



Medizinische Fakultät
der Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg

BEWERBUNG FÜR DEN VBG- PRÄVENTIONSPREIS SPORT 2026

**Return to Soccer - sportmedizinisches Konzept zur
Verbesserung der Validierung von RTC-Testungen
nach VKBR unter Einbeziehung zentraler und
peripherer neurophysiologischer Parameter**

Hallescher Fußballclub e.V.

Kantstraße 2
06110 Halle (Saale)

vertreten durch:

Dr. med. Thomas Bartels (M-Arzt - Team-Arzt)

MVZ Sportklinik Halle GmbH (Im Folgenden Sportklinik Halle genannt)
Dr. med. Thomas Bartels/ M.Sc. Stefan Pröger
Weidenplan 16
06108 Halle

In Kooperation mit der:

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

Medizinische Fakultät
Department Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (DOUW)
Labor für Experimentelle Orthopädie & Sportmedizin
apl. Prof. Dr. René Schwesig/ Dr. Eduard Kurz
Ernst-Grube-Str. 40
06120 Halle

GLIEDERUNG

Einleitung.....	3
1 HFC – Trainings- und Präventionskonzept	4
2 VKBR unter besonderer Berücksichtigung von Frauen und Mädchen	11
3 Einsatz des HDsEMG im Rahmen der RTC-Testung nach VKBR – weltweit erster Messplatz, der das HDsEMG in die RTC-Test- batterie inkludiert.....	13
4 Untersuchungen zur Muskelfaserleitgeschwindigkeit im Leistungssport (Basisdaten HFC) zur Inkludierung in RTC-Test- batterien und zum Monitoring des Trainings- und Leistungszu- standes.....	15
5 Eine vergleichende Analyse der Explosiv- und Maximalkraft des Quadriceps bei Leistungssportlern nach Ruptur des vorderen Kreuzbands.....	23
6 Fallbeispiel aus der Praxis RTC-Testung mit additiver PIC Analytik zur Schätzung der neuronalen Plastizität (zentraler Marker)	25
7 Ableitungen für die diagnostische Praxis.....	29
8 Ableitungen für die präventiv-therapeutische Praxis – zukünftige Projekte.....	30
Schlussbemerkung.....	31
Literatur.....	32

Einleitung

Der Hallesche FC ist ein ostdeutscher Traditionsverein, der bis zu seinem Abstieg (2024) 12 Jahre ununterbrochen in der 3. Liga spielte.

Die sportmedizinische und orthopädische Betreuung wird seit 22 Jahren durch die Sportklinik Halle (Dr. med. Thomas Bartels, M-Arzt des HFC seit 2020 zusammen mit Dr. Kenny Ludäscher) sichergestellt. Die Leistungsdiagnostik wird durch apl. Prof. Dr. René Schwesig und seine Arbeitsgruppe in Verbindung mit B.A. John Brandes (AG Versorgungsforschung, Innere Medizin, Universitätsmedizin Halle, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg) sowie dem Athletik- und Rehabilitationsleiter Denis Hasenbeck realisiert.

Die Betreuung und Weiterentwicklung erfolgt in einem breit angelegten Staff mit Integration der medizinischen Abteilung. Die innovative HDsEMG Analytik wird federführend von Dr. Eduard Kurz geleitet (Arbeitsgruppe apl. Prof. Dr. Schwesig). Dies in enger Zusammenarbeit mit Dr. Thomas Bartels und M.Sc. Stefan Pröger (Sportklinik Halle). In der Sportklinik Halle ist ein für das vordere Kreuzband einzigartiger Messplatz aufgebaut worden (Neuromuskuläre Forschung-NMF e.V. Vorsitzender Dr. Bartels).

Auf Grund ihrer gezeigten Leistungen in der chirurgischen Versorgung von Verletzungen verfügt die Sportklinik Halle im Profisport über vielfältige Expertisen im „Hochleistungssport“ und arbeitet eng mit der VBG zusammen.

Die diesjährige Preiseinreichung für den Präventionspreis 2026 (VBG Next) schließt in gewisser Weise an die erfolgreiche Teilnahme im Jahr 2018 und 2022 an. Das damals vorgestellte Konzept wurde zwischenzeitlich weiterentwickelt und signifikant ergänzt (Abb. 1). Bezugnehmend auf die diesjährige Ausschreibung, wonach „Sie das Rad nicht neu erfinden müssen.“, stellt die hier vorgestellte Arbeit bekannte Inhalte (z. B. CK-Diagnostik, Laktatleistungsdiagnostik, Screening mittels STATSports-Tracking-System, Posturographie, ACWR) nur flankierend vor und konzentriert sich stattdessen auf innovative neue Ideen der nichtinvasiven Analytik mittels High Density Oberflächen-EMG (HDsEMG). Durch diese Erweiterung der VBG RTC Testbatterie gelingt es bisher nicht, objektivierbare zentrale und periphere neurophysiologische EMG-Marker in die Testungen zu inkludieren. Hintergrund und Notwendigkeit ist die mangelhafte Zielgenauigkeit und Vorhersagekraft der bisherigen RTC-Testungen. Diese stützen sich zumeist auf Outcomeparameter ab (Produktebene) und vernachlässigen den Innenaspekt der Bewegung respektive die zugrundeliegende Prozessebene. Bislang wurde das HDsEMG weltweit noch nicht in Testbatterien inkludiert, weil seine Anwendung und Auswertung aktuell (noch) zu komplex und aufwändig ist. Hinzu kommt, dass in der Diagnostik und Rehabilitation bislang zumeist der Vergleich zur „gesunden Seite“ zu Rate gezogen wird, um das Rehabilitationsziel zu definieren. Auch hier gehen wir neue Wege, indem wir den Vergleich zum gesunden Athleten anstreben. Das macht umfangreiche Screeninguntersuchungen im Vorfeld der Saison erforderlich, was umso herausfordernder ist, je komplexer das anzuwendende Assessment in Durchführung und Auswertung ist. Dies insbesondere vor dem Hintergrund der Finanzierbarkeit und Echtzeitanalytik solch umfangreicher Testungen. Überdies stellt diese Arbeit inhaltliche Bezüge zur Rehabilitation mittels neuester Erkenntnisse bezüglich neurophysiologischer Wirkprinzipien mittels Blood Flow Restriction (BFR) her und zeichnet Visionen zur Reformierung der Rehabilitation auf. Beispielsweise ist die Messung der Voraktivierung mittels zeitaufgelöstem

hochfrequenten Ultraschall mit Scherwellentechnologie Gegenstand eines aktuellen Bundesforschungsprojektes.

Die Ruptur des vorderen Kreuzbands ist ein Prototyp gestörter Sensomotorik und Rehabilitation (Laube et al. 2025). Der akute Informationsverlust durch eine VKB-Ruptur ist offensichtlich nicht nur für die sensomotorische Funktion hoch relevant, sondern auch für neurokognitive Funktionen, was in der Rehabilitation und bei der Bewertung des „return to sport“ beachtet werden muss (Piskin et al. 2022). Die bisher verborgenen neuromuskulären Defizite werden mit gut 80% beziffert (Lepley et al. 2020 und 2021).

Nach gegenwärtigem Stand gibt es keine RTC Testbatterien nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion (VKBR) in denen ein HDsEMG als Kriterium für die Freigabe zum Wettkampf verwendet wird (Blasimann et al. 2021). Aktuelle Studien belegen, dass der Einfluss von RTC-Testbatterien zum gegenwärtigen Stand sehr begrenzt ist und dass neue Wege gefunden werden müssen (Piussi et al. 2023).

1 HFC – Trainings- und Präventionskonzept

Das Trainings- und Präventionskonzept des Halleschen FC beinhaltet eine Vielzahl diagnostischer und interventionaler Maßnahmen (Abb. 1). Hervorzuheben ist hierbei der ganzheitliche Ansatz, um sowohl die Produktebene (z. B. Sprint- und Sprungdiagnostik) als auch die Prozessebene (z. B. HDsEMG, Posturographie) abzubilden und miteinander zu verzahnen.

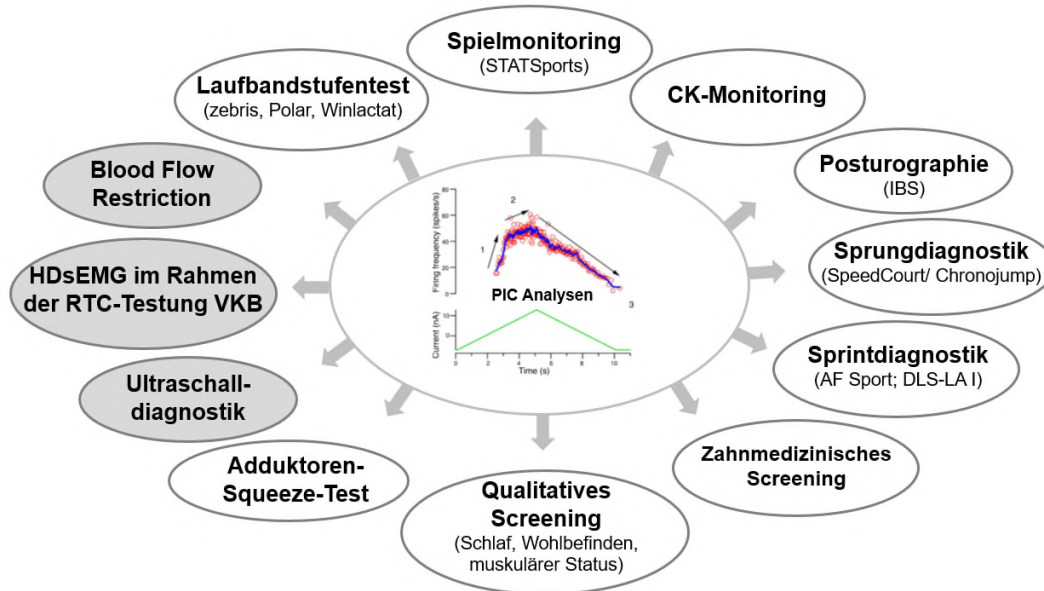


Abb. 1: Trainings und Präventionskonzept des HFC unter besonderer Berücksichtigung der Analyse von Ermüdung und Erholtheit sowie prozessualer Kenngrößen

Im Folgenden werden die einzelnen Interventionen, die den neuromuskulären Messplatz in gewisser Weise flankieren, komprimiert im Überblick vorgestellt:

Zahnmedizinisches Screening

Der Einfluss der Mundgesundheit auf die Verletzungshäufigkeit und Leistungsfähigkeit wird in der klinischen und sportlichen Praxis trotz vorliegender Evidenzen häufig unterschätzt und infolgedessen vernachlässigt (Ashley et al. 2015, Magalhaes et al. 2022). Einige Studien wiesen auf eine beträchtliche Prävalenz von Munderkrankungen und -verletzungen bei Spitzensportlern hin, darunter Karies, Parodontitis und sogenannte nicht-kariöse Läsionen wie Zahnerosionen (Schulze et al. 2024, Mielle et al. 2025). Eingebettet in die umfangreichen leistungsdiagnostischen Screenings zu Saisonbeginn wurden durch die Universitätspoliklinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie (Prof. Dr. Gernhardt) eine Dentalanamnese durchgeführt sowie zahnmedizinische Scores (DMFT, API, PSI, PBI) erhoben. Anschließend wurden diese Ergebnisse in Relation zu den leistungsdiagnostischen Tests und Parametern sowie zur Verletzungshäufigkeit gesetzt (Schwesig et al. 2025).

Posturographie

Seit 2018 (siehe auch Exposé zum VBG Präventionspreis 2018) wird jeder Spieler des HFC zu Saisonbeginn posturographisch untersucht. Hierbei kommt das Interactive Balance System (IBS, neurodata GmbH, Wien) zur Anwendung, welches durch die Arbeitsgruppe um apl. Prof. Dr. Schwesig seit 2002 umfangreich (Validität, Reliabilität, Referenzdaten) evaluiert wurde. Insbesondere im orthopädischen Setting (z. B. Rückenschmerz, VKBR, HTO, Knieendoprothetik) wurde das Assessment in den letzten 8 Jahren angewendet (Bartels et al. 2019, Brehme et al. 2020, Kurz et al. 2022a, Zeh et al. 2025).

Im leistungssportlichen Kontext liefert das IBS wertvolle Informationen seitens der posturalen Stabilität sowie der Gewichtsverteilung. Letztere ist insbesondere nach unilateralen Verletzungen gestört, so dass sich über die vier Kraftmessplatten Schon- und Entlastungshaltungen manifestieren bzw. quantifizieren lassen. Darüber hinaus bietet das Messsystem durch die Umwandlung des Kraft-Zeit-Signals mittels Fast Fourier Transformation in ein Spektrogramm die Möglichkeit, die Leistungsfähigkeit der posturalen Subsysteme zu beurteilen. Beispielsweise ist die Somatosensorik nach der operativen Kreuzbandrekonstruktion temporär vermindert, da durch die Operation Propriozeption geschädigt bzw. zerstört wird. Erst nach ca. 12 Monaten erreichen die Kreuzbandpatienten seitens der posturalen Stabilität wieder das Niveau einer alters- und geschlechtsgemachten Vergleichsgruppe (Bartels et al. 2019).

CK Monitoring

Seit der Saison 2021/2022 wird dreimal wöchentlich bei den Spielern Blut entnommen und der Kreatinkinase (CK) - Wert noch vor der Trainingseinheit bestimmt. Zu Beginn jeder Trainingswoche, zumeist Matchday (MD) + 3, wird überprüft, inwiefern Ermüdungen vom Spieltag sich in die neue Trainingswoche übertragen haben und u.U. akkumulieren. So kann das Trainerteam ggf. die kalkulierte Belastung für die Trainingseinheit oder sogar die Trainingswoche adaptieren. Das zweite Erhebungszeitfenster ist am Tag vor dem Wettkampf (MD-1) und soll den Trainern dabei helfen, die Spielfähigkeit der Sportler besser einschätzen zu können, mögliche Wechselstrategien zu antizipieren oder hoch belastete Spieler zu schonen. Das letzte Erhebungszeitfenster ist am Tag nach dem Spiel (MD+1) und spiegelt die erfahrenen Belastungen des Vortags wider.

Ziel ist es, individuelle Referenzdaten zu etablieren, um Belastung und Beanspruchung bei den Spielern verlässlicher erkennen und damit Risiken für Verletzungen minimieren zu können.

Sprintdiagnostik

Die Sprintdiagnostik (10 m, 30 m) wird sowohl mit dem Profiteam als auch mit den Nachwuchsteams (U15-19) einmal jährlich durchgeführt. Hierbei wird im Feld ein Lichtschrankenbasiertes Messsystem (AF Sport, Wesel) verwendet (Abb. 2).



Abb. 2: Lichtschrankenbasierte Sprintdiagnostik beim HFC

Laktatleistungsdiagnostik auf dem Laufband

Dreimal jährlich (Mai, Juni, Dezember) führt der Verein, mit Hilfe des Labors für Experimentelle Orthopädie und Sportmedizin, einen Laufbandstufentest durch (Abb. 3a). Hierbei erfolgt die Bestimmung der Schwellen (individuelle aerobe Schwelle, IAS; individuelle anaerobe Schwelle, IANS; Dickhuth Modell) und individuellen Laufbereiche (REKOM, GA1, GA1/2, GA2 und WSA) sowie den daraus resultierenden Trainingsempfehlungen für die Spieler. Neben der individuellen Analyse erfolgt auf der Basis einer nunmehr umfangreichen Referenzdatenbank (Liga 3 + 4: n=677) eine Perzentilanalyse (Abb. 3b) auf deren Grundlage die Spieler mit Hilfe eines **Ampel-systems** (grün = überdurchschnittlich = oberhalb Perzentil (P) 75; gelb = normal = zwischen P 25 und 75; rot = unterdurchschnittlich = unterhalb P 25) kategorisiert werden. Auf diese Art und Weise erhalten Spieler und Trainer eine schnelle und einfach nachvollziehbare Information zur Ausdauerleistungsfähigkeit.

a)



b)

	Leistungsparameter			Erholungsparameter		Vorbelastungswerte	
	v2 [km/h]	v4 [km/h]	v6 [km/h]	Erholung kardial [%/min]	Erholung metabolisch [mmol/l/min]	Ruhe-Hf [Schläge/min]	Ruhelaktat [mmol/l]
Minimum	5,20	10,6	12,7	1,77	-0,83	38	0,43
Mittelwert	12,0	15,0	16,5	3,98	0,11	65	1,10
Perzentil 25	11,0	14,2	15,8	3,38	-0,05	58	0,88
Perzentil 75	13,0	15,8	17,3	4,56	0,28	72	1,29
Maximum	16,2	18,8	20,1	7,57	0,95	129	2,82

Abb. 3a-b: Laufbandleistungsdiagnostik beim HFC (a) sowie deskriptive Aufbereitung der Ergebnisse (b)

Sprungdiagnostik und -monitoring

Im Mikrozyklus werden vor allem der Squat Jump (SJ) und der Countermovement Jump (CMJ; Abb. 4) regelmäßig genutzt, um die neuromuskuläre Leistungsfähigkeit stetig zu Beginn jeder Trainingswoche zu erfassen. Neben der Erfassung von Veränderungen trägt es dazu bei, die Sprungleistungen über verschiedene Trainingsphasen hinweg zu kontrollieren. So lassen sich Rückschlüsse auf die aktuelle Leistungsentwicklung ziehen und Trainingsanpassungen ableiten. Hinweise auf Ermüdung und 'Player Readiness' können zwar gewonnen werden, die Evidenz hierfür ist im Fußball jedoch noch begrenzt (Thorpe et al. 2015).



Abb. 4: Counter Movement Jump (Pierre Weber/ HFC Profiteam) unter Nutzung des SpeedCourts und Chronojump

Beanspruchungsmonitoring und Wellness-Fragebogen

Mit Hilfe des Prevention Management Tool der VBG lassen sich verschiedene Metriken zur Belastungs- und Beanspruchungssteuerung übersichtlich vereinen (Abb. 5). Besonders hilfreich sind dabei Wellness-Fragebögen, die aufgrund ihrer Einfachheit und Kosteneffizienz eine schnelle Erfassung des subjektiven Befindens, des Muskelstatus sowie der Schlafqualität und -quantität ermöglichen und darüber hinaus weitere relevante Metriken der Athleten erfassen können. Die Ergebnisse können ohne großen Aufwand von Sport-wissenschaftlern und Physiotherapeuten interpretiert werden und liefern unmittelbar verwertbare Einblicke in den aktuellen Ist-Zustand eines Athleten.

Ergänzend wird nach jedem Training die individuelle Trainingsintensität der Spieler eingetragen, indem die wahrgenommene Anstrengung (RPE) mit der Trainingsdauer kombiniert wird, woraus der Session-RPE Workload resultiert. Auf dieser Grundlage wird das Acute:Chronic Workload Ratio (ACWR) ermittelt, das das Verhältnis zwischen akuter und chronischer Belastung beschreibt. Werte zwischen 0,8 und 1,3 gelten dabei als optimal, während sowohl höhere als auch niedrigere Werte mit einem erhöhten Verletzungsrisiko assoziiert sind (Foster et al. 2001, Gabbett 2016, Impellizzeri et al. 2019). Insgesamt stellt das Tool damit eine praxisnahe und effektive Möglichkeit für die Präventionsdiagnostik dar.

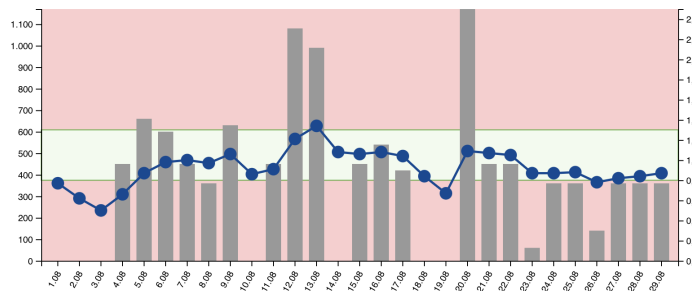


Abb. 5: Ausschnitt aus dem Prevention Management Tool der VBG mit Darstellung des Acute:Chronic Workload Ratio (ACWR).

GPS Trainings- & Spielmonitoring

Das GPS-Monitoring mit STATSports (Abb. 6) dient nicht nur der Erfassung von Distanzen, sondern ermöglicht eine differenzierte Analyse von Trainings- und Wettkampfbelastungen. Erfasst werden vor allem externe Belastungsparameter (z. B. Gesamtdistanz, High-Speed-Running, Beschleunigungen), um ein umfassendes Bild der Beanspruchung zu gewinnen (Akenhead & Nassis 2016). Individuell angepasste Schwellenwerte innerhalb des jeweiligen Mikrozyklus erhöhen die Aussagekraft der Daten und ermöglichen eine positionsspezifische Steuerung der Trainingsbelastung (Jaspers et al. 2017, Ravé et al. 2020). Zudem wird das Verhältnis akuter zu chronischer Belastung (ACWR) einzelner Laufmetriken berücksichtigt, um Überlastungsspitzen zu vermeiden und das Verletzungsrisiko nachhaltig zu reduzieren (Gabbett 2016).

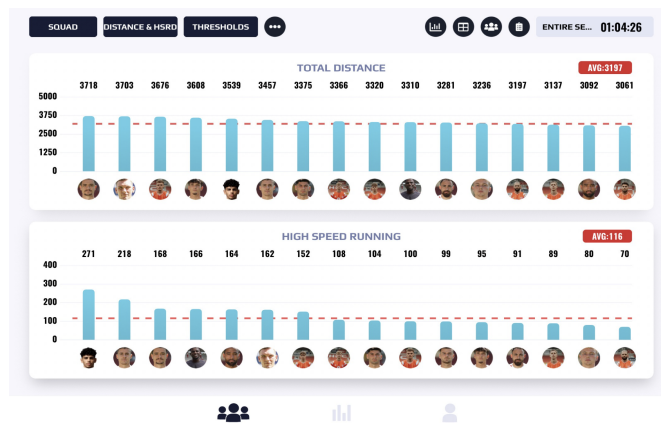


Abb. 6: Übersicht aus dem STATSports-Tracking-System mit den Parametern Total Distance und High Speed Running zur Erfassung externer Belastungen

Adduktoren-Squeeze-Test

Der Adduktoren-Squeeze-Test (Abb. 7), der u.a. mit einer einfachen Blutdruckmanschette durchführbar ist, stellt ein etabliertes Verfahren zur Beurteilung der isometrischen Adduktorenkraft dar. Diese Muskelgruppe ist im Fußball insbesondere für bewegungsspezifische Aufgaben (z. B. Passen, Schießen, schnelle Richtungswechsel) von zentraler Bedeutung (Charnock et al. 2009, Rouissi et al. 2016, Asimakidis et al. 2024).

Leistenverletzungen zählen mit einem Anteil von 12–16% zu den häufigsten Verletzungen im Profifußball und besitzen damit erhebliche Relevanz für die sportmedizinische Prävention (Werner et al. 2009, Asimakidis et al. 2024). Studien belegen, dass eine reduzierte isometrische Adduktorenkraft einen signifikanten Risikofaktor für die Entstehung von Leistenverletzungen darstellt. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass ein Abfall der Testwerte im Verlauf eine bevorstehende Verletzung indizieren kann (Crow et al. 2010, Delahunt et al. 2017, Moreno-Pérez et al. 2019). Damit bietet der Adduktoren-Squeeze-Test eine valide Möglichkeit, Risikoprofile frühzeitig zu identifizieren und gezielte präventive Trainingsinterventionen einzuleiten.



Abb. 7: Durchführung des Adduktoren-Screenings im Rahmen der verletzungspräventiven Diagnostik.

Präventivtraining

Präventivtraining, sei es vor oder nach dem Training als aktivierende Maßnahme, im Rahmen des allgemeinen Krafttrainings oder zum gezielten Ausgleich muskulärer Defizite und Dysbalancen, stellt einen zentralen Bestandteil im Fußball dar, um das Risiko von Verletzungen zu reduzieren und gleichzeitig die Belastbarkeit der Spieler zu erhöhen. Durch spezifische Übungen (Abb. 8) und eine systematische Integration in den Mikrozyklus, die auf Stabilität, Kraft, Beweglichkeit und neuromuskuläre Kontrolle abzielen, wird die Robustheit der Athleten gesteigert und Verletzungen können wirksam vorgebeugt werden. Zahlreiche Studien, insbesondere zum FIFA-11+-Programm, belegen, dass solche Präventionsprogramme die Verletzungsinzidenz im Fußball signifikant senken können (Bizzini & Dvorak 2015).



HAMSTRING AKTIVIERUNG

Übung 1 Long Lever Hamstring Iso Hold Reps: 20-30s Sets: 1-2



Link zum Video

Übung 2 SL Hip Thrust Reps: 12-20 Sets: 1-2



Link zum Video

Übung 3 SL RDL w/ Med Ball Reach Reps: 8-10 Sets: 2



Link zum Video

Übung 4 Lunge Matrix Reps: 3-4 p.S. Sets: 1-2



Link zum Video

Abb. 8: Beispielübungen zur Aktivierung der ischiokruralen Muskulatur.

2 VKBR unter besonderer Berücksichtigung von Frauen und Mädchen

Der stetig gestiegene Anteil von Athletinnen bei Olympischen Spielen spiegelt die Professionalisierung der Frau im Sport wider. Demgegenüber beruht der Großteil der Erkenntnisse für wissenschaftlich fundierte Entscheidungen innerhalb der Leistungsentwicklung und der Trainingsprozesse auf experimentellen Ergebnissen an männlichen Probanden. Die Unterrepräsentation des weiblichen Geschlechts in wissenschaftlichen Untersuchungen mit Bezug zum Leistungssport ist vielfach belegt (Cowley et al. 2021, Zimmer & Bischoff 2023).

Diese mangelnde Berücksichtigung des weiblichen Geschlechts steht im Widerspruch zur deutlich erhöhten Verletzungsprävalenz. Beispielsweise ist das Risiko eine VKBR zu erleiden für Frauen im Fußball 5-8 mal höher als für Männer (Huston et al. 2000, Hewett et al. 2005, Zech et al. 2022). Der DFB registrierte in der Saison 2023/24 insgesamt 26 Kreuzbandrisse in der 1. und 2. Frauen-Bundesliga. Derzeit fehlen in der Frauenfußballbundesliga bei den 14 Teams insgesamt 16 Spielerinnen wegen einer Kreuzbandverletzung. Aktuelle prominente Beispiele sind Lena Oberdorf (FC Bayern München), die zweimal innerhalb von 15 Monaten einen Kreuzbandriss erlitt und Giovanna Hoffmann (RB Leipzig).

Folgende biomechanisch-anatomisch-hormonelle Gegebenheiten begünstigen das deutlich erhöhte Verletzungsrisiko seitens der Frauen für eine kontaktlose VKB-Verletzung:

- Kreuzband ist bei Frauen zumeist dünner als bei Männern,
- Vermehrte Neigung zur X-Beinstellung (Genu Valgus), die insbesondere nach der Landung bei Sprüngen zu beobachten ist (Nguyen et al. 2009),
- engere knöcherne Führung des Kreuzbandes (interkondyläre Notch, Keays et al. 2016),
- weniger Muskel-, mehr Fettmasse (Fett: Männer/Frauen 15/25 %, Muskel: 45/35 %; Bredella 2017),
- zusätzliche Schwächung des Kreuzbandes durch hormonelle Einflüsse (Menstruation),
- schwächeres Bindegewebe.

Nia Künzer, Sportdirektorin des Deutschen Fußball-Bundes und ehemalige Weltmeisterin, die in ihrer Karriere selbst gleich viermal einen Kreuzbandriss erlitt, verweist in diesem Zusammenhang auf enorme Verbesserungen seitens der medizinisch-therapeutischen Betreuung: „Wir haben im medizinischen, im athletischen, im Physio-Bereich natürlich wahnsinnige Fortschritte gemacht“.

Dieses Paradoxon, signifikant verbesserte medizinische, sportwissenschaftliche, physiotherapeutische Betreuung vs. nach wie vor (sehr)hohe Verletzungsraten, hat uns dazu bewogen, die Return-to-Competition Testung sowie die Rehabilitation nach VKBR zu überdenken und grundlegend zu verändern. Im Kern geht es darum, stärker den Fokus auf die Prozess-, denn auf die Produktebene zu legen (Abb. 9).

Zu diesem Zweck soll elektromyographisch (Kapitel 3) die Interaktion Nerv-Muskel aufgeklärt werden, um so näher an die eigentlichen Ursachen heran zu kommen (<https://www.ardmediathek.de/video/mdr-aktuell-live/frauenfussball-angst-vor-kreuzbandriss/mdr/Y3JpZDovL21kci5kZS9zZW5kdW5nLzI4MjA0MS81NDEzNzAtNTIxMDMw>)

Die alleinige Messung und Bewertung von Outcomeparametern (z. B. Muskelkraftwerte, Sprunghöhen und –weiten) sowie der Festigkeit des Implantats ist offensichtlich nicht ausreichend, um das Re-Rupturrisiko für Nicht-Kontaktverletzungen signifikant zu verringern.

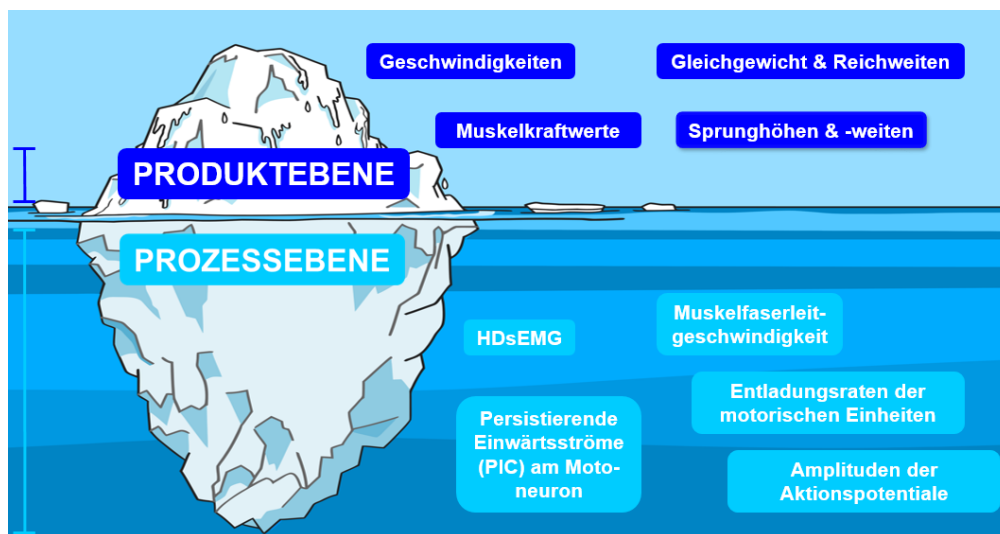


Abb. 9: Eisbergmodell bezüglich der unterschiedlichen Ebenen (Produkt- vs. Prozessebene) innerhalb der Return-To-Competition Testung

Im Ergebnis dieser im Folgenden vorzustellenden subtileren, prozessorientierten Diagnostik beträgt die Durchfallquote bei der RTC-Testung in der MVZ Sportklinik GmbH ca. 40%.

Abschließend sei an dieser Stelle bemerkt, dass Frauen auch hinsichtlich der Rückkehr in den Wettkampfbetrieb („Time to return to play“) gegenüber Männern im Nachteil sind. Diese beträgt Mazza et al. (2025) zufolge 300 (Frauen) bzw. 248 Tage (Männer), woraus die Autoren (auch) einen erhöhten Forschungsbedarf für die Rehabilitation bei Frauen nach VKR ableiteten. Überdies ergab diese Untersuchung, die 169 FußballspielerInnen (Männer: n=101; Frauen: n=68) aus den europäischen Top-Ligen (Deutschland, Italien, Spanien, England, Frankreich) einschloss, dass die Dropout Rate („did not return to play“) bei Frauen geringer ist als bei Männern (9 vs. 21%).

Unsere klinische Erfahrung aus den letzten 10 Jahren zeigt, übereinstimmend mit Mazza et al. (2025), dass den neuromuskulären Faktoren (Abb. 9) im Rahmen der Prävention und Rehabilitation von kontaktlosen Verletzungen am Kniegelenk, insbesondere bei Mädchen und Frauen, zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt wurde und immer noch wird.

3 Einsatz des HDsEMG im Rahmen der RTC-Testung nach VKBR – weltweit erster Messplatz, der das HDsEMG in die RTC-Test-batterie inkludiert

Der Messplatz (Abb. 10) enthält in seinem Kern das High Density-sEMG (HDsEMG) und wurde originär für das vordere Kreuzband (VKB) konzipiert. Dies vor dem Hintergrund von über 600 Kreuzbandrekonstruktionen, die jährlich in der Sportklinik (Dr. Bartels) durchgeführt werden. Hierbei ist anzumerken, dass die Nutzung des Messplatzes eine umfassende Einarbeitung erfordert, weshalb die Beschäftigung von zwei Spezialisten (Sportwissenschaftler) unabdingbar ist.

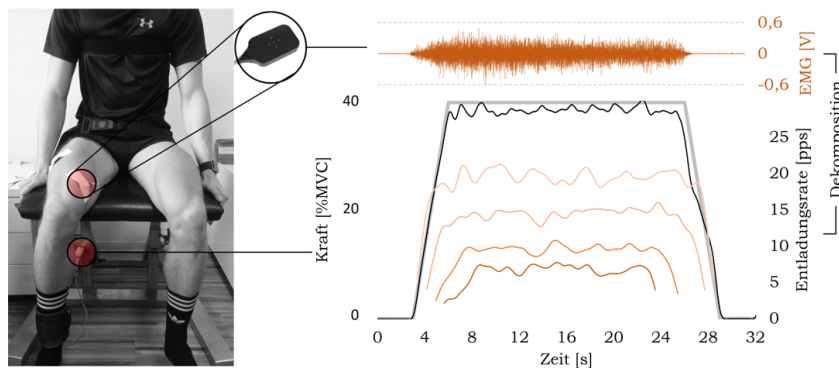
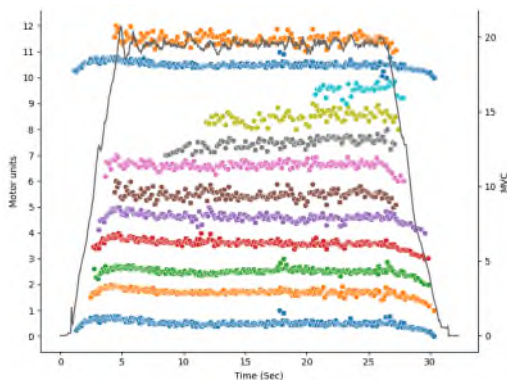


Abb. 10: Komplexer neurophysiologisch-interdisziplinärer Messplatz unter besonderer Berücksichtigung des HDsEMG

Unser Hauptaugenmerk gilt dabei der Dekomposition des HDsEMG. Diese ermöglicht es uns, periphere und zentrale Eigenschaften der einzelnen motorischen Einheiten (MUs) zu analysieren und motorische Einheiten zu tracken (Abb. 11a-b). Muskelfaserleitgeschwindigkeiten, Aktionspotentiale sowie die Entladungsraten der einzelnen MUs können somit nicht-invasiv bestimmt werden. Durch eine Kooperation mit der Universität in Brescia (Dr. Giacomo Valli) sind wir darüber hinaus in der Lage, die neuronale Plastizität anhand von PIC's (persistent inward currents - persistierende ionische Einwärtsströme) zu schätzen.

a)



b)

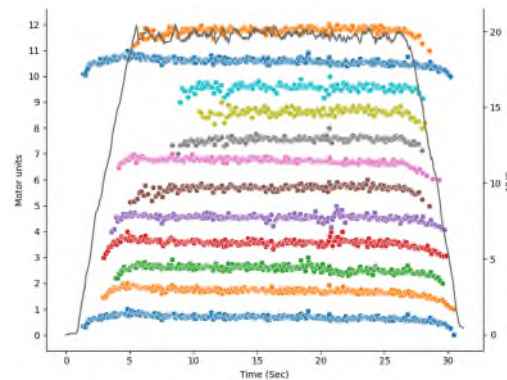


Abb. 11a-b: 12 getrackte motorische Einheiten vor (a) und nach (b) Blood Flow Restriction (BFR)

Unsere BFR-Analytik mittels HDsEMG ist in Deutschland bislang einzigartig. Sie ermöglicht neben der Erfassung peripherer Messparameter (Aktionspotentiale, Muskelfaserleitgeschwindigkeit) auch die Schätzung von zentralen Parametern (PIC's, Entladungsraten der Motoneuronen) sowie das Tracken von einzelnen motorischen Einheiten im Rahmen von Längsschnittuntersuchungen.

Erstmalig gelang es zudem, HDsEMG Daten in RTC Testbatterien längsschnittlich zu erfassen. Hierbei zeigten sich unterschiedliche neuromuskuläre Adaptationen bei professionellen Mannschaftssportlern nach VKB-Rekonstruktion. Beispielsweise wurden 30 Berufssportler, die den RTC Test nach VBG Standard bestanden ($>75\%$ LSI) entsprechend ihres Leistungsvermögens in Terzilgruppen eingeteilt (G1, G2, G3) und miteinander verglichen (Abb. 12a-b). Die Muskelaktivität des M. vastus medialis und lateralis wurde 264 Tage (Median) nach VKBR erfasst und die Signale in Aktionspotenziale (AP) der einzelnen motorischen Einheiten zerlegt.

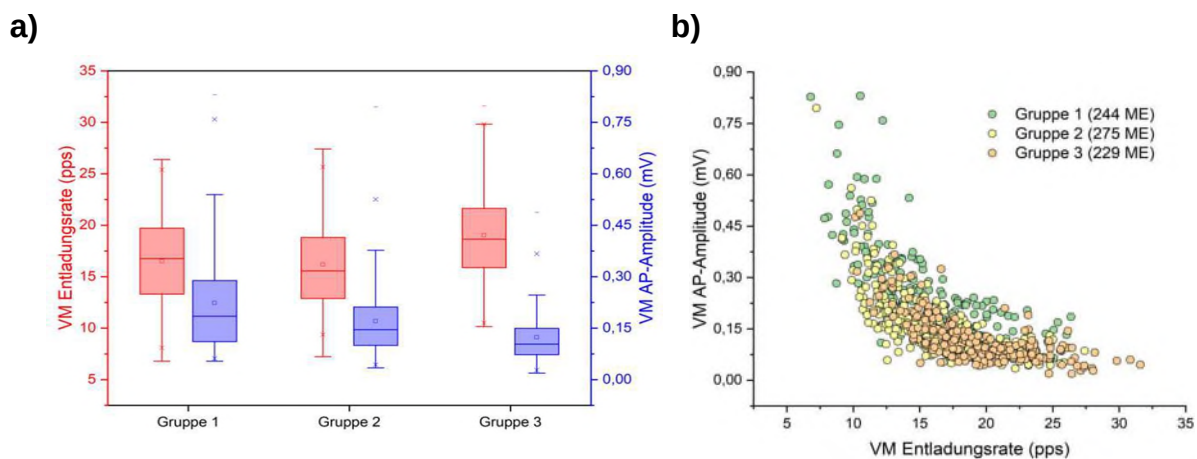


Abb. 12a-b: Entladungsraten des M. vastus medialis (VM) im längsschnittlichen Gruppenvergleich

Die maximalen Kniestreckmomente der Terzilgruppen unterschieden sich signifikant (G1: $5,01 \pm 0,60$ Nm/kg; G2: $4,18 \pm 0,60$; G3: $3,60 \pm 0,61$; $p < 0,001$) voneinander. Die mittleren Entladungsraten der ME von G1 und G2 waren geringer als von G3 ($p < 0,05$). Die mittleren AP-Amplituden von G1 waren höher als von G3 ($p = 0,003$; Bartels et al. 2025a).

Diese Erkenntnisse an VBG versicherten Leistungssportlern im Rahmen der RTC Testung nach VBG Standard Knie zeigen erstmalig, dass neuromuskuläre Adaptationen infolge der Strukturzerstörung des VKB leistungsabhängig auf unterschiedlichen Ebenen des sensomotorischen Systems stattfinden. Sportler mit funktionellen Defiziten kompensieren mit erhöhten Entladungsraten (zentraler Marker) der ME, während leistungsfähigere Athleten höhere AP-Amplituden (peripherer Marker) der ME aufweisen.

4 Untersuchungen zur Muskelfaserleitgeschwindigkeit im Leistungssport (Basisdaten HFC) zur Inkludierung in RTC-Testbatterien und zum Monitoring des Trainings- und Leistungszustandes

Für unsere Untersuchungen verwenden wir Basisdaten des HFC aus der Bundesligasaison, da wir davon ausgehen, dass ein Rechts-Links-Vergleich im Rahmen der RTC Testungen nicht ausreichend ist, um die HDsEMG Daten ausreichend zu interpretieren. Die hohe Rate an Re-Rupturen unterstreicht die Limitation der standardisierten RTC-Testbatterien (Paterno et al. 2014, Blasimann et al. 2021, Webster & Hewett 2022, Manojlovic et al. 2024). Das Risiko einer zweiten VKB-Läsion konnte nach Bestehen der RTC-Richtlinien nicht signifikant gesenkt werden (Losciale et al. 2019, Rodriguez-Merchan et al. 2022). In einer Kohorte von 27 UEFA-Elitefußballspielern lag die Return-to-Play-Rate nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion bei 93%, während 7% innerhalb von sechs Monaten eine Re-Ruptur erlitten. Die durchschnittliche Spielbeteiligung sank im ersten Jahr signifikant auf 29% (vs. 57% prä OP), erreichte jedoch ab dem zweiten Jahr erneut das Vorverletzungsniveau (Farinelli et al. 2023).

Das prospektive „ACL-Register im deutschen Fußball“, das in der Saison 2014/15 eingeführt wurde, zeigt, dass im Amateurfußball die Gefahr einer erneuten Verletzung nach VKBR mit Abstand am höchsten ist (Szymiski et al. 2022, 2023). Demnach besteht eine diagnostische Lücke bei den RTC-Testungen im Bereich der neuromuskulären Kontrolle (Gokeler et al. 2022). Während klassische RTC-Testungen biomechanische Parameter abbilden, fehlt bislang eine objektive Analyse der zentralnervösen Steuerung und motorischen Einheitenaktivierung.

Alpha-Motoneurone erhalten ihre Aktivierung über ein komplexes neuronales Netzwerk, das zentral vom Gehirn (insbesondere dem motorischen Kortex, dem Hirnstamm und subkortikalen Strukturen) gesteuert wird (Guo et al. 2024). Sie integrieren dabei sowohl exzitatorische als auch inhibitorische Efferenzen aus supraspinalen und spinalen Zentren sowie afferente Rückmeldungen aus der Peripherie, insbesondere von Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorganen (Mesquita et al. 2024). Durch diese Integration steuern sie die extrafusalen Skelettmuskelfasern, wodurch gezielte und koordinierte Muskelkontraktionen ermöglicht werden (Laube et al. 2025).

Studien belegen, dass auch nach klinisch unauffälliger Rehabilitation persistierende Defizite in der neuromuskulären Kontrolle (veränderte Rekrutierung motorischer Einheiten, verzögerte Aktivierungsmuster oder asymmetrisches Entladungsverhalten der MU) bestehen bleiben (Lepley et al. 2020, Blasimann et al. 2021, Nuccio et al. 2020, 2021, Bartels et al. 2022, Gokeler et al. 2022, Kurz et al. 2023, Bartels et al. 2023, Forelli et al. 2025). Diese Defizite stellen verborgene neurobiologische Faktoren dar und können zu funktionellen Kompensationen und Re-Rupturen führen (Burland et al. 2020, Lepley et al. 2020, 2021).

Zusammenfassend wird an dieser Stelle deutlich, dass sich die Return-To-Competition Testung bislang vornehmlich auf der Produktebene respektive des motorischen Outputs bewegt. Vermutlich zielführender für eine valide Beurteilung ist die Berücksichtigung der Prozessebene in Form der Nerv-Muskel-Interaktion, wie sie u.a. durch das HDsEMG aufgeklärt werden kann (Abb. 9).

Die High-Density Oberflächenelektromyographie (HDsEMG) bietet als innovatives Verfahren die Möglichkeit, motorische Einheiten während funktioneller Aufgaben nicht-invasiv zu analysieren (Abb. 9). Rekrutierungsmuster, Entladungsraten, Aktionspotentiale und die Muskelfaserleitgeschwindigkeit können mittels der HDsEMG Technologie geschätzt werden (Farina et al. 2001).

In den folgenden Analysen wird die mittels HDsEMG bestimmte Muskelfaserleitgeschwindigkeit des VM und VL in bestehende RTC-Testbatterien (Bloch et al. 2018) und in den Hochleistungssport integriert. Die MFCV ist ein grundlegender physiologischer Parameter, der biophysikalisch mit dem Durchmesser der Muskelfasern assoziiert ist und ein indirekter Biomarker für die fortschreitende Rekrutierung motorischer Einheiten darstellt (Del Vecchio et al. 2017, Casolo et al. 2020). Eine unvollständige Wiederherstellung der MFCV nach einer VKB-Rekonstruktion stellt einen validen Marker für eine unzureichende Rehabilitation dar (Nuccio et al. 2020, 2021). Sie reflektiert anhaltende Defizite in der Rekrutierung schnellzuckender motorischer Einheiten, die für sportliche Leistung und funktionelle Stabilität entscheidend sind. Ziel ist es, eine sensitivere Identifikation neuromuskulärer Defizite nach VKBR im Leistungssport mittels HDsEMG möglich zu machen.

In einer eigenen Querschnittsstudie wurden 27 männliche Leistungssportler nach VKBR (Semitendinosustransplantation; Tegner Score: 8,8) und 27 unverletzte Hochleistungssportler als Kontrollgruppe (HFC Profimannschaft) aufgenommen (Tegner Score: 9,0). Beide Gruppen beinhalten ausschließlich Fußballspieler aus dem Leistungssport. Die Patienten wurden bei ihrer Rückkehr zum Sport untersucht, während die unverletzten Kontrollpersonen (HFC) zu Beginn der Saisonvorbereitung untersucht wurden. Die Muskelfaserleitgeschwindigkeit (MFCV) des M. vastus medialis (VM) und des M. vastus lateralis (VL) wurde im monophasischen Modus (OT Bioelettronica) mithilfe einer linearen Elektrodenanordnung gleichzeitig mit der isometrischen Kraft aufgezeichnet. Die Messungen wurden bilateral (verletzt, unverletzt) bei den Patienten und an beiden Seiten der gesunden Kontrollgruppe durchgeführt. Das maximale willkürliche Drehmoment (MVT) der Kniestrecker wurde auf die Körpermasse der Sportler normalisiert.

Die bei vier submaximalen Intensitäten (20%, 40%, 60%, 80% MVT) geschätzten MFCV-Werte wurden verwendet, um den Achsenabschnitt (IC, Anfangswert) und die Steigung (SL, Änderungsrate) der individuellen Regressionslinie zu berechnen.

Der Slope (SL; Abb. 13) ist ein Indikator für die fortschreitende Rekrutierung der motorischen Einheiten. Indem die MU's nach ihrer willkürlichen Rekrutierungsschwelle in niedrig- und hochschwellige MU's (LTMUs: $\leq 30\%$ MVC; HTMUs: $> 30\%$) eingeteilt werden, kann man den relativen Beitrag schätzen. Der Intercept ist ein Indikator für die Eigenschaften der motorischen Einheiten mit niedrigster Rekrutierungsschwelle und beschreibt somit die langsamen Muskelfasern.

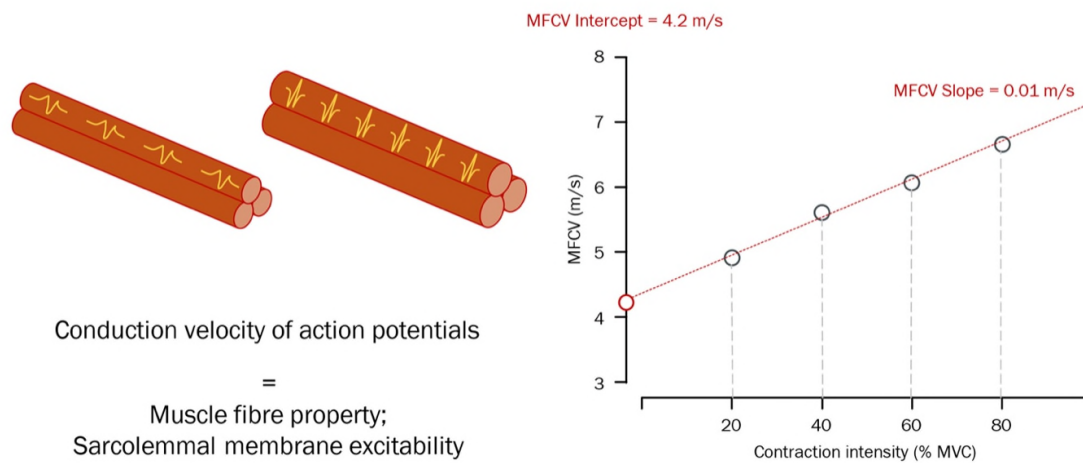


Abb. 13: Interpretation der Muskelfaserleitgeschwindigkeitsanalyse. Die Muskelfaserleitgeschwindigkeit (MFCV) wird durch die Eigenschaften der Muskelmembran (Sarkolemm) und die Faserdicke bestimmt. Die Darstellung zeigt beispielhaft eine lineare Regressionsanalyse mit Intercept (z. B. 4,2 m/s) als Maß für die initiale MFCV sowie der Steigung (z. B. 0,01 m/s) als Ausdruck für die intensitätsabhängige Rekrutierung zusätzlicher motorischer Einheiten.

Der durchschnittliche Tegner Score der RTC getesteten Patienten/Athleten (Alter: 25 ± 5 Jahre, BMI: $24,5 \pm 1,9$ kg/m²) betrug 8,8 (Tegner & Lysholm 1985). Die HFC-Kontrollgruppe hatte einen Tegner Score von 9,0. Die MVT-Werte auf der verletzten Seite waren moderat niedriger ($4,18 \pm 0,81$ Nm/kg) als die auf der unverletzten Seite ($4,56 \pm 0,79$ Nm/kg, $d = 0,48$), aber vergleichbar mit denen der HFC-Kontrollgruppe ($4,07 \pm 0,53$ Nm/kg, $d = 0,16$).

Alle untersuchten MFCV-Werte (VM: 3,8–7,7 m/s, VL: 3,1–7,5 m/s) lagen innerhalb des erwarteten physiologischen Bereichs. Die IC-Werte beider Muskeln waren bei den VKBR-Patienten moderat niedriger (VM: $4,6 \pm 0,6$ m/s, VL: $4,2 \pm 0,7$ m/s). Nur die SL-Werte der VM zeigten bei den Patienten bedeutsame ($d = 0,51$) höhere Werte (Abb. 14). Die MFCV-Werte der Kontrollgruppe zeigen für den VM und den VL keine Differenzen zwischen rechten und linken sowie zwischen dominantem und nicht dominantem Bein.

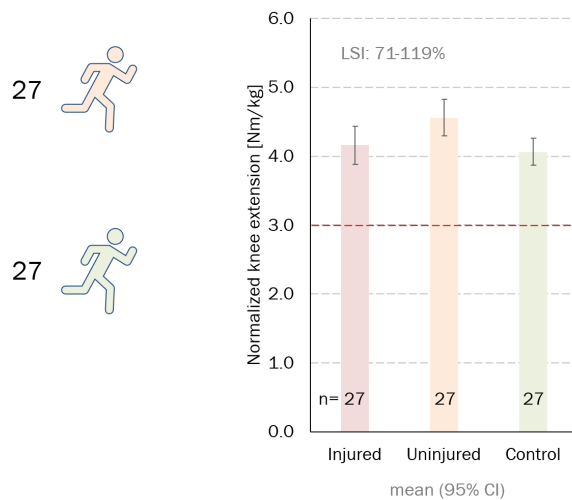


Abb. 14: Normierte Kniestreckermomente (Nm/kg) bei VKBR-Athleten (verletztes und unverletztes Bein) sowie in der Kontrollgruppe. Alle Gruppen zeigten durchschnittliche Werte oberhalb der klinisch relevanten Schwelle von 4 Nm/kg. Die Daten wurden zum Zeitpunkt der sportlichen Rückkehr (RTC) erhoben. Vier Athleten erhielten zusätzlich eine laterale extraartikuläre Tenodese (LET).

Die normierten MVT-Werte auf der verletzten Seite waren moderat niedriger ($4,18 \pm 0,81$ Nm/kg) als die auf der unverletzten Seite ($4,56 \pm 0,79$ Nm/kg, $d = 0,48$), aber vergleichbar mit denen der Kontrollgruppe ($4,07 \pm 0,53$ Nm/kg, $d = 0,16$; Abb. 14). Unsere MFCV Ergebnisse zeigten moderate Defizite der motorischen Einheiten mit niedrigerer Schwelle in der VKBR, die wahrscheinlich durch eine höhere VM-Änderungsrate bei zunehmender Intensität kompensiert werden. Der signifikant höhere SL-Wert in der verletzten VKBR-Gruppe (*) deutet auf eine verstärkte Nutzung höherer motorischer Einheiten zur Kompensation potenzieller Defizite in niedrigschwelligen Einheiten hin und beschränkt sich isoliert auf den VM. Es zeigten sich im ambitionierten Amateursport strukturelle Schwächen nach VKBR in der späten Rehabilitationsphase (Buckthorpe 2019, Buckthorpe & Della Villa 2020, Meredith et al. 2020, Nuccio et al. 2020 und 2021, Tortoli et al. 2024). Professionelle Sportler intensivieren in der spätrehabilitativen Phase nach VKBR das Krafttraining enorm, welches die erhöhte Muskelfaserleitgeschwindigkeit der hochschwelligen motorischen Einheiten unabhängig von einer selektiv kompensatorischen Optimierung erklären kann (Casolo et al. 2020).

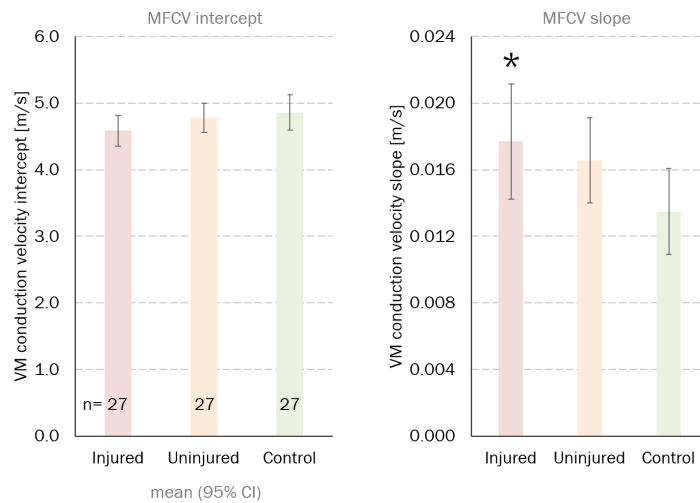


Abb. 15: Muskelfaserleitgeschwindigkeit (MFCV) im M. vastus medialis (VM) der drei Gruppen. Links: Intercept-Wert (IC) als Maß für die Leistungsfähigkeit motorischer Einheiten mit niedriger Schwelle. Rechts: Steigungswert (SL) als Indikator für die fortschreitende Rekrutierung motorischer Einheiten. Der signifikant höhere SL-Wert in der verletzten VKBR-Gruppe (*) deutet auf eine verstärkte Nutzung höherer motorischer Einheiten zur Kompensation potenzieller Defizite in niedrigschwelligen Einheiten hin.

Für die 4 Sportler, die zusätzlich eine extraartikuläre Stabilisierung nach Lemaire bekamen zeigt sich ein deutliches Defizit in der Rekrutierung hochschwelliger MUs (Abb. 16). Wir führen deshalb als LET die Ellison OP durch, da diese Defizite beim Ellison nicht vorkommen.

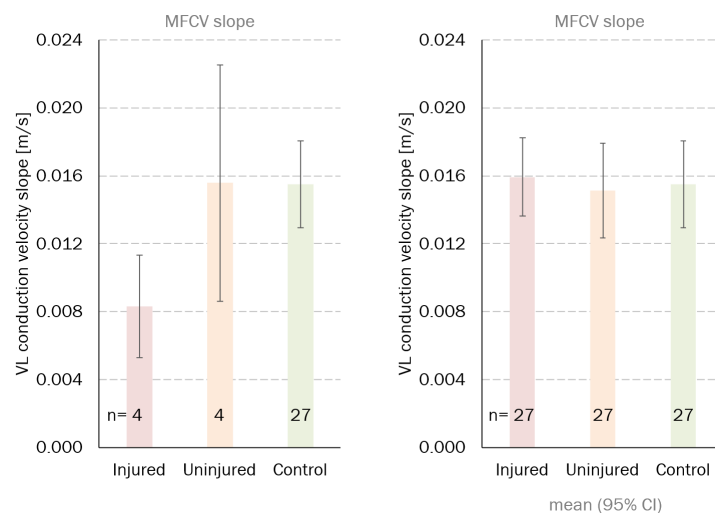


Abb. 16: Muskelfaserleitgeschwindigkeit für den M. vastus medialis (VM) für die 4 Sportler, die zusätzlich eine extraartikuläre Stabilisierung nach Lemaire bekamen im Kontrollgruppenvergleich.

Die IC-Werte spiegeln Eigenschaften der motorischen Einheiten mit niedrigerer Schwelle wider, während die SL-Werte ein Indikator für eine fortschreitende Rekrutierung motorischer Einheiten sind (Casolo et al. 2020). Die Ergebnisse zeigen moderate Defizite der motorischen Einheiten mit niedrigerer Schwelle in der VKBR, die wahrscheinlich durch eine höhere VM-Änderungsrate bei zunehmender Intensität kompensiert werden.

Ein auffälliges Ergebnis dieser Studie waren die höheren Kniestreckerdrehmomente, die bei den VKBR-Athleten gemessen wurden. Umfangreiche kniemuskelspezifische Rehabilitationsübungen könnten dieses Ergebnis erklären. Allerdings stimmen insbesondere die vom Kniestreckerapparat erzeugten Kräfte nicht mit den in der Literatur berichteten Ergebnissen bei VKBR-Patienten überein (Otzel et al. 2015, Nuccio et al. 2021, Pietrosimone et al. 2022). Bei unseren Untersuchungen wurden ausschließlich professionelle Mannschaftssportler berücksichtigt. Die vergleichbaren Ergebnisse aus der Literatur wurden an Kohorten des gehobenen Freizeitsports (Tegner-Score: 7,2-7,7) erhoben. Somit unterstützen diese Ergebnisse den Erfolg von Rehabilitationsprogrammen insbesondere für die Krafterzeugungskapazität speziell bei Hochleistungssportlern.

Nachdem die invasive Bestimmung der MFCV bei Patienten eine zuverlässige Methode darstellt, um die Muskelfunktion nach Denervierung, Immobilisierung sowie im Verlauf der Reinnervation zu charakterisieren (Cruz-Martinez & Arpa 1999), scheint die AMCV (mittlere Muskelfaserleitgeschwindigkeit) bei Leistungssportlern auch geeignet zu sein, um den aktuellen Trainings- und Leistungszustand während Trainings- und Wettkampfperioden zu monitoren. Eine weitergehende Analyse der AMCV-Änderungen der vier Stürmer des HFC über die Hinrunde der Saison zeigt Konditionierungs- sowie Dekonditionierungseffekte (Abb. 17).

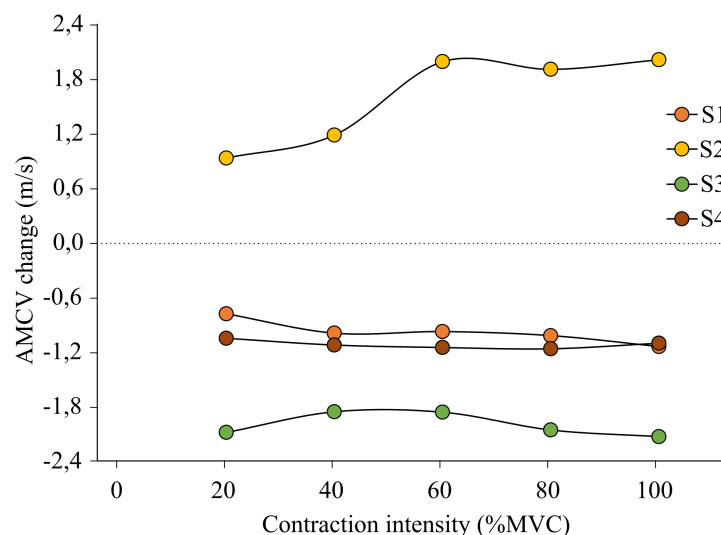


Abb. 17: Einfluss des Trainings und der Einsatzzeiten verschiedener Stürmer (n=4) während der Hinrunde (17 Spieltage) auf die Änderung der mittleren Muskelfaserleitgeschwindigkeit (AMCV) des M. vastus lateralis. Spieler 2 war regelmäßiger Stammspieler, die drei anderen hatten deutlich reduzierte Trainingszeiten und kaum Wettkampfzeiten.

Zum Zeitpunkt des Ende der Arbeitsunfähigkeit (6-12 Monate nach der Operation) wurden 20 männliche Profisportler (Alter: 18-35 Jahre) nach einer Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes hinsichtlich der AMCV untersucht (Kurz et al. 2024). Die Athleten absolvierten die Testbatterie der VBG und wurden daraufhin anhand der Ergebnisse in eine erfolgreichere (higher performers) und weniger erfolgreiche (lower performers) Subgruppe unterteilt (Kurz et al. 2022b). Die Subgruppe, die ein schlechteres Gesamtergebnis der Testbatterie erreicht hat, wies über alle untersuchten Kontraktionsintensitäten hinweg höhere AMCV-Werte des M. vastus medialis verglichen mit dem M. vastus lateralis auf (Kurz et al. 2025; Abb. 18).

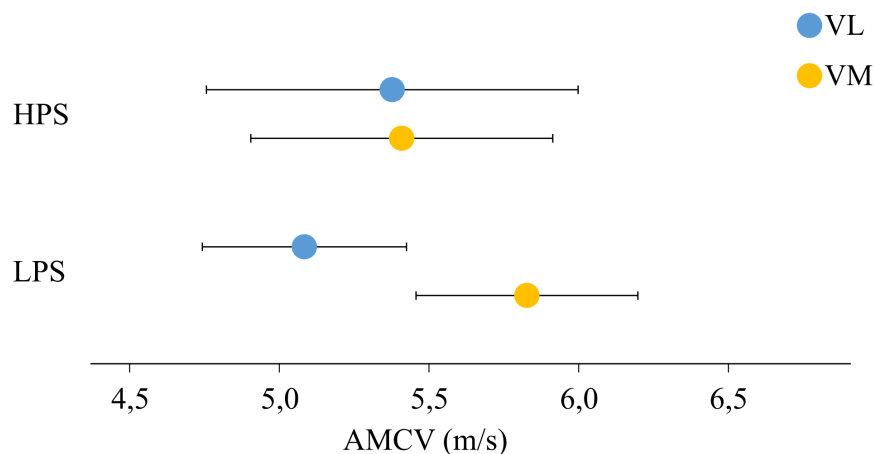


Abb. 18: Ergebnisse der mittleren Muskelfaserleitgeschwindigkeit (AMCV) des M. vastus medialis (VM) und lateralis (VL) während einer willkürlichen isometrischen Kontraktion (40% MVC) bei Leistungssportlern nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes am Ende der Arbeitsunfähigkeit. Erfolgreichere (higher performers, HPS, n=10) und weniger erfolgreiche (lower performers, LPS, n=10) Athleten wurden unterschieden. Dargestellt sind Mittelwerte und 95% Konfidenzintervalle.

Athleten, mit einer eingeschränkten Leistungsfähigkeit nach einer Verletzung und Rekonstruktion des vorderen Kreuzbands kompensierten dies mit höheren AMCV-Werten des M. vastus medialis, während Athleten mit einer höheren Leistungsfähigkeit nahezu ausgeglichene AMCV-Werte beider knieführender Muskeln zeigten. Die AMCV-Ratio der Vasti Muskeln scheint einen vielversprechenden Indikator für die neuromuskuläre Funktion darzustellen. Die Kontrollgruppe des HFC (Tegner Score: 9,0; n=27) zeigt nahezu identische AMCV zwischen dominanten und nicht dominanten Bein (Abb. 19). Die AMCV weist einen direkten Zusammenhang mit der Kontraktionsintensität auf. Mit zunehmender Kontraktionsintensität werden größere und höher-schwellige motorische Einheiten rekrutiert. Diese weisen auch eine höhere Muskelfaserleitgeschwindigkeit auf (Arendt-Nielsen et al. 1984, Broman et al. 1985, Masuda et al. 1996).

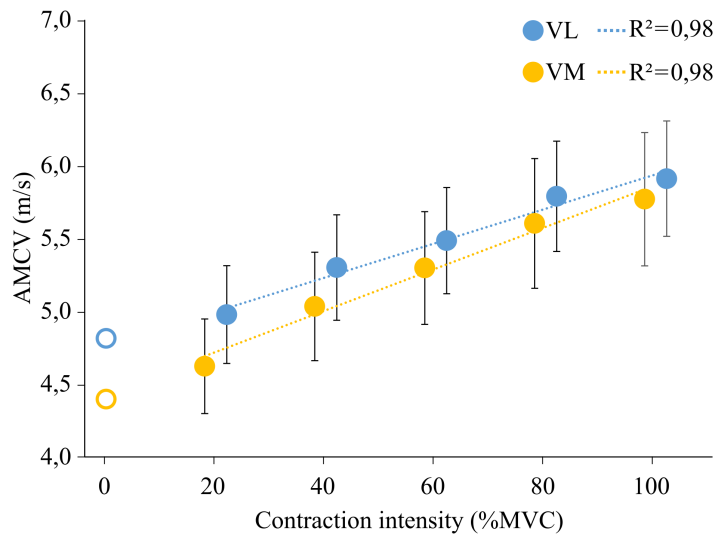


Abb. 19: Pre-Season Resultate der mittleren Muskelfaserleitgeschwindigkeit (AMCV) des M. vastus medialis (VM) und lateralis (VL) während willkürlicher isometrischer Kontraktionen von Profifußballern (HFC) (n=12). Dargestellt sind Mittelwerte, 95% Konfidenzintervalle und der Schnittpunkt (Intercept) mit der y-Achse.

Die Resultate des M. vastus lateralis (Abb. 18) stehen im Einklang mit denen von Arendt-Nielsen und Kollegen (Arendt-Nielsen et al. 1984; 20% MVC: 4,9 m/s; 40% MVC: 5,3 m/s; 60% MVC: 5,6 m/s; 80% MVC: 5,7 m/s; 100% MVC: 5,9 m/s) und belegen die Vergleichbarkeit des muskulären Status der untersuchten Probanden. Mit der Kombination der oberflächlichen Erfassung der mittleren AP-Fortleitung auf den Muskelfasern und der Dekomposition der mit einer quadripolaren Nadelelektrode erfassten Signale der motorischen Einheiten konnten Masuda und De Luca (1991) am M. tibialis anterior den Einfluss des Größenordnungsprinzips der Rekrutierung der motorischen Einheiten auf die Muskelfaserleitgeschwindigkeit belegen. Entsprechend kann die MFCV als ein indirekter Marker für die Rekrutierung motorischen Einheiten angesehen werden (Andreassen & Arendt-Nielsen 1987, Casolo et al. 2020) und spiegelt damit auch zentrale Eigenschaften des neuromuskulären Systems wider.

5 Eine vergleichende Analyse der Explosiv- und Maximalkraft des Quadriceps bei Leistungssportlern nach Ruptur des vorderen Kreuzbands

Insbesondere für schnelle sportliche Aktionen scheinen Kennwerte der Explosivkraft eine höhere Relevanz als die Maximalkraft aufzuweisen. Für den erfolgreichen Abschluss der Rehabilitation nach Verletzungen des vorderen Kreuzbandes (VKB) ist eine maximale Kniestreckkraft von mindestens 3 Nm/kg Körpergewicht (KG) etabliert. Aufgrund der inakzeptabel hohen Reverletzungsraten nach Primärverletzungen des VKB bei Sportlern, sollten modifizierbare Faktoren gezielt analysiert werden.

Ziel dieser Studie war es, Athleten zum Zeitpunkt der Return to Competition (RTC) Testung anhand von Kennwerten verschiedener Kraftqualitäten der verletzten Extremität zu vergleichen.

In die Querschnittsstudie wurden 26 männliche Profisportler nach bestandenem ($n=17$, Alter: 18-34 Jahre) oder nicht bestandenem ($n=9$, Alter: 20-35 Jahre) RTC-Test nach VKB-Rekonstruktion (Semisehnentransplantat) eingeschlossen. Die Athleten wurden 7-9 Monate nach der VKB-Rekonstruktion untersucht. Dabei wurden isometrisch das maximale Kniestreckmoment (MVC) sowie die Kraftentwicklungsrate (RFD) zwischen 0 und 30 ms gemessen. Beide Kennwerte wurden auf das KG normiert.

Die Gruppen (Abb. 20) wiesen einen großen Unterschied hinsichtlich des KG auf ($d=0,92$). Der Unterschied bezüglich der Explosivkraft war deutlich geringer ($d=0,42$; bestanden: $21,6 \pm 13,3$ Nm/s/kg; nicht bestanden: $16,4 \pm 6,9$ Nm/s/kg). Die Maximalkraft ergab einen großen Unterschied ($d=0,99$) zwischen beiden Gruppen (bestanden: $3,64 \pm 0,82$ Nm/kg; nicht bestanden: $2,83 \pm 0,80$ Nm/kg).

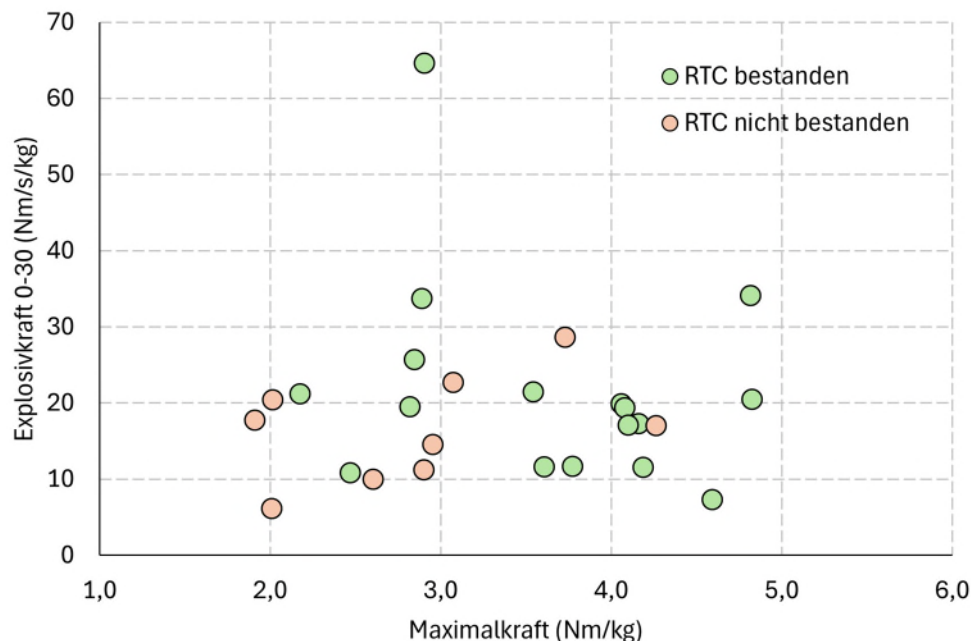


Abb. 20: Subgruppenanalyse für die individuellen Explosiv- und Maximalkraftwerte.

Die Unterschiede im Körpergewicht unterstreichen die Notwendigkeit der Normierung von Explosiv- und Maximalkraftkennwerten. Mit Hilfe der Maximalkraft gelingt es deutlich besser, beide Gruppen zu differenzieren, was die Anwendung dieses Kennwerts unterstreicht.

Die Explosivkraft hingegen ist eine deutlich variablere Kenngröße, die u.a. vom betrachteten Zeitfenster abhängig ist (Aagaard et al. 2002, Folland et al. 2014, Maffiuletti et al. 2016). Dennoch wird durch die berichteten Effektgrößen deutlich, dass die Explosivkraftwerte eine wertvolle Ergänzung für die RTC-Entscheidung darstellen und berücksichtigt werden müssen. Insbesondere für schnelle sportliche Aktionen scheinen Kennwerte der Explosivkraft eine höhere Relevanz zu besitzen als die Maximalkraftwerte.

Da viele Sportaktionen in Zeitintervallen < 200 ms ablaufen und MVC ≥ 300 ms benötigt, sind zeitfensterspezifische RFD-Metriken (z. B. 0–30 ms, 0–50 ms, 0–100 ms) für Leistungs- und Rehascreenings aussagekräftiger als die Maximalkraft allein. Früh-RFD lässt sich am ehesten durch neuronale Anpassungen (höhere Rekrutierungsrate, früherer Anstieg des EMG) verbessern. Spät-RFD profitiert stärker von Zuwächsen der Maximalkraft respektive der Muskelgröße (Aagaard et al. 2002, Folland et al. 2014, Maffiuletti et al. 2016, Dideriksen et al. 2020).

Die normierte Quadrizepskraft (Nm/kg) einer gesunden Population zeigt sowohl im Freizeitsportbereich (van Melick et al. 2022) als auch im Leistungssport, speziell im Fußball (Owoeye et al. 2024; Sliwowski et al. 2024), keine Differenzen zwischen dominantem und nicht dominantem Bein. Diese Referenzwerte sind bedeutsam, da meistens keine Vorverletzungsdaten vorliegen (Sarabon et al. 2021). Unsere gesunde HFC- Kontrollgruppe bestätigt diese Referenzdaten.

6 Fallbeispiel aus der Praxis RTC-Testung mit additiver PIC Analytik zur Schätzung der neuronalen Plastizität (zentraler Marker)

Anamnese & Testinhalte

Am 03.09.2025 nahm ein Erstligahandballbundesligaspieler (Alter: 27 Jahre) an der VBG-Testung „Return-to-Competition“ teil. Dieser erlitt bei der Landung nach einem Sprungwurf eine isolierte Kreuzbandruptur rechts (kein Ellison und Lemaire)

Die Testbatterie enthielt folgende Elemente:

- Bestimmung der posturalen Kontrolle durch den Y-Balance-Test,
- Sprunguntersuchung (Drop Jumps, Single-Leg-Hop-For-Distance, Side-Hop),
- Testreihen auf dem Speed Court (Tapping, SpeedCourt-Läufe),
- EMG-Messung zur Erfassung der neuronalen Plastizität sowie zur Erfassung der Muskelfaserleitgeschwindigkeit.

Testergebnisse

Im **Y-Balance-Test** zeigten sich keine Auffälligkeiten (Koeffizient rechts - links: 106% - 105% [Soll > 94%]). Demnach liegt kein erhöhtes Risiko für eine rezidivierende Verletzung des rechten Kniegelenkes vor.

Der **DJ** ergab im Seitenvergleich im nicht ermüdeten Zustand einen Lower-Limb-Symmetry-Index von 61%. Für eine Wiedereingliederung sollte mindestens ein Wert von 90% gegeben sein. Im ermüdeten Zustand wurde ein Wert von 84% ermittelt. Dieser liegt ebenso unter dem zu erreichenden Sollwert.

Der **Single-Leg-Hop-For-Distance** im nicht ermüdeten Zustand erbrachte rechts und links jeweils eine Weite von 174 cm. Vorermüdet lag der Wert bei 173 cm (rechts) und 172 cm (links). Der Rechts-Links-Vergleich liegt jeweils bei 100% bzw. 101%. Somit ist ein kein Seitenunterschied zu verzeichnen.

Bei dem durchgeführten **Side-Hop-Test** wurden sehr gute Werte erzielt (Koeffizient Side Hop mit einer Distanz von 30 cm: 103%; 40 cm: 102% (nicht ermüdet; Soll > 90%)). Im ermüdeten Zustand erzielte der Spieler ähnliche Ergebnisse. Auch unter Ermüdungsbedingungen erreichte der Spieler bilateral ein gutes Ergebnis.

Mithilfe des **Tapping-Koeffizienten** können mögliche koordinative Schwächen aufgedeckt und eine schnellere Ermüdung des neuromuskulären Systems erkannt werden. Der Spieler erreichte einen Koeffizienten von 13, der als durchschnittlich einzustufen ist. Somit könnte eine koordinative Schwäche oder eine schnelle Ermüdbarkeit des neuromuskulären Systems vorliegen. Die Frequenz ist ebenso als durchschnittlich zu werten.

Die **Läufe auf dem SpeedCourt** befinden sich im Vergleich zu anderen getesteten Sportlern im mittleren bis oberen Bereich. Hier merkt man, dass der Spieler eher wenig im Schnelligkeitsausdauerbereich trainiert hat. Die erbrachten Bodenkontaktzeiten wiesen im Rechts-Links-Vergleich keine Seitigkeitsunterschiede auf.

Auf die Ergebnisse des **HDsEMG** soll an dieser Stelle dezidiert eingegangen werden, da diese integraler Bestandteil der neuen, innovativen RTC-Testung nach VKB Ruptur sind. Ziel ist es, die neuronale Plastizität und das Zusammenspiel motorischer Einheiten unter definierten Bedingungen zu analysieren. Damit sollen Erkenntnisse über die Anpassungsfähigkeit der zentralen Ansteuerung im motorischen System an Training und Belastung gewonnen werden.

Hierbei wird eine dreiecksförmige Kraftaufgabe bei 20% der maximalen willkürlichen Kontraktion (MVC) ausgeführt. Während dieser standardisierten Aufgabe wurden mittels HDsEMG die Entladungsmuster einzelner motorischer Einheiten (Motor Units, MUs) aufgezeichnet. Besonderes Augenmerk lag auf der Berechnung der sogenannten Delta-F-Werte im Rahmen der Paired Motor Unit Analysis. Hierbei wird die Entladungsfrequenz einer Referenz-MU zum Zeitpunkt der Rekrutierung und Derekrutierung einer zweiten MU verglichen. Die Delta-F-Werte geben dabei Aufschluss über die Aktivität der Persistent Inward Currents (PICs) in Motoneuronen. Persistent Inward Currents (PICs) sind zentrale Mechanismen der Motoneuronen-erregbarkeit. Sie werden durch monoaminerge Inputs (z. B. Serotonin, Noradrenalin) verstärkt und tragen zur Verstärkung und Aufrechterhaltung von motorischen Ausgaben bei. Veränderungen in der PIC-Aktivität können daher unmittelbare Auswirkungen auf motorische Kontrolle und Rehabilitation haben (Mesquita et al. 2024). Hemmende afferente Eingänge (d. h. rekurrente und reziproke Hemmung) können deutlich PICs unterdrücken, was zu reduzierten MU DRs bei der Rekrutierung führt (Revill & Fuglevand 2017). PICs sind entscheidend für die Initiierung, Beschleunigung und Aufrechterhaltung der Motoneuronenfeuerung. Ihr Verhalten kann man als Form der neuronalen Plastizität verstehen (Heckman et al. 2008). Sie stellen eine intrinsische Grundlage plastischer Anpassungen dar und werden zentral gesteuert.

Diese Ströme verstärken synaptische Eingänge und tragen wesentlich zur Stabilität und Effizienz der Motoneuronenaktivität bei.

Demnach weisen höhere Delta-F-Werte auf eine stärkere zentrale Aktivierung von PICs hin und spiegeln damit das Zusammenspiel zwischen den motorischen Einheiten wider. Über diese Kennzahlen lassen sich Rückschlüsse auf die neuronale Plastizität ziehen – also die Fähigkeit des Nervensystems, sich durch Training und wiederholte Belastung anzupassen.

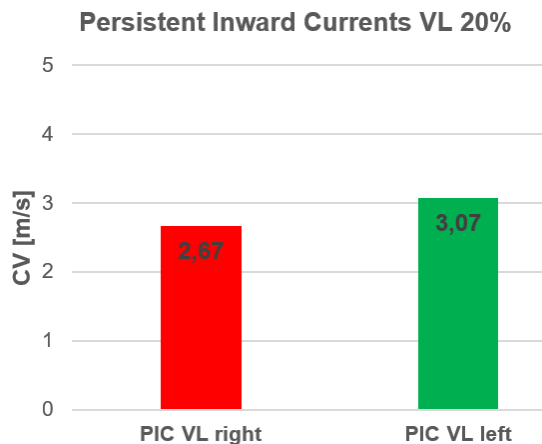
Die gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, das Verständnis der neuromuskulären Steuerung bei Sportlern zu vertiefen. Langfristig können solche Analysen helfen, Trainingsprozesse besser zu steuern, die Leistungsfähigkeit gezielter zu entwickeln und möglicherweise auch Präventionsstrategien zur Vermeidung von Fehlbelastungen oder Überlastungsschäden abzuleiten.

Dieses sind zudem die ersten veröffentlichten Daten weltweit zur PIC Analyse nach vorderer Kreuzbandruptur.

Im speziellen Fall zeigten sich Auffälligkeiten bezüglich der PICs bezogen auf den M. vastus lateralis. Hierbei ist die Aktivierung der PICs des nicht operierten Beines (links – grün) deutlich erhöht (Abb. 21a). Somit ist das Zusammenspiel der motorischen Einheiten als effizienter zu betrachten.

Anders sieht es beim M. vastus medialis aus (Abb. 21b). Hierbei ist die Aktivierung der PICs zwischen beiden Beinen fast identisch. Somit ist das Zusammenspiel der motorischen Einheiten als gleich zu werten.

a)



b)

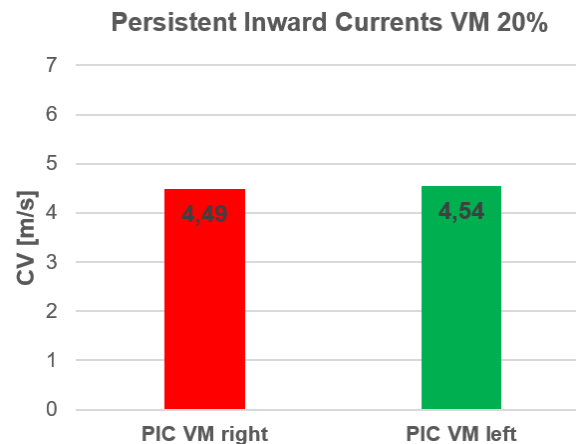
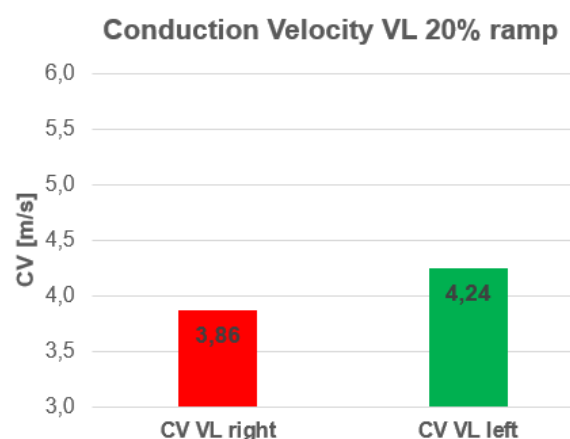


Abb. 21a-b: PIC's im Seitenvergleich für den a) M. vastus lateralis (VL) und b) M. vastus medialis (VM) bei 20% MVC im Rampentest

Die Muskelfaserleitgeschwindigkeit (CV) beschreibt, wie schnell sich ein elektrisches Signal entlang einer Muskelfaser ausbreitet. Sie kann mit Oberflächen-EMG auch auf Ebene einzelner motorischer Einheiten bestimmt werden. Im sportwissenschaftlichen Kontext liefert die Analyse der CV wichtige Hinweise darauf, welche motorischen Einheiten rekrutiert werden, wie sich Muskeln unter Belastung verhalten und wie das neuromuskuläre System auf Training reagiert. Damit ist die CV – ähnlich wie die Analyse der PICs – ein wertvoller Marker für neuronale Plastizität und Anpassungsprozesse bei Sportlern.

Hierbei verhält es sich bei dem Handballspieler ähnlich wie bei der Analyse der PICs. Die CV des operierten Beines ist sowohl bei 20 als auch bei 40% der maximal willkürlichen Kontraktion bezogen auf den M. vastus lateralis (VL) deutlich geringer (Abb. 22a-b):

a)



b)

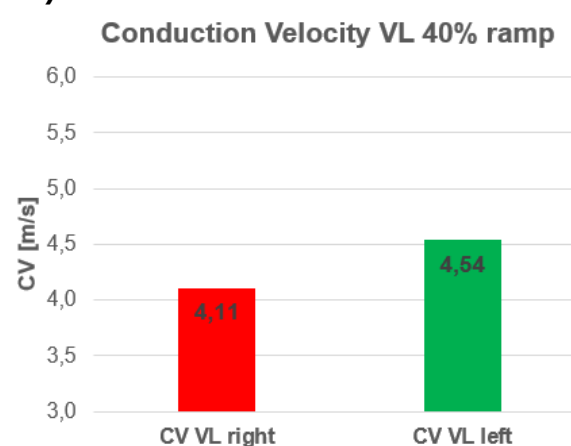


Abb. 22a-b: CV im Seitenvergleich für den M. vastus lateralis bei a) 20% MVC und b) 40% MVC im Rampentest

Bei der Analyse der CV für den M. vastus medialis ist der Unterschied zwischen rechten und linken Bein hingegen minimal (Abb. 23a-b):

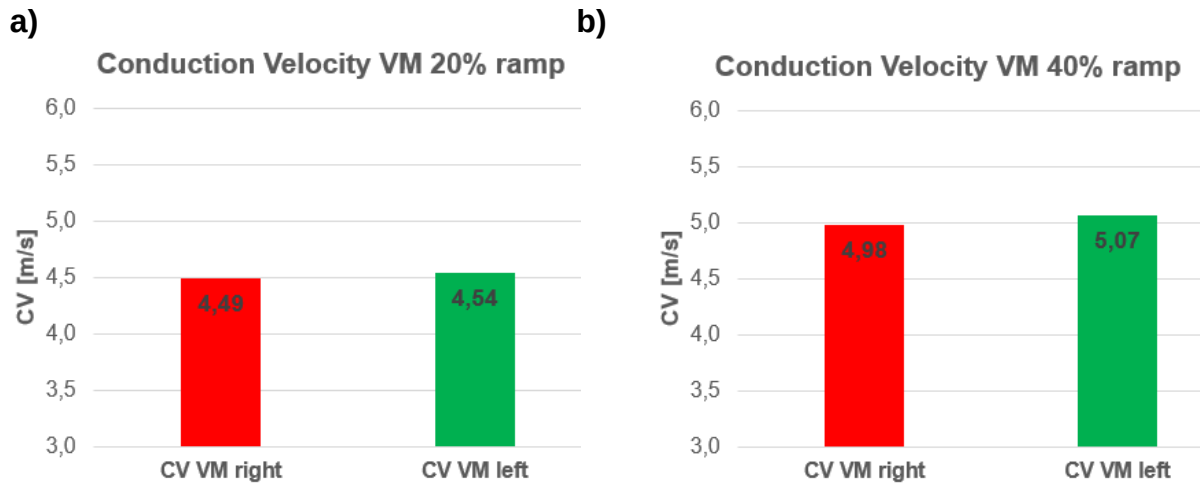


Abb. 23a-b: CV im Seitenvergleich für den M. vastus medialis bei a) 20% MVC und b) 40% MVC im Rampentest

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bezüglich der Komponente des Verletzungsmechanismus sich bei dem getesteten Handballprofi keine Anzeichen für ein erhöhtes Verletzungsrisiko zeigten. Auch wenn es sich hier nur um eine erste Pilotmessung der PICs nach Kreuzbandoperation handelt, bestätigen die reduzierten PIC Werte des VL am operierten Bein die Ergebnisse von Nuccio et al. (2020, 2021) bei denen eine reduzierte Entladungsrate am VL und eine reduzierte MFCV des VL nach VKBR objektiviert wurde. Aus Sicht der physischen Leistungsfähigkeit wird der Sportler von uns als wieder wettkampffähig eingeschätzt. Er kann somit vollumfänglich am Mannschaftstraining teilnehmen. Insgesamt erreichte der Handballer eine Empfehlung von 78% bezogen auf die Rückkehr zum Wettkampfsport. Eine erneute Testung erscheint augenblicklich nicht sinnvoll. Die Maximalkraft der Kniestreckmuskulatur im Rechts-Links-Vergleich weist keine relevanten (ca. 5%) Seitigkeitsunterschiede auf (MVC rechts: 846 N vs. MVC links: 894 N).

7 Ableitungen für die diagnostische Praxis

Sportler mit funktionellen Defiziten kompensieren mit erhöhten Entladungsraten (zentraler Marker) der motorischen Einheiten (ME), während leistungsfähigere Athleten höhere Amplituden der Aktionspotentiale (peripherer Marker) aufweisen. Neuromuskuläre Adaptationen infolge der Strukturzerstörung des VKB finden leistungsabhängig auf unterschiedlichen Ebenen des sensomotorischen Systems statt (Bartels et al. 2025b).

Durch eine differenzierte elektrophysiologische Diagnostik lassen sich Unterschiede verletzungsbedingter Adaptationen der neuromuskulären Funktion knieführender Muskeln erkennen. Die neuromuskulären Kompensationen spiegeln sich in differenten zentralen und peripheren Adaptationen infolge des Rezeptorverlustes nach VKB-Ruptur wider. Diese Untersuchungsergebnisse stützen einen individualisierten und funktionsorientierten Ansatz der Rehabilitation nach VKB-Rekonstruktion.

Eine unvollständige Wiederherstellung der Muskelfaserleitgeschwindigkeit (MFCV) vom VM und VL nach einer VKB-Rekonstruktion reflektiert anhaltende Defizite in der Rekrutierung schnellzuckender motorischer Einheiten, die für sportliche Leistung und funktionelle Stabilität entscheidend sind. Damit stellt die MFCV einen validen peripheren und indirekt auch einen zentralen Marker im Verlauf der Rehabilitation und auch für die RTC-Testung nach VKB-Rekonstruktion dar (Kurz et al. 2025).

Die von uns objektivierten HDsEMG Marker im Rahmen der RTC-Testungen werden schrittweise in die Gewichtung der RTC-Testungen nach VBG-Standard integriert.

Die AMCV (Mittlere Muskelfaserleitgeschwindigkeit) bei Leistungssportlern ist auch geeignet, um den aktuellen Trainings- und Leistungszustand zu monitoren bzw. diesen während Trainings- und Wettkampfperioden zu überwachen (Kurz et al. 2025). Es können mittels AMCV Konditionierungs- sowie Dekonditionierungseffekte der Mannschaft über die Saison im Längsschnitt analysiert werden.

8 Ableitungen für die präventiv-therapeutische Praxis – zukünftige Projekte

1. Die von uns objektivierten HDsEMG Marker im Rahmen der RTC-Testungen werden schrittweise in die RTC-Testungen nach VBG-Standard integriert.
2. Eine Längsschnittstudie zu PICs bei Leistungssportlern, die sich nach vorderem Kreuzbandriss im Genesungsprozess befinden, läuft bereits. Erste Ergebnisse werden im nächsten Jahr zu erwarten sein. Da weltweit keine Referenzdaten im Leistungssport existieren, müssen auch hier gesunde Kontrollgruppen inkludiert werden. Die PIC-Schätzung als Marker der zentralen neuronalen Plastizität könnte zusammen mit anderen MU-Eigenschaften zur Überwachung der Genesung nach einem vorderen Kreuzbandriss verwendet werden. Das Tracking der einzelnen MU und die Verfolgung im Längsschnitt erhöhen die Aussagefähigkeit weiter.
3. Verstärkte Inkludierung der BFR in die frührehabilitative Phase nach VKB-Rekonstruktion, da es uns erstmalig weltweit gelungen ist, einen wissenschaftlichen Beleg für die zentrale Wirkung der BFR-Therapie bereits nach kurzzeitiger passiver Therapie mittels PIC-Analytik zu objektivieren (Dr. Kurz, Dr. Bartels, M.Sc. Pröger). Die entsprechenden Daten werden zur Zeit aufgearbeitet und ggf. noch in diesem Jahr (12/2025) erstmalig in London vorgetragen.
4. Abschluss einer Vergleichsstudie zur extraartikulären zusätzlichen Stabilisierung bei anterolateralen Rotationsinstabilitäten (Lemaire vs. Ellison OP) im Zusammenhang mit einer VKB-Rekonstruktion bei Leistungssportlern (PIC-Analytik und MFCV- Analytik longitudinal). Ein Case Report wurde hierzu bereits veröffentlicht (Bartels et al. 2023). Die Untersuchungen werden 2026 abgeschlossen und veröffentlicht. Die Integration des Frequenz- und spektralen Leistungsspektrums des HDsEMG in RTC-Testungen sollte die RTC Analytik weiter qualifizieren.
5. Entwicklung neuer kostengünstiger Verfahren zur Diagnostik der Muskelsteifigkeit mittels zeitaufgelösten hochfrequenten Ultraschall mit Scherwellentechnologie (Interdisziplinäres Projekt startete 7/24 und wird 12/26 abgeschlossen).
6. Versorgungsforschung zur Variation der Strombehandlung nach VKB-Ruptur und Rekonstruktion zur Reduktion von Denervierungsmechanismen in Folge der neurologischen Teilparese nach VKB-Ruptur (in Planung).

Schlussbemerkung

Unsere Ergebnisse schließen nahtlos an bereits vorgestellte Ergebnisse an, wobei anzumerken ist, dass sich die Dynamik im Forschungsprozess „Diagnostik von Ermüdung & Erholtheit“ stark erhöht hat. Besondere Relevanz hat diese Thematik im Teamsport, wo azyklische, hochintensive, intervallartige Belastungen von den Sportlern zu tolerieren sind.

Mit dem neuen HDsEMG-Analyseportal im Rahmen der VKB-RTC-Testung (Ampelprinzip) steht ein neues, innovatives Assessment bereit, welches offensichtlich deutlich sensibler ist als vergleichbare etablierte Tests. Mittels dieser elektromyographisch-dynamometrisch akzentuierten Testbatterie könnte es zukünftig gelingen, die Rupturrate der am vorderen Kreuzband operierten Patienten deutlich zu senken. Wenn es darüber hinaus perspektivisch gelingt, mit hochfrequentem Ultraschall und Scherwellentechnologie zeitaufgelöst über Stiffnessanalysen die HDsEMG Ergebnisse zu quantifizieren (z. B. Voraktivierung), wäre u.U. die Entwicklung eines preisgünstigen und praktikablen Tools für einen größeren Anwenderkreis in Klinik und Sport möglich.

Der wichtigste Risikofaktor für eine kontralaterale sekundäre VKB Ruptur ist die Rückkehr zu einem hohen Aktivitätslevel mit besonderer Beanspruchung der schnell ermüdenden FT-Fasern. Es bedarf daher einer besonderen Analyse des dynamischen Trainings dieser Strukturen, um der ständig wachsenden Dynamik im Fußball auch präventiv gerecht werden zu können.

Durch die weitere Intensivierung der Kooperation zwischen der Sportklinik Halle mit dem DOUW der MLU Halle-Wittenberg konnte die wissenschaftliche Analyse aller Maßnahmen beim Halleschen FC seither qualifiziert und verstetigt werden. Diese wurde zudem zielgerichtet um weitere Kooperationen (z. B. Anatomie und Radiologie der MLU Halle-Wittenberg; Universität in Brescia; Dr. Giacomo Valli) erweitert. Diese enge Verzahnung zwischen universitärer Grundlagenforschung sowie der Anwendung in der niedergelassenen Praxis ist in dieser intensiven und inzwischen langjährigen Form und Ausgestaltung beispielhaft und deshalb hervorzuheben.

In Zukunft gilt es auch den Schweregrad und die Dauer der Denervierung sowie die Aufnahmefähigkeit denervierter Muskeln für regenerierende Axone zu objektivieren. Dies gibt möglicherweise einen wichtigen Hinweis für die Wahl des chirurgischen Eingriffs und lässt die Folgen einer verzögerten Nervenreparatur besser vorhersagen.

Literatur

Aagaard P., Simonsen E.B., Andersen J.L., Magnusson P., Dyhre-Poulsen P. (2002). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J. Appl. Physiol.* (1985), 93, 1318-1326.

Akenhead R., Nassis G.P. (2016). Training Load and Player Monitoring in High-Level Football: Current Practice and Perceptions. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 11, 587–593.

Andreassen S., Arendt-Nielsen L. (1987). Muscle fibre conduction velocity in motor units of the human anterior tibial muscle: a new size principle parameter. *J. Physiol.*, 391, 561-571.

Arendt-Nielsen L., Forster A., Mills K.R. (1984). The relationship between muscle-fibre conduction velocity and force in the human vastus lateralis. *J. Physiol.*, 353, 6P.

Ashley P., Di Iorio A., Cole E., Tanday A., Needleman I. (2015). Oral health of elite athletes and association with performance: a systematic review. *Br. J. Sports Med.*, 49, 14-19.

Asimakidis N.D., Bishop C.J., Beato M., Mukandi I.N., Kelly A.L., Weldon A., Turner A.N. (2024). A survey into the current fitness testing practices of elite male soccer practitioners: from assessment to communicating results. *Front. Physiol.*, 15, 1376047.

Bartels T., Brehme K., Pyschik M., Pollak R., Schaffrath N., Schulze S., Delank K.S., Laudner K.G., Schwesig R. (2019). Postural stability and regulation before and after anterior cruciate ligament reconstruction – a two-years longitudinal study. *Phys. Ther. Sport*, 38, 49-58.

Bartels T., Schwesig R., Brehme K., Pyschik M., Pröger S., Laube W., Kurz E. (2022). Beurteilung des neuromuskulären Funktionszustands bei Berufssportlern - ergänzende Diagnostik der muskulären Leistungsbereitschaft. *Arthroskopie*, 35, 293-299.

Bartels T., Laube W., Pröger S., Brehme K., Schwesig R., Delank K.S., Kurz E. (2023). Does the Surgical Technique Applied Influence Muscle Activation after ACL Reconstruction? *Ann. Case Rep.*, 8, 1324.

Bartels T., Brehme K., Schwesig R., Delank K.S., Pröger S., Kurz E. (2025a). Eine vergleichende Analyse der Explosiv- und Maximalkraft des Quadriceps bei Leistungssportlern nach Ruptur des vorderen Kreuzbands. 42. AGA-Jahreskongress, 11.09. – 13.09., Hamburg.

Bartels T., Laube W., Pröger S., Brehme K., Delank K.S., Schwesig R., Kurz E. (2025b). Unterschiedliche neuromuskuläre Adaptationen bei professionellen Mannschaftssportlern nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion. *Phys. Med. Rehab. Kuror.*, 35, In press.

Bizzini M., Dvorak J. (2015). FIFA 11+: an effective programme to prevent football injuries in various player groups worldwide-a narrative review. *Br. J. Sports. Med.*, 49, 577–579.

Blasimann A., Koenig I., Baert I., Baur H., Vissers D. (2021). Which assessments are used to analyze neuromuscular control by electromyography after an anterior cruciate ligament injury to determine readiness to return to sports? A systematic review. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.*, 13, 142.

Blasimann A., Busch A., Henle P., Bruhn S., Vissers D., Baur H. (2023). Neuromuscular control in males and females 1 year after an anterior cruciate ligament rupture or reconstruction during stair descent and artificial tibial translation. *Sci. Rep.*, 13, 15316.

- Bloch H., Klein C., Luig P., Riepenhof H. (2018). Entwicklung und Implementierung einer modularen Return-to-Play-Testbatterie nach ACL-Rekonstruktion. In: Musahl, V., Karlsson, J., Krutsch, W., Mandelbaum, B., Espregueira-Mendes, J., d'Hooghe, P. (Hrsg.) Return to Play in Football. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Bredella M.A. (2017). Sex differences in body composition. *Adv. Exp. Med. Biol.*, 1043, 9-27.
- Brehme K., Bartels T., Pyschik M., Jenz M., Delank K.S., Laudner K.G., Schwesig R. (2020). Postural stability and regulation before and after high tibial osteotomy and rehabilitation. *Appl. Sci.*, 10, 6517.
- Broman H., Bilotto G., De Luca C.J. (1985). Myoelectric signal conduction velocity and spectral parameters: influence of force and time. *J. Appl. Physiol.*, 58, 1428-1437.
- Buckthorpe M. (2019). Optimising the Late-Stage Rehabilitation and Return-to-Sport Training and Testing Process After ACL Reconstruction. *Sports Med.*, 49, 1043-1058.
- Buckthorpe M., Della Villa F. (2020). Optimising the 'Mid-Stage' Training and Testing Process After ACL Reconstruction. *Sports Med.*, 50, 657-678.
- Burland J.P., Lepley A.S., Frechette L., Lepley L.K. (2020). Protracted alterations in muscle activation strategies and knee mechanics in patients after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 28, 3766-3772.
- Casolo A., Nuccio S., Bazzucchi I., Felici F., Del Vecchio A. (2020). Reproducibility of muscle fibre conduction velocity during linearly increasing force contractions. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 53, 102439.
- Charnock B.L., Lewis C.L., Garrett W.E., Jr, Queen R.M. (2009). Adductor longus mechanics during the maximal effort soccer kick. *Sports Biomech.*, 8, 223-234.
- Cowley E.S., Olenick A.A., McNulty K.L., Ross E.Z. (2021). "Invisible sportswomen": the sex data gap in sport and exercise science research. *Women Sport Phys. Act. J.*, 29, 146-151.
- Crow J.F., Pearce A.J., Veale J.P., VanderWesthuizen D., Coburn P.T., Pizzari T. (2010). Hip adductor muscle strength is reduced preceding and during the onset of groin pain in elite junior Australian football players. *J. Sci. Med. Sport*, 13, 202-204.
- Cruz-Martinez A., Arpa J. (1999). Muscle fiber conduction velocity in situ (MFCV) in denervation, reinnervation and disuse atrophy. *Acta Neurol. Scand.*, 100, 337-340.
- Delahunt E., Fitzpatrick H., Blake C. (2017). Pre-season adductor squeeze test and HAGOS function sport and recreation subscale scores predict groin injury in Gaelic football players. *Phys. Ther. Sport*, 23, 1e6.
- Del Vecchio A., Negro F., Felici F., Farina D. (2017). Associations between motor unit action potential parameters and surface EMG features. *J. Appl. Physiol.* (1985), 123, 835-843.
- Dideriksen J.L., Del Vecchio A., Farina D. (2020). Neural and muscular determinants of maximal rate of force development. *J. Neurophysiol.*, 123, 149-157.
- Farina D., Muhammad W., Fortunato E., Meste O., Merletti R., Rix H. (2001). Estimation of single motor unit conduction velocity from surface electromyogram signals detected with linear electrode arrays. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 39, 225-36.
- Farinelli L., Abermann E., Meena A., Ueblicher P., Hahne J., Fink C. (2023). Return to Play and Pattern of Injury After ACL Rupture in a Consecutive Series of Elite UEFA Soccer Players. *Orthop. J. Sports Med.*, 11, 23259671231153629.

Folland J.P., Buckthorpe M.W., Hannah R. (2014). Human capacity for explosive force production: neural and contractile determinants. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 24, 894-906.

Forelli F., Moiroux-Sahraoui A., Mazeas J., Dugernier J., Cerrito A. (2025). Rethinking the Assessment of Arthrogenic Muscle Inhibition After ACL Reconstruction: Implications for Return-to-Sport Decision-Making-A Narrative Review. *J. Clin. Med.*, 14, 2633.

Foster C., Florhaug J.A., Franklin J., Gottschall L., Hrovatin L.A., Parker S., Doleshal P., Dodge C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *J. Strength. Cond. Res.*, 15, 109–115.

Gabbett T.J. (2016). The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *Br. J. Sports Med.*, 50, 273–280.

Gokeler A., Dingenen B., Hewett T.E. (2022). Rehabilitation and Return to Sport Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Where Are We in 2022? *Arthrosc. Sports Med. Rehabil.*, 4, e77-e82.

Guo Y., Jones E.J., Škarabot J., Inns T.B., Phillips B.E., Atherton P.J., Piasecki M. (2024). Common synaptic inputs and persistent inward currents of vastus lateralis motor units are reduced in older male adults. *Geroscience.*, 46, 3249-3261.

Heckman C.J., Johnson M., Mottram C., Schuster J. (2008). Persistent inward currents in spinal motoneurons and their influence on human motoneuron firing patterns. *Neuroscientist.*, 14, 264-275.

Hewett T.E., Myer G.D., Ford K.R., Heidt R.S., Jr., Colosimo A.J., McLean S.G., van den Bogert A.J., Paterno M.V., Succop P. (2005). Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes: a prospective study. *Am. J. Sports Med.*, 33, 492-501.

Huston L.J., Greenfield M.L., Wojtys E.M. (2000). Anterior cruciate ligament injuries in the female athlete. Potential risk factors. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 372, 50-63.

Impellizzeri F.M., Marcora S.M., Coutts A.J. (2019). Internal and External Training Load: 15 Years On. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 14, 270–273.

Jaspers A., Brink M.S., Probst S.G., Frencken W.G., Helsen W.F. (2017). Relationships Between Training Load Indicators and Training Outcomes in Professional Soccer. *Sports Med.*, 47, 533–544.

Keays S.L., Keays R., Newcombe P.A. (2016). Femoral intercondylar notch width size: a comparison between siblings with and without anterior cruciate ligament injuries. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 24, 672-679.

Kurz E., Brehme K., Bartels T., Pyschik M., Jenz M., Kadler W., Delank K.S., Schwesig R. (2022a). Standing Steadiness and Asymmetry after High Tibial Osteotomy Surgery: A 2-year Follow-up Study. *J. Pers. Med.*, 12, 1594.

Kurz E., Schwesig R., Pröger S., Delank K.S., Bartels T. (2022b). Foot tapping and unilateral vertical jump performance in athletes after knee surgery: an explorative cross-sectional study. *BMC Sports Sci. Med. Rehabil.*, 14, 34.

Kurz E., Schwesig R., Pröger S., Delank K.S., Bartels T. (2023). Differenzierte Analyse des neuronalen Antriebs nach Kniebandverletzungen. *Knie J.*, 5, 40-47.

Kurz E., Pröger S., Gizzi L., Schwesig R., Delank K.S., Bartels T. (2024). Effects of functional performance in professional athletes after ACL reconstruction on muscle fiber conduction velocity. In: Watanabe K (ed) Abstracts of the XXV Congress of the International Society of Electrophysiology and Kinesiology (ISEK), June 26-29, 2024, Nagoya, Japan.

Kurz E., Bartels T., Negro F., Pröger S., Schwesig R., Delank K.S., Valli G. (2025). Motor unit recruitment thresholds of tracked motor units are not affected by an acute passive blood flow restriction intervention. 17. Jahrestagung der dvs-Sektion Trainingswissenschaft, 19.02. – 21.02., Saarbrücken.

Kurz E., Bartels T., Negro F., Pröger S., Schwesig R., Delank K.S., Valli G. (2025). Effects of acute passive blood flow restriction on motor unit recruitment threshold and discharge rate. 30. Annual Congress of the European College of Sport Science (ECSS), 01.07. – 04.07., Rimini.

Kurz E., Schenk P., Baumgart C., Bartels T., Graßme R. (2025). Skeletal muscle action potential propagation: Background, methodology and interpretation of superficial recordings. *Klinische Neurophysiologie* in press.

Laube W., Kurz E., Schwesig R., Bartels T. (2025). Ruptur des vorderen Kreuzbands: ein Prototyp gestörter Sensomotorik und Rehabilitation. *Manuelle Medizin*, 63, Online ahead of print.

Lepley L.K., Davi S.M., Burland J.P., Lepley A.S. (2020). Muscle Atrophy After ACL Injury: Implications for Clinical Practice. *Sports Health*, 12, 579-586.

Lepley A.S., Lepley L.K. (2021). Mechanisms of Arthrogenic Muscle Inhibition. *J. Sport Rehabil.*, 31, 707-716.

Losciale J.M., Zdeb R.M., Ledbetter L., Reiman M.P., Sell T.C. (2019). The Association Between Passing Return-to-Sport Criteria and Second Anterior Cruciate Ligament Injury Risk: A Systematic Review With Meta-analysis. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 49, 43-54.

Maffiuletti N.A., Aagaard P., Blazevich A.J., Folland J., Tillin N., Duchateau J. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 116, 1091-1116.

Magalhaes F.C.O., Marques da Silva C.E., Springer C.R., Carteri R.B., Luiz Lopez A., Costa Teixeira B., Capitanio de Souza B. (2022). Survey on Oral Health and History of Muscle Injury in Professional Athletes of Brazilian Women's Soccer: A Cross-Sectional Self-Reported Study. *Curr. Res. Dentistry*, 13, 1-10.

Manojlovic M., Ninkovic S., Matic R., Versic S., Modric T., Sekulic D., Drid P. (2024). Return to Play and Performance After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction in Soccer Players: A Systematic Review of Recent Evidence. *Sports Med.*, 54, 2097-2108.

Masuda T., De Luca C.J. (1991). Recruitment threshold and muscle fiber conduction velocity of single motor units. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 1, 116-23.

Masuda T., Sadoyama T., Shiraishi M. (1996). Dependence of average muscle fibre conduction velocity on voluntary contraction force. *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 6, 267-276.

Mazza D., Carrozzo A., Annibaldi A., De Carli F., Santoriello V., Zeppilli P., De Carli A. (2025). ACL tears in female and male professional soccer players. *Knee*, 57, 292-297.

Meredith S.J., Rauer T., Chmielewski T.L., Fink C., Diermeier T., Rothrauff B.B., Svantesson E., Hamrin Senorski E., Hewett T.E., Sherman S.L., Lesniak B.P. (2020). Panther Symposium ACL Injury Return to Sport Consensus Group. Return to sport after anterior cruciate ligament injury: Panther Symposium ACL Injury Return to Sport Consensus Group. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 28, 2403-2414.

Mesquita R.N.O., Taylor J.L., Heckman C.J., Trajano G.S., Blazevich A.J. (2024). Persistent inward currents in human motoneurons: emerging evidence and future directions. *J. Neurophysiol.*, 132, 1278-1301.

Mielle B., Judice A., Proenca L., Machado V., Vieira A.M., Mendes J.J., Manso C., Rozan C., Botelho J. (2025). Dental Caries, Tooth Erosion and Nutritional Habits in a Cohort of Athletes: A Cross-Sectional Study. *Nutrients*, 17, 543.

Moreno-Pérez V., Travassos B., Calado A., Gonzalo-Skok O., Del Coso J., Mendez-Villanueva A. (2019). Adductor squeeze test and groin injuries in elite football players: A prospective study. *Phys. Ther. Sport*, 37, 54–59.

Nguyen A.D., Boling M.C., Levine B., Shultz S.J. (2009). Relationships between lower extremity alignment and the quadriceps angle. *Clin. J. Sport Med.*, 19, 201-206.

Nuccio S., Del Vecchio A., Casolo A., Labanca L., Rocchi J.E., Felici F., Macaluso A., Mariani P.P., Falla D., Farina D., Sbriccoli P. (2020). Muscle fiber conduction velocity in the vastus lateralis and medialis muscles of soccer players after ACL reconstruction. *Scand. J. Med. Sci. Sports.*, 30, 1976-1984.

Nuccio S., Del Vecchio A., Casolo A., Labanca L., Rocchi J.E., Felici F., Macaluso A., Mariani P.P., Falla D., Farina D., Sbriccoli P. (2021). Deficit in knee extension strength following anterior cruciate ligament reconstruction is explained by a reduced neural drive to the vasti muscles. *J. Physiol.*, 599, 5103-5120.

Otzel D.M., Chow J.W., Tillman M.D. (2015). Long-term deficits in quadriceps strength and activation following anterior cruciate ligament reconstruction. *Phys. Ther. Sport.*, 16, 22-8.

Owoeye O.B.A., Mulenga D., Kim J., Breitbach A., Neme J.R. (2024). Normative Hamstrings and Quadriceps Isometric Strength Values and Hamstrings-Quadriceps Asymmetry in Healthy Collegiate Soccer and Basketball Players. *Int. J. Exerc. Sci.*, 17, 768-778.

Paterno M.V., Rauh M.J., Schmitt L.C., Ford K.R., Hewett T.E. (2014). Incidence of Second ACL Injuries 2 Years After Primary ACL Reconstruction and Return to Sport. *Am. J. Sports Med.*, 42, 1567–1573.

Pietrosimone B., Lepley A.S., Kuenze C., Harkey M.S., Hart J.M., Blackburn J.T., Norte G. (2022). Arthrogenic Muscle Inhibition Following Anterior Cruciate Ligament Injury. *J. Sport Rehabil.*, 31, 694-706.

Piskin D., Benjaminse A., Dimitrakis P., Gokeler A. (2022). Neurocognitive and Neurophysiological Functions Related to ACL Injury: A Framework for Neurocognitive Approaches in Rehabilitation and Return-to-Sports Tests. *Sports Health.*, 14, 549-555.

Piussi R., Simonson R., Högberg J., Thomeé R., Samuelsson K., Hamrin Senorski E. (2023). No Effect of Return to Sport Test Batteries with and without Psychological PROs on the Risk of a Second ACL Injury: A Critical Assessment of Four Different Test Batteries. *Int. J. Sports Phys. Ther.*, 18, 874-886.

Ravé G., Granacher U., Boullosa D., Hackney A.C., Zouhal H. (2020). How to Use Global Positioning Systems (GPS) Data to Monitor Training Load in the "Real World" of Elite Soccer. *Front. Physiol.*, 11, 944.

Revill A.L., Fuglevand A.J. (2017). Inhibition linearizes firing rate responses in human motor units: implications for the role of persistent inward currents. *J. Physiol.*, 595, 179-191.

Rodriguez-Merchan E.C., Valentino L.A. (2022). Return to Sport Activities and Risk of Reinjury Following Primary Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Arch. Bone Jt. Surg.*, 10, 648-660.

Rouissi M., Chtara M., Owen A., Chaalali A., Chaouachi A., Gabbett T., Chamari K. (2016). Effect of leg dominance on change of direction ability amongst young elite soccer players. *J. Sports Sci.*, 34, 542–548.

Šarabon N., Kozinc Ž., Perman M. (2021). Establishing Reference Values for Isometric Knee Extension and Flexion Strength. *Front. Physiol.*, 12, 767941.

Schulze A., Busse M. (2024). Sports Diet and Oral Health in Athletes: A Comprehensive Review. *Medicina (Kaunas)*, 60, 319.

Schwesig R., Born P., Kurz E., Schulze S., Panian P., Marshall R.P., Bartels T., Wienke A., Gernhardt R.C. (2025). Oral Health Conditions and Physical Performance in Two Different Professional Team Sports in Germany: A Cross-Sectional Study. *Sports*, 13, 206.

Śliwowski R., Paillard T., Bojkowski Ł., Dudziński W., Patek M., Marynowicz J. (2024). Intra- and inter-limb strength imbalance and asymmetry in soccer: A comparison of elite senior and junior players. *PLoS One.*, 26, e0302474.

Szymiski D., Achenbach L., Zellner J., Weber J., Koch M., Zeman F., Huppertz G., Pfeifer C., Alt V., Krutsch W. (2022). Higher risk of ACL rupture in amateur football compared to professional football: 5-year results of the 'Anterior cruciate ligament-registry in German football'. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 30, 1776-1785.

Szymiski D., Achenbach L., Weber J., Huber L., Memmel C., Kerschbaum M., Alt V., Krutsch W. (2023). Reduced performance after return to competition in ACL injuries: an analysis on return to competition in the 'ACL registry in German Football'. *Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc.*, 31, 133-141.

Tegner Y., Lysholm J. (1985). Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 198, 43-49.

Thorpe R.T., Strudwick A.J., Buchheit M., Atkinson G., Drust B., Gregson W. (2015). Monitoring Fatigue During the In-Season Competitive Phase in Elite Soccer Players. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 10, 958-964.

Tortoli E., Pellicciari L., Giovannico G., Tak I. (2024). Return to running criteria after anterior cruciate ligament reconstruction: an online survey of 1404 Italian physiotherapists. *J. Sports Med. Phys. Fitness.*, 64, 931-941.

van Melick N., van der Weegen W., van der Horst N. (2022). Quadriceps and Hamstrings Strength Reference Values for Athletes With and Without Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Who Play Popular Pivoting Sports, Including Soccer, Basketball, and Handball: A Scoping Review. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.*, 52, 142-155.

Webster K.E., Hewett T.E. (2022). Anterior Cruciate Ligament Injury and Knee Osteoarthritis: An Umbrella Systematic Review and Meta-analysis. *Clin. J. Sport Med.*, 32, 145-152.

Werner J., Häggglund M., Waldén M., Ekstrand J. (2009). UEFA injury study: a prospective study of hip and groin injuries in professional football over seven consecutive seasons. *Br. J. Sports Med.*, 43, 1036-1040.

Zech A., Hollander K., Junge A., Steib S., Groll A., Heiner J., Nowak F., Pfeiffer D., Rahlf A.L. (2022). Sex differences in injury rates in team-sport athletes: A systematic review and meta-regression analysis. *J. Sport Health Sci.*, 11, 104-114.

Zeh A., Stier J., Meyer L., Wohlrab D., Gutteck N., Schulze S., Panian M., Delank K.S., Laudner K.G., Schwesig R. (2025). No clinical relevant differences in early clinical outcomes, patient satisfaction and objective gait and posture analysis between a custom versus off-the-shelf total knee arthroplasty: a prospective controlled study. *Arch. Orthop. Trauma Surg.*, 145, 245.

Zimmel H., Bischoff L.L. (2023). Der "Gender Data Gap" und geschlechtsspezifische physiologische Unterschiede im Sport. *Bewegungstherapie und Gesundheitssport*, 39, 78-80.