

Arthroskopie 2022 · 35:293–299
<https://doi.org/10.1007/s00142-022-00548-0>
 Angenommen: 17. Mai 2022
 Online publiziert: 17. Juni 2022
 © Der/die Autor(en) 2022



Beurteilung des neuro-muskulären Funktionszustands bei Berufssportlern

Ergänzende Diagnostik der muskulären Leistungsbereitschaft

Thomas Bartels¹ · René Schwesig² · Kay Brehme¹ · Martin Pyschik¹ · Stefan Pröger¹ · Wolfgang Laube^{1,2} · Eduard Kurz²

¹Zentrum für Gelenkchirurgie, MVZ Sportklinik Halle GmbH, Halle (Saale), Deutschland

²Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, Medizinische Fakultät, Labor für Experimentelle Orthopädie & Sportmedizin, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Deutschland

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden bedeutende Fortschritte in den chirurgischen Techniken, der postoperativen Rehabilitation und der Identifizierung von Risikofaktoren für eine zweite Verletzung des vorderen Kreuzbands (VKB) gemacht. Dies führte jedoch nicht zu einer Verringerung des sekundären VKB-Verletzungsrisikos. Die Wiederherstellung der anatomischen (operative Rekonstruktion) und anschließend insbesondere der trainingsbedingten funktionellen Stabilität sollte eine grundlegende Voraussetzung für die Rückkehr zu Pivot-Sportarten nach einer VKB-Verletzung sein. Das VKB hat eine bedeutende Rolle bei der Kniepropriozeption mit der Konsequenz einer eingeschränkten sensomotorischen Regulation im Verletzungsfall. Das Perturbationstraining stellt eine große Herausforderung in der spätrehabilitativen Phase nach VKB-Rekonstruktion dar. Die Diagnostik der Muskelaktivierung im Rehabilitationsverlauf nach VKB-Rekonstruktion hat deshalb eine enorme Bedeutung. Mit der entwickelten Software können Charakteristika der motorischen Einheiten knieführender Muskeln zeitnah objektiviert und somit eine mögliche Überlastung bei hochreaktivem Perturbationstraining im Rahmen der spätrehabilitativen Phase nach VKB-Rekonstruktion vermieden werden.

Schlüsselwörter

Knie · Muskel · Rehabilitation · Return to sport · Oberflächen-Elektromyographie

Video Online

Die Online-Version dieses Beitrags (<https://doi.org/10.1007/s00142-022-00548-0>) enthält ein Video.



QR-Code scannen & Beitrag online lesen

Jährlich werden in Deutschland über 40.000 Operationen nach einer Verletzung am vorderen Kreuzband (VKB) durchgeführt [12]. Die Rekonstruktion des VKB ist der aktuell klinische Standard, um dem Gelenk mechanische Stabilität und eine rechtzeitige Rückkehr zum Sport („return to sport“, RTS) zu ermöglichen [22]. Es zeichnet sich ein Paradigmenwechsel bei RTS-Entscheidungen durch den Einsatz immer komplexerer Testbatterien ab [5, 32]. Viele der gegenwärtigen RTS-Analyseverfahren werden in kontrollierten klinischen Umgebungen durchgeführt und können möglicherweise nicht die

tatsächliche Leistungsfähigkeit oder das Verletzungsrisiko eines Athleten während der sportartspezifischen Anforderungen abschätzen [31]. Nach einer Verletzung erleiden bis zu einem Viertel der Sportler, die zum Sport zurückkehren, eine zweite VKB-Verletzung. Dabei treten 30% der VKB-Rupturen innerhalb der ersten 20 sport-spezifischen Belastungen nach dem RTS auf [28]. Diese alarmierenden Statistiken unterstreichen die Notwendigkeit einer Optimierung der RTS-Entscheidungsfindung.

Die Gelenkkapseln, die Gelenkbänder, die myotendinösen Übergangsbereiche

Tab. 1 Demografische Daten der untersuchten Athleten. Angegeben sind Mittelwerte (Standardabweichungen) sowie Minimum und Maximum

Subgruppe	Alter (Jahre)	Größe (cm)	Gewicht (kg)	BMI (kg/m ²)	Unterschenkel-länge (cm)
Unverletzte (n = 5)	22 (2) 20–24	188 (12) 175–206	80 (12) 67–98	22,6 (1,4) 20,7–24,2	47,9 (4,5) 44,0–55,0
Operierte (n = 4)	25 (2) 23–26	184 (4) 179–188	78 (3) 74–81	23,1 (0,4) 22,8–23,6	46,5 (1,0) 46,0–48,0

und die Fasziennetze sind wichtige Standorte von Mechanosensoren als Bestandteile des sensomotorischen Systems (SMS). Die Afferenzen aus dem VKB bestimmen über die volle Aktivierungsfähigkeit des M. quadriceps femoris [18]. Fallen diese Informationsquellen infolge Verletzung, Gelenkdegeneration oder auch des Alterungsprozesses ständig aus, ist auch die Funktion des SMS dauerhaft verändert. So sind die nahezu umgehende Atrophie und das ausgeprägte Funktionsdefizit des M. quadriceps femoris infolge der VKB-Ruptur einer akuten funktionellen Teilparese geschuldet [18–20].

» Die Oberflächen-Elektromyographie ermöglicht die Analyse der Muskelaktivierungsfähigkeit

Der diagnostische Zugang ist die Analyse der Muskelaktivierungsfähigkeit mittels Oberflächen-Elektromyographie (EMG). Mit Hilfe der Zerlegung oder Dekomposition der an der Hautoberfläche erfassten Signale sind wir in der Lage, Aussagen über die Zusammensetzung des EMG-Mischsignals zu treffen [14, 27] und somit Rekrutierungsdefizite bei Sportlern nach einer VKB-Verletzung zu objektivieren. Ziel dieser Pilotstudie war es, ein Messprotokoll zu etablieren, welches unterstützt durch eine spezielle Software zeitnah Informationen zum aktuellen neuromuskulären Status (vor und nach einer spezifischen Belastung) bereitstellt. Damit soll die Entscheidungsfindung in der Spätphase der Rehabilitation verbessert werden.

Material und Methoden

Untersuchungsgruppe

In dieser Pilotuntersuchung konnten 9 männliche Berufssportler (Tegner-Aktivitätslevel: 6–9) aus den Teamsportarten Fußball (7), Handball (1) und Volleyball (1)

eingeschlossen werden. Vier Athleten wurden (3–19 Monate) nach einem operativen Eingriff (2-mal oberes Sprunggelenk, 2-mal VKB) untersucht. Die operierten Sportler verletzten sich jeweils auf der dominanten (Schussbein) und nichtdominanten Seite. Die demografischen Daten beider Subgruppen sind in der **Tab. 1** zusammengefasst.

Testablauf und Belastungsprotokolle

Das isometrische Testprogramm, entwickelt für Leistungssportler, besteht aus maximalen und submaximalen Kontraktionen. Dabei werden 3 maximal isometrische Kontraktionen („maximum voluntary contraction“, MVC) über jeweils 3 s mit einer Pause von 30 s absolviert. Vor und nach einer Belastung durchlief der Proband eine feedbackgeführte Messung. Dabei musste eine Intensität von 40 % MVC über 20 s aufrechterhalten werden. Dieselbe Messung wurde nach einer Pause von 60 s bei 80 % MVC absolviert. Aktuell sind 2 Belastungsprotokolle etabliert und erprobt: ein isometrisches Ermüdungsprotokoll für die Knieextensoren und ein dynamisches Belastungsprotokoll mit Richtungswechseln auf dem SpeedCourt (GlobalSpeed GmbH, Hemsbach; s. Video). Das spezifische Training mit diesem Gerät umfasst 5–6 Übungen, die jeweils 15–30 s lang durchgeführt werden (Belastung-Pause-Regime: 1:4). Der Einsatz dieser Interventionen in der Rehabilitation stellt eine sehr große Herausforderung dar, da die prozessualen Anforderungen immens hoch sind. Das ungenügende Wissen um den individuellen Erholungszustand ist problematisch, da auch Unverletzte koordinativ akzentuierte Trainingsinhalte nicht im ermüdeten Zustand durchführen sollten. Während das dynamische Belastungsprotokoll für die Diagnostik und Trainingssteuerung in der Spätphase der Rehabilitation genutzt wird, kann das iso-

metrische Ermüdungsprotokoll deutlich früher angewendet werden. Beim Ermüdungsprotokoll muss der Athlet 5-mal ein Niveau von 60 % der MVC 60 s lang halten (Belastung-Pause-Regime: 1:1). Bei unverletzten oder wieder vollständig genesenen Sportlern orientiert sich die Bewertung an den Ergebnissen der dominanten Seite (Schussbeinseite), während bei Verletzten, Operierten oder Athleten im Rehabilitationsprozess die Bewertung anhand der nichtbetroffenen Seite vorgenommen wird.

Test-Setup und Ableitung der Kennmuskeln

Der M. quadriceps femoris ist ein myofasziales Kettenglied in der Belastungsstruktur sehr vieler Sportarten bzw. Disziplinen von Sportarten. Er wird als Repräsentant des sensomotorischen Systems (SMS) in einer standardisierten Körperposition (spezieller Stuhl, Oberkörper aufrecht fixiert, Hüft- und Kniegelenk in 90° Beugung, Fixierung des Kraftsensors oberhalb der Malleoli 90° zur Unterschenkelachse; **Abb. 1**) untersucht. Die EMG-Signale werden nach standardisierter Vorbereitung der Hautoberfläche und Platzierung der Elektroden [9] vom M. vastus medialis und lateralis mittels eines speziellen 5-Pin-Sensors (AD: 20.000 s⁻¹, Fa. Delsys, Inc., Natic, MA, USA) abgeleitet.

Extrahierte dEMG-Parameter

Mit Hilfe der Software (PD III Algorithmus, EMGworks) wird das Summen-EMG-Signal zunächst in Charakteristika einzelner motorischer Einheiten zerlegt (Dekomposition; **Abb. 1**). Hierbei werden die aktivierten motorischen Einheiten mit ihren Eigenschaften Rekrutierungsschwelle („recruitment threshold“, RT), Entladungsrate („firing rate“, FR), Amplitude des Muskelaktionspotenzials („motor unit action potential“, MUAP) und ermüdungsrelevante Veränderungen ermittelt. Der MVC-Wert sowie die berechnete prozentuale Abweichung von der Vorgabekurve („compliance error“, CE) für die submaximalen Kontraktionen stellen die kraftabhängigen Parameter dar. Alle erfassten Parameter der Kraft- und Aktivierungscharakteristika der untersuchten Muskeln sind in **Tab. 2**

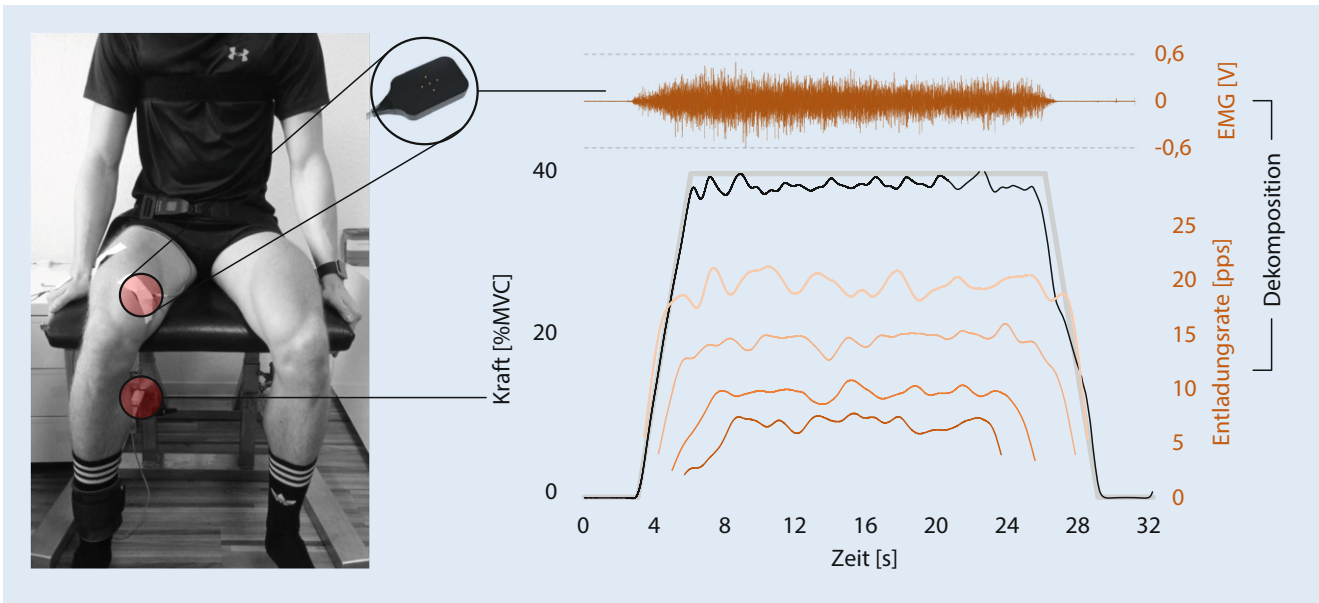


Abb. 1 ▲ Darstellung des Messplatzes, der Kraft- und EMG-Sensorik sowie ein Beispielprotokoll der Erfassung und Dekomposition der elektromyographischen Signale (mittlere Entladungsraten von 4 motorischen Einheiten). EMG Elektromyographie, MVC „maximum voluntary contraction“

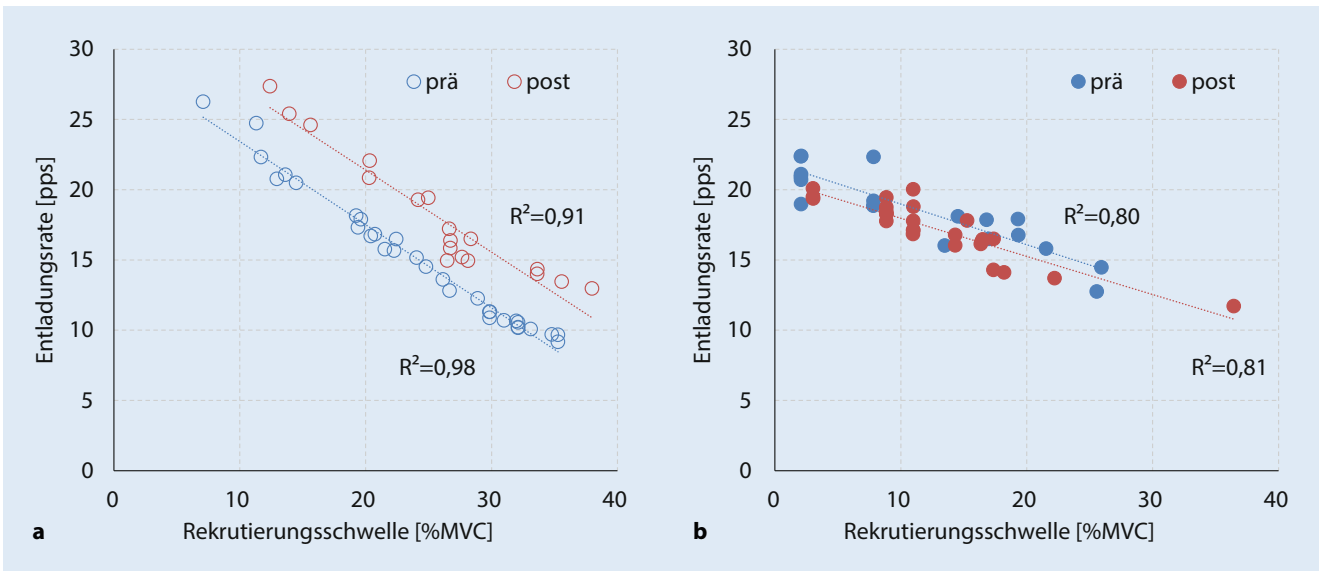


Abb. 2 ▲ Aktivierungskontrolle (Abstimmung des neuromuskulären Systems während der Krafterzeugung) des M. vastus medialis bei 40 % MVC („maximum voluntary contraction“) vor und nach der isometrischen Ermüdung des M. quadriceps femoris. **a** 26 Jahre alter Fußballer 9 Monate nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbands. **b** 21 Jahre alter Fußballer dominante Seite, unverletzt

genannt und beschrieben. Die extrahierte dEMG-Parameter wurden verwendet, um Vorher-Nachher-Vergleiche anzustellen. Dabei wurden die Ergebnisse unmittelbar nach den Belastungen mit den Resultaten des erholten Zustands verglichen. Basierend auf diesen Vergleichen werden Aussagen zur muskulären Leistungsbereitschaft sowie Empfehlungen für die

voraussichtliche Belastbarkeit weiterer hochintensiver Belastungen abgeleitet.

Resultate

Maximalkraft

Die unverletzten Athleten erzielten mit den Knieextensoren ihrer dominanten Sei-

te im Durchschnitt 337 Nm (209–442 Nm). Für die Patienten hingegen konnten keine Einschränkungen der willkürlichen Maximalkraft auf der operierten Seite belegt werden (272–403 Nm). Die normierten maximalen Drehmomente und die Symmetriewerte („limb symmetry index“, LSI) sind **Tab. 3** zu entnehmen.

Tab. 2 Kategorisierte Übersicht der einzelnen Parameter der Kraftkontrolle und der Muskelaktivität und deren Interpretation

Kategorie	Parameter	Bedeutung
Kraft	MVC („maximum voluntary contraction“)	Willkürliche isometrische Maximalkraft des M. quadriceps femoris
Kraftkontrolle	CE („compliance error“)	Relative Abweichung von der Intensitätsvorgabe der Kraftkurve
Aktivierung	Anzahl der motorischen Einheiten	Anzahl der durch den Algorithmus im Erfassungsfeld identifizierten motorischen Einheiten
	Minimale Rekrutierungsschwelle	Intensität, der ersten identifizierten motorischen Einheit (motorische Einheit mit der niedrigsten Rekrutierungsschwelle)
	Maximale Rekrutierungsschwelle	Intensität, der letzten identifizierten motorischen Einheit (motorische Einheit mit der höchsten Rekrutierungsschwelle)
	Rekrutierungsbereich	Differenz zwischen maximaler und minimaler Rekrutierungsschwelle; Spannweite der neuromuskulären Aktivierung
	FR („firing rate“)	Durchschnittswert der mittleren Feuerrate (Entladungsrate) der identifizierten motorischen Einheiten
Aktivierungskontrolle	MUAP-Amplitude	Maximale Amplitude des Aktionspotenzials der identifizierten motorischen Einheit; Intensität der Aktivierung
	Bestimmtheitsmaß (R ²)	Varianzaufklärung der linearen Regression zwischen der mittleren Entladungsrate und der jeweiligen Rekrutierungsschwelle aller identifizierter motorischer Einheiten; Maß der Abstimmung des neuromuskulären Systems während der Krafterzeugung

Tab. 3 Körpergewichtsbezogene maximale Drehmomente (Nm/kg) und Symmetriewerte (LSI, %) der Knieextensoren der untersuchten Athleten. Angegeben sind Mittelwerte (Standardabweichungen) sowie Minimum und Maximum

Subgruppe	Dominante Seite	Nichtdominante Seite	LSI	Verletzte Seite	Nichtverletzte Seite
Unverletzte (n = 5)	4,18 (0,66) 3,11–4,79	3,95 (0,65) 2,86–4,42	95 (7) 86–104	–	–
Operierte (n = 4)	–	–	93 (6) 89–102	4,62 (0,89) 3,36–5,45	4,95 (0,93) 3,75–5,90

Im Wesentlichen konnte allen Athleten eine Seitensymmetrie bescheinigt werden. Drei Sportler (1-mal unverletzt, 2-mal operiert) wiesen einen LSI-Wert < 90 % auf. Vier der unverletzten Athleten sowie ein am VKB operierter Sportler erreichten mit ihrer dominanten Seite eine höhere Maximalkraft.

Beurteilung der Rekrutierungsfähigkeit am Beispiel des M. vastus medialis

Um die Beurteilung der Rekrutierungsfähigkeit der Muskeln darzustellen, wurden exemplarisch ein Sportler nach VKB-Rekonstruktion sowie ein unverletzter Athlet ausgewählt (beide Fußballer). Beide Sportler wurden vor und nach dem isome-

trischen Ermüdungsprotokoll untersucht. Die Zusammenhänge zwischen der Rekrutierungsschwelle und den mittleren Entladungsraten der identifizierten motorischen Einheiten des M. vastus medialis sind in **Abb. 2** dargestellt.

Trainingsempfehlungen

Es stellte sich heraus, dass eine sehr hohe interindividuelle Variabilität der Veränderungen der Parameter auf das standardisierte Training zu verzeichnen ist. Entsprechend sind keine statistischen Gruppenwerte der Parameter als „Norm- oder Orientierungswerte“ ermittelt worden. Es erfolgte ein tagesspezifischer Vergleich für jeden Probanden. Für die Bewertung „noch bestehende Ermüdung“ wurde für jeden

Parameter eine Änderung zum Ausgangswert von 10 % als Schwellenwert festgelegt. Werte über 10 % Abweichung deuten auf eine noch vorhandene Ermüdung hin. Für die Empfehlung „hochintensives Training kann mit hoher Wahrscheinlichkeit mit dem gewünschten Trainingseffekt und ohne höheres Verletzungsrisiko erneut ausgeführt werden“ müssen die meisten Parameter auf 10-%-Niveau liegen (**Tab. 4** zeigt die detaillierten Ergebnisse der in **Abb. 2** dargestellten Vergleiche). Die Anzahl der identifizierten motorischen Einheiten sowie deren maximale Amplitude des Aktionspotenzials waren nach der Ermüdung beim Patienten deutlich reduziert. Aktuell scheint somit eine zusätzliche intensive Belastung nicht sinnvoll.

Diskussion

In dieser Pilotstudie wurde ein Messprotokoll etabliert und an männlichen Berufssportlern erprobt. Der Einsatz der entwickelten Software reduziert die Auswertungszeit erheblich und verbessert damit die Anwendbarkeit im Reha-Setting. Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen den Nutzen dieser Technologie bei der Bewertung der muskulären Leistungsbereitschaft insbesondere nach Verletzungen.

» Die Rückkehr zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit gelingt nur 65–83 % der Sportler

Die Rückkehr zur ursprünglichen sportlichen Leistungsfähigkeit bzw. deren Stabilität gelingt in der Regel nur 65–83 % der Sportler [1, 16, 25]. Die meisten Personen entwickelten innerhalb von 10–15 Jahren eine sekundäre Gonarthrose, sodass die Rekonstruktion per se keine Intervention zur Verhinderung einer degenerativen Gelenkschädigung scheint [21]. Derzeit gibt es keinen Goldstandard für die Rehabilitation nach VKB-Rekonstruktion [2]. Des Weiteren zeigt sich zwischen den Expertengruppen eine sehr hohe Variabilität und geringe Standardisierung in der Bewertung des RTS [23]. Die Funktion des M. quadriceps femoris war bei Premier-League-Fußballern (n = 15) nach einer VKB-Rekonstruktion zum Zeitpunkt des RTS nachweislich eingeschränkt [10]. Die

Tab. 4 Parameter der Kraftkontrolle und des zerlegten EMG-Signals des Fußballers 9 Monate nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbands (VKB) und eines unverletzten Fußballers (■ Abb. 2) vor und nach der isometrischen Ermüdung

Parameter	Einheit	VKB rekonstruiert		VKB intakt	
		Prä	Post	Prä	Post
MVC	N	877	867	474	456
CE	%	1,0	1,0	2,0	1,3
Anzahl der motorischer Einheiten	–	31	18	18	26
Min. Rekrutierungsschwelle	%MVC	7	12	2	3
Max. Rekrutierungsschwelle	%MVC	35	38	26	36
Rekrutierungsbereich	%MVC	28	26	24	33
Entladungsrate („firing rate“)	pps	15,7	18,8	18,7	18,2
MUAP-Amplitude	mV	0,23	0,17	0,15	0,13
Bestimmtheitsmaß (R ²)	–	0,981	0,913	0,797	0,810

MVC „maximum voluntary contraction“, CE „compliance error“, MUAP „motor unit action potential“

Maximalkraft und Inhibition des M. quadriceps femoris sowie einbeinige Weitsprungtests zeigten im Seitenvergleich defizitäre Ergebnisse. Dabei erreichte die Mehrzahl der Premier-League-Fußballer bei den einbeinigen Sprungtests mindestens 90 % der Weiten der unverletzten Seite [10]. Dies verdeutlicht die eingeschränkte Aussagefähigkeit der Einbeinsprungtests als RTS-Kriterium [13]. Das Ausmaß der Defizite der Maximalkraftwerte und zentralen Aktivierung hingegen war deutlich größer (Cohen's $d > 2$). Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Premier-League-Fußballer konnten an den in der eigenen Klinik operierten Athleten zum RTS-Zeitpunkt keine relevanten Seitenunterschiede hinsichtlich der Maximalkraft festgestellt werden (LSI $> 89\%$). Ein Grund dafür kann in der Berechnungsgrundlage des LSI (verletzt/unverletzt $\times 100$) liegen [15]. Drei Viertel der Nichtkontaktverletzungen bei männlichen Fußballern sind auf der Schussbeinseite zu erwarten [3]. Wenn auf der verletzten Seite höhere Werte erzielt werden, dann ist der LSI > 100 . Eine Asymmetrie kann dabei allerdings nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Alle in dieser Pilotstudie untersuchten operierten Athleten ($n = 4$) wiesen unabhängig von der Körperseite maximale isometrische Drehmomente der Knieextensoren auf, die über der vorgeschlagenen Untergrenze von 3 Nm/kg [29] lagen.

Die Maximalkraft allein ist ein ungenügender Parameter für die Einschätzung eines erfolgreichen Rehabilitationsergebnisses. Sie liefert nur teilweise Aussagen zur Geschwindigkeit der Kraftentfaltung

(Schnellkraft). Die Schnellkraft entsteht durch die zusätzliche Rekrutierung der schnellen motorischen Einheiten mit möglichst minimaler Verzögerung nach der Rekrutierungsordnung [6–8]. Sie ist somit primär eine koordinativ und nur sekundär eine maximalkraftgestützte Funktion und insbesondere für die primäre, aber auch sekundäre Verletzungsprophylaxe entscheidend. Ergebnisse zur Muskelaktivierung können helfen, die aktuelle neuromuskuläre Bereitschaft zu beurteilen. Zu beachten ist, dass höhere EMG-Amplituden des Oberflächen-EMG-Signals das Ergebnis einer Synchronisation der aktivierbaren motorischen Einheiten anzeigen, die als pathophysiologische Adaptation zu werten ist und nicht die Rückkehr zur physiologischen Funktion anzeigt. Da die funktionelle Teilparese nach einer VKB-Ruptur den schnellen Anteil des Motoneuronenpools betrifft [17], ist schnelligkeits- und schnellkraftorientiertes Training ein gut begründetes Element. Obwohl absolut indiziert, kann ein solches Training bei zu schnellem Belastungsaufbau zu Problemen aufgrund der mangelnden sensomotorischen Koordination, der muskulären Funktion, eingeschränkt durch die Atrophie der funktionell teilparetischen Faseranteile, und der Belastbarkeit der Bindegewebestrukturen führen. An den Mm. vasti konnten Nuccio und Mitarbeiter [26] zeigen, dass die Entladungsraten der motorischen Einheiten auf der Seite der VKB-Rekonstruktion im Vergleich zur nichtverletzten Seite geringer sind und somit ein reduzierter neuraler Antrieb auf der operierten Seite vorliegt. Das

isometrische Belastungsprotokoll führte bei unserem VKB-Patienten im Vergleich zum unverletzten Athleten zu einer deutlichen Reduktion der maximalen Amplitude des Aktionspotenzials bei gleichzeitiger Erhöhung der Entladungsrate der identifizierten motorischen Einheiten. Dies ist als eine pathophysiologische Anpassung, aber auch als Ermüdungszeichen und somit als Merkmal einer inadäquaten Leistungsbereitschaft des SMS zu werten. Für Nachbehandlungsprogramme mit Schnelligkeitsinhalten gibt es bisher keine evidenzbasierten Empfehlungen [4, 11]. McLean und Samorezov [24] belegen, dass die Biomechanik von Landungen durch einen zentralen Ermüdungsmechanismus gesteuert ist. Pincheira et al. [30] zufolge ist eine unerwartete Landung im ermüdeten Zustand ein Worst-case-Szenario für berührungslose bzw. Nichtkontaktverletzungen des VKB.

Limitationen

Die in dieser Arbeit untersuchte Stichprobe ist sehr gering. Die Ergebnisse stellen Beobachtungen an männlichen Leistungssportlern dar und sind daher zunächst Hinweise und z. Z. nur bedingt übertragbar. Eine wesentliche Limitation des Messsystems ist die kleine Erfassungsfläche des verwendeten Sensors. Entsprechend sind Rückschlüsse auf die Aktivierung des gesamten Muskels nicht zulässig. Durch die Konfiguration des verwendeten Erfassungssystems ist es weiterhin nicht möglich, die Leitungsgeschwindigkeit der Aktionspotenziale auf den Muskelfasern zu bestimmen. Somit können keine Aussagen bezüglich möglicher Veränderungen in den Membranen der Muskelfasern gemacht werden, welche dann auch die Vermittlung der Kontraktion, die elektromechanische Ankopplung, betreffen würden.

Fazit für die Praxis

- Eine präzise Analyse der Zusammensetzung des EMG-Mischsignals kann helfen, Rekrutierungsdefizite bei Sportlern nach einer Verletzung des vorderen Kreuzbands (VKB) zu objektivieren.
- Die im erhaltenen Zustand erhobenen elektromyographischen Daten ermöglichen über die einzelnen Charakteristika der motorischen Einheiten eine individuelle

Beurteilung der Funktionskapazität des M. quadriceps femoris.

- Ob ein Sportler vor einer erneuten Belastung neuromuskulär ermüdet ist und aufgrund zu hoher Verletzungsanfälligkeit diese nicht durchführen sollte, kann dadurch besser abgeschätzt werden.
- Verletzungsrisiken in der spätrehabilitativen Phase könnten somit minimiert und der sportliche Wettkampf optimal vorbereitet werden.
- Durch die Verwendung der etablierten Software kann die Auswertungszeit um 90 % reduziert werden.

Korrespondenzadresse

Dr. rer. nat. Eduard Kurz

Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, Medizinische Fakultät, Labor für Experimentelle Orthopädie & Sportmedizin, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Ernst-Grube-Str. 40, 06120 Halle (Saale), Deutschland
eduard.kurz@uk-halle.de

Danksagung. Die Entwicklung der Software wurde mit Unterstützung aus Mitteln der Europäischen Union (EFRE) und der Investitionsbank Sachsen-Anhalt im Rahmen eines Digital Creativity Projektes sowie der IT-Firma Dögel realisiert.

Funding. Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. T. Bartels, R. Schwesig, K. Brehme, M. Pyschik, S. Pröger, W. Laube und E. Kurz geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Die Methoden, Protokolle und Untersuchungen, die in diesem Beitrag vorgestellt werden, wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission durchgeführt und entsprechen den Richtlinien der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung).

Open Access. Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für

die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Ardern CL, Taylor NF, Feller JA et al (2014) Fifty-five per cent return to competitive sport following anterior cruciate ligament reconstruction surgery: an updated systematic review and meta-analysis including aspects of physical functioning and contextual factors. *Br J Sports Med* 48:1543–1552
2. Badawy CR, Jan K, Beck EC et al (2022) Contemporary principles for postoperative rehabilitation and return to sport for athletes undergoing anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthrosc Sports Med Rehabil* 4:e103–e113
3. Brophy R, Silvers HJ, Gonzales T et al (2010) Gender influences: the role of leg dominance in ACL injury among soccer players. *Br J Sports Med* 44:694–697
4. Cavanaugh JT, Powers M (2017) ACL rehabilitation progression: where are we now? *Curr Rev Musculoskelet Med* 10:289–296
5. Gokeler A, Dingenen B, Hewett TE (2022) Rehabilitation and return to sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction: where are we in 2022? *Arthrosc Sports Med Rehabil* 4:e77–e82
6. Henneman E (1957) Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science* 126:1345–1347
7. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO (1965) Excitability and inhibitory of motoneurons of different sizes. *J Neurophysiol* 28:599–620
8. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO (1965) Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol* 28:560–580
9. Hermens HJ, Freriks B, Merletti R et al (1999) SENIAM 8. European recommendations for surface ElectroMyoGraphy. Roessingh Research and Development b.v., Enschede
10. Herrington L, Ghulam H, Comfort P (2021) Quadriceps strength and functional performance after anterior cruciate ligament reconstruction in professional soccer players at time of return to sport. *J Strength Cond Res* 35:769–775
11. Hoover DL, Vanwyke WR, Judge LW (2016) Periodization and physical therapy: bridging the gap between training and rehabilitation. *Phys Ther Sport* 18:1–20
12. Kohn L, Rembeck E, Rauch A (2020) Verletzung des vorderen Kreuzbandes beim Erwachsenen: Diagnostik und Therapie. *Orthopäde* 49:1013–1028
13. Kotsifaki A, Whiteley R, Van Rossom S et al (2022) Single leg hop for distance symmetry masks lower limb biomechanics: time to discuss hop distance as decision criterion for return to sport after ACL reconstruction? *Br J Sports Med* 56:249–256
14. Kurz E, Pröger S, Brehme K et al (2019) Does blood flow restriction alter the motor unit recruitment of the muscles at the knee? *Ger J Exerc Sport Res* 49:S19
15. Kurz E, Schwesig R, Pröger S et al (2022) Foot tapping and unilateral vertical jump performance in athletes after knee surgery: an explorative cross-sectional study. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 14:34
16. Lai CCH, Ardern CL, Feller JA et al (2018) Eighty-three per cent of elite athletes return to preinjury sport after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review with meta-analysis of return to sport rates, graft rupture rates and performance outcomes. *Br J Sports Med* 52:128–138
17. Laube W (2000) Die funktionellen Störungen im sensomotorischen System infolge struktureller Veränderungen im afferenten Teil nach Gelenkverletzungen (ACL) oder degenerativer Erkrankung (TEP des Hüftgelenkes) und der sensomotorische Stereotyp der Hüftgelenkextension bei klinisch gesunden Personen und low back pain Patienten als pathogenetischer Faktor. In: Jerosch J (ed) *Sensomotorik 2000. Aktuelle Aspekte zur Sensorik und Propriozeption in Forschung, Klinik und Praxis*. Prosympos Eigenverlag, Essen, p 9–26
18. Laube W (Hrsg) (2009) *Sensomotorisches System: Physiologisches Detailwissen für Physiotherapeuten*. Thieme, Stuttgart
19. Laube W, Kibittel W, Schreiber W et al (1987) Zur Möglichkeit der neurophysiologischen Charakterisierung des M. quadr. fem. sowie der Diagnostik seines aktuellen funktionellen Zustandes mit Hilfe der Methodenkombination Stimmulationsmyographie/Mechanographie. *Med Sport* 27:72–77
20. Laube W, Weber J, Thue L et al (1998) Persistierende Kraftdefizite nach Hüft-TEP und Kreuzband-OP infolge gestörter Muskelaktivierung. *Kinesiologische Elektromyographie, Teil II. Man Ther* 2:120–129
21. Luc B, Gribble PA, Pietrosimone BG (2014) Osteoarthritis prevalence following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and numbers-needed-to-treat analysis. *J Athl Train* 49:806–819
22. Mall NA, Chalmers PN, Moric M et al (2014) Incidence and trends of anterior cruciate ligament reconstruction in the United States. *Am J Sports Med* 42:2363–2370
23. Marom N, Xiang W, Wolfe I et al (2022) High variability and lack of standardization in the evaluation of return to sport after ACL reconstruction: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 30:1369–1379
24. Mclean SG, Samorezov JE (2009) Fatigue-induced ACL injury risk stems from a degradation in central control. *Med Sci Sports Exerc* 41:1661–1672
25. Mehl J, Otto A, Baldino JB et al (2019) The ACL-deficient knee and the prevalence of meniscus and cartilage lesions: a systematic review and meta-analysis (CRD42017076897). *Arch Orthop Trauma Surg* 139:819–841
26. Nuccio S, Del Vecchio A, Casolo A et al (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
27. Nuccio S, Del Vecchio A, Casolo A et al (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
28. Paterno MV, Rauh MJ, Schmitt LC et al (2014) Incidence of second ACL injuries 2 years after primary ACL reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med* 42:1567–1573
29. Pietrosimone B, Lepley AS, Harkey MS et al (2016) Quadriceps strength predicts self-reported function post-ACL reconstruction. *Med Sci Sports Exerc* 48:1671–1677
30. Pincheira PA, Silvestre R, Armijo-Olivo S et al (2018) Ankle perturbation generates bilateral alteration of knee muscle onset times after unilateral anterior cruciate ligament reconstruction. *PeerJ* 6:e5310

31. Taylor JB, Ford KR, Queen RM et al (2021) Incorporating internal and external training load measurements in clinical decision making after ACL reconstruction: a clinical commentary. *Int J Sports Phys Ther* 16:565–578
32. Yung KK, Ardern CL, Serpiello FR et al (2022) Characteristics of complex systems in sports injury rehabilitation: examples and implications for practice. *Sports Med Open* 8:24

Assessment of the neuromuscular function in professional athletes. Extended diagnostics of the readiness for muscular performance

In recent years significant advances have been made in surgical techniques, postoperative rehabilitation, and the identification of risk factors for a second injury of the anterior cruciate ligament (ACL); however, this has not led to a reduction of the risk for secondary ACL injury. Restoration of the anatomical (surgical reconstruction) and subsequently especially the training-related functional stability should be a fundamental prerequisite for return to sport after ACL reconstruction. The ACL plays an important role in knee proprioception with the consequence of a limited sensorimotor control after injury. Perturbation training represents a major challenge in the late rehabilitation phase after ACL reconstruction. The diagnostics of muscle activation in the course of rehabilitation after ACL reconstruction is therefore of huge importance. With the developed software, the characteristics of the motor units of the knee joint muscles can be quantified in a timely manner. Thus, a possible overload during highly reactive perturbation training during the late rehabilitation phase after ACL reconstruction can be avoided.

Keywords

Knee · Muscle · Rehabilitation · Return to sport · Surface electromyography