieler (Mittelwert \pm SD; Alter: $15,6 \pm 1,1$ Jahre) sowie zwei Stichproben regionaler Landeskaderspieler*innen (Mittelwert \pm SD; Stichprobe 1, männlich: N = 60, Alter: $14,9 \pm 2,5$ Jahre; weiblich: N = 47, Alter $14,6 \pm 2,1$ Jahre; Stichprobe 2: männlich N = 59, Alter: $15,2 \pm 0,6$ Jahre) nahmen an der Studie teil. Die athletischen Leistungsdaten sind in einer umfangreichen Leistungsdiagnostik erfasst worden, während die Verletzungsprävalenzen über einen Fragebogen und die Trainingsdaten durch eine systematische Befragung erhoben wurden. Die Ergebnisse zeigten bessere athletische Leistungsvoraussetzungen (Effektstärke (ES): $0,75$ – $1,26$) sowie höhere Trainingsvolumina (ES: $1,23$ – $1,66$) bei den Junioren-Davis-Cup-Spielern im Vergleich zu den regionalen Landeskaderspielern auf. Die Erfassung von Verletzungen ergab mittlere bis hohe Verletzungsprävalenzen bei den jungen Tennisspieler*innen, ohne Unterschiede hinsichtlich des Leistungsniveaus

zwischen Landeskaderspieler*innen und Junior-Davis-Cup-Spielern feststellen zu können. Dennoch ließ sich ein Trend zu höheren Verletzungszahlen in Junior-Davis-Cup-Spielern erkennen. Mit Fokus auf die obere Extremität innerhalb der letzten 12 Monate ergab sich bei den Landeskaderspieler*innen und Davis-Cup-Spielern, dass die Schulter (32 % und 44 %) am häufigsten von Beschwerden betroffen war, gefolgt von der Hand/dem Handgelenk (25 % und 33 %) sowie dem Ellenbogen (19 % und 0 %).

Die Ergebnisse untermauern die Komplexität des Tennisaufschlags; relevante Prädiktoren (athletisch, anthropometrisch, kinematisch) sowie limitierende Verletzungspotenziale wurden identifiziert. In der langfristigen Trainingssteuerung sollte eine entsprechende Priorisierung hinsichtlich der genannten Prädiktoren erfolgen sowie frühzeitig im Technikerwerb die Besonderheiten der Aufschlagseite berücksichtigt werden. Ein besonderer Fokus muss dabei begleitenden verletzungspräventiven Maßnahmen zukommen. Darüber hinaus ist es empfehlenswert, die identifizierten Faktoren in die Talentselektion zu implementieren.

7.1 Abstract

The modern game of tennis has evolved from a primarily technique-based sport to a more explosive sport, thus becoming increasingly dynamic and fast-paced. At present, the game is characterised by strength, speed, and power with higher stroke and serve velocities of up to 200 km/h, which makes service a key factor in game success. Due to its importance, identifying predictors of serve performance can be highly beneficial for developing training guidelines. Nevertheless, previous studies have shown inconsistent findings regarding potential predictors of service speed. Furthermore, there is limited research on the kinematic characteristics and biomechanical models of different service techniques (i. e., service sides). In addition to its criticality in tennis performance, the serve also exerts high loads on body segments, thereby increasing the risk of injury. Therefore, the purpose of the current doctoral thesis was to evaluate the predictors of serve performance, based on different age groups and sex, to analyse the kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court sides as well as to evaluate injury rates and their occurrence during serves in German elite junior tennis players.

The purpose of the first study was to analyse the relationship between physical performance components, anthropometric characteristics, and serve velocity (SV) in elite junior tennis players, depending on their sex and age group. Hence, a sample of the 1,019 (male = 625, female = 394) top junior squad tennis players of the German Tennis Federation participated in the study, which involved complex anthropometric measurements (body height, body mass, sitting

height, and arm span) and physical tests (e. g., SV, medicine ball throws [MBTs], hand grip strength, push-ups, back extension, countermovement jumps [CMJs], horizontal jumps, 20-m sprint, and tennis-specific endurance). The results show that among all the anthropometric and physical characteristics analysed, the MBTs ($r = 0.49\text{--}0.63$ ♂; $r = 0.20\text{--}0.60$ ♀), hand grip strength ($r = 0.43\text{--}0.59$ ♂; $r = 0.27\text{--}0.37$ ♀), arm span ($r = 0.37\text{--}0.56$ ♂; $r = 0.24\text{--}0.36$ ♀), body height ($r = 0.31\text{--}0.52$ ♂; $r = 0.26\text{--}0.38$ ♀), and body mass ($r = 0.44\text{--}0.57$ ♂; $r = 0.35\text{--}0.39$ ♀) were closely correlated with serve velocity. The results of the multiple regression analysis indicated that the combination of the selected predictors (e. g., MBTs, grip strength, arm span, and body mass) explained 41–66% of the variance in SV for boys and 19–45% for girls.

The second cross-sectional study aimed to evaluate body and ball kinematics of flat serves from the ad (AD) and deuce (D) service sides. A total of 14 elite male junior players (mean \pm SD; age: 14.6 ± 1.8 years; height: 176.0 ± 15.9 cm; body weight: 61.4 ± 16.3 kg) participated within a controlled semi-court laboratory setting and performed eight flat first serves to a target field directed to the receiver's body from both service positions in a matched and counterbalanced order. An 8-camera Vicon system was used to capture the 3D-landmark trajectories. The mean service velocity was found to be similar on both sides (D: 151.4 ± 19.8 km/h vs. AD: 150.5 ± 19.4 km/h), while multiple characteristics of the serve and ball kinematics differed significantly ($p < 0.05$). At the starting position, the front-foot angle relative to the baseline (D: $39.7 \pm 17.6^\circ$ vs. AD: $31.1 \pm 17.4^\circ$) and lateral distance between the feet (D: 16.3 ± 12.9 cm vs. AD: 26.2 ± 11.9 cm) were significantly different. The upper torso range of motion from maximum clockwise rotation until impact was significantly greater on the deuce court (D: $130.5 \pm 19.8^\circ$ vs. AD: $126.7 \pm 21.1^\circ$), being especially pronounced in the foot-back technique players. Concerning ball kinematics, differences in the lateral ball impact location (D: 30.0 ± 24.1 cm vs. AD: 10.3 ± 23.3 cm) were observed.

The aim of the third study was to analyse athletics, training characteristics, and the prevalence of musculoskeletal symptoms in male junior tennis Davis Cup players (DC) in comparison to their regional counterparts. For this purpose, 12 junior DC (male) and two samples of regional squad players (RS 1: $n = 60$ males, $n = 47$ females; RS 2: $n = 59$ males) were recruited to partake in physical testing, an interview for data evaluation on training characteristics, and a questionnaire survey regarding the frequency of orthopedic injury. The results indicated higher physical performance levels (effect size (ES) 0.75–1.26) and training volumes (ES 1.23–1.66) in DC. Injury frequencies showed moderate-to-high prevalence with no differences ($p > 0.05$) between DC and RS. Nevertheless, a trend of higher injury rates in junior DC were identified. In the upper extremity, the shoulder (RS 32 %, DC 44 %) was most frequently affected, followed by the hand/wrist (RS 25 %, DC 33 %) and the elbow (RS 19 %, DC 0 %).

The results support the complexity of the tennis serve and identify important predictors (athletic, anthropometric, kinematic) of serve performance. In learning the tennis serve and skill acquisition, technical improvements and adaptations are recommended depending on the service side. In long-term training, an appropriate prioritisation with regard to the predictors mentioned should be indicated and considered in talent identification. Furthermore, the implementation of a high-quality tennis-specific injury prevention programme during training is required, as it may lessen the severity of overload injuries and enhance a player's performance.

8 Literaturverzeichnis

- Abrams, G. D., Harris, A. H. S., Andriacchi, T. P. & Safran, M. R. (2014). Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system. *British journal of sports medicine*, 48 (4), 339–342. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091371>
- Abrams, G. D., Renstrom, P. A. & Safran, M. R. (2012). Epidemiology of musculoskeletal injury in the tennis player. *British journal of sports medicine*, 46 (7), 492–498. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091164>
- Abrams, G. D., Sheets, A. L., Andriacchi, T. P. & Safran, M. R. (2011). Review of tennis serve motion analysis and the biomechanics of three serve types with implications for injury. *Sports biomechanics*, 10 (4), 378–390. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.629302>
- Alyas, F., Turner, M. & Connell, D. (2007). MRI findings in the lumbar spines of asymptomatic, adolescent, elite tennis players. *British journal of sports medicine*, 41 (11), 836-41; discussion 841. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.037747>
- Anz, A. W., Bushnell, B. D., Griffin, L. P., Noonan, T. J., Torry, M. R. & Hawkins, R. J. (2010). Correlation of torque and elbow injury in professional baseball pitchers. *The American journal of sports medicine*, 38 (7), 1368–1374. <https://doi.org/10.1177/0363546510363402>
- Bahamonde, R. (1989). Kinetic analysis of the serving arm during the performance of the tennis serve. *Journal of Biomechanics*, 22 (10), 983.
- Baiget, E., Corbi, F., Fuentes, J. P. & Fernández-Fernández, J. (2016). The relationship between maximum isometric strength and ball velocity in the tennis serve. *Journal of human kinetics*, 53, 63–71. <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0028>
- Baxter-Jones, A., Maffulli, N. & Helms, P. (1993). Low injury rates in elite athletes. *Archives of disease in childhood*, 68 (1), 130–132. <https://doi.org/10.1136/adc.68.1.130>
- Behringer, M., Neuerburg, S., Matthews, M. & Mester, J. (2013). Effects of two different resistance-training programs on mean tennis-serve velocity in adolescents. *Pediatric exercise science*, 25 (3), 370–384. <https://doi.org/10.1123/pes.25.3.370>
- Bonato, M., Maggioni, M. A., Rossi, C., Rampichini, S., La Torre, A. & Merati, G. (2015). Relationship between anthropometric or functional characteristics and maximal serve velocity in professional tennis players. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 55 (10), 1157–1165.
- Campbell, A., Straker, L., O'Sullivan, P., Elliott, B. & Reid, M. (2013). Lumbar loading in the elite adolescent tennis serve. Link to low back pain. *Medicine and science in sports and exercise*, 45 (8), 1562–1568. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31828bea5e>

- Carboch, J., Tufano, J. J. & Süß, V. (2018). Ball toss kinematics of different service types in professional tennis players. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18 (6), 881–891. <https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1519750>
- Chandler, T. J., Kibler, W. B., Stracener, E. C., Ziegler, A. K. & Pace, B. (1992). Shoulder strength, power, and endurance in college tennis players. *The American journal of sports medicine*, 20 (4), 455–458. <https://doi.org/10.1177/036354659202000416>
- Changstrom, B. & Jayanthi, N. (2016). Clinical evaluation of the adult recreational tennis player. *Current sports medicine reports*, 15 (6), 437–445. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000315>
- Chow, J. W., Carlton, L. G., Lim, Y.-T., Chae, W.-S., Shim, J.-H., Kuenster, A. F. et al. (2003). Comparing the pre- and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis players' first and second serves. A preliminary study. *Journal of sports sciences*, 21 (7), 529–537. <https://doi.org/10.1080/0264041031000101908>
- Chow, J. W., Park, S.-A. & Tillman, M. D. (2009). Lower trunk kinematics and muscle activity during different types of tennis serves. *Sports medicine, arthroscopy, rehabilitation, therapy & technology: SMARTT*, 1 (1), 24. <https://doi.org/10.1186/1758-2555-1-24>
- Cohen, D. B., Mont, M. A., Campbell, K. R., Vogelstein, B. N. & Loewy, J. W. (1994). Upper extremity physical factors affecting tennis serve velocity. *The American journal of sports medicine*, 22 (6), 746–750. <https://doi.org/10.1177/036354659402200604>
- Colomar, J., Baiget, E. & Corbi, F. (2020). Influence of strength, power, and muscular stiffness on stroke velocity in junior tennis players. *Frontiers in physiology*, 11, 196. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00196>
- Cools, A. M., Palmans, T. & Johansson, F. R. (2014). Age-related, sport-specific adaptations of the shoulder girdle in elite adolescent tennis players. *Journal of athletic training*, 49 (5), 647–653. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.02>
- Cross, R. & Pollard, G. (2009). Grand Slam men's single tennis 1991-2009. Serve speed and other related data. *ITF Coaching and Sport Science Review*, 16 (49), 8–10.
- DiFiori, J. P., Benjamin, H. J., Brenner, J., Gregory, A., Jayanthi, N., Landry, G. L. et al. (2014). Overuse injuries and burnout in youth sports. A position statement from the American Medical Society for Sports Medicine. *Clinical journal of sport medicine: official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 24 (1), 3–20.
- Dines, J. S., Bedi, A., Williams, P. N., Dodson, C. C., Ellenbecker, T. S., Altchek, D. W. et al. (2015). Tennis injuries. Epidemiology, pathophysiology, and treatment. *The Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 23 (3), 181–189. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-13-00148>

- Dossena, F., Rossi, C., La Torre, A. & Bonato, M. (2018). The role of lower limbs during tennis serve. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 58 (3), 210–215. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06685-8>
- Draper, N. (2014). *Exercise physiology. Physical and functional growth and development* (1. Aufl.): Taylor and Francis.
- Ellenbecker, T. (1991). A total arm strength isokinetic profile of highly skilled tennis players. *Isokinetics and Exercise Science*, 1 (1), 9–21.
- Ellenbecker, T. S., Pluim, B., Vivier, S. & Sniteman, C. (2009). Common injuries in tennis players. Exercises to address muscular imbalances and reduce injury risk. *Strength and Conditioning Journal*, 31 (4), 50–58. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181af71cb>
- Elliott, B. (2006). Biomechanics and tennis. *British journal of sports medicine*, 40 (5), 392–396. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.023150>
- Elliott, B., Fleisig, G., Nicholls, R. & Escamilla, R. (2003). Technique effects on upper limb loading in the tennis serve. *Journal of science and medicine in sport*, 6 (1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/s1440-2440\(03\)80011-7](https://doi.org/10.1016/s1440-2440(03)80011-7)
- Elliott, B. & Wood, G. A. (1983). The biomechanics of the foot-up and foot-back tennis service techniques. *The Australian Journal of Sports Sciences*, 3 (2), 3–6.
- Elliott, B. C., Marshall, R. N. & Noffal, G. J. (1995). Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of applied biomechanics*, 11 (4), 433–442. <https://doi.org/10.1123/jab.11.4.433>
- Emery, C. A. (2003). Risk factors for injury in child and adolescent sport. A systematic review of the literature. *Clinical journal of sport medicine: official journal of the Canadian Academy of Sport Medicine*, 13 (4), 256–268. <https://doi.org/10.1097/00042752-200307000-00011>
- Escamilla, R. F., Fleisig, G. S., Yamashiro, K., Mikla, T., Dunning, R., Paulos, L. et al. (2010). Effects of a 4-week youth baseball conditioning program on throwing velocity. *Journal of strength and conditioning research*, 24 (12), 3247–3254. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181db9f59>
- Fernandez-Fernandez, J., Ellenbecker, T., Sanz-Rivas, D., Ulbricht, A. & Ferrauti, A. (2013). Effects of a 6-week junior tennis conditioning program on service velocity. *Journal of sports science & medicine*, 12 (2), 232–239.
- Fernandez-Fernandez, J., Nakamura, F. Y., Moreno-Perez, V., Lopez-Valenciano, A., Del Coso, J., Gallo-Salazar, C. et al. (2019). Age and sex-related upper body performance differences in competitive young tennis players. *PLOS ONE*, 14 (9), e0221761. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221761>

- Fernandez-Fernandez, J., Saez de Villarreal, E., Sanz-Rivas, D. & Moya, M. (2016). The effects of 8-week plyometric training on physical performance in young tennis players. *Pediatric exercise science*, 28 (1), 77–86. <https://doi.org/10.1123/pes.2015-0019>
- Fernandez-Fernandez, J., Ulbricht, A. & Ferrauti, A. (2014). Fitness testing of tennis players. How valuable is it? *British journal of sports medicine*, 48 Suppl 1, i22-31. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093152>
- Ferrauti, A. (Hrsg.). (2020). *Trainingswissenschaft für die Sportpraxis. Lehrbuch für Studium, Ausbildung und Unterricht im Sport*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Ferrauti, A., Fernandez-Fernandez, J., Klapsing, G. M., Ulbricht, A. & Rosenkranz, D. (2013). Diagnostic of footwork characteristics and running speed demands in tennis on different ground surfaces. *Sport-Orthopädie - Sport-Traumatologie - Sports Orthopaedics and Traumatology*, 29 (3), 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2013.07.017>
- Ferrauti, A., Hahn, D., Fett, J., Vuong, J.-L., Babel, S., Oberschelp, N. et al. (2018). Der schnelle Arm im Tennis – trainings- und bewegungswissenschaftliche Analysen zur Optimierung der Aufschlagqualität im Nachwuchsleistungstennis. In *BISp-Jahrbuch, Forschungsförderung 2017/18* (S. 215–221).
- Ferrauti, A., Maier, P. & Weber, K. (2014). *Handbuch für Tennistraining. Leistung, Athletik, Gesundheit* (3., überarb. und erw. Aufl.). Aachen: Meyer.
- Fett, J. (2012). *Vergleichende Betrachtung von technischen, taktischen, koordinativen und konditionellen Einflüssen auf die komplexe Spielleistung von Nachwuchstennisspielern*. Unveröffentlichte Masterarbeit: Ruhr-Universität Bochum.
- Fleisig, G., Nicholls, R., Elliott, B. & Escamilla, R. (2003). Kinematics used by world class tennis players to produce high-velocity serves. *Sports biomechanics*, 2 (1), 51–64. <https://doi.org/10.1080/14763140308522807>
- Fu, M. C., Ellenbecker, T. S., Renstrom, P. A., Windler, G. S. & Dines, D. M. (2018). Epidemiology of injuries in tennis players. *Current reviews in musculoskeletal medicine*, 11 (1), 1–5. <https://doi.org/10.1007/s12178-018-9452-9>
- Gale-Watts, A. S. & Nevill, A. M. (2016). From endurance to power athletes. The changing shape of successful male professional tennis players. *European journal of sport science*, 16 (8), 948–954. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1192690>
- Gillet, E., Leroy, D., Thouvarecq, R. & Stein, J.-F. (2009). A notational analysis of elite tennis serve and serve-return strategies on slow surface. *Journal of strength and conditioning research*, 23 (2), 532–539. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31818efe29>

- Girard, O., Micallef, J.-P. & Millet, G. P. (2005). Lower-limb activity during the power serve in tennis. Effects of performance level. *Medicine and science in sports and exercise*, 37 (6), 1021–1029.
- Girard, O., Micallef, J.-P. & Millet, G. P. (2007). Influence of restricted knee motion during the flat first serve in tennis. *Journal of strength and conditioning research*, 21 (3), 950–957.
<https://doi.org/10.1519/R-20876.1>
- Göktepe, A., Ak, E., Söğüt, M., Karabörk, H. & Korkusuz, F. (2009). Joint angles during successful and unsuccessful tennis serves kinematics of tennis serve. *Eklem hastalıkları ve cerrahisi = Joint diseases & related surgery*, 20 (3), 156–160.
- Grosser, M. & Schönborn, R. (2002). *Competitive tennis for young players. The road to becoming a top player*. Aachen: Meyer und Meyer Sport.
- Gruchow, H. W. & Pelletier, D. (1979). An epidemiologic study of tennis elbow. Incidence, recurrence, and effectiveness of prevention strategies. *The American journal of sports medicine*, 7 (4), 234–238. <https://doi.org/10.1177/036354657900700405>
- Hayes, M. J., Spits, D. R., Watts, D. G. & Kelly, V. G. (2021). Relationship between tennis serve velocity and select performance measures. *Journal of strength and conditioning research*, 35 (1), 190–197. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002440>
- Hizan, H., Whipp, P. & Reid, M. (2017). Comparison of serve and serve return statistics of high performance male and female tennis players from different age-groups. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 11 (2), 365–375. <https://doi.org/10.1080/24748668.2011.11868556>
- Hjelm, N., Werner, S. & Renstrom, P. (2010). Injury profile in junior tennis players. A prospective two year study. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy: official journal of the ESSKA*, 18 (6), 845–850. <https://doi.org/10.1007/s00167-010-1094-4>
- Hoskins, T. (2003). *The tennis drill book*. Champaign, Ill.: Human Kinetics.
- International Tennis Federation. *ITF Rules of Tennis; 2020*. Abgerufen von <https://www.itftennis.com/media/2510/2020-rules-of-tennis-english.pdf> [cited 1. September 2020].
- Jayanthi, N., Pinkham, C., Dugas, L., Patrick, B. & Labella, C. (2013). Sports specialization in young athletes. Evidence-based recommendations. *Sports health*, 5 (3), 251–257.
<https://doi.org/10.1177/1941738112464626>
- Jayanthi, N., Sallay, P. I., Hunker, P. & Przybylski, M. (2005). Skill-level related injuries in recreational competition tennis players. *Journal of Medicine Science in Tennis*, 10, 12–15.

- Johnson, C. D., McHugh, M. P., Wood, T. & Kibler, B. (2006). Performance demands of professional male tennis players. *British journal of sports medicine*, 40 (8), 696-699. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.021253>
- Kekelekis, A., Nikolaidis, P. T., Moore, I. S., Rosemann, T. & Knechtle, B. (2020). Risk factors for upper limb injury in tennis players. A systematic review. *International journal of environmental research and public health*, 17 (8). <https://doi.org/10.3390/ijerph17082744>
- Kibler, B. (2014). Understanding the kinetic chain in tennis performance and injury. *Aspetar Sports Medicine Journal*, 3, 492–497.
- Kibler, W. B. (1995). Biomechanical analysis of the shoulder during tennis activities. *Clinics in sports medicine*, 14 (1), 79–85.
- Kibler, W. B., Chandler, T. J., Livingston, B. P. & Roetert, E. P. (1996). Shoulder range of motion in elite tennis players. Effect of age and years of tournament play. *The American journal of sports medicine*, 24 (3), 279–285. <https://doi.org/10.1177/036354659602400306>
- Kibler, W. B. & Safran, M. (2005). Tennis injuries. *Medicine and sport science*, 48, 120–137. <https://doi.org/10.1159/000084285>
- Kibler, W. B., Chandler, T. J., Shapiro, R. & Conuel, M. (2007). Muscle activation in coupled scapulo-humeral motions in the high performance tennis serve. *British journal of sports medicine*, 41 (11), 745–749. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.037333>
- Kitai, E., Itay, S., Ruder, A., Engel, J. & Modan, M. (1986). An epidemiological study of lateral epicondylitis (tennis elbow) in amateur male players. *Annales de chirurgie de la main: organe officiel des sociétés de chirurgie de la main*, 5 (2), 113–121. [https://doi.org/10.1016/s0753-9053\(86\)80023-0](https://doi.org/10.1016/s0753-9053(86)80023-0)
- Kolman, N. S., Huijgen, B. C. H., Visscher, C. & Elferink-Gemser, M. T. (2021). The value of technical characteristics for future performance in youth tennis players. A prospective study. *PLOS ONE*, 16 (1), e0245435. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0245435>
- Kovacs, M. S. & Ellenbecker, T. S. (2011a). A performance evaluation of the tennis serve. Implications for strength, speed, power, and flexibility training. *Strength and Conditioning Journal*, 33 (4), 22–30. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e318225d59a>
- Kovacs, M. S. & Ellenbecker, T. S. (2011b). An 8-stage model for evaluating the tennis serve. Implications for performance enhancement and injury prevention. *Sports health*, 3 (6), 504–513. <https://doi.org/10.1177/1941738111414175>
- Kovacs, M. S. (2007). Tennis physiology. Training the competitive athlete. *Sports medicine (Auckland, N.Z.)*, 37 (3), 189–198. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737030-00001>

- Koya, N., Kitamura, T. & Takahashi, H. (2022). Prediction of service performance based on physical strength in elite junior tennis players. *Frontiers in psychology, 13*, 898224. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.898224>
- Kramer, T., Huijgen, B. C., Elferink-Gemser, M. T. & Visscher, C. (2016). A longitudinal study of physical fitness in elite junior tennis players. *Pediatric exercise science, 28* (4), 553–564. <https://doi.org/10.1123/pes.2016-0022>
- Kramer, T., Huijgen, B. C. H., Elferink-Gemser, M. T. & Visscher, C. (2017). Prediction of tennis performance in junior elite tennis players. *Journal of sports science & medicine, 16* (1), 14–21.
- Marcondes, F. B., Jesus, J. F. de, Bryk, F. F., Vasconcelos, R. A. de & Fukuda, T. Y. (2013). Posterior shoulder tightness and rotator cuff strength assessments in painful shoulders of amateur tennis players. *Brazilian journal of physical therapy, 17* (2), 185–194. <https://doi.org/10.1590/S1413-35552012005000079>
- Martin, C., Bideau, B., Ropars, M., Delamarche, P. & Kulpa, R. (2014). Upper limb joint kinetic analysis during tennis serve. Assessment of competitive level on efficiency and injury risks. *Scandinavian journal of medicine & science in sports, 24* (4), 700–707. <https://doi.org/10.1111/sms.12043>
- McCurdie, I., Smith, S., Bell, P. H. & Batt, M. E. (2017). Tennis injury data from The Championships, Wimbledon, from 2003 to 2012. *British journal of sports medicine, 51* (7), 607–611. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095552>
- Mirwald, R. L., Baxter-Jones, A. D. G., Bailey, D. A. & Beunen, G. P. (2002). An assessment of maturity from anthropometric measurements. *Medicine and science in sports and exercise, 34* (4), 689–694. <https://doi.org/10.1097/00005768-200204000-00020>
- Moreno-Pérez, V., Moreside, J., Barbado, D. & Vera-Garcia, F. J. (2015). Comparison of shoulder rotation range of motion in professional tennis players with and without history of shoulder pain. *Manual therapy, 20* (2), 313–318. <https://doi.org/10.1016/j.math.2014.10.008>
- Moreno-Pérez, V., Hernández-Sánchez, S., Fernandez-Fernandez, J., Del Coso, J. & Vera-Garcia, F. J. (2019). Incidence and conditions of musculoskeletal injuries in elite Spanish tennis academies. A prospective study. *The Journal of sports medicine and physical fitness, 59* (4), 655–665. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.18.08513-4>
- Oberschelp, N. (2017). *Kinematische Bewegungsanalyse des Tennisaufschlags in Abhängigkeit von Aufschlagtyp und Aufschlagseite im Nachwuchsleistungstennis*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum.
- Palmer, K., Jones, D., Morgan, C. & Zepieri, G. (2018). Relationship between range of motion, strength, motor control, power, and the tennis serve in competitive-level tennis players. A pilot study. *Sports health, 10* (5), 462–467. <https://doi.org/10.1177/1941738118785348>

- Perkins, R. H. & Davis, D. (2006). Musculoskeletal injuries in tennis. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 17 (3), 609–631. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2006.05.005>
- Perry, A. C., Wang, X., Feldman, B. B., Ruth, T. & Signorile, J. (2004). Can laboratory-based tennis profiles predict field tests of tennis performance? *Journal of strength and conditioning research*, 18 (1), 136–143. [https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2004\)018<0136:cltppf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2004)018<0136:cltppf>2.0.co;2)
- Pluim, B. M., Loeffen, F. G. J., Clarsen, B., Bahr, R. & Verhagen, E. A. L. M. (2016). A one-season prospective study of injuries and illness in elite junior tennis. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 26 (5), 564–571. <https://doi.org/10.1111/sms.12471>
- Pluim, B. M., Staal, J. B., Windler, G. E. & Jayanthi, N. (2006). Tennis injuries. Occurrence, aetiology, and prevention. *British journal of sports medicine*, 40 (5), 415–423. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.023184>
- Pugh, S. F., Kovalski, J. E., Heitman, R. J. & Gilley, W. F. (2003). Upper and lower body strength in relation to ball speed during a serve by male collegiate tennis players. *Perceptual and motor skills*, 97 (3 Pt 1), 867–872. <https://doi.org/10.2466/pms.2003.97.3.867>
- Reid, M., Elliott, B. & Alderson, J. (2007). Shoulder joint loading in the high performance flat and kick tennis serves. *British journal of sports medicine*, 41 (12), 884–889. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.036657>
- Reid, M., Elliott, B. & Alderson, J. (2008). Lower-limb coordination and shoulder joint mechanics in the tennis serve. *Medicine and science in sports and exercise*, 40 (2), 308–315. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31815c6d61>
- Reid, M., Morgan, S. & Whiteside, D. (2016). Matchplay characteristics of Grand Slam tennis. Implications for training and conditioning. *Journal of sports sciences*, 34 (19), 1791–1798. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1139161>
- Reid, M. & Schneiker, K. (2008). Strength and conditioning in tennis. Current research and practice. *Journal of science and medicine in sport*, 11 (3), 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.05.002>
- Reid, M., Whiteside, D. & Elliott, B. (2010). Effect of skill decomposition on racket and ball kinematics of the elite junior tennis serve. *Sports biomechanics*, 9 (4), 296–303. <https://doi.org/10.1080/14763141.2010.535843>
- Reid, M., Whiteside, D. & Elliott, B. (2011). Serving to different locations. Set-up, toss, and racket kinematics of the professional tennis serve. *Sports biomechanics*, 10 (4), 407–414. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.629206>

- Reid, M., Whiteside, D., Gilbin, G. & Elliott, B. (2013). Effect of a common task constraint on the body, racket, and ball kinematics of the elite junior tennis serve. *Sports biomechanics*, 12 (1), 15–22. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.724702>
- Roetert, E. P., Ellenbecker, T. S. & Brown, S. W. (2000). Shoulder internal and external rotation range of motion in nationally ranked junior tennis players. *Journal of strength and conditioning research*, 14 (2), 140–143. <https://doi.org/10.1519/00124278-200005000-00004>
- Roetert, E. P., Ellenbecker, T. S. & Reid, M. (2009). Biomechanics of the tennis serve. Implications for strength training. *Strength and Conditioning Journal*, 31 (4), 35–40. <https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181af65e1>
- Roetert, E. P., McCormick, T. J., Brown, S. W. & Ellenbecker, T. S. (1996). Relationship between isokinetic and functional trunk strength in elite junior tennis players. *Isokinetics and Exercise Science*, 6 (1), 15–20. <https://doi.org/10.3233/IES-1996-6103>
- Salzmann, S. N., Maquirriain, J., Shue, J. & Girardi, F. P. (2018). Spine injuries in tennis. In Di Giacomo, G., Ellenbecker, T. & Kibler, W. (Eds.), *Tennis Medicine*, (S. 111–118). Springer.
- Sánchez-Muñoz, C., Sanz, D. & Zabala, M. (2007). Anthropometric characteristics, body composition and somatotype of elite junior tennis players. *British journal of sports medicine*, 41 (11), 793–799. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.037119>
- Sánchez-Pay, A., Ramón-Llin, J., Martínez-Gallego, R., Sanz-Rivas, D., Sánchez-Alcaraz, B. J. & Frutos, S. (2021). Fitness testing in tennis. Influence of anthropometric characteristics, physical performance, and functional test on serve velocity in professional players. *PLOS ONE*, 16 (11), e0259497. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259497>
- Sheets, A. L., Abrams, G. D., Corazza, S., Safran, M. R. & Andriacchi, T. P. (2011). Kinematics differences between the flat, kick, and slice serves measured using a markerless motion capture method. *Annals of biomedical engineering*, 39 (12), 3011–3020. <https://doi.org/10.1007/s10439-011-0418-y>
- Signorile, J. F., Sandler, D. J., Smith, W. N., Stoutenberg, M. & Perry, A. C. (2005). Correlation analyses and regression modeling between isokinetic testing and on-court performance in competitive adolescent tennis players. *Journal of strength and conditioning research*, 19 (3), 519–526. <https://doi.org/10.1519/R-15514.1>
- Sögüt, M. (2016). Ball speed during the tennis serve in relation to skill level and body height. *Pamukkale Journal of Sports Science*, 7 (2), 51–57.
- Sögüt, M. (2018). Stature. Does it really make a difference in match-play outcomes among professional tennis players? *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 18 (2), 255–261. <https://doi.org/10.1080/24748668.2018.1466259>

- Tanabe, S. & Ito, A. (2007). A three-dimensional analysis of the contributions of upper limb joint movements to horizontal racket head velocity at ball impact during tennis serving. *Sports biomechanics*, 6 (3), 418–433. <https://doi.org/10.1080/14763140701491500>
- Tennisgate. *How to serve in tennis: the 6-step guide*. Abgerufen von <https://www.tennisgate.com/how-to-serve/> [cited 1. September 2020].
- Ulbricht, A. (2015). *Athletische Fähigkeiten im Nachwuchsleistungstennis – Relevanz für Leistungsfähigkeit, Talentselektion und individualisierte Trainingssteuerung*. Dissertationsschrift: Ruhr-Universität Bochum.
- Ulbricht, A., Fernandez-Fernandez, J., Mendez-Villanueva, A. & Ferrauti, A. (2016). Impact of fitness characteristics on tennis performance in elite junior tennis players. *Journal of strength and conditioning research*, 30 (4), 989–998. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001267>
- Vad, V. B., Gebeh, A., Dines, D., Altchek, D. & Norris, B. (2003). Hip and shoulder internal rotation range of motion deficits in professional tennis players. *Journal of science and medicine in sport*, 6 (1), 71–75. [https://doi.org/10.1016/S1440-2440\(03\)80010-5](https://doi.org/10.1016/S1440-2440(03)80010-5)
- Van der Hoeven, H. & Kibler, W. B. (2006). Shoulder injuries in tennis players. *British journal of sports medicine*, 40 (5), 435-40; discussion 440. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.023218>
- Vaverka, F. & Cernosek, M. (2013). Association between body height and serve speed in elite tennis players. *Sports biomechanics*, 12 (1), 30–37. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.670664>
- Vuong, J.-L. (2017). *Analyse leistungslimitierender Charakteristika des Tennisaufschlags mittels kinematischer Bewegungsanalyse im Nachwuchsleistungstennis*. Unveröffentlichte Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum
- Wagner, H., Pfusterschmied, J., Tilp, M., Landlinger, J., Duvillard, S. P. von & Müller, E. (2014). Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 24 (2), 345–354. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01503.x>
- Weber, K. & Born, P. (2012). Die besondere Bedeutung der erweiterten Spieleröffnung im Leistungstennis. Begründung, Leitlinien und Umsetzung in die Trainingspraxis. *Leistungssport*, 42 (6), 26–32.
- Weber, K., Exler, T., Marx, A., Pley, C., Röbbel, S. & Schäffkes, C. (2010). Schnellere Aufschläge, kürzere Ballwechsel und höherer Zeitdruck für Grundschläge in der Tennis-Weltspitze. Darstellung am Beispiel der Herren. *Leistungssport*, 40 (5), 36–42.

- Whiteside, D., Elliott, B., Lay, B. & Reid, M. (2013a). A kinematic comparison of successful and unsuccessful tennis serves across the elite development pathway. *Human movement science*, 32 (4), 822–835. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.06.003>
- Whiteside, D., Elliott, B., Lay, B. & Reid, M. (2013b). The effect of age on discrete kinematics of the elite female tennis serve. *Journal of applied biomechanics*, 29 (5), 573–582. <https://doi.org/10.1123/jab.29.5.573>
- Wong, F. K., Keung, J. H., Lau, N. M., Ng, D. K., Chung, J. W. & Chow, D. H. (2014). Effects of body mass index and full body kinematics on tennis serve speed. *Journal of human kinetics*, 40, 21–28. <https://doi.org/10.2478/hukin-2014-0003>
- Wuelker, N., Korell, M. & Thren, K. (1998). Dynamic glenohumeral joint stability. *Journal of shoulder and elbow surgery*, 7 (1), 43–52. [https://doi.org/10.1016/s1058-2746\(98\)90182-3](https://doi.org/10.1016/s1058-2746(98)90182-3)

9 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1	8-Stage-Modell nach Kovacs und Ellenbecker 2011b, S. 505	10
Abb. 2	Gesamtdesign des Arbeitsprogramms	18

10 Abkürzungsverzeichnis

BMI	= Body-Mass-Index
CMJ	= Countermovement Jump
DCS	= Davis-Cup-Spieler
DTB	= Deutscher Tennis Bund
ES	= Effektstärke
ESS	= Einstandseite
ITF	= International Tennis Federation
LA	= langsame Aufschlaggruppe
LKS	= Landeskaderspieler*in
m	= männlich
MB	= Medizinball
Nm	= Newtonmeter
ROM	= Range of Motion
RH	= Rückhand
SA	= schnelle Aufschlaggruppe
SD	= Standardabweichung
üK	= über Kopf
VH	= Vorhand
VS	= Vorteilseite
vs.	= versus
W	= Woche
w	= weiblich
Y	= Richtung frontal
Z	= Richtung horizontal
♂	= männlich
♀	= weiblich

11 Anhang

Darstellung der Autorenbeiträge

Artikel 1

Janina Fett:	Konzeption, Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Analyse und Interpretation der Daten, Formulierung des Manuskripts, Revision des Manuskripts
Alexander Ulbricht:	Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Revision des Manuskripts
Alexander Ferrauti:	Einwerbung Drittmittel, Konzeption, Analyse und Interpretation der Daten, Revision des Manuskripts

Artikel 2

Janina Fett:	Konzeption, Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Analyse und Interpretation der Daten, Formulierung des Manuskripts, Revision des Manuskripts
Nils Oberschelp:	Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Analyse und Interpretation der Daten
Jo-Lam Vuong:	Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Analyse und Interpretation der Daten, Revision des Manuskripts
Thimo Wiewelhove:	Revision des Manuskripts
Alexander Ferrauti:	Einwerbung Drittmittel, Konzeption, Analyse und Interpretation der Daten, Revision des Manuskripts

Artikel 3

Janina Fett:	Konzeption, Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Analyse und Interpretation der Daten, Formulierung des Manuskripts, Revision des Manuskripts
Alexander Ulbricht:	Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Revision des Manuskripts
Thimo Wiewelhove:	Datenerhebung, Durchführung der Untersuchung, Analyse und Interpretation der Daten, Revision des Manuskripts
Alexander Ferrauti:	Konzeption, Analyse und Interpretation der Daten, Revision des Manuskripts

Manuskript 2 – [Open Access]

Fett, J., Oberschelp, N., Vuong, J., Wiewelhove, T. & Ferrauti, A. (2021). Kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court service positions in elite junior players. *PLOS ONE*, 16 (7): e0252650.650.

Zugriff unter:

<https://journals.plos.org/plosone/article/authors?id=10.1371/journal.pone.0252650>

RESEARCH ARTICLE

Kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court service positions in elite junior players

Janina Fett *, Nils Oberschelp, Jo-Lâm Vuong, Thimo Wiewelhove, Alexander Ferrauti

Department of Training & Exercise Science, Faculty of Sport Science, Ruhr University Bochum, Bochum, Germany

* janina.fett@rub.de



Abstract

Purpose

According to the official rules of the International Tennis Federation, players have to serve alternately from two different positions: the deuce (right, D) and the ad court (left, AD) side. This study aimed to compare body and ball kinematics of flat serves from both service sides.

Methods

In a controlled, semi-court laboratory setting, 14 elite male junior players served eight flat first serves to a target field directed to the receiver's body from both service positions in a matched and counterbalanced order. An 8-camera-Vicon-System was used to capture the 3D-landmark trajectories.

Results

The mean service velocity was found to be similar on both sides (D: 151.4 ± 19.8 vs. AD: 150.5 ± 19.4 km/h), while multiple characteristics of the serve and ball kinematics differed significantly ($p < .05$). At starting, the front-foot angle relative to the baseline (D: $39.7 \pm 17.6^\circ$ vs. AD: $31.1 \pm 17.4^\circ$) and lateral distance between the feet (D: 16.3 ± 12.9 cm vs. AD: 26.2 ± 11.9 cm) were significantly different. During the service, upper torso range of motion from maximum clockwise rotation until impact was significantly greater on the deuce court (D: $130.5 \pm 19.8^\circ$ vs. AD: $126.7 \pm 21.1^\circ$). This was especially pronounced in foot-back technique players. Further, differences in the lateral ball impact location (D: 30.0 ± 24.1 cm vs. AD: 10.3 ± 23.3 cm) were observed.

Conclusions

Changing the service side affects the serve and ball kinematics in elite junior tennis players. Our results underline biomechanical differences regarding the starting position (feet and upper torso) as well as the movement and ball kinematics which could be relevant for skill acquisition, injury prevention and performance enhancement.

OPEN ACCESS

Citation: Fett J, Oberschelp N, Vuong J-L, Wiewelhove T, Ferrauti A (2021) Kinematic characteristics of the tennis serve from the ad and deuce court service positions in elite junior players. PLoS ONE 16(7): e0252650. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650>

Editor: Marc H.E. de Lussanet, University of Münster, GERMANY

Received: November 23, 2020

Accepted: May 19, 2021

Published: July 22, 2021

Peer Review History: PLOS recognizes the benefits of transparency in the peer review process; therefore, we enable the publication of all of the content of peer review and author responses alongside final, published articles. The editorial history of this article is available here: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650>

Copyright: © 2021 Fett et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: All relevant data are within the manuscript and its [Supporting Information](#) files.

Funding: The present study was funded by the German Federal Institute of Sport Science (<http://www.bisp.de>). The Grant number was AZ-072017/16. Funding was received by AF. We further acknowledge support by the Open Access Publication Funds of the Ruhr-Universität Bochum. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

Introduction

In tennis, all points start with the serve, which has become the most important stroke and a key factor of game success [1–3]. This stroke allows players to gain points with very short rallies and percentage of points won after the first serve correspond to around 72–81% [4, 5]. Additionally, a successful first serve has evolved into a powerful tool to achieve direct points or to take instant initiative within a rally [6]. Nevertheless, it is also the most difficult stroke to master due to the complex combination and coordination of limb and joint movements required to summate and transfer forces from the ground up into the racquet head, reported as the kinetic chain [7]. Therefore, an appropriate skill acquisition (i.e., movement execution, technical skill, coordination of kinetic chain) is needed from beginners to elite junior players to ensure the best possible outcomes regarding a powerful and efficient serve.

According to the official rules of the International Tennis Federation (ITF), players must serve alternately from the two different positions, the deuce (right) and the ad court (left) side, into the diagonally opposite service boxes [8]. The percentage of serves performed per match from either side is almost identical (47.6% and 52.4% from AD and D, respectively) since only games ending after a 40:15 or 15:40 result in a higher number of serves from the deuce court side. Depending on the tactical strategy, different locations can be targeted: out wide, to the receiver's body, and to the T (i.e., near the centre service line) [9].

Interestingly, from a biomechanical point of view, only one service model is mediated [7], not taking into account the service side. Usually, the serve is characterized by a corkscrew motion: after the ball toss, the serving arm moves behind the body, and the vertebral column is laterally flexed and hyperextended with a fully loaded lower body position [10]. Acceleration of the serving arm and racquet before ball impact is accompanied by a fast counter-rotation of the lumbar spine—from hyperextension to flexion, and from right twist to left twist [7, 10, 11]. Under the current recommendations for the starting position, players are instructed to put their front foot towards the right net post, and their rear foot parallel to the baseline (for a right-handed player). In an attempt to achieve stability, a common advice is to place the toes of the rear foot in line with the heel of the front foot [12, 13].

Due to its great importance, the serve has received significant biomechanical interest. A large number of investigations have examined the kinematic characteristics of lower and upper limb and trunk joint motion [1, 3, 10, 14–18], racquet and ball kinematics [2, 19–22], kinematics in relation to performance level, gender, age, and injury [10, 23–26] and effect of serve type (flat, kick, slice) [27, 28]. A small body of literature has focused on differences in serving locations [20, 22], but no study has examined serve kinematics according to the different service sides: the ad versus the deuce service side. It can be hypothesized that changing the service side can lead to different body and ball kinematics. To the best of our knowledge, this is the first study to examine serve kinematics from both the deuce and ad court sides. Thus, this study aimed to compare the body and ball kinematics of flat serves from the deuce and ad court side, targeting the centre of the service box (i.e., serving to the receiver's body).

Materials and methods

Subjects

Fourteen male elite junior squad players of the German Tennis Federation (age: 14.6 ± 1.8 years, age at peak height velocity (APHV): 14.0 ± 0.7 years, maturity offset (MO): 0.6 ± 1.9 , weight: 61.4 ± 16.3 kg, height: 176.0 ± 15.9 cm) participated in this study. Twelve players were right-handed and two left-handed. Considering the foot technique, there were six foot-up and eight foot-back technique players. Players were ranked on the national youth ranking list and

had a weekly training volume (without competition) of 10.0 ± 2.6 hours on tennis specific training (i.e., technical and tactical skills). Participants were excluded if they had musculoskeletal injury (upper extremity surgery, shoulder, back, knee, ankle pain) within the past 12 months, conduct any sport-related rehabilitation during the 12 month prior the study or had any other kind of pain during the service execution.

This study was approved by the ethics committee of the Faculty of Sport Science of the Ruhr University Bochum (EKS-24072017), and all procedures conformed to the recommendations and guidelines of the Declaration of Helsinki. The players and parents were fully informed of all experimental procedures, and both players and parents provided written informed consent before participation.

Experimental design

Procedures. The investigation was conducted in a specific semi-court indoor tennis laboratory on a hard-court surface (Rebound Ace). Players had to serve against an absorption wall with a target field (direction to the receiver's body from both sides). The position and size of the target field on the absorption wall were calculated such that it would be a valid serve on a full-size tennis court directed to the receiver's body. For this calculation, triangulation was used to transfer the specific dimensions to the laboratory setting. A schematic screen is available as [S1 Fig](#).

Each player was fitted with 86 retro-reflective markers placed on anatomical landmarks using double-sided tape according to the UWA full-body marker set [26], which is further characterized by a cluster method that saw three markers attached to each segment [16]. Additionally, five markers were fixed to the players' racquets to create coordinate systems therein [26], and retro-reflective tape was placed on the ball in order to determine ball data [29]. To limit movement of the markers from their anatomical landmarks, all players wore tight shorts only. Familiarization with the testing surrounding and the landmark set has been implemented prior to the experiment.

All players completed a standardized warm-up protocol prior to testing. The standardized warm-up consisted of general movement preparation exercises, specific activation and mobilization with elastic tubes, and a set of submaximal serves with increasing velocities (total: 32; 16 at 50–70%, eight at 70–80%, and eight at 90–100% in accordance to their subjective feeling). For the testing protocol each player performed two sets of eight maximum "first flat" serves to the target field (direction: receiver's body; size: 67×30 cm). The service execution was performed from both service sides (deuce and ad court) in a matched and counterbalanced order. After each set, there was a two minute rest period, between each serve there was a rest of 30s to prepare for the next service. Participants were instructed to serve the ball exactly as they would during a match with maximum power into the predefined target zone. To maximize ecological validity, players used their own racquets to feel as comfortable as possible during their serves [26].

The three fastest serves that landed in the target area were analysed [30]. Four players failed to make three valid attempts within eight serves. Because of that four players had to perform in total (both sides) three to four further serves to get three serves in on each side. Serve velocity was measured using a radar gun (Stalker Professional Sports Radar; Radar Sales, Plymouth, MN). The radar was located 2 m behind the server. It was aligned with the approximate height of ball contact (~ 3 m) and was aimed down the target zone. Peak velocity of each stroke was recorded.

Kinematic analysis. An 8-camera Vicon Vantage V5-System operating at 300 Hz was used to capture the three-dimensional (3D) landmark trajectories to reconstruct the service

motion. After capturing all static and dynamic trials, the trajectories were reconstructed with Vicon Nexus software (Nexus, Vicon, Oxford, UK). The experimental data analysis was conducted on the basis of prior kinematic studies carried out by a research group of the University of Western Australia [17, 19, 21–23, 26]. According to the methods prescribed in their previous work [17, 22, 26], gaps were interpolated using a cubic spline; data were filtered using a Woltring filter and subsequently modelled with a customized version of the University of Western Australia model to calculate relevant anatomical, racquet, and ball data [16, 17, 19, 21–23, 26]. Ball data were held relative to the front foot. Therefore, the origin of the global coordinate system was translated to the position of the first metatarsal marker (prior to the initiation of each participant's backswing) [22]. Negative x pointed lateral to the right along the baseline, negative y pointed towards to the net, and positive z pointed vertically upwards. The Euler Z-X-Y sequence was used to describe joint rotations, except at the shoulder where Y-X-Y decomposition was applied to estimate shoulder joint motion, as recommended by the International Society of Biomechanics [16, 17, 19, 31]. The kinematic data of left-handed players were inverted where appropriate [17, 26].

Kinematic variables. The service action was divided into different parts to analyse kinematic variables of interest: (1) starting position, (2) preparation phase, (3) propulsion, and (4) impact. Starting position was defined as when the player begins to initiate the ball toss. Time phase until peak shoulder external rotation was defined as the *preparation phase*; the phase from this key point to impact was defined as *propulsion* [17]. All variables of interest are shown in [S1 Appendix](#).

During the starting position, the position of the feet and upper torso axis was measured relative to the baseline (x-axis of the global coordinate system). Upper torso rotation was calculated by a vector joining the two shoulder joint centres, which was expressed relative to the global x-axis [21]. From an overhead view, forward rotation (+) was counter-clockwise, and backward rotation (-) was clockwise for right-handed players. Foot axis was calculated by a vector joining the middle of the forefoot and the heel. In addition, the lateral distance between both toes (first metatarsal) was measured.

During the preparation phase, the analysed parameters were knee flexion, trunk extension, trunk tilt, external shoulder rotation, and elbow flexion. In addition, maximum upper torso position relative to the baseline and counter- upper torso rotation range of motion (ROM) was measured. Counter-upper torso ROM was defined as the ROM between upper torso starting position (relative to baseline) and maximum upper torso position (relative to baseline).

The peak angular velocities during the propulsion phase were focused on the knee extension, trunk flexion, trunk tilt, elbow extension, as well as shoulder internal rotation.

At the time of impact, knee extension, trunk extension, trunk tilt, upper torso position relative to baseline, upper torso ROM, shoulder abduction, and elbow extension were analysed. Upper torso ROM was defined as the maximum backward rotation (during preparation) to forward rotation until impact. The ball kinematics at impact were calculated relative to the first metatarsal of the front foot at the instant of starting position [19, 22].

[S2 Appendix](#) shows reliability data for all analysed variables. Overall, 'good' and 'excellent' reliability was found for nearly each variable (ICCs ranging from 0.76 to 0.99). Front knee extension velocity and shoulder internal rotation velocity during propulsion as well as front and back knee flexion at impact showed a 'moderate' reliability (ICCs ranging from 0.58 to 0.73) [32].

Anthropometric measurements. Participants body height and sitting height was measured to the nearest mm with a fixed stadiometer (Holtain Ltd., Crosswell, UK). Further, a purpose-built table was used for measuring sitting height. Body mass was recorded to the nearest 0.1 kg with a bioelectrical-impedance scale InBody770 (InBodyCo., Ltd., Gangnam-gu, Seoul,

Korea). Status of maturity was calculated according to the maturity offset method as previously described [33, 34].

Statistical analysis

All data are presented as mean values and standard deviations (\pm SD). Paired sample *t*-tests were used to determine differences in kinematics between both sides, the deuce and ad court side. Additional, in case of non-normality the Wilcoxon-test was used. Further, the standardized difference or effect size (ES) of changes in each parameter between the two groups were calculated using the pooled standard deviation. Threshold values for Cohen's *d* ES statistics were < 0.2 (small), 0.5 (moderate), and > 0.8 (large) [35]. For subgroup analysis of the total upper torso ROM (foot-up and foot-back players), a repeated-measures ANOVA was used. Intra-session reliability of all variable measures was calculated. Intraclass correlation coefficient (ICC 3,1) and standard error of measurement (SEM) (90% confidence limits) were assessed by the three testing trials and pooled between both service sides using the spreadsheets for analysis of validity and reliability of Hopkins [36]. Statistical significance was set at $p \leq .05$. Data analyses were performed using the free statistical software JASP (version 0.11.1) and Microsoft Office 365 MSO (version 16.0.13029.20232).

Results

Serve kinematics

Mean values (\pm SD) of serve and ball kinematics for both conditions (deuce and ad court) are presented in [Table 1](#). Comparing body kinematics on both service sides, there were significant differences in foot position as well as upper torso position at starting position. The front-foot angle (relative to baseline) was higher on the deuce court compared to the ad court side (deuce: $39.7 \pm 17.6^\circ$ vs. ad: $31.1 \pm 17.4^\circ$; ES 0.49). The lateral distance between both feet was less on the deuce court (deuce: 16.3 ± 12.9 cm vs. ad: 26.2 ± 11.9 cm; ES -0.80) ([Fig 1](#)). Upper torso position at starting position was higher on the ad court (deuce: $-60.9 \pm 15.7^\circ$ vs. ad: $-69.6 \pm 15.0^\circ$; ES -0.57).

During preparation, higher max. upper torso position (clockwise) was found on ad court side (deuce: $-105.6 \pm 9.5^\circ$ vs. ad: $-120.5 \pm 10.3^\circ$; ES -1.50). Further, counter-upper torso ROM was higher on ad court side (deuce: $44.7 \pm 15.3^\circ$ vs. ad: $50.9 \pm 16.1^\circ$; ES -0.39).

At impact, there was a higher knee flexion in the front leg on the deuce court side (deuce: $29.1 \pm 10.3^\circ$ vs. ad: $26.2 \pm 10.4^\circ$; ES 0.28). Upper torso ROM from maximum clockwise rotation until impact was significantly greater on the deuce court side (deuce: $130.5 \pm 19.8^\circ$ vs. ad: $126.7 \pm 21.1^\circ$; ES 0.18). Additionally, the alignment of the upper torso at impact was to be rotated significantly further forward on the deuce court side relative to baseline (deuce: $24.9 \pm 16.5^\circ$ vs. ad: $6.2 \pm 16.6^\circ$; ES 1.13).

Additional subgroup analysis revealed descriptively slightly higher side differences in the upper torso ROM for foot-back players ($n = 8$, $\text{diff} = 4.8^\circ \pm 4.8^\circ$, $p = .026$) compared to foot-up players ($n = 6$, $\text{diff} = 2.4^\circ \pm 4.2^\circ$, $p = .215$). However, the side \times subgroup interaction was unclear ($p = .360$) ([Table 2](#) and [Fig 2](#)).

Ball kinematics

Mean service velocity was similar from both sides (deuce: 151.4 ± 19.8 km/h vs. ad: 150.5 ± 19.4 km/h; ES 0.04). Lateral ball impact location (X) was more leftwards on the deuce court (deuce: 30.0 ± 24.1 cm vs. ad: 10.3 ± 23.3 cm; ES 0.83) from a back-view position ([Table 1](#)).

Table 1. Peak and terminal kinematic variables of interest for the ad and deuce service side.

	Unit	Advantage court			Deuce court			<i>p</i>	ES
		Mean	±	SD	Mean	±	SD		
Starting position									
Front foot position to baseline	[deg]	31.1	±	17.4	39.7	±	17.6	.000	0.49
Back foot position to baseline	[deg]	12.0	±	9.8	12.0	±	6.6	.988	-0.01
Lateral feet distance §	[cm]	26.2	±	11.9	16.3	±	12.9	.000	-0.80
Upper torso position to baseline	[deg]	-69.6	±	14.6	-60.9	±	15.7	.002	-0.57
Preparation									
Front knee flexion	[deg]	69.5	±	15.0	71.6	±	15.7	.025	0.14
Back knee flexion	[deg]	75.0	±	10.6	77.6	±	9.6	.067	0.26
Trunk extension	[deg]	-44.0	±	10.6	-44.2	±	10.3	.548	-0.02
Trunk tilt	[deg]	19.2	±	6.5	19.4	±	5.8	.649	0.03
Max. upper torso position	[deg]	-120.5	±	10.3	-105.6	±	9.5	.000	-1.50
Counter-upper torso rotation #	[deg]	50.9	±	16.1	44.7	±	15.3	.020	-0.39
Shoulder external rotation	[deg]	138.1	±	11.4	136.7	±	10.6	.125	0.13
Elbow flexion	[deg]	132.2	±	10.4	132.7	±	9.8	.553	0.05
Propulsion									
Front knee extension ω	[deg/s]	0443.6	±	108.0	0447.2	±	99.1	.756	-0.03
Back knee extension ω	[deg/s]	0540.4	±	80.4	0517.9	±	101.9	.066	0.25
Trunk flexion ω	[deg/s]	0506.7	±	69.0	0493.2	±	71.2	.111	-0.19
Trunk tilt ω	[deg/s]	0421.0	±	99.6	0424.0	±	96.5	.696	-0.03
Shoulder internal rotation ω	[deg/s]	1970.9	±	275.9	2028.7	±	331.7	.203	-0.19
Elbow extension ω	[deg/s]	1546.5	±	303.1	1563.6	±	327.0	.584	-0.05
Wrist flexion ω	[deg/s]	1095.4	±	339.9	1070.9	±	299.5	.439	-0.08
Impact									
Front knee flexion	[deg]	26.2	±	10.4	29.1	±	10.3	.003	0.28
Back knee flexion \$1	[deg]	5.6	±	8.1	6.7	±	8.2	.474	0.13
Trunk extension	[deg]	-8.0	±	9.6	-7.6	±	9.5	.327	0.05
Trunk tilt	[deg]	-27.6	±	4.4	-27.2	±	4.1	.482	0.07
Upper torso position to baseline	[deg]	6.2	±	16.6	24.9	±	16.5	.000	1.13
Upper torso rotation (ROM)	[deg]	126.7	±	21.1	130.5	±	19.8	.008	0.18
Shoulder abduction	[deg]	114.5	±	6.4	114.0	±	6.4	.427	-0.07
Elbow flexion	[deg]	18.0	±	8.5	18.0	±	7.8	.998	0.00
Wrist extension \$2	[deg]	-20.5	±	6.9	-20.3	±	6.2	.796	0.03
Ball kinematics									
Ball velocity	[km/h]	150.5 ± 19.4	±	19.4	151.4	±	19.8	.505	0.04
Ball impact location X (lateral)	[cm]	10.3	±	23.3	30.0	±	24.1	.000	0.83
Ball impact location Y (forward)	[cm]	-49.9	±	17.7	-51.6	±	20.9	.552	-0.09
Ball impact location Z (upward)	[cm]	260.0 ± 23.1	±	23.1	258.0	±	22.7	.086	-0.08

\$1 non-normality distribution: Wilcoxon Test: $p = .194$; \$2 non-normality distribution: Wilcoxon Test: $p = .241$

§ first metatarsal of front foot to first metatarsal of rear foot; # range of motion between upper torso starting position and maximum upper torso position during preparation; ω maximum angular velocity; ES effect size

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650.t001>

Discussion

This is the first study to examine the effects of the deuce and the ad court side on body and ball kinematics during flat serves in elite junior tennis players. Obtaining knowledge about the respective serve characteristics is quite important since, according to the rules of the ITF, the

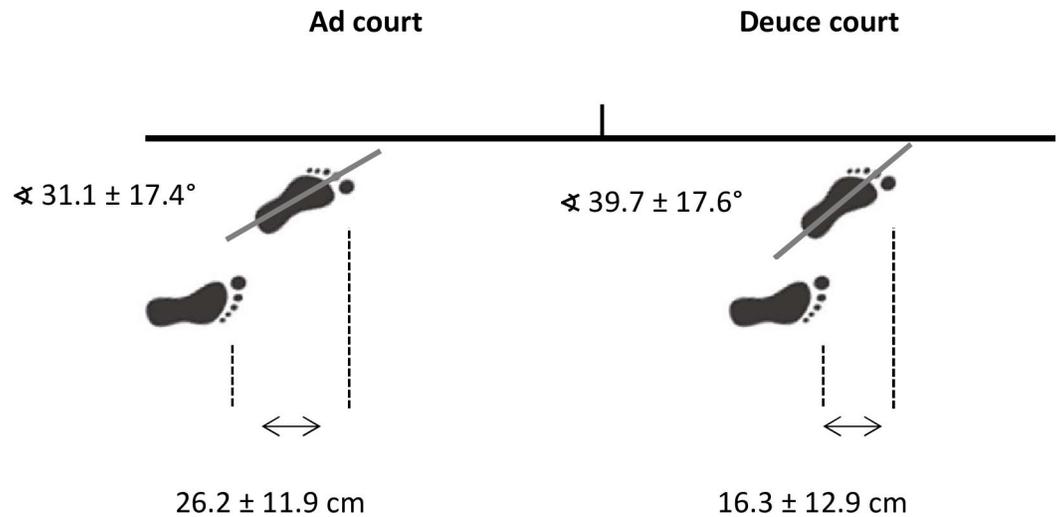


Fig 1. Mean foot position on ad and deuce court side immediately before ball toss.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650.g001>

distribution of serves performed from both sides is similar for almost every game score (except for a game win after 40:15 or 15:40). Our data demonstrate various significant differences regarding the starting position, as well as serve kinematics, when changing the service side. Specifically, these differences involve the foot starting position (front-foot angle to baseline), the upper torso position in relation to baseline, the total upper torso ROM until impact, the knee flexion of the front leg at impact and the lateral ball impact point. However, no differences were found for service speed (Table 1). These deviations are surprising, since in most coaches' textbooks only one service technique is taught [7, 12, 13].

Regarding the basic foot position prior to the service movement, the front-foot and back-foot axis seem largely similar on the deuce and ad court side when comparing foot angle in relation to the baseline (Table 1 and Fig 1). A similar service basic position related to the baseline is recommended in the tennis literature (i. e. the front foot is aligned towards the right net post, and the rear foot is placed parallel to the baseline) [12, 13], with acceptable inter-individual variations [7] and is widely accepted by professional players and coaches. Interestingly, during stroke preparation, propulsion and ball impact, we found a significantly higher upper torso ROM until ball impact, with higher knee flexion of the front leg on the deuce court side (Table 1 and Figs 3 and 4). These changes were accompanied by a more leftwards ball impact point (Fig 4).

In general, our kinematic data are comparable to previous findings [2, 18, 21, 22]. Nevertheless, the small, but significant, kinematic differences found between both service sides need to be discussed in greater depth. As this is the first study to focus on this question, a comparison with other studies is limited. We therefore assume that the higher upper torso ROM on the

Table 2. Upper torso ROM in foot-up and foot-back players.

Upper torso rotation (ROM)	Unit	Advantage court		Deuce court		Difference		p	Side x group p
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD		
Foot up (n = 6)	[deg]	129.5 ± 23.1	± 24.1	131.9	± 23.2	2.4	± 4.2	.215	.360
Foot back (n = 8)	[deg]	124.7	± 20.0	129.5	± 18.4	4.8	± 4.8	.026	

SD: standard deviation; ROM: range of motion

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650.t002>

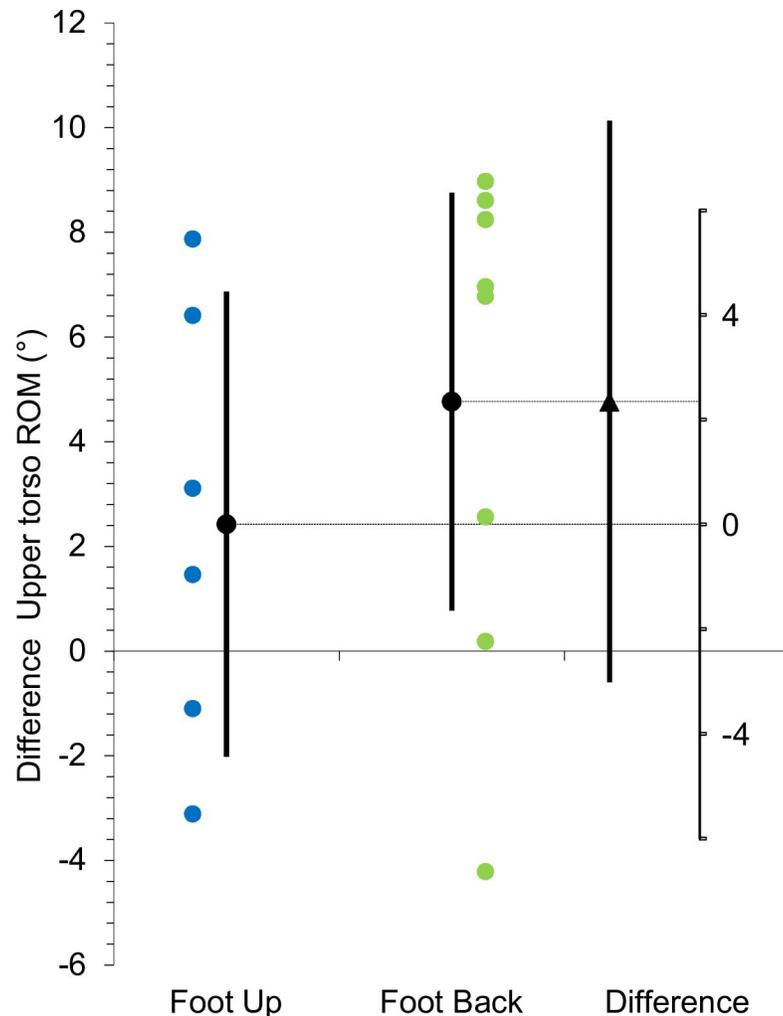


Fig 2. Subgroup analysis of side differences in upper torso range of motion between foot-up and foot-back players (95% CI).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650.g002>

deuce court side compared to the ad court side, as shown in our study (Table 1 and Figs 3 and 4), is mainly affected by the relationship between the basic foot and upper torso position and the respective target point in the diagonally opposite service box. Obviously, despite a (only) marginal adjustment of the starting position to a more open stance on the deuce court (Fig 1), this trend does not meet the complete requirements for an identical shaping of the service movement on both sides (i.e. similar upper torso ROM).

Regarding the underlying reasons for these surprising results, it has to be considered that the service is a highly asymmetric task from a perceptual point of view. The spatial-visual orientation differs significantly between the two service sides. During preparation, the visual perception is decreased on the deuce court side in terms of the target field during the early preparation phase which may have an effect on the player's behaviour and the biomechanical outcome [37]. It further can be speculated that, for most players and coaches, the baseline seems to be the first point of reference for the foot position during serve preparation. Historically, various top players have even taken a parallel foot position entirely behind the baseline on both service sides (e. g. John McEnroe, USA). From a biomechanical point of view, and to

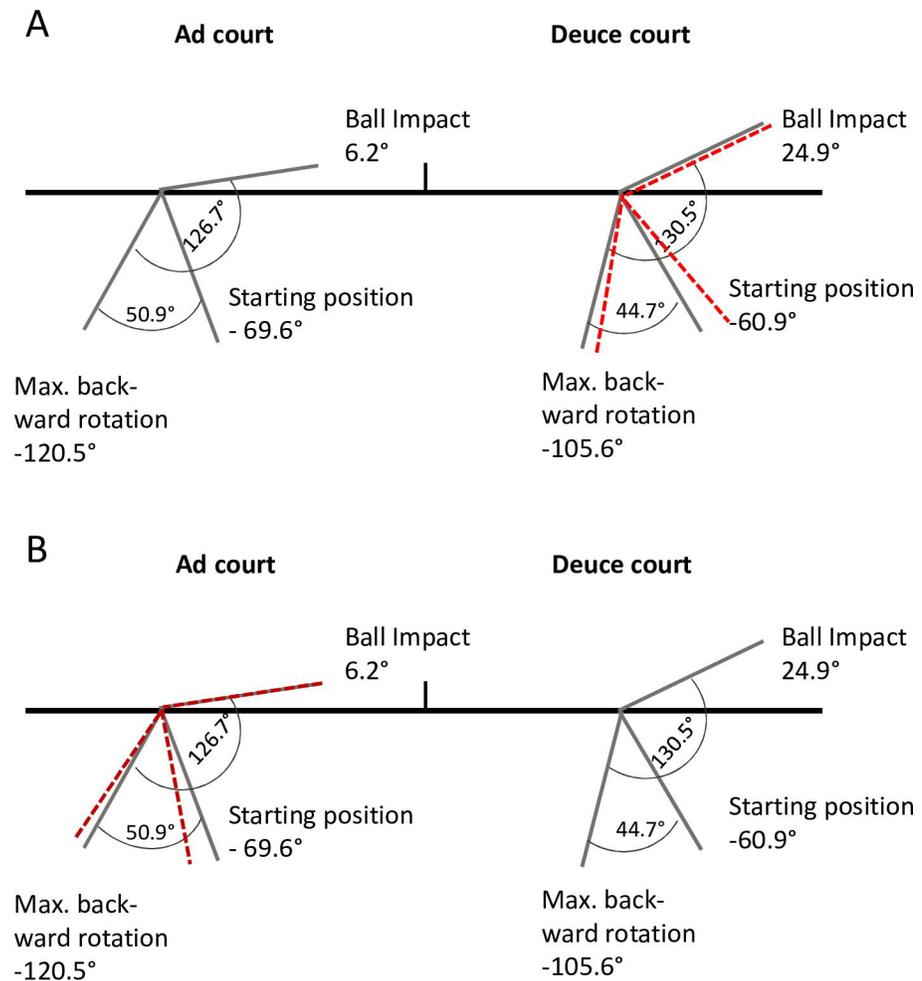


Fig 3. Upper torso rotation at start, maximum backward rotation (clockwise), and impact on ad and deuce court side. A) red line: mirror image transferred from the ad court kinematics to the deuce court (total ROM: 126.7°, counter-rotation ROM: 50.9°); B) red line: mirror image transferred from the deuce court kinematics to the ad court (total ROM: 130.5°, counter-rotation ROM: 44.7°).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650.g003>

simplify the motor learning process, a more open stance on the deuce court could be recommended. This change would adjust the total angle and body alignment towards the target, thereby leading to a more uniform and mirrored movement pattern on both service sides, as illustrated in Fig 3. This issue seems to be mainly relevant during skill acquisition in young players and might simplify the learning process in the early career stages. In the case of repeated and considerable weaknesses on one of the two service sides, even elite players could reflect a slight adjustment.

The individual service foot technique has to be considered as representing an important individual characteristic in this context. In general, there are two different types of foot techniques: the foot-up (during preparation, the back foot is moved forward next to the front foot) and the foot-back technique (players leave the back foot in relatively the same position) [38]. In our study, we noted a homogenous distribution of players using either foot technique. This is consistent with the general distribution in male elite junior players, where 52% of the players use the foot-back technique [39]. Regarding the side differences in the upper torso ROM, from a descriptive point of view, a stronger effect could be expected in the foot-back technique

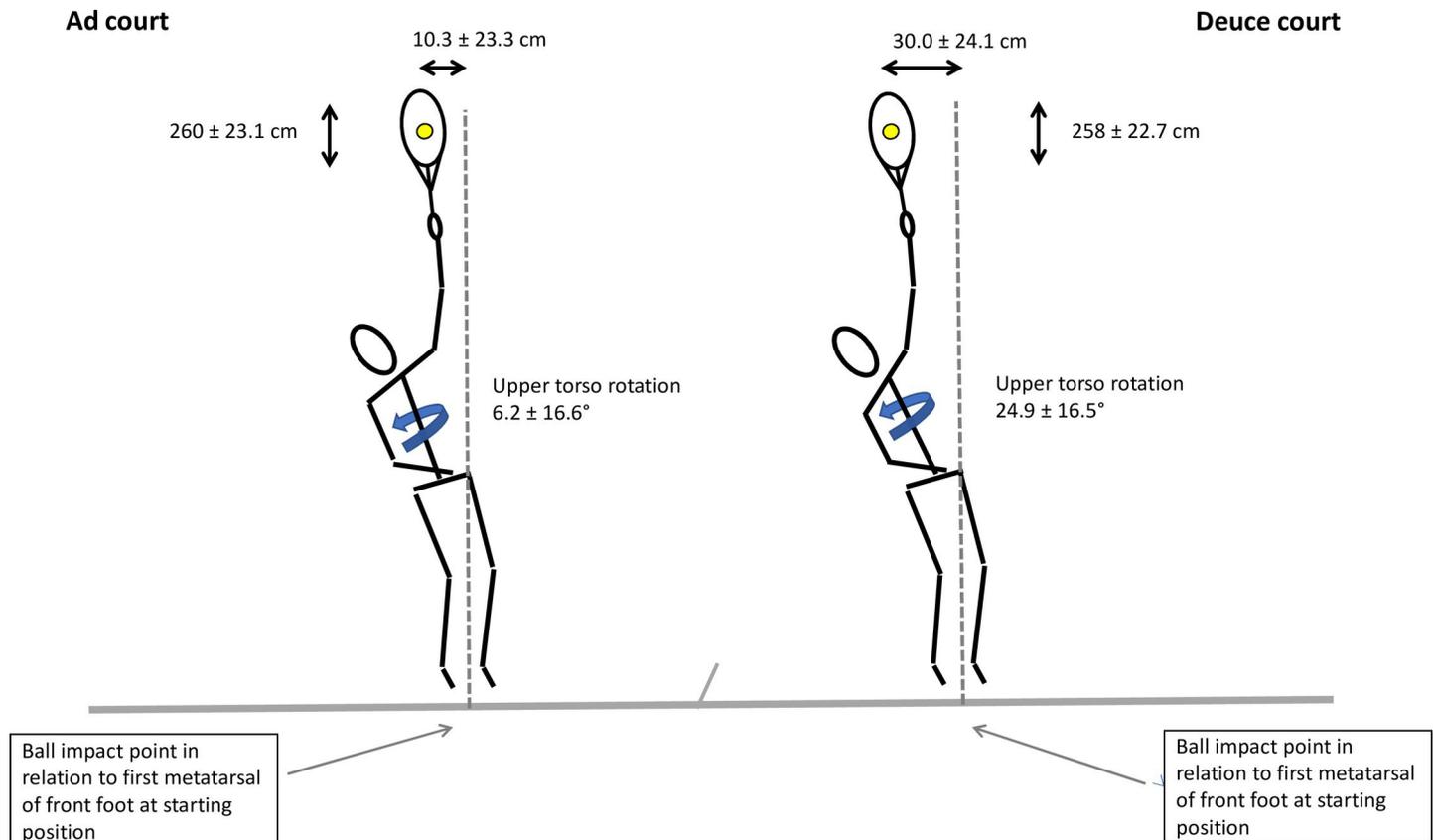


Fig 4. Mean ball displacement and upper torso rotation at impact.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252650.g004>

players because the basic foot position is neutralised early during the foot-up technique (Fig 2). Nevertheless, significant interactions (side \times group) are missing.

A comparison of the lateral hitting positions on both sides reveals a more leftward ball impact point on the deuce court side, with a difference of 20 cm between the two service sides (back-view position) (Table 1 and Fig 4). The lateral hitting point from the deuce court in our study (30 cm) is consistent with the findings of Reid et al. (2010) [2]. Interestingly, older professional players impact the ball less leftwards than junior players do [20, 22]. This age-dependant difference might be due to a stronger spin serve by the juniors [22], compensating for body height differences, thereby resulting in an overall lower ball impact point and, thus, the need for a more curvilinear ball trajectory above the net [20, 40]. Regarding the side differences of the ball impact points they can be explained by the side specific change in the geometric spatial relationships between the starting position and the service target. This is in line with findings of Reid et al. [22] and Carboch et al. [20], who showed that the lateral displacement at impact is significantly further left in a wide than in a T serve. This effect seems to be inevitable to avoid players being able to anticipate the service direction. When serving from different sides, by contrast, players would be able to compensate for the side-specific spatial circumstances without any tactical disadvantages as mentioned above (Fig 3).

Side specific differences of the tennis serve should also be discussed regarding possible injury-risk implications. Serve production is a violent manoeuvre generating high recurring forces and places the greatest stress on the lower back among all strokes [40–42]. Consequently, the reported high prevalence of back pain in competitive junior and professional

tennis players [23, 40, 43, 44] is not surprising, given the large loads in axial rotation [42]. The combination of repetitive rotational forces, coupled with trunk flexion and hyperextension, is particularly critical in the pathophysiology of lower back injuries [23, 42]. It is stated that players hit 50–150 serves during each of the approximately 60 matches played per season, without considering double matches and training sessions [25]. In light of our results, the higher upper torso ROM in general, compared to previous studies [18, 21], as well as the higher values on the deuce court side in comparison to the ad side (especially in foot-back technique players), could be considered as risk factors for back pain. This would underline the above-mentioned recommendation to reduce the upper torso rotation and rotational forces on the deuce court side. In this regard, it should be highlighted that we found no difference in serve velocity between the service sides, although kinematic serve differences were present. This illustrates that these side-related differences can be compensated regarding the service speed and have no effect on the power transmission to the ball. In this context, Kibler [45] stated that there are six to eight key positions during the serve, which are the most basic and which are required to be present in all motions. Further, there are multiple individual variations in other parts of the kinetic chain. It seems that small changes within the kinetic chain are compensated by subsequent body segments and their coordination.

From a practical point of view, our results clearly emphasise some modified kinematics between both service sides. Obviously, to a certain extent, the service has to be accepted as a biomechanically asymmetric and side-specific task. On the other hand, our data show some simple correction points (e. g. a change in the basic foot position) to adjust the serve kinematics which would come along several benefits. This includes a quicker and easier skill acquisition for beginners, which would allow them to generate a more stable movement execution. In tournament players, a beneficial time-saving cost–benefit ratio and a reduced injury risk can be expected.

Limitations

Some limitations of the study design must be considered. The study took place in an indoor laboratory that did not cover the real conditions of the tennis court, which could influence the spatial orientation of the players. Further, players were fitted with retro-reflective markers placed on anatomical landmarks. In addition, the player's position along the baseline was restricted. These points could reduce the ecological validity of the investigation. Nevertheless, we used familiarisation procedures prior to the investigation in an attempt to minimise possible effects. Another limitation is that we did not perform a sample size estimation. However, the number of participants in this investigation was high compared with those of previous similar studies and the aim was to include only the best players from the respective age group. We also only analysed side-specific differences regarding serves directed to the middle of the service field (i.e. directed to the receiver's body). Further investigations are recommended to verify the changes in body kinematics between all serve directions.

Conclusion

Changing the service side affects both the serve and the ball kinematics in elite junior tennis players. Our results underline biomechanical differences regarding the starting position (feet and upper torso), as well as movement and ball kinematics, which could be relevant for skill acquisition, injury prevention and performance enhancement. Since the serve is a highly complex and partly unsymmetrical task, the underlying reasons for these findings remain unclear. Nevertheless, a better kinematic adjustment on both sides might be an option that could economise the process of motor learning in young players. Tournament players and their coaches

are recommended to explore slight adaptations in their service positions in cases of repeated and considerable weaknesses on one of the two service sides.

Supporting information

S1 Dataset. Original data.

(XLSX)

S1 Appendix. Variables of interest.

(PDF)

S2 Appendix. Intra-session reliability statistics for each performance measure.

(PDF)

S1 Fig. Study setting.

(PDF)

Acknowledgments

The authors would like to thank Bruce Elliott and Jacqueline Alderson from the University of Western Australia (Perth, Australia), for assistance during data modelling to calculate relevant anatomical and ball kinematics during serves (University of Western Australia Model). Further, we would like to thank to all of the athletes for participating in the study. Also, we wish to thank Christoph Schneider for providing feedback on preparing and presenting the statistical analysis and data.

Author Contributions

Conceptualization: Janina Fett, Alexander Ferrauti.

Formal analysis: Janina Fett.

Funding acquisition: Alexander Ferrauti.

Investigation: Janina Fett, Nils Oberschelp, Jo-Lâm Vuong.

Methodology: Janina Fett, Alexander Ferrauti.

Resources: Alexander Ferrauti.

Writing – original draft: Janina Fett.

Writing – review & editing: Janina Fett, Thimo Wiewelhoeve, Alexander Ferrauti.

References

1. Girard O, Micallef JP, Millet GP. Lower-limb activity during the power serve in tennis: effects of performance level. *Med Sci Sports Exerc.* 2005; 37(6):1021–9. PMID: [15947729](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15947729/)
2. Reid M, Whiteside D, Elliott B. Effect of skill decomposition on racket and ball kinematics of the elite junior tennis serve. *Sports Biomech.* 2010; 9(4):296–303. <https://doi.org/10.1080/14763141.2010.535843> PMID: [21309303](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21309303/)
3. Elliott BC, Marshall RN, Noffal GJ. Contributions of Upper Limb Contribution of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *J Appl. Biomech.* 1995; 11:433–42.
4. Bonato M, Maggioni MA, Rossi C, Rampichini S, La Torre A, Merati G. Relationship between anthropometric or functional characteristics and maximal serve velocity in professional tennis players. *J Sports Med Phys Fitness.* 2015; 55(10):1157–65. PMID: [24998615](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24998615/)
5. Hornery DJ, Farrow D, Mujika I, Young W. An integrated physiological and performance profile of professional tennis. *Br J Sports Med.* 2007; 41(8):531–6. <https://doi.org/10.1136/bjism.2006.031351> PMID: [17472999](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17472999/)

6. Keller M, Kuhn YA, Lüthy F, Taube W. How to Serve Faster in Tennis: The Influence of an Altered Focus of Attention and Augmented Feedback on Service Speed in Elite Players. [published online ahead of print December 7, 2018]. *J Strength Cond Res.* <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000002899> PMID: [30531414](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30531414/)
7. Kovacs M, Ellenbecker T. An 8-stage model for evaluating the tennis serve: implications for performance enhancement and injury prevention. *Sports Health.* 2011; 3(6):504–13. <https://doi.org/10.1177/1941738111414175> PMID: [23016050](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23016050/)
8. International Tennis Federation. ITF Rules of Tennis; 2020. [cited 1. September]. Available from: <https://www.itftennis.com/media/2510/2020-rules-of-tennis-english.pdf>.
9. Gillet E, Leroy D, Thouwarecq R, Stein JF. A notational analysis of elite tennis serve and serve-return strategies on slow surface. *J Strength Cond Res.* 2009; 23(2):532–9. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31818efe29> PMID: [19197212](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19197212/)
10. Chow JW, Park SA, Tillman MD. Lower trunk kinematics and muscle activity during different types of tennis serves. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol.* 2009; 1(1):24. <https://doi.org/10.1186/1758-2555-1-24> PMID: [19825184](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19825184/)
11. Elliott B. Biomechanics and tennis. *Br J Sports Med.* 2006; 40(5):392–6. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.023150> PMID: [16632567](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16632567/)
12. Tennisgate. How to serve in tennis: the 6-step guide. [cited 1. September 2020]. Available from: <https://www.tennisgate.com/how-to-serve/>.
13. Hoskins T. *The Tennis Drill Book*. 1st ed. Champaign, IL: Human Kinetics; 2003.
14. Fleisig G, Nicholls R, Elliott B, Escamilla R. Kinematics used by world class tennis players to produce high-velocity serves. *Sports Biomech.* 2003; 2(1):51–64. <https://doi.org/10.1080/14763140308522807> PMID: [14658245](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14658245/)
15. Girard O, Micallef JP, Millet GP. Influence of restricted knee motion during the flat first serve in tennis. *J Strength Cond Res.* 2007; 21(3):950–7. <https://doi.org/10.1519/R-20876.1> PMID: [17685715](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17685715/)
16. Reid M, Elliott B, Alderson J. Lower-limb coordination and shoulder joint mechanics in the tennis serve. *Med Sci Sports Exerc.* 2008; 40(2):308–15. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31815c6d61> PMID: [18202570](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18202570/)
17. Reid M, Giblin G, Whiteside D. A kinematic comparison of the overhand throw and tennis serve in tennis players: how similar are they really? *J Sports Sci.* 2014; 33(7):713–23. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.962572> PMID: [25517627](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25517627/)
18. Wagner H, Pfusterschmied J, Tilp M, Landlinger J, Duvillard SP, Müller E. Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike. *Scand J Med Sci Sports.* 2014; 24(2):345–54. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01503.x> PMID: [22813080](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22813080/)
19. Whiteside D, Elliott B, Lay B, Reid M. A kinematic comparison of successful and unsuccessful tennis serves across the elite development pathway. *Hum Mov Sci.* 2013; 32(4):822–35. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.06.003> PMID: [23973088](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23973088/)
20. Carboch J, Tufano JJ, Süß V. Ball toss kinematics of different service types in professional tennis players. *Int. J. Perform. Anal.* 2018; 18(6):881–91.
21. Reid M, Whiteside D, Giblin G, Elliott B. Effect of a common task constraint on the body, racket, and ball kinematics of the elite junior tennis serve. *Sports Biomech.* 2012; 12(1):15–22.
22. Reid M, Whiteside D, Elliott B. Serving to different locations: set-up, toss, and racket kinematics of the professional tennis serve. *Sports Biomech.* 2011; 10(4):407–14. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.629206> PMID: [22303790](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22303790/)
23. Campbell A, Straker L, O'Sullivan P, Elliott B, Reid M. Lumbar loading in the elite adolescent tennis serve: link to low back pain. *Med Sci Sports Exerc.* 2013; 45(8):1562–8. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31828bea5e> PMID: [23470302](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23470302/)
24. Abrams GD, Harris AHS, Andriacchi TP, Safran MR. Biomechanical analysis of three tennis serve types using a markerless system. *Br J Sports Med.* 2014; 48(4):339–42. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-091371> PMID: [22936411](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22936411/)
25. Martin C, Bideau B, Ropars M, Delamarche P, Kulpa R. Upper limb joint kinetic analysis during tennis serve: Assessment of competitive level on efficiency and injury risks. *Scand J Med Sci Sports.* 2013; 24(4):700–7. <https://doi.org/10.1111/sms.12043> PMID: [23293868](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23293868/)
26. Whiteside D, Elliott B, Lay B, Reid M. The Effect of Age on Discrete Kinematics of the Elite Female Tennis Serve. *J Appl. Biomech.* 2013; 29(5):573–82. <https://doi.org/10.1123/jab.29.5.573> PMID: [23270869](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23270869/)
27. Reid M, Elliott B, Alderson J. Shoulder joint loading in the high performance flat and kick tennis serves. *Br J Sports Med.* 2007; 41(12):884–9. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.036657> PMID: [17513331](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17513331/)

28. Sheets AL, Abrams GD, Corazza S, Safran MR, Andriacchi TP. Kinematics differences between the flat, kick, and slice serves measured using a markerless motion capture method. *Ann Biomed Eng.* 2011; 39(12):3011–20. <https://doi.org/10.1007/s10439-011-0418-y> PMID: 21984513
29. Martin C, Bideau B, Nicolas G, Delamarche P, Kulpa R. How does the tennis serve technique influence the serve-and-volley? *J Sports Sci.* 2012; 30(11):1149–56. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.695079> PMID: 22668422
30. Mullineaux DR, Bartlett RM, Bennett S. Research design and statistics in biomechanics and motor control. *J Sports Sci.* 2001; 19(10):739–60. <https://doi.org/10.1080/026404101317015410> PMID: 11561672
31. Wu G, van der Helm FCT, Veeger HEJD, Makhsous M, van Roy P, Anglin C et al. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *J Biomech.* 2005; 38(5):981–92. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.05.042> PMID: 15844264
32. Koo TK, Li MY. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med.* 2016; 15(2):155–63. <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012> PMID: 27330520
33. Mirwald RL, Baxter-Jones AD, Bailey DA, Beunen GP. An assessment of maturity from anthropometric measurements. *Med Sci Sports Exerc.* [published online ahead of print April, 2002]. *Med Sci Sports Exerc.* <https://doi.org/10.1097/00005768-200204000-00020> PMID: 11932580
34. Sherar LB, Mirwald RL, Baxter-Jones AD, Thomis M. Prediction of adult height using maturity-based cumulative height velocity curves. *J Pediatr.* 2005; 147(4):508–14. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2005.04.041> PMID: 16227038
35. Cohen J. Statistical power analysis for the behavioral-sciences. *Perceptual and Motor Skills.* 1988; 67:1007.
36. Hopkins WG. Spreadsheets for Analysis of Validity and Reliability. *Sportscience.* 2015; 19:36–42. Available from: sports.org/2015/ValidRely.htm.
37. Williams AM, Williams KD, Williams JG. *Visual Perception and Action in Sport.* Taylor & Francis e-Library, 2005.
38. Girard O, Eicher F, Micallef JP, Millet G. Plantar pressures in the tennis serve. *J Sports Sci.* 2010; 28(8):873–80. <https://doi.org/10.1080/02640411003792695> PMID: 20496222
39. Ulbricht A, Fernandez-Fernandez J, Ferrauti A. Conception for Fitness Testing and individualized training programs in the German Tennis Federation. *Sport-Orthopädie—Sport-Traumatologie—Sports Orthopaedics and Traumatology.* 2013; 29(3):180–92.
40. Abrams GD, Sheets AL, Andriacchi TP, Safran MR. Review of tennis serve motion analysis and the biomechanics of three serve types with implications for injury. *Sports Biomech.* 2011; 10(4):378–90. <https://doi.org/10.1080/14763141.2011.629302> PMID: 22303788
41. Johnson CD, McHugh MP, Wood T, Kibler B. Performance demands of professional male tennis players. *Br J Sports Med.* 2006; 40(8):696–9. <https://doi.org/10.1136/bjism.2005.021253> PMID: 16864564
42. Dines JS, Bedi A, Williams PN, Dodson CC, Ellenbecker TS, Altchek DW et al. Tennis injuries: epidemiology, pathophysiology, and treatment. *J Am Acad Orthop Surg.* 2015; 23(3):181–9. <https://doi.org/10.5435/JAAOS-D-13-00148> PMID: 25667400
43. Ellenbecker TS, Pluim B, Vivier S, Snitman C. Common Injuries in Tennis Players: Exercises to Address Muscular Imbalances and Reduce Injury Risk. *Strength & Conditioning Journal.* 2009; 31(4):50–8.
44. Perkins RH, Davis D. Musculoskeletal injuries in tennis. *Phys Med Rehabil Clin N Am.* 2006; 17(3):609–31. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2006.05.005> PMID: 16952755
45. Kibler B. Understanding the kinetic chain in tennis performance and injury. *Aspetar Sports Medicine Journal.* 2014; 3(1):492–7.