

Sabrina Erdrich

Verletzungsprophylaxe im Leistungssport

Spezifische Trainingseffekte auf
biomechanische Risikofaktoren
von Kreuzbandverletzungen



Springer VS

Verletzungsprophylaxe im Leistungssport

Sabrina Erdrich

Verletzungsprophylaxe im Leistungssport

Spezifische Trainingseffekte auf
biomechanische Risikofaktoren
von Kreuzbandverletzungen

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr. med. Holger Schmitt

 Springer VS

Sabrina Erdrich
Heidelberg, Deutschland

Diese Veröffentlichung wurde als Dissertation im Jahr 2018 unter dem Titel „Verletzungsprophylaxe im Leistungssport - Auswirkungen eines kraft- versus koordinationsbetonten Athletiktrainings auf die Kniegelenkstabilität und die neuromuskuläre Aktivierung von Handballerinnen bei hochdynamischen Belastungen“ im Fach Sportwissenschaft an der Fakultät für Verhaltens- und Empirische Kulturwissenschaften der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg angenommen.

ISBN 978-3-658-29370-3 ISBN 978-3-658-29371-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-29371-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer VS ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Für meine Familie

meinen absolut tollen Mann

meine WUNDERvollen Kinder

meine liebevollen, sorgenden Eltern

meine Brüder mit ihren Familien - ich hab' euch lieb!

meine Schwiegereltern - ich könnte mir keine besseren vorstellen

und meine/n Schwiegerschwester/-bruder mit ihren Familien - schön, dass es euch gibt

Geleitwort

Durch sportliche Aktivitäten können die verschiedenen Organsysteme des Menschen positiv beeinflusst werden. Chronische Erkrankungen treten seltener auf, der Bewegungsapparat kann gestärkt und leistungsfähiger gemacht werden, und auch günstige neurobiologische Effekte konnten nachgewiesen werden. Auch wenn in der Zusammenschau die positiven Effekte überwiegen und eine regelmäßige sportliche Betätigung fast uneingeschränkt empfohlen werden kann, können je nach Sportart Verletzungen auftreten, die den Leistungssportler häufig vor ein großes Problem stellen. Je ambitionierter und intensiver der Sportler seinen Sport betreibt, desto wichtiger ist die Frage: Was kann ich tun, um mich nicht zu verletzen bzw. wann kann ich nach einer Verletzung wieder Sport treiben? Gerade in den Mannschaftssportarten, bei denen neben der sportartspezifischen Belastung mit häufigen Stop-and-Go-Bewegungen der Gegnerkontakt eine zusätzliche Gefahrenquelle bedeutet, treten schwerwiegende Kniegelenkverletzungen wie zum Beispiel Kreuzbandrupturen häufig auf. Welche Maßnahmen sind geeignet, diese Verletzung zu verhindern sowie die Stabilität und Funktion des verletzten Gelenkes optimal wiederherzustellen?

Mit der Idee, zum einen präventiv das Auftreten von Verletzungen zu reduzieren und zum anderen den Rehabilitationsprozess zu optimieren, um möglichst schnell durch individualisierte Trainingskonzepte die Funktion des verletzten Kniegelenkes wiederherzustellen, beschäftigt sich das vorliegende Werk. Sabrina Erdrich hat all ihre persönliche Erfahrung im Umgang mit Sportlern als auch wissenschaftliche Erkenntnisse aus Auslandsaufenthalten und ihrer Tätigkeit bei wissenschaftlichen Einrichtungen in Deutschland zusammengetragen, um in einer prospektiv und praxisnah angelegten Studie die Effekte eines kraft- bzw. koordinationsbetonten Trainings an einem leistungssportlich aktiven Athletinnen-Kollektiv auf die Stabilität des Kniegelenkes und die neuromuskuläre Aktivierung zu untersuchen.

Die Arbeit ist für all diejenigen interessant, die sowohl in der Prävention als auch Rehabilitation von verletzten Sportlern therapeutisch eingesetzt werden. Ich hoffe, dass Sie beim Lesen durch die ausführliche Auseinandersetzung mit den theoretischen Grundlagen und deren Diskussion viele neue Ideen und wertvolle Aspekte für das eigene Handeln erhalten.

Heidelberg, im Oktober 2019

Prof. Dr. med. Holger Schmitt

Danksagung

Ich danke ...

... Prof. Dr. phil. Klaus Roth für seinen fachlichen Rat und all seine Unterstützung auf diesem langen Weg zur Promotion.

... Prof. Dr. med. Holger Schmitt für seine unkomplizierte Betreuung als Zweitgutachter.

... apl. Prof. Dr. rer. nat. Sebastian Wolf und Prof. Dr. med. Rainer Siebold, dass sie eine Kooperation möglich gemacht haben, um dieses so spannende Thema verwirklichen zu können. Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Dr. med. Rainer Siebold für die Kontaktherstellung zu Timothy Hewett Ph.D. in Ohio bedanken. Der Forschungsaufenthalt in den USA hat mich enorm weitergebracht. Danke Tim!

... Priv.-Doz. Dr. med. Benita Kuni für viele wegweisende Gespräche zu Beginn des Projekts, insbesondere zur Modifizierung des Heidelberger Sprungkoordinations-tests, und den Erstkontakt zum Ganglabor.

... Marcus Gutsche und den Spielerinnen der Ketscher Bären, ohne die dieses Projekt niemals zustande gekommen wäre. Ich bin mir bewusst, was es für einen Trainer bedeutet, so viel wichtige Trainingszeit zu „opfern“.

... allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Ganglabors, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen und die einen entscheidenden Teil dazu beigetragen haben, dass dieses Projekt nicht nur ein Hirngespinnst geblieben ist.

... allen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Sport und Sportwissenschaft für zahlreiche konstruktive Gespräche.

... all meinen Freunden, dass sie meine Freunde geblieben sind, obwohl ich oft mehr Zeit mit meinem Messequipment verbracht habe als mit Ihnen. Ihr seid großartig.

Mein ganz besonderer Dank geht an meinen Mann Holger und meine Kinder Anouk und Mila für all die Stunden, die sie mich entbehrt haben und ihr Verständnis für meine Leidenschaft. Mit eurem Humor habt ihr mir unendlich viel Kraft gegeben!

Diese Promotion wurde finanziell unterstützt durch ein Abschlussstipendium der Graduiertenakademie der Universität Heidelberg, finanziert aus Mitteln der Exzellenzinitiative. Für diese Förderung möchte ich mich abschließend ganz herzlich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung und Aufbau der Arbeit	1
I. THEORETISCHER TEIL	5
1 Die vordere Kreuzbandverletzung im ballsportlichen Kontext	7
1.1 Aktueller Stand der Forschung.....	7
1.2 Verletzungsmechanismus und biomechanische Risikofaktoren	10
2 Ist die vordere Kreuzbandverletzung verhinderbar?	17
2.1 Wirksamkeit aktueller verletzungspräventiver Trainingsprogramme	17
2.2 Bedeutung von Kraft für die VKB-Verletzungsprävention	20
2.3 Bedeutung von Koordination für die VKB-Verletzungsprävention.....	23
3 Komplexe Messsysteme und Testverfahren zur Erfassung der biomechanischen Bewegungskontrolle	29
3.1 Dreidimensionale Bewegungsanalyse und Elektromyographie als komplexes Messplatzsetting	29
3.2 Dynamisch funktionelle Tests als Abbild der sportspezifischen Risikosituation	32
II. EMPIRISCHER TEIL	37
4 Zielstellung und Hypothesen	39
5 Konzeptioneller Rahmen	45
5.1 Rahmenbedingungen	45
5.2 Vorüberlegungen und Vortests.....	46
5.2.1 Die Modifizierung des Heidelberger Sprungkoordinationstests	49
5.3 Studiendesign und Durchführung.....	51
5.4 Abbruchkriterien, Ethische und Rechtliche Aspekte	53
6 Material und Methodik	55
6.1 Probandenstichprobe	55
6.2 Klinische Untersuchung	57
6.3 Trainingsprogramme	58
6.4 Assessmentverfahren	65

6.4.1 Trainingsprogramm-Kontrollvariablen	66
6.4.1.1 <i>Isokinetische Maximalkraft</i>	66
6.4.1.2 <i>Posturale Kontrolle</i>	67
6.4.2 Dynamisch funktionelle Tests	69
6.4.2.1 <i>Drop Jump</i>	69
6.4.2.2 <i>Modifizierter Heidelberger Sprungkoordinationstest</i>	70
6.4.3 Fragebögen zu Klinik, Funktion und Bewegungsangst.....	72
6.4.3.1 <i>Allgemeiner Fragebogen</i>	72
6.4.3.2 <i>Lysholm Score und Tegner Aktivitätsskala</i>	72
6.4.3.3 <i>TAMPA Scale for Kinesiophobia (TSK-11)</i>	73
6.5 Datenerfassung.....	74
6.5.1 Isokinetik und Posturographie.....	74
6.5.2 Dreidimensionale Bewegungsanalyse.....	75
6.5.2.1 <i>Plug-in Gait Marker-Modell</i>	77
6.5.3 Elektromyographie	79
6.5.3.1 <i>Abgeleitete Muskeln und Elektrodenapplikation</i>	80
6.5.3.2 <i>Maximale Willkürkontraktionen</i>	82
6.6 Auswertungsstrategie und Datenverarbeitung	84
6.6.1 Isokinetik und Posturographie.....	84
6.6.2 Dreidimensionale Bewegungsanalyse	85
6.6.3 Elektromyographie	90
6.7 Fehlermaße.....	93
6.8 Statistik.....	97
7 Ergebnisse	101
7.1 Stichprobencharakterisierung.....	101
7.2 Test-Retestreliabilität	106
7.2.1 Kinematik.....	107
7.2.2 Kinetik.....	109
7.3 Interventionseffekte.....	112
7.3.1 Trainingsprogramm-Kontrollvariablen	112
7.3.1.1 <i>Isokinetische Maximalkraft</i>	113
7.3.1.2 <i>Posturale Kontrolle</i>	114

7.3.2	Dynamisch funktionelle Tests	116
7.3.2.1	<i>Kniekinematik in der Sagittal-, Frontal- und Transversalebene</i>	117
7.3.2.2	<i>Kniekinetik in der Sagittal-, Frontal- und Transversalebene</i>	131
7.3.2.3	<i>Elektromyographie in den verschiedenen Bewegungsphasen</i>	142
7.3.2.4	<i>Beobachtungen außerhalb der Hypothesen</i>	149
7.3.3	Zusammenfassung der Interventionseffekte	151
7.4	Zusammenhang von Bewegungsangst und biomechanischer Bewegungspräsentation	154
7.5	Einzelfalldarstellung einer „Risiko-Athletin“	157
8	Diskussion	167
8.1	Reliabilitätsanalyse	167
8.2	Interventionsstudie	172
8.3	Bewegungsangst und biomechanische Präsentation	179
8.4	Einzelfallanalyse der „Risiko-Athletin“	180
8.5	Limitationen	184
9	Fazit und Ausblick	187
	Literaturverzeichnis	191
	Anhang	213

Abkürzungsverzeichnis

BF	Musculus biceps femoris
BKZ	Bodenkontaktzeit
3D	Dreidimensional
DJ	Drop Jump
DVZ	Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus
EMG	Elektromyographie
GluM	Musculus glutaeus medius
GM	Musculus gastrocnemius medialis
KAD	Knee Alignment Device
IG	Interventionsgruppe
JL-SC	Jump-land-side-cut <i>(Sprung-Landemanöver mit anschließendem Seitschritt)</i>
JL-Stab	Jump-land-stabilize <i>(Sprung-Landemanöver mit anschließender Stabilisationsphase)</i>
JL-CC	Jump-land-cross-cut <i>(Sprung-Landemanöver mit anschließendem Kreuzschritt)</i>
M.	Musculus
meanEMG	mittlere Amplitude
mHDST	modifizierter Heidelberger Sprungkoordinationstest
MVC	Maximum Voluntary Contraction
mV	Millivolt
MW	Mittelwert
N	Newton
n	Stichprobengröße
RIA	Reflexinduzierte Aktivitätsphase
STAND	Standphase
SD	Standardabweichung
vGRF	vertical Ground Reaction Force <i>(vertikale Bodenreaktionskraft)</i>
VKB	Vorderes Kreuzband
VM	Musculus vastus medialis
VOR	Vorinnervations-/Voraktivitätsphase
Vp	Versuchsperson
vs.	versus

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Risk factors for knee and/or ACL injuries (Mehl et al., 2018, p. 53)	6
Tab. 2:	Inhalte und Methoden des Krafttrainings der unteren Extremität	52
Tab. 3:	Inhalte und Methoden des Krafttrainings für den Rumpf	53
Tab. 4:	Inhalte und Methoden des Koordinationstrainings	56
Tab. 5:	Plug-in Gait Markerplatzierung und -bezeichnung (Vicon, 2010) ...	71
Tab. 6:	Anatomische Lage und Funktion der vier abgeleiteten Muskeln sowie Elektrodenpositionierung (Hermens et al., 1999; Kapandji, 2001; Schünke et al., 2005; Valerius et al., 2006)	74
Tab. 7:	Parametrisierung der kinematischen und kinetischen Daten	82
Tab. 8:	Parametrisierung der elektromyographischen Daten. Phaseneinteilung nach (Gollhofer et al., 1990)	87
Tab. 9:	Anthropometrische Daten der drei Gruppen beim Prä-Test (Baseline)	95
Tab. 10:	Lysholm Score und Tegner Aktivitätslevel in den drei Gruppen beim Prä-Test	96
Tab. 11:	Alte Verletzungen der Reliabilitätsgruppe und der beiden Interventionsgruppen	98
Tab. 12:	Test-Retestreliabilität der Kinematik beim beidbeinigen Drop Jump und modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest	101
Tab. 13:	Test-Retestreliabilität der Kinetik beim beidbeinigen Drop Jump und modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest	103
Tab. 14:	Relative isokinetische Maximalkraft (60°/s) des Quadriceps und der ischio cruralen Muskulatur (Ischios, MW ± SD) sowie Prä-Post-Differenzen und Gruppeneffekte der Koordinationsgruppe (KOG) und der Kraftgruppe (KR _G) für die dominante und die nichtdominante Seite	107
Tab. 15:	Normiertes maximales CoP Bewegungsausmaß (ROM) in a/p und m/l Richtung (MW ± SD) sowie Prä-Post-Differenzen und	

	Gruppeneffekte der Koordinationsgruppe (KO_G) und der Kraftgruppe (KR_G) für die dominante und die nichtdominante Seite	109
Tab. 16:	Kinematische Parameter ($MW \pm SD$) der Koordinations- (KO_G) und Kraftgruppe (KR_G) für das dominante und nichtdominante Bein während der Bodenkontaktphase beim Drop Jump	112
Tab. 17:	Kinematische Parameter ($MW \pm SD$) der Koordinations- (KO_G) und Kraftgruppe (KR_G) für das dominante und nichtdominante Bein während der Bodenkontaktphase beim modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest – Kondition „jump-land-side-cut“	117
Tab. 18:	Kinematische Parameter ($MW \pm SD$) der Koordinations- (KO_G) und Kraftgruppe (KR_G) für das dominante und nichtdominante Bein während der Bodenkontaktphase beim Modifizierten Heidelberger Sprungtest – Kondition „jump-land-stabilize“	120
Tab. 19:	Kinematische Parameter ($MW \pm SD$) der beiden Interventionsgruppen während der Bodenkontaktphase beim Modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest – Kondition „jump-land-cross-cut“	125
Tab. 20:	Kinetische Parameter (Maximale externe Momente, $MW \pm SD$) der Koordinations- und Kraftgruppe für das dominante und das nichtdominante Bein während der Bodenkontaktphase beim Drop Jump	128
Tab. 21:	Kinetische Parameter (Maximale externe Momente, $MW \pm SD$) in der Sagittal, Frontal- und Transversalebene für das dominante und das nichtdominante Bein während der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstests – Kondition "jump-land-side-cut"	131
Tab. 22:	Kinetische Parameter (Maximale externe Momente, $MW \pm SD$) in der Sagittal, Frontal- und Transversalebene für das dominante und das nichtdominante Bein während der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstests – Kondition "jump-land-stabilize"	134
Tab. 23:	Kinetische Parameter (Maximale externe Momente, $MW \pm SD$) in der Sagittal, Frontal- und Transversalebene für das dominante	

	und das nichtdominante Bein während der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstests – Kondition "jump-land-cross-cut"	136
Tab. 24:	Test-Retest Unterschiedsprüfung des $\text{meanEMG}_{\text{norm}}$ der R_G für die analysierten Bewegungsphasen, dominante Seite	139
Tab. 25:	Test-Retest Unterschiedsprüfung des $\text{meanEMG}_{\text{norm}}$ der R_G für die analysierten Bewegungsphasen, nichtdominante Seite	140
Tab. 26:	Bodenkontaktzeiten der beiden Interventionsgruppen beim modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest für die Konditionen „jump-land-side-cut“ und „jump-land-cross-cut“	150
Tab. 27:	Tampa Score ($MW \pm SD$) der drei Gruppen sowie der Gesamtstichprobe beim Prä-Test	154
Tab. 28:	Korrelationsanalyse: Bewegungsangst und maximale Kniewinkel in der Sagittal-, Frontal- und Transversalebene beim Drop Jump und modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest	155

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Dynamic valgus was defined as the position or motion, measured in 3 dimensions, of the distal femur toward and distal tibia away from the midline of the body. Dynamic valgus may have included indicated motions and moments (Hewett et al., 2005, p. 495)	10
Abb. 2:	Darstellung des sensomotorischen Systems mit den verschiedenen Interaktionsmöglichkeiten und Testverfahren (Jerosch et al., 1998, S. 248)	21
Abb. 3:	Studiendesign der Interventionsstudie	45
Abb. 4:	Consort Flow Diagram nach Schulz et al. (2010) zur Verdeutlichung der Gewinnung, Zusammensetzung und Veränderung der Stichprobe im Studienverlauf. VKB-Ruptur = Vordere Kreuzbandruptur, AB-Riss = Außenbandriss	48
Abb. 5:	Koordinationstraining zu Beginn. „Erfahrbar machen“ der Beinachse, Rumpfstabilität. Statische Stabilisation und dynamische Stabilisation am Ort	57
Abb. 6:	Koordinationstraining mittlere Phase. Umsetzen des Erlernten in sportsspezifische Bewegungsmuster (sportartübergreifend)	57
Abb. 7:	Koordinationstraining gegen Ende der Trainingsphase. Komplexe Sprungstabilisierung in handballspezifischen Risikosituationen	58
Abb. 8:	Isokinetische Maximalkraftmessung des Quadriceps und der ischiocruralen Muskulatur in der offenen kinetischen Kette am Biodex System 3	60
Abb. 9:	Einbeinstandtest auf einer Kistler Kraftmessplatte zur Ermittlung der statischen Gleichgewichtskontrolle	61
Abb. 10a-c:	Beidbeiniger Drop Jump. (a) Ausgangsstellung. Die Versuchsperson steht auf einer 30 cm hohen Kiste mit einem Abstand von 35 cm zwischen den Zehenmarkern. (b, c) Auf Kommando lässt sie sich ohne sichtbaren Absprung von der Kiste auf zwei davorliegende Kraftmessplatten fallen, um von dort möglichst schnell maximal hoch abzuspringen. Die Landung der zweiten Flugphase erfolgt wieder auf den beiden Kraftmessplatten.	63

- Abb. 11a-d: Modifizierter Heidelberger Sprungkoordinationstest. **(a)** In der Ausgangsstellung ist kein Lichtsignal aktiviert. Nach dem Er-tönen des akustischen Signals erfolgt der Anlauf. Das Lichtsig-nal (re., li., keins) wird durch eine Lichtschranke ausgelöst, wenn die Versuchsperson vom Boden abspringt, um den Ball überkopf zu schlagen. **(b)** In der Landephase hat die Probandin die Mög-lichkeit sich mental auf die weiterlaufende Richtung einzustellen. **(c, d)** Nach der Landung stabilisiert die Versuchsperson entweder in der Mitte (kein Lichtsignal) oder führt unmittelbar ein Side-cut-Manöver (re. Lichtsignal, s. Abbildung) bzw. ein Cross-cut-Man-över (li. Lichtsignal) im 45° Winkel durch. 64
- Abb. 12: Darstellung der Markerplatzierung, Seiten- und Frontalansicht (Probandin der R_G)¹⁷ 71
- Abb. 13: Visualisierung des dreidimensionalen Marker-Modells in der Vicon Workstation® (einfache statische Aufnahme) 72
- Abb. 14: Visualisierung des dreidimensionalen Marker-Modells in der Vicon Workstation® nach Berechnung der Gelenkzentren und -achsen anhand der statischen KAD-Aufnahme. Das Foto zeigt das "Knee Alignment Device" (KAD), dass an der medialen und lateralen Femurkondyle angebracht wird. 72
- Abb. 15a-d: Platzierung der Oberflächenelektroden gemäß den SENIAM Leit-linien (Hermens et al., 1999). **(a)** M. gluteus medius **(b)** M. vastus medialis **(c)** oben: M. biceps femoris, unten: M. gastrocnemius medialis **(d)** Referenzelektrode am Sakrum 75
- Abb. 16a-d: Positionen für die muskelspezifischen maximalen Willkürkon-traktionen. **(a)** M. vastus medialis **(b)** M. biceps femoris **(c)** M. gastrocnemius medialis **(d)** M. gluteus medius. Das Stahlgestell diente der Erfassung, der während der MVC aufgebracht, Kraft (Newton), die als Kraft-Zeitkurve in der Software Vicon Work-station® visualisiert wurde. Die verbale Instruktion war in folgen-de Anweisungen untergliedert: 1) „Kein Kontakt“ (zum Stahl-gestell) 2) „Kontakt aufnehmen“ 3) „und maximal Druck geben... fest...fest...fest...und halten.“ 4) „fertig“. 76
- Abb. 17a, b: Center of Pressure (CoP) Verlauf in anterior-posteriore (a/p) und medio-laterale (m/l) Richtung. **a)** Ungefiltertes Signal **b)** Mit 5 Hz

- Tiefpass (Butterworth, 4. Ordnung) gefiltertes Signal 78
- Abb. 18: Eventsetzung in der Vicon Workstation®. 1. Event = IC (Initialer Bodenkontakt, vGRF > 30N), 2. Event = TO (Toe Off, Verlassen der Kraftmessplatte, vGRF < 30N). 3. Event = 10 Frames nach dem TO (rein auswerttechnisch begründet). Frontalansicht zum Zeitpunkt der maximalen Knieflexion beim modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest – Kondition „jump-land-side-cut“ 81
- Abb. 19: Definition der kinematischen Variablen (rot markiert). **(a)** Knieflexion/-extension (Sagittalebene) **(b)** Knieabduktion/-adduktion (\triangleq Knievalgus/-varus, Frontalebene) und Knieinnen-/außenrotation (Transversalebene) (modifiziert nach Vicon, 2017, S. 78) 83
- Abb. 20: Darstellung der analysierten Bewegungsphasen. Gleichgerichtetes und gefiltertes EMG (20-500 Hz) einer Probandin beim mHDST – Kondition „jump-land-side-cut“. GluM = M. glutaemus medius, VM = M. vastus medialis, BF = M. biceps femoris, GM = M. gastrocnemius medialis, Fz = vertikale Bodenreaktionskraft. IC = Initial Contact, TO = Toe off, VOR (Vorinnerationsphase) = Periode 150 ms vor Bodenkontakt; RIA (Phase der reflexinduzierten Aktivität) = 30-120 ms nach Bodenkontakt (in Anlehnung an Gollhofer et al., 1990). Die Abbildung basiert auf nicht normalisierten Daten, d. h. es kann lediglich das Muster der Kurven verglichen werden, nicht die absoluten Werte. 85
- Abb. 21: Maximale isometrische Willkürkontraktion des M. vastus medialis (dominante Seite). Die synchrone Aufzeichnung des EMG-Signals und der Kraft-Zeitkurve ermöglicht es, das MVC Signal als Normierungsgrundlage über ein Zeitfenster von 1000 Frames zu berechnen, zu einem Zeitpunkt, an dem die Probandin ein stabiles Kraftplateau zeigt. 86
- Abb. 22: Variation in knee joint angles (Euler Model) of a representative normal subject corresponding to internal (dotted lines) and external (solid thin lines) perturbation of the knee flexion-extension axis in steps of 5°. Reference data are shown as solid thick lines. The outermost curves correspond to a perturbation of 15° in flexion-extension axis (Ramakrishnan & Kadaba, 1991, p. 971). 88

- Abb. 23a, b: Subjektive Einschätzung zu Stabilität und Schmerz (Skala von 1-10) an der unteren Extremität von allen drei Gruppen beim Prä-Test - dominantes **(a)** und nichtdominantes Bein **(b)**. KO_G = Koordinationsgruppe; KR_G = Kraftgruppe; R_G = Reliabilitätsgruppe 99
- Abb. 24a, b: Relative isokinetische Maximalkraft (60°/s) des Quadriceps und der ischiocruralen Muskulatur der Koordinationsgruppe (KO_G) und der Kraftgruppe (KR_G) für die dominante **(a)** und die nichtdominante Seite **(b)**. * = $p < .05$ (Prä-Post-Vergleich innerhalb der Gruppen); † = $p < .10$ (Prä-Post-Vergleich innerhalb der Gruppen), † $_G$ = $p < .10$ (Gruppenvergleich) 107
- Abb. 25a, b: Normiertes maximales Center of Pressure (CoP) Bewegungsausmaß (ROM) in a/p und m/l Richtung der Koordinationsgruppe (KO_G) und Kraftgruppe (= KR_G) für die dominante **(A)** und die nichtdominante Seite **(B)**. * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppen), † = $p < .10$ (prä/post innerhalb der Gruppen) 109
- Abb. 26: Winkelverlaufskurven der Koordinations- (KO_G , n = 6) und Kraftgruppe (KR_G , n = 7) für das dominante (dom) und nichtdominante (ndom) Bein im Prä-Post-Vergleich (rot/blau) während der Bodenkontaktphase beim Drop Jump 112
- Abb. 27: Winkelverlaufskurven der Koordinations- (KO_G , n = 5) und Kraftgruppe (KR_G , n = 7) für das dominante (dom) und nichtdominante (ndom) Bein im Prä-Post-Vergleich (rot/blau) während der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstests – Kondition „jump-land-side-cut“ 117
- Abb. 28a-c: Sagittales Kniebewegungsausmaß (Flexion-Extension ROM) des *nichtdominanten Beines* während der Bodenkontaktphase für die Kondition “jump-land-side-cut” des modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstests. **(a)** MW \pm SD der Koordinationsgruppe (KO_G) und Kraftgruppe (KR_G) **(b)** Einzelne Athletinnen der KO_G **(c)** Einzelne Athletinnen der KR_G . * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppe; * $_G$ = $p < .05$ (Gruppenvergleich) 118
- Abb. 29: Winkelverlaufskurven der Koordinations- (KO_G , n = 6) und Kraftgruppe (KR_G , n = 7) für das dominante (dom) und nichtdominante (ndom) Bein im Prä-Post-Vergleich (rot/blau) während der

- Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprung-
 koordinations-tests – Kondition „jump-land-stabilize“ 120
- Abb. 30a-c: Maximaler Knievalgus des *nichtdominanten Beines* während der
 Bodenkontaktphase für die Kondition “jump-land-stabilize” des
 modifizierten Heidelberger Sprungkoordinations-tests. **(a)** MW \pm
 SD der Koordinationsgruppe (KO_G) und Kraftgruppe (KR_G).
(b) Einzelne Athletinnen der KO_G. **(c)** Einzelne Athletinnen der
 KR_G. * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppe; *_G = $p < .05$
 (Gruppenvergleich) 122
- Abb. 31a-c: Bewegungsausmaß in der Transversalebene des *nichtdominan-
 ten Beines* während der Bodenkontaktphase für die Kondition
 “jump-land-stabilize” des modifizierten Heidelberger Sprung-
 koordinations-tests. **(a)** MW \pm SD der Koordinations- (KO_G) und
 Kraftgruppe (KR_G) **(b)** Einzelne Athletinnen der KO_G, **(c)** Ein-
 zelne Athletinnen der KR_G. * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der
 Gruppe; *_G = $p < .05$ (Gruppenvergleich) 123
- Abb. 32: Winkelverlaufskurven der Koordinations- (KO_G, n = 6) und Kraft-
 gruppe (KR_G, n = 7) im Prä-Post-Vergleich (rot/blau) während
 der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprung-
 tests - Kondition „jump-land-stabilize“ 125
- Abb. 33: Externe Gelenkmomente der Koordinations- (KO_G, n = 6) und
 Kraftgruppe (KR_G, n = 7) für das dominante (dom) und das
 nichtdominante (ndom) Bein im Prä-Post-Vergleich (rot/blau)
 während der Bodenkontaktphase beim Drop Jump 128
- Abb. 34: Kniekinetik der Interventionsgruppen in der Sagittal-, Frontal-
 und Transversalebene für das dominante (Dom) und nichtdomi-
 nante (Ndom) Bein im Prä-Post-Vergleich (rot/blau) während
 der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprung-
 koordinations-tests - Kondition „jump-land-side-cut“ 131
- Abb. 35: Kniekinetik der Interventionsgruppen in der Sagittal-, Frontal-
 und Transversalebene für das dominante (dom) und das nichtdo-
 minante (ndom) Bein im Prä-Post-Vergleich (rot/blau) während
 der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprung-
 koordinations-tests - Kondition „jump-land-stabilize“ 134

- Abb. 36: Kniekinetik der Interventionsgruppen in der Sagittal-, Frontal- und Transversalebene für das dominante (dom) und das nichtdominante (ndom) Bein im Prä-Post-Vergleich (rot/blau) während der Bodenkontaktphase des modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstests - Kondition „jump-land-cross-cut“ 136
- Abb. 37: MeanEMG_{norm} für die Koordinationsgruppe (KO_G) und die Kraftgruppe (KR_G) in der Vorinnervationsphase (VOR), der Phase der reflexinduzierten Aktivität (RIA) und der Standphase (STAND) beim beidbeinigen Drop Jump. **(a)** Dominant **(b)** Nichtdominant. * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppe); † = $p < .10$ (prä/post innerhalb der Gruppe) 141
- Abb. 38: MeanEMG_{norm} für die Koordinationsgruppe (KO_G) und die Kraftgruppe (KR_G) in der Vorinnervationsphase (VOR), der Phase der reflexinduzierten Aktivität (RIA) und der Standphase (STAND) beim modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest – Kondition „jump-land-side-cut“. **(a)** Dominant **(b)** Nichtdominant. * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppe); † = $p < .10$ (prä/post innerhalb der Gruppe); ‡ = $p < .05$ (Gruppenvergleich) 142
- Abb. 39: MeanEMG_{norm} für die Koordinationsgruppe (KO_G) und die Kraftgruppe (KR_G) in der Vorinnervationsphase (VOR), der Phase der reflexinduzierten Aktivität (RIA) und der Standphase (STAND) beim modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest – Kondition „jump-land-stabilize“. **(a)** Dominant **(b)** Nichtdominant. * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppe); † = $p < .10$ (prä/post innerhalb der Gruppe) 144
- Abb. 40: MeanEMG_{norm} für die Koordinationsgruppe (KO_G) und die Kraftgruppe (KR_G) in der Vorinnervationsphase (VOR), der Phase der reflexinduzierten Aktivität (RIA) und der Standphase (STAND) beim modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest – Kondition „jump-land-cross-cut“. **(a)** Dominant **(b)** Nichtdominant. * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppe); † = $p < .10$ (prä/post innerhalb der Gruppe) 146
- Abb. 41: Vertikale Bodenreaktionskraft (Fz) der Koordinations- (KO_G) und Kraftgruppe (KR_G) beim Drop Jump und modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest, dominante (DOM) und nicht-

- dominante Seite (NDOM). * = $p < .05$ (prä/post innerhalb der Gruppe); ** = $p < .01$ (prä/post innerhalb der Gruppe); †_G = $p < .10$ (Gruppenvergleich) 149
- Abb. 42: Interventionseffekte der beiden Trainingsgruppen (Δ prä/post, $p < .05$, Koordinationsgruppe = orange, Kraftgruppe = grün) für die Kinematik, Kinetik und Elektromyographie der *dominanten Seite*. Es fanden sich keine Gruppeneffekte. 152
- Abb. 43: Interventionseffekte der beiden Trainingsgruppen (Δ prä/post, $p < .05$, Koordinationsgruppe = orange, Kraftgruppe = grün) für die Kinematik, Kinetik und Elektromyographie der *nichtdominanten Seite*. *_G = Gruppeneffekte beim Post-Test ($p < .05$) 152
- Abb. 44a, b: Signifikant negative Korrelation zwischen Bewegungsangst und maximalem Knievalguswinkel der nichtdominanten Seite. Probandinnen mit mehr Bewegungsangst zeigen stärkere Valguswinkel. **(a)** beidbeiniger Drop Jump ($n = 17$, moderater Zusammenhang) **(b)** modifizierten Heidelberger Sprungkoordinationstest – Kondition „jump-land-cross-cut“ ($n = 15$, starker Zusammenhang) 155
- Abb. 45a-h: Vordere Kreuzbandruptur während eines Ligaspiels, sieben Monate nach der Trainingsintervention (Vp6, KO_G, rechtes, nichtdominantes Bein). Die betroffene Spielerin befindet sich im Angriff auf links außen (linker Bildrand). **(a, b)** Auf der Bildsequenz sieht man die Spielerin unmittelbar nach Ballannahme in Vorbereitung zum Rückpass auf ihre Teamkollegin auf der Position Rückraum links. **(c, d)** Zeigt die Spielerin beim Ausseren des rechten Beines für die typische Abstoppbewegung nach dem Stoßen sowie den für das Verletzungsereignis entscheidenden Moment des Bodenkontakts des Fußes, d. h. unmittelbar nach der Landung (roter Kreis). Die Aufnahmen demonstrieren eindrücklich, wie die Spielerin beim Abstoppen auf dem nahezu gestreckten Bein mit dem Körperschwerpunkt hinter dem Kniegelenk landet. Inwiefern zu diesem Zeitpunkt ein zusätzlicher Valgus- bzw. Rotationsstress auf das Kniegelenk wirkt, ist aufgrund der Kameraperspektive nicht beurteilbar. **(e)** Nach der Ruptur folgt die zunehmende Kniebeugung. **(f - h)** Die Handballerin

	entlastet das betroffene rechte Bein und geht zu Boden.	157
Abb. 46:	Kinematik (oben) und Kinetik (unten) der „Risiko-Athletin“ beim Prä- (rot) und Post –Test (blau) in der Sagittal-, Frontal- und Transversalebene	159
Abb. 47:	Maximales Knieflexionsmoment der einzelnen Handballerinnen im Prä-Post-Vergleich. Vp6 zeigt die stärkste Zunahme des Flex- ionsmoments ohne Veränderung des maximalen Flexionswinkels vom Prä- zum Post-Test. Vp7 zeigt eine annähernd gleich starke Zunahme, die aber mit einer verstärkten Knieflexion von 7,1° beim Post-Test einhergeht.	160
Abb. 48:	MeanEMG _{norm} des M. biceps femoris der einzelnen Handballe- rinnen im Prä-Post-Vergleich. Vp6 zeigt eine deutlich höhere Muskelaktivität als ihre Teamkolleginnen, insbesondere in der reflexinduzierten Phase (RIA) und Standphase (STAND). Nach der Intervention hat sich die „Risiko-Athletin“ hinsichtlich der M. biceps femoris Aktivität den restlichen Spielerinnen ange- passt. In der Vorinnervationsphase (VOR) offenbaren sich die Unterschiede nicht so gravierend. Vp1-6 = Koordinationsgruppe; Vp7-13 = Kraftgruppe	162
Abb. 49:	Tampa Score beim Post-Test. Vp6 weist mit zwei ihrer Team- kolleginnen den höchsten Score auf.	163

Zusammenfassung

Einleitung: Jährlich ereignen sich in den USA ca. 250.000 Kreuzband (VKB)-Verletzungen, die mit immensen Behandlungskosten einhergehen. Besonders davon betroffen sind Sportler/innen von sogenannten „high risk“ Sportarten wie Fußball, Handball und Basketball. Dabei verletzen sich Frauen das VKB mit einem 4- bis 6-fach erhöhten Risiko, deutlich häufiger als Männer. Als biomechanische Risikofaktoren werden in der Literatur eine geringe Kniebeugung, ein verstärkter Knievalgus (x-Bein) und/oder eine vermehrte Knieinnen- bzw. -außenrotation in Verbindung mit einer mangelhaften Rumpfkontrolle bei Sprung-, Lande- und Richtungswechselmanövern angegeben. Trotz der Kenntnis des Verletzungsmechanismus finden sich wenig Interventionsstudien, in denen neuromuskuläre Kontrollparameter in sportspezifischen Risikosituationen analysiert werden, um die Effektivität verletzungsprophylaktischer Trainingsprogramme zu überprüfen. Das konkrete Ziel der Studie war es, die Auswirkungen eines kraft- versus koordinationsbetonten Athletiktrainings auf die Kniegelenkstabilität (Kinematik/Kinetik) und die neuromuskuläre Aktivierung (EMG) von Handballerinnen bei hochdynamischen Belastungen zu untersuchen.

Methodik: Zur Beantwortung der Fragestellung wurde im Rahmen eines interdisziplinären Untersuchungssettings eine Interventionsstudie mit Handballerinnen der 3. Bundesliga (n = 13) sowie eine Reliabilitätsstudie mit Sportstudentinnen (n = 6) durchgeführt. Alle Probandinnen erhielten zu Beginn der Studie eine klinische Untersuchung der Kniegelenke und durchliefen vor und nach der 6-wöchigen Trainingsintervention spezifische Kraft-, Gleichgewichts- und Sprungtests in einem Bewegungsanalyselabor. Im Fokus der dynamischen Tests stand ein komplexer einbeiniger Sprungtest mit „Überkopf-Ballaktion“ und unerwarteten Richtungswechseln nach der Landung (modifizierter Heidelberger Sprungkoordinationstest), der es ermöglicht, die sportspezifische Risikosituation für VKB-Verletzungen abzubilden. Als Blick über den Tellerrand wurde als Nebeninformation der Zusammenhang von Bewegungsangst und biomechanischer Bewegungspräsentation untersucht.

Ergebnisse: Die Trainingsintervention führte in beiden Gruppen in Abhängigkeit der Beine und Testmanöver zu einer Veränderung der Biomechanik und der neuromuskulären Aktivität. Für drei Parameter fanden sich Gruppeneffekte. Die Koordinationsgruppe landete nach der Trainingsintervention mit einem reduzierten sagittalen Bewegungsausmaß beim „jump-land-side-cut“ Manöver und einem reduzierten transversalen Bewegungsausmaß beim „jump-land-stabilize“ Manöver. Die Kraftgruppe landete nach der Trainingsintervention in verstärkter Knievalgusposition

beim „jump-land-stabilize“ Manöver. In beiden Gruppen konnten weitere trainingsbedingte Adaptationen festgestellt werden, die keinen Gruppeneffekt zeigten. Das Krafttraining führte unter anderem zu einer Reduzierung der vertikalen Bodenreaktionskräfte sowie einer Aktivitätszunahme des M. biceps femoris und eine Aktivitätsabnahme des M. gluteus medius in Abhängigkeit verschiedener Manöver. Die Koordinationsgruppe zeigte eine Aktivitätszunahme des M. biceps femoris für eine Testkondition. Die Korrelationsanalyse ergab einen moderaten Zusammenhang zwischen Bewegungsangst und Knievalgus des nichtdominanten Beines beim beidbeinigen Drop Jump.

Diskussion und Fazit: Das progressive Beinachsentraining mit dem Fokus auf Sprung-, Lande- und Abbremsmanövern unter koordinativen Druckbedingungen (Zeit-, Präzisions-, Ermüdungsdruck...) hat sich als sinnvolle verletzungsprophylaktische Trainingsmaßnahme erwiesen. Krafttraining hat unumstritten ein verletzungsprophylaktisches Potential. Der Einsatz von reinem Hypertrophietraining ohne funktionellen Input sollte jedoch kritisch betrachtet werden, da fraglich ist, ob die Kraftumsetzung in hochdynamischen Belastungssituationen in allen drei Ebenen gewährleistet ist.

Der modifizierte Heidelberger Sprungkoordinationstest kann als praktisches Testverfahren zur Analyse neuromuskulärer Defizite angewandt werden. Anhand dieses komplexen Sprungtests konnten deutliche Defizite der „Risiko-Athletin“ im Vergleich zu ihren Teamkolleginnen identifiziert werden. Als besonders auffällig hat sich dabei die neuromuskuläre Aktivierungsstrategie der lateralen Hamstrings herausgestellt. Zur weiteren Verwendung wird die Überprüfung der Test-Retestreliabilität in einer größeren Stichprobe empfohlen. Fragebögen zu Bewegungsangst sollten vermehrt in den Fokus der VKB-verletzungspräventiven Forschung rücken; sie haben möglicherweise großes Potential Risiko-Athletinnen ohne aufwendiges Messerquipment im Vorfeld zu identifizieren. Die Ergebnisse sind aufgrund der kleinen Stichprobe nicht generalisierbar, bieten aber zahlreiche Anknüpfungspunkte für vertiefende Forschung auf dem Gebiet der neuromuskulären Kontrolle sportlicher Bewegungen.



Einleitung und Aufbau der Arbeit

„Leistungssport ist Leidenschaft!

Aber was nützt die Leidenschaft, wenn man verletzt ist?“

Die VKB-Verletzung ist die häufigste Knieverletzung im Sport, mit den längsten Ausfallzeiten. Die verletzten Athleten/innen stehen ihrem Team für lange Zeit nicht für den Wettkampfsport zur Verfügung. Dabei haben Frauen ein deutlich höheres Risiko sich eine VKB-Verletzung zuzuziehen als Männer.

Um die alarmierenden Verletzungsraten zu reduzieren, sind in den letzten Jahren zahlreiche Präventionsstrategien und spezifische neuromuskuläre Trainingsprogramme entstanden. Laut Sugimoto et al. (2012) lässt sich das relative Risiko eine VKB-Verletzung ohne Fremdeinwirkung zu erleiden bei weiblichen Athleten durch neuromuskuläre Trainingsprogramme um 73% reduzieren. Der prophylaktische Benefit scheint gegeben, es bedarf jedoch einer großen Anzahl an Personen ($n = 108$), die trainiert werden müssen, um eine VKB-Verletzung ohne Fremdeinwirkung zu verhindern. Die Optimierung der Effektivität der Programme ist damit nach wie vor hochaktuell. Die Programme bestehen in der Regel aus verschiedenen Trainingsbausteinen, deren einzelne Wirkung auf die Gelenkstabilität nicht bekannt ist. Um die Bausteine für einen maximal protektiven Effekt zu kombinieren, ist dies jedoch unabdingbar.

Die verletzungsprophylaktische Wirkung der spezifischen Trainingsprogramme wird entweder anhand der tatsächlichen Verletzungshäufigkeit der Athleten/innen oder über die Beeinflussbarkeit der biomechanischen Risikofaktoren untersucht. In diesem Zusammenhang existiert eine Vielzahl an verschiedenen Sprungtests, die zur Analyse der Bewegungskontrolle in dynamischen Belastungssituationen eingesetzt werden. Viele davon können die sportliche Drucksituation nicht erzeugen. Um die biomechanischen Risikofaktoren im Labor möglichst realitätsnah abbilden zu können, müssen die Testverfahren der Komplexität der tatsächlichen Risikosituation Rechnung tragen. Ein komplexes Messplatzsetting aus dreidimensionaler Bewegungsanalyse und Elektromyographie bietet die Chance, Gelenkwinkel, -momente und Muskelaktivität simultan zu erfassen. Interventionsstudien, die die verletzungsprophylaktische Wirkung ihrer Programme anhand kinematischer, kinetischer und elektromyographischer Parameter überprüfen, sind rar.