

# Unterschiedliche neuromuskuläre Adaptationen bei professionellen Mannschaftssportlern nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion

## Different neuromuscular adaptations in professional team athletes after anterior cruciate ligament reconstruction

OPEN  
ACCESS



Autorinnen/Autoren

Thomas Bartels<sup>1</sup>, Wolfgang Laube<sup>1,2</sup>, Stefan Pröger<sup>1</sup>, Kay Brehme<sup>1</sup>, Stefan Delank<sup>2</sup>, René Schwesig<sup>2</sup>, Eduard Kurz<sup>2</sup>

### Institute

- 1 Zentrum für Gelenkchirurgie, MVZ Sportklinik Halle GmbH, Halle (Saale), Germany
- 2 Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Halle (Saale), Germany

### Schlüsselwörter

Elektromyographie, dEMG, Zurück zum Sport, Profisport

### Keywords

electromyography, dEMG, return to sports, professional sport

eingereicht 19.06.2025

akzeptiert nach Revision 23.01.2026

Artikel online veröffentlicht 2026

### Bibliografie

Phys Med Rehab Kuror

DOI 10.1055/a-2796-0372

ISSN 0940-6689

© 2026. The Author(s).

This is an open access article published by Thieme under the terms of the Creative Commons Attribution License, permitting unrestricted use, distribution, and reproduction so long as the original work is properly cited. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Georg Thieme Verlag KG, Oswald-Hesse-Straße 50, 70469 Stuttgart, Germany

### Korrespondenzadresse

Dr. Eduard Kurz

Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Ernst-Grube-Str. 40  
06120 Halle (Saale)  
Germany  
[eduard.kurz@uk-halle.de](mailto:eduard.kurz@uk-halle.de)

### ZUSAMMENFASSUNG

**Hintergrund** Nach der erfolgreichen chirurgischen Wiederherstellung der mechanischen Stabilität bleiben bei Sportlern nach Ruptur des vorderen Kreuzbandes neuromuskuläre Defizite bestehen. Ziel dieser Studie war die vergleichende elektrophysiologische Bewertung knieführender Muskeln zum Zeitpunkt der Rückkehr in das Mannschaftstraining.

**Materialien und Methoden** Die Muskelaktivität des M. vastus medialis und lateralis wurde im Median 264 Tage nach Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes erfasst. Die Signale wurden in Aktionspotenziale einzelner motorischer Einheiten zerlegt und in Abhängigkeit des objektiven Leistungsvermögens der 30 professionellen Spisportler in Terzilgruppen (G1, G2, G3) miteinander verglichen.

**Ergebnisse** 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 motorischen Einheiten von G1 und G2 waren geringer als von G3 ( $p < 0,05$ ). Die mittleren Amplituden der Aktionspotenziale von G1 waren höher als von G3 ( $p = 0,003$ ).

**Schlussfolgerung** Sportler mit funktionellen Defiziten kompensieren mit erhöhten Entladungsraten (zentraler Marker) der motorischen Einheiten, während leistungsfähigere Athleten höhere Amplituden der Aktionspotenziale (peripherer Marker) der motorischen Einheiten aufweisen. Neuromuskuläre Adaptationen infolge der Strukturzerstörung des vorderen Kreuzbandes finden leistungsabhängig auf unterschiedlichen Ebenen des sensomotorischen Systems statt.

### ABSTRACT

**Objectives** After successful surgical restoration of mechanical stability, neuromuscular deficits remain in athletes after an anterior cruciate ligament tear. This study aimed to compare electrophysiological outcomes of knee muscles upon return to team training.

**Materials and Methods** Muscle activity of the vastus medialis and lateralis muscles was recorded at a median of 264 days

after anterior cruciate ligament reconstruction. The signals were decomposed into action potential trains of individual motor units and compared in tertile groups (G1, G2, G3) depending on the objective performance of the 30 professional athletes.

**Results** The maximum knee extension torques differed significantly (G1:  $5.01 \pm 0.60$  Nm/kg; G2:  $4.18 \pm 0.60$ ; G3:  $3.60 \pm 0.61$ ;  $p < 0.001$ ) between the tertile groups. The mean discharge rates of the motor unit of G1 and G2 were lower than those of

G3 ( $p < 0.05$ ). The mean action potential amplitudes of G1 were higher than those of G3 ( $p = 0.003$ ).

**Conclusions** Athletes with functional deficits compensate with increased discharge rates (central marker) of the motor unit, while athletes with better performance showed higher action potential amplitudes (peripheral marker) of the motor unit. Neuromuscular adaptations resulting from structural anterior cruciate ligament destruction occur at different levels of the sensorimotor system depending on athletes' performance capacity.

## Einleitung

Verletzungen der Gelenkbänder, im Speziellen des vorderen Kreuzbandes (VKB), beeinträchtigen das neuro-mechanische System und führen zu langen Ausfallzeiten im professionellen Mannschaftssport [1, 2]. Eine besondere Herausforderung innerhalb der Nachbehandlung stellen die sukzessive Aufbelastung der Struktur sowie die optimale Funktionswiederherstellung dar.

Die Bemühungen in den letzten Jahren einheitliche Standardtestverfahren (Muskelkrafttests, Sprungtests, Selbstbeurteilungsbögen) für Return-to-Sport (RTS)-Entscheidungen zu kombinieren, scheitern derzeit an der fehlenden Validität der RTS-Kriterien [3] und einem Konsens bezüglich der Mindestanforderungen. Die Freigabe für das uneingeschränkte Mannschaftstraining ist dabei ein wesentlicher Meilenstein auf dem Weg zurück in den Leistungssport. Eine erfolgreiche Rückkehr in den Sport ist dann erreicht, wenn die Athleten auf ihr ursprüngliches Sportlevel zurückkehren, sie weder mentale noch physische Leistungsdefizite aufweisen und keine erneute Verletzung des VKB (Transplantatruptur oder VKB-Ruptur der kontralateralen Seite) erleiden.

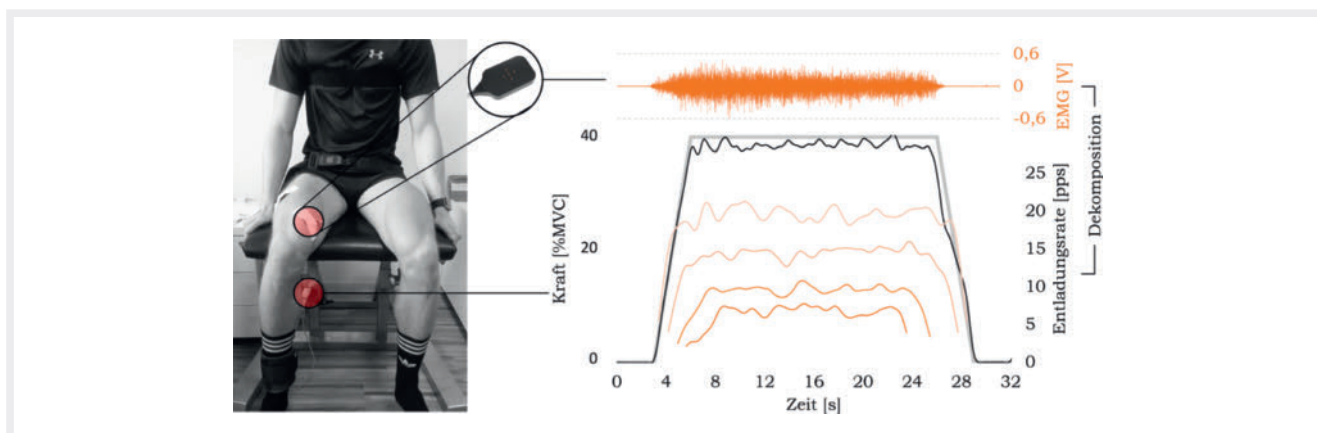
Nach der erfolgreichen chirurgischen Wiederherstellung der mechanischen Stabilität bleiben bei den Athleten neuromuskuläre Defizite auf unterschiedlichen Ebenen bestehen [4]. Das zentrale Nervensystem reagiert auf die zumeist bilateral nachweisbaren Funktionsdefizite mit einer Reorganisation im Sinne einer selektiven kompensatorischen Optimierung [5]. Damit lässt sich ein Teil der interindividuellen Variabilität zwischen den Patienten erklären.

Eine Strategie ist daher, den neuromuskulären Status nach einer VKB-Rekonstruktion mittels effektiverer Interventionen zu verbessern. Hierbei scheinen neurokognitive Aufgaben ein probates Mittel zur Modifikation der kortikalen und subkortikalen Defizite zu sein. In Kombination mit funktionellen Tests können dann RTS-Entscheidungen optimiert werden [6]. Eine zusätzliche Möglichkeit, die Sicherheit der Rückkehr in den Sport nach der Rehabilitation zu erhöhen und möglicherweise den inakzeptabel hohen Reverletzungsraten [7] zu begegnen, stellt eine differenziertere elektrophysiologische Diagnostik dar. Nuccio und Kollegen [8] konnten in diesem Zusammenhang belegen, dass das Kraftdefizit der Kniestreckernach der Rekonstruktion des VKB mit einem reduzierten neuralen Antrieb, vor allem des M. vastus lateralis, in Zusammenhang steht. Der neurale Antrieb stellt den synaptischen Input auf den Motoneuronenpool dar, wodurch die motorischen Einheiten (ME) mit ihren spezifischen Entladungsraten (zentraler Marker) rekrutiert werden. Im Seitenvergleich waren die mittleren Entla-

dungsraten der ME motorischen Einheit der Vasti-Muskeln auf der Seite der VKB-Rekonstruktion geringer [8]. Somit scheinen die Motoneurone der Vasti-Muskeln nach einer VKB-Rekonstruktion nicht in der Lage, die Entladungsrate hochzuregulieren. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass auf der Seite der VKB-Rekonstruktion die ME des M. vastus medialis bei geringeren Rekrutierungsschwellen höhere AP-Amplituden aufweisen [9]. Da die zentralen (Antrieb der Motoneurone) und peripheren Funktionsmerkmale (AP-Amplituden) der Muskelsteuerung für das Ausmaß der Muskelaktivität verantwortlich sind, ist deren Wechselbeziehung von besonderer Bedeutung für die differenzierte Beurteilung individueller Kompensationen nach einer Verletzung oder Operation.

Trotz bekannter und kritisch diskutierter Limitationen des interindividuellen Seitenvergleichs unilateral erbrachter Leistungen der Extremitäten (limb symmetry index, LSI) hat sich das vergleichende Verfahren zur Statusbeurteilung nach Verletzungen und Operationen weitestgehend etabliert. Ein wesentlicher Grund hierfür ist der Mangel an Alternativen im Fall fehlender Statuswerte zu den Zeitpunkten vor der Verletzung (Pre-Injury-Wert [10]) oder vor der operativen Intervention [11]. Folglich können nur bedingt Aussagen darüber getroffen werden, inwieweit die verletzte Seite bereits initial die schwächere bzw. geringer leistungsfähigere Seite war. Überdies konnten Welling und Kollegen [12] an Mannschaftssportlern zeigen, dass trotz der erreichten Vorgaben von mindestens 90 % LSI in den Hop Tests zehn Monate nach der VKB-Rekonstruktion nur 72 % der Athleten zwei Jahre nach der VKB-Rekonstruktion auf ihrem ursprünglichen Sportlevel aktiv waren. Eine Analyse der absoluten Sprungergebnisse ergab, dass die Athleten, die erfolgreich zurückgekehrt waren, eine höhere Leistungsfähigkeit aufwiesen [12]. Daraus schlussfolgerten die Autoren, dass die absolute athletische Leistung für eine erfolgreiche Rückkehr in den Mannschaftssport einen wesentlichen Faktor darstellt.

Deshalb war es das Ziel dieser Studie, zentrale und periphere Kennwerte knieführender Muskeln in Abhängigkeit vom objektiven Leistungsvermögen bei professionellen Spisportlern nach einer Primärruptur des VKB und zum Zeitpunkt der Rückkehr in das Mannschaftstraining auf der operierten Seite vergleichend zu bewerten. Ausgehend von der Studienlage kann hypothetisch davon ausgegangen werden, dass Spisportler mit einer höheren Leistungsfähigkeit in den absolvierten funktionellen Tests höhere Entladungsraten der Motoneurone aufweisen als Athleten mit geringeren Leistungswerten.



► **Abb. 1** Darstellung des Messplatzes mit der Kraft- und EMG-Sensorik sowie dem Profil der Datenerfassung mit einer exemplarischen Dekomposition des zentralen Anteils des EMG-Signals (geglättete Kurven der Entladungsraten von vier motorischen Einheiten). Quelle: Bartels et al. Beurteilung des neuromuskulären Funktionszustands bei Berufssportlern. Arthroscopie 35, 293–299 (2022). DOI: 10.1007/s00142-022-00548-0, Copyright 2022 by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), Link zum Artikel (<https://doi.org/10.1007/s00142-022-00548-0>).

## Methode

### Studiendesign und Rekrutierung

In dieser explorativen Querschnittstudie wurden professionelle Spisportler untersucht. Die Rekrutierung der Patienten erfolgte fortlaufend nach Zuweisung durch die Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG) in den Jahren 2021 bis 2023. Die Studienprotokolle wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission (Bearbeitungsnummern: 2016–144 und 2016–145) durchgeführt.

### Ein- und Ausschlusskriterien

In die Studie wurden männliche Spisportler mit einem Tegner Aktivitätslevel von mindestens sieben eingeschlossen. Die Sportler wiesen eine unilaterale Primärruptur des VKB auf, die operativ versorgt wurde. Ausgeschlossen wurden Sportler aus Individualsportarten und mit einem geringeren Tegner Aktivitätslevel als sieben. Sportler mit konservativ versorgter VKB-Ruptur sowie Sportler nach wiederholter Ruptur des VKB oder Sportler mit einer Multiligamentverletzung wurden ebenfalls ausgeschlossen.

### Elektromyographie (EMG)

Nach der Bestimmung der Maximalkraft (MVC) wurde die Muskelaktivität einer isometrischen Kontraktion bei einer Intensität von 40 % MVC an der Hautoberfläche über dem M. vastus medialis (VM) und lateralis (VL) der operierten Seite mit Hilfe von 5-Pin-Sensoren der Firma Delsys erfasst (Abtastrate: 20 kHz). Anschließend erfolgte mittels etablierter Algorithmen [13] die Zerlegung (Dekomposition) in Aktionspotenziale (AP) einzelner motorischer Einheiten (ME) (► **Abb. 1**).

Die Entladungsraten der ME stellen einen zentralen Marker der Muskelaktivierung dar und können nicht aus Outcomes herkömmlicher EMG-Mischsignale abgeleitet werden. Die AP-Amplituden der ME (Summenaktionspotenziale der ME, MUAP) hingegen repräsentieren einen peripheren Marker der Struktur der ME. Somit spiegelt das MUAP die Anzahl der zu dem Motoneuron gehörenden Muskelfasern wider und beschreibt die Größe der ME.

### Leistungstests und Leistungsbewertung (Subgruppenzuordnung)

Neben der MVC als Leistungsindikator wurden folgende Funktionstests zur Bewertung der Leistungsfähigkeit durchgeführt: Y-Balance Test, Forward Hop Test, Side Hop Test, Drop Vertical Jump und der vertikale Foot Tapping Test. Die Ergebnisse dieser fünf Funktionstests dienten zur Berechnung des Performance Score (PS [14]). Hierfür wurden die z-standardisierten Testergebnisse der operierten Seite aufsummiert, um alle eingeschlossenen Sportler Terzilgruppen zuzuordnen.

### Statistik

Aufgrund des explorativen Charakters der Studie wurde keine a-priori Fallzahlplanung durchgeführt. Die Daten wurden mit Hilfe des Shapiro-Wilk Tests auf Normalverteilung geprüft. Unterschiede zwischen den Terzilgruppen wurden mit univariaten Varianzanalysen geprüft. Die Effekte der leistungsabhängigen Gruppenzuordnung auf die mittleren Entladungsraten sowie die Amplituden der Aktionspotenziale der motorischen Einheiten (MUAP) wurden mittels Varianzanalysen mit Messwiederholung (Faktor Muskel) geprüft. Als Post Hoc Test wurde Fisher's LSD Test verwendet. Die Inferenzstatistik wurde mit den individuellen Mittelwerten der ME (10 Werte je Gruppe) gerechnet. Dadurch wurden die Effekte der Lage einzelner ME in Bezug zur Hautoberfläche reduziert [15], die Unabhängigkeit der Beobachtungen sichergestellt und der Fehler 1. Art reduziert [16].

## Ergebnisse

### Kollektiv

Es konnten 30 männliche Leistungssportler (Tegner 7/9: 6/24) im Alter zwischen 15 und 36 Jahren eingeschlossen werden (► **Tab. 1**). Die Untersuchungen fanden im Median 264 (95 % CI: 237–329) Tage nach der Rekonstruktionschirurgie (Transplantat Semitendinosus-Sehne/

► **Tab. 1** Demografische Daten mit den Leistungs- und Rekrutierungsergebnissen der Terzilgruppen. Die Werte sind als Mittelwert (Standardabweichung) angegeben.

|                          | Gruppe 1, n = 10 | Gruppe 2, n = 10 | Gruppe 3, n = 10 | ANOVA               |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Alter (Jahre)            | 21,8 (5,4)       | 26,8 (7,0)       | 25,7 (6,1)       | p = 0,18            |
| Größe (cm)               | 182 (6)          | 183 (7)          | 187 (6)          | p = 0,28            |
| Gewicht (kg)             | 77 (7)           | 84 (11)          | 92 (10)          | <b>p &lt; 0,01</b>  |
| BMI (kg/m <sup>2</sup> ) | 23,2 (1,2)       | 24,9 (1,9)       | 26,4 (2,4)       | <b>p &lt; 0,01</b>  |
| Monate post OP           | 8,7 (1,5)        | 9,0 (2,3)        | 10,6 (6,7)       | p = 0,57            |
| Performance Score ( )    | 4,3 (2,1)        | -0,6 (0,9)       | -3,8 (2,0)       | –                   |
| MVC (Nm/kg)              | 5,01 (0,60)      | 4,18 (0,60)      | 3,60 (0,61)      | <b>p &lt; 0,001</b> |
| Anzahl der ME, VM        | 24 (6)           | 28 (10)          | 23 (7)           | p = 0,41            |
| Anzahl der ME, VL        | 28 (7)           | 32 (10)          | 30 (5)           | p = 0,48            |

BMI, Body Mass Index (Körpermasseindex); MVC, Maximum Voluntary Contraction (maximale Willkürkontraktion); ME, motorische Einheit; VM, Musculus vastus medialis; VL, Musculus vastus lateralis

Patella-Sehne: 28/2) zum Zeitpunkt der Rückkehr in das Mannschaftstraining statt. Der Großteil (n = 23) der untersuchten Leistungssportler waren Fußballer (Handball: n = 6, Eishockey: n = 1). Mehr als die Hälfte (19) der Spieler erlitten die Verletzungen ohne gegnerische Einwirkung. Von den übrigen Verletzungen kamen vier (13 %) durch direkten und sieben (23 %) durch indirekten gegnerischen Kontakt zustande. Die demografischen Daten, die maximalen Kniestreckmomente und die PS sowie die Anzahl der identifizierten ME der in Terzilgruppen zugeordneten Leistungssportler sind der ► **Tab. 1** zu entnehmen. Insgesamt konnten in den Signalen 1638 (VM: 748, VL: 890) ME identifiziert werden.

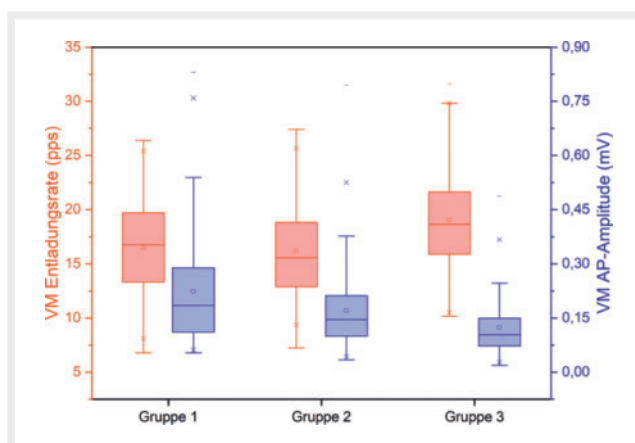
### Entladungsraten der motorischen Einheiten

Es konnte keine Interaktion ( $p = 0,32$ ;  $\eta^2 = 0,08$ ) zwischen den mittleren Entladungsraten der ME beider Muskeln und der Gruppenzugehörigkeit belegt werden. Beide Haupteffekte waren signifikant (Gruppe:  $p = 0,02$ ; Muskel:  $p < 0,05$ ; ► **Abb. 2**). Die Post Hoc Tests ergaben signifikant geringere mittlere Entladungsraten der ME der Gruppen 1 ( $p = 0,02$ ) und 2 ( $p = 0,01$ ) verglichen mit der Gruppe 3.

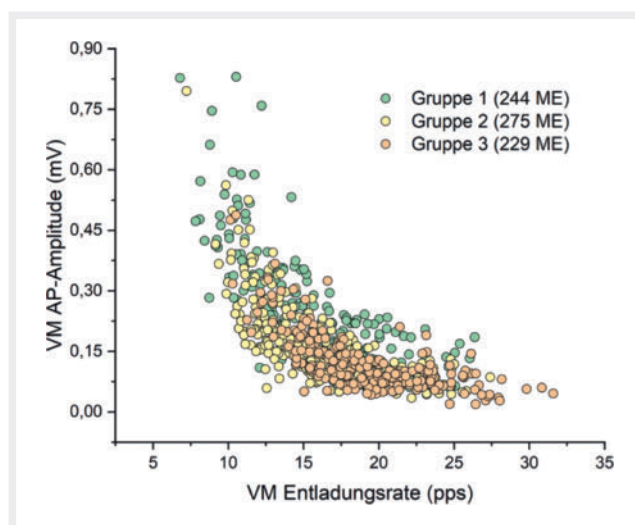
### Amplitude der Aktionspotenziale der motorischen Einheiten

Es konnte keine Interaktion ( $p = 0,16$ ;  $\eta^2 = 0,13$ ) zwischen den Amplituden der Aktionspotenziale der motorischen Einheiten beider Muskeln und der Gruppenzugehörigkeit belegt werden. Beide Haupteffekte waren signifikant (Gruppe:  $p = 0,01$ ; Muskel:  $p < 0,001$ ; ► **Abb. 2**). Die Post Hoc Tests belegten niedrigere Amplituden der Aktionspotenziale der Gruppe 3 verglichen mit den Gruppen 1 ( $p = 0,003$ ) und 2 ( $p = 0,09$ ).

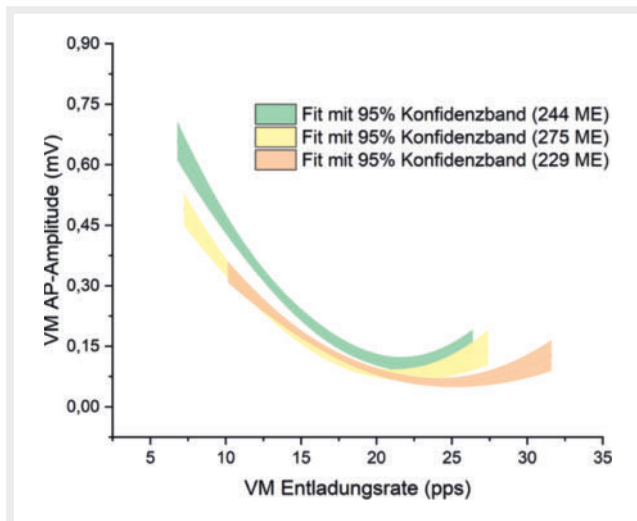
In der ► **Abb. 3** sind die Einzelwerte aller identifizierten ME des VM der jeweiligen Gruppen dargestellt. Die Ergebnisse zwischen den Terzilgruppen werden durch Polynome zweiten Grades verdeutlicht (► **Abb. 4**).



► **Abb. 2** Entladungsraten und Amplituden der Aktionspotenziale (AP) der identifizierten motorischen Einheiten des M. vastus medialis (VM) als Durchschnittswerte der Einzelpersonen.



► **Abb. 3** Einzelwerte der zentralen (Entladungsraten) und peripheren (Amplituden der Aktionspotenziale, AP) Kennwerte aller identifizierten motorischen Einheiten des M. vastus medialis (VM).



► **Abb. 4** Polynome zweiten Grades der Entladungsraten mit den Amplituden der Aktionspotenziale (AP) aller identifizierten motorischen Einheiten (ME) des M. vastus medialis (VM) mit dem zugehörigen 95% Konfidenzband dargestellt.

## Diskussion

### Abriss der wesentlichen Ergebnisse

In dieser Querschnittstudie wurden zentrale und periphere Aktivitätscharakteristika der Vasti-Muskeln von Leistungssportlern nach VKB-Rekonstruktion drei verschiedener Gruppen miteinander verglichen. Die Gruppe, die zum Zeitpunkt der Rückkehr in das Mannschaftstraining eine höhere Leistungsfähigkeit in den Funktionstests erzielte, wies höhere AP-Amplituden der ME auf. Demgegenüber waren bei Sportlern mit funktionellen Defiziten höhere Entladungsraten der ME zu verzeichnen. Diese Unterschiede waren am VM ausgeprägter als am VL. Dies lässt darauf schließen, dass neuromuskuläre Kompensationen sich in differenten zentralen und peripheren Adaptationen infolge der Strukturzerstörung des VKB (Verlust hoch wichtiger Mechanosensoren) widerspiegeln.

### Ist das untersuchte Kollektiv repräsentativ?

Das Aktivitätsniveau des untersuchten Kollektivs ist grundsätzlich vergleichbar [8, 9] mit anderen untersuchten Sportlern nach VKB-Rekonstruktion, allerdings bei unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten. Die Qualität der Zerlegung des Mischsignals in vorhandene ME (Anzahl) beider Muskeln kann als hoch eingeschätzt werden und war vergleichbar zwischen den untersuchten Gruppen sowie mit denen trainierter unverletzter Sportler ( $n = 10$  [17]). Die deutlich höhere Anzahl identifizierter ME als in der Untersuchung von Sherman et al. [9] lässt sich mit der Kontraktionsintensität (70 und 100% MVC) erklären. Je höher die Kontraktionsintensität, desto eingeschränkter und ungenauer die Ergebnisse der Dekomposition (Zerlegung des Mischsignals in einzelne ME). Die Detektion einer repräsentativen Anzahl vorhandener ME nach einer VKB-Rekonstruktion spricht gegen eine protektive arthrogene Muskelinhibition, durch die die Rekonditionierung des Kniestreckapparates beeinträchtigt sein kann [18]. Aufgrund der zu erwartenden Muskelatrophie des Quadriceps nach einer VKB-Rekonstruktion [19] müssen höhere

Kniestreckkräfte über Anpassungen des neuralen Antriebs realisiert werden [20]. Dies sollte bei Mannschaftssportlern mit maximalen Kniestreckmomenten von  $> 3$  Nm/kg zu erwarten sein [21]. In unserem Kollektiv erreichte nur ein Sportler (2,66 Nm/kg) diese Untergrenze nicht. Die Rehabilitation des untersuchten Kollektivs dauerte im Median 59 Tage länger als der Profifußballer der UEFA-Studie [1] und war jedoch vergleichbar mit den Angaben der Fußballspieler auf nationaler Ebene [2].

### Wie lassen sich Anpassungen der Entladungsraten des Motoneurons erklären?

Die Erzeugung und Kontrolle der Kontraktionskraft eines Muskels wird sowohl über die Variation der Entladungsrate des Motoneurons bereits rekrutierter ME als auch von der Rekrutierung (Zuschalten) zusätzlicher ME realisiert. Die Beeinflussung der Entladungsraten bereits rekrutierter ME erfolgt mit Hilfe erregender und hemmender synaptischer Informationen an den Motoneuronpool aus absteigenden supraspinalen Bahnen, spinalen Interneuronen sowie Muskelafferenzen. Bei einem Training oder Re-Konditionieren der Muskulatur finden die Anpassungen zunächst auf neuronaler Ebene statt bevor morphologische Adaptationen zu erwarten sind [22]. Experimentell konnte das durch einen Re-Test sieben Tage nach der Initialmessung am VL belegt werden. Die MVC sowie die durchschnittlichen Entladungsraten der ME während der MVC waren im zweiten Test erhöht ( $n = 15$  [23]). Durch ein 8-wöchiges isometrisches unilaterales ( $n = 10$  [24]) oder dynamisches hoch-intensives Krafttraining ( $n = 16$  [25]) hingegen blieben die mittlere Entladungsraten des VL bei jungen Männern unverändert. Daher konnte angenommen werden, dass der gemessene Kraftzuwachs nach zwei Monaten aufgrund der Hypertrophie von Typ-II Muskelfasern höherschwelliger ME zustande gekommen ist. Sterczala et al. [25] führten derartige Untersuchungen mit einer Kontraktionsintensität von 70% MVC durch. Es könnten höhere Entladungsraten und somit ein verstärkter neuraler Antrieb die fehlende Rekrutierung größerer ME kompensieren und somit die notwendige Kraftkontrolle sicherstellen. Dies wird gestützt durch die deutlich geringeren maximalen Streckkräfte der in den Funktionstests leistungsschwächeren Athleten (Gruppe 3). Geringere Entladungsraten der ME des VL auf der operierten Seite konnten mit Kraftdefiziten bei Fußballspielern im Mittel 8 Monate nach VKB-Rekonstruktion ( $n = 9$  [8]) assoziiert werden. Am hier untersuchten Kollektiv konnte gezeigt werden, dass Sportler nach einer VKB-Ruptur und Rekonstruktion in der Lage sind, die Entladungsraten knieführender Muskeln hochzuregulieren. Dies scheint allerdings insbesondere auf den VM und vor allem die in den Funktionstests als leistungsschwächer identifizierten Sportler (Gruppe 3) zuzutreffen. Niedrigere Entladungsraten der ME (Gruppen 1 und 2) lassen sich zum einen mit der Rekrutierung zusätzlicher ME erklären. Andererseits konnte gezeigt werden, dass niedrigere Entladungsraten der ME mit einer geringeren Kniestreckkraft im Alter assoziiert sind [26]. Dies kann jedoch bei dem hier untersuchten Kollektiv ausgeschlossen werden. Ferner konnten die Entladungsraten der ME mit metabolischen [27] und mechanischen [28] Eigenschaften des kontraktiven Apparates knieführender Muskeln in Zusammenhang gebracht werden. Demnach könnten Defizite des kontraktiven Apparates durch eine Erhöhung der Entladungsraten ausgeglichen werden (Gruppe 3).

## Welche Faktoren tragen zur Amplitude der Aktionspotenziale der motorischen Einheiten bei?

Die an der Hautoberfläche gemessenen AP-Amplituden werden unter anderem von den im Erfassungsgebiet der Elektrode aktivierten Muskelfasern und deren Querschnitt determiniert. Demnach führen eine höhere Anzahl und größere Querschnitte aktivierter Muskelfasern zu höheren AP-Amplituden. Des Weiteren haben die Muskelfasertypologie sowie die Synchronisation der Entladungsraten unterschiedlicher ME einen Einfluss auf die gemessenen AP-Amplituden. Die Muskelfasern schneller kontrahierender ME sind im Vergleich zu langsameren in der Lage, höhere AP-Amplituden [29] zu erzeugen. Dabei weisen schneller kontrahierende ME eine höhere Anzahl innervierter Muskelfasern auf [30] und können somit auch mit ähnlichen Faserquerschnitten höhere Kräfte erzeugen. Das Ausmaß der Synchronisation verschiedener ME kann durch unterschiedliche Trainingsinterventionen gesteigert werden [31]. Da alle untersuchten Athleten Berufssportler waren und die Tests im Anschluss an die Rehabilitation stattfanden, kann angenommen werden, dass der Grad der Synchronisation der ME zwischen den Athleten vergleichbar war. Daher könnten vor allem eine höhere Anzahl innervierter Muskelfasern (Innervationsverhältnis) die höheren AP-Amplituden der ME (vor allem der Gruppe 1) erklären.

Durch ein 8-wöchiges hoch-intensives Krafttraining mit männlichen Freizeitsportlern ( $n = 10$ ) konnte gezeigt werden, dass die Querschnittsänderung des VL mit höheren AP-Amplituden der ME erklärt werden konnte [32]. Die angegebenen Maximalwerte der gemessenen AP-Amplituden ( $0,154\text{--}0,786\text{ mV}$ ) sowie der Wertebereich der MVC-Werte ( $599\text{--}970\text{ N}$ ) waren mit denen unserer leistungsstärksten Terzilgruppe (Gruppe 1;  $0,049\text{--}0,628\text{ mV}$ ;  $669\text{--}1024\text{ N}$ ) vergleichbar. Diese Ergebnisse belegen die Validität der nicht-invasiven Technologie, indirekt Rückschlüsse auf die Muskelmorphologie zu ziehen. Somit kann angenommen werden, dass den höheren AP-Amplituden der Gruppe 1 auch größere Muskelfaserquerschnitte zu Grunde gelegen haben und unterstreichen damit die Trainingsanpassungen sowie die erfolgreiche Rehabilitation. Die hier vorgestellten Ergebnisse von Profisportlern stimmen nicht mit den Resultaten anderer Arbeitsgruppen überein, die geringere AP-Amplituden der knieführenden Muskeln berichten und dies auf eine persistierende arthrogene Muskelinhibition zurückführen [33]. Eine weitere mögliche Erklärung für die erhöhten AP-Amplituden (Gruppe 1) ist die Muskelfasertypverschiebung nach einer traumatischen Gelenkverletzung, da wahrscheinlich schnelle Muskelfasern von langsamen Motoneuronen übernommen worden sind. Neben einer vermehrten Ansammlung von Bindegewebe im Muskel ( $n = 10$  [34]) konnte die Arbeitsgruppe um Noehren ( $n = 10$  [35]) eine mittlere Reduktion der Anzahl vor allem der Typ-IIa zugunsten der Typ-IIa/x Fasern nach der VKB-Rekonstruktionschirurgie und Rehabilitation belegen. Diese Fasertransformation der Typ-IIa zu Typ-IIa/x Muskelfasern führten sie auf die persistierende Dysfunktion der Gamma-Schleife nach VKB-Rekonstruktion ( $n = 18$  [36]) zurück. Eine Verschiebung der Muskelfasern zugunsten der Typ-IIx Fasern konnte bereits als Anpassung an eine Trainingspause [37] oder Inaktivität [38] dokumentiert werden. Demnach scheint es den Athleten der Gruppe 1 gelungen zu sein, die vermutlich aufgetretene Muskelfasertypverschiebung während der Rehabilitation wieder zurück zur Typ-IIa Muskelfaser mit einem grö-

ßeren Faserquerschnitt [39, 40] zu transformieren. Damit ließen sich u.U. die höheren AP-Amplituden (Gruppe 1) erklären. Technisch gesehen kann ein Effekt des subkutanen Gewebes der Sportler der Gruppe 3 nicht ausgeschlossen werden. Das Unterhautfettgewebe wirkt auf die elektrischen Signale wie ein Tiefpassfilter und dämpft somit deren Amplitude.

Obwohl sich die in den Terzilgruppen untersuchten Mannschaftssportler hinsichtlich der Dauer der Rehabilitation nach der VKB-Operation nicht unterschieden, konnten in den dekompositionierten EMG-Signalen teilweise deutliche Unterschiede auf verschiedenen Ebenen der neuromuskulären Funktion belegt werden. So, als wären die Sportler in unterschiedlichen Stadien des Rehabilitationsprozesses. Insgesamt stützen diese Untersuchungsergebnisse einen individualisierten und funktions-orientierten Ansatz der Rehabilitation nach VKB-Verletzung und Rekonstruktion. Die Erfassung vielfältiger Funktionsmarker scheint vor allem bei Leistungssportlern sinnvoll und notwendig, um den aktuellen Leistungszustand zu beurteilen und eine optimale Funktionswiederherstellung zum Zeitpunkt der Rückkehr in den Sport zu garantieren.

## Schlussfolgerung

Sportler mit funktionellen Defiziten kompensieren mit erhöhten Entladungsraten (zentraler Marker) der ME, während leistungsfähigere Athleten höhere AP-Amplituden (peripherer Marker) der ME aufweisen. Neuromuskuläre Adaptationen infolge der Strukturzerstörung des VKB finden leistungsabhängig auf unterschiedlichen Ebenen des sensomotorischen Systems statt.

## Limitationen

Das untersuchte Kollektiv bestand ausschließlich aus professionellen männlichen Sportsportlern. Inwieweit sich diese Resultate auf Freizeit- oder Amateursportler übertragen lassen, bleibt ebenso unklar, wie der Transfer auf weibliche Athleten. Des Weiteren wurden die eingeschlossenen Sportler in unterschiedlichen Zentren operiert und rehabilitiert. Entsprechend können zu den Nachbehandlungsprotokollen keine Aussagen gemacht werden. Die Muskelaktivität wurde während einer submaximalen Kontraktionsintensität (40 %) und unter isometrischen Bedingungen erfasst. Folglich ist die Übertragbarkeit auf höhere Intensitäten und dynamische Aufgaben eingeschränkt. Weiterhin ist bei Vergleichen mit Ergebnissen anderer Messsysteme und EMG-Signal Dekompositionsverfahren äußerste Vorsicht geboten.

## Interessenkonflikt

Die Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

## Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Dr. Steven Lindley (Delsys Europe) für seine kontinuierliche Unterstützung über die Jahre.

- [1] Ekstrand J, Krutsch W, Spreco A et al. Time before return to play for the most common injuries in professional football: a 16-year follow-up of the UEFA Elite Club Injury Study. *Br J Sports Med* 2020; 54: 421–426. DOI: 10.1136/bjsports-2019-100666
- [2] Szymiski D, Achenbach L, Weber J et al. 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* 2023; 31: 133–141. DOI: 10.1007/s00167-022-07062-8
- [3] Gokeler A, Dingenen B, Hewett TE. Rehabilitation and return to sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction: Where are we in 2022? *Arthrosc Sports Med Rehabil* 2022; 4: e77–e82. DOI: 10.1016/j.asmr.2021.10.025
- [4] Rush JL, Glaviano NR, Norte GE. Assessment of quadriceps corticomotor and spinal-reflexive excitability in individuals with a history of anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 2021; 51: 961–990. DOI: 10.1007/s40279-020-01403-8
- [5] Baltes PB, Baltes MM. Psychological perspectives on successful aging: The model of selective optimization with compensation. In: Baltes PB, Baltes MM, Hrsg. *Successful aging: Perspectives from the behavioral sciences*. New York: Cambridge University Press; 1990: 1–34
- [6] Grooms DR, Chaput M, Simon JE et al. Combining neurocognitive and functional tests to improve return-to-sport decisions following ACL reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 2023; 53: 415–419. DOI: 10.2519/jospt.2023.11489
- [7] King E, Richter C, Jackson M et al. Factors influencing return to play and second anterior cruciate ligament injury rates in level 1 athletes after primary anterior cruciate ligament reconstruction: 2-year follow-up on 1432 reconstructions at a single center. *Am J Sports Med* 2020; 48: 812–824. DOI: 10.1177/0363546519900170
- [8] Nuccio S, Del Vecchio A, Casolo A et al. Deficit in knee extension strength following anterior cruciate ligament reconstruction is explained by a reduced neural drive to the vasti muscles. *J Physiol* 2021; 599: 5103–5120. DOI: 10.1113/JP282014
- [9] Sherman DA, Rush J, Stock MS et al. Neural drive and motor unit characteristics after anterior cruciate ligament reconstruction: implications for quadriceps weakness. *PeerJ* 2023; 11: e16261. DOI: 10.7717/peerj.16261
- [10] Maestroni L, Turner A, Papadopoulos K et al. Comparison of strength and power characteristics before ACL rupture and at the end of rehabilitation before return to sport in professional soccer players. *Sports Health* 2023; 15: 814–823. DOI: 10.1177/19417381231171566
- [11] Wellsandt E, Failla MJ, Snyder-Mackler L. Limb symmetry indexes can overestimate knee function after anterior cruciate ligament injury. *J Orthop Sports Phys Ther* 2017; 47: 334–338. DOI: 10.2519/jospt.2017.7285
- [12] Welling W, Benjaminse A, Lemmink K et al. Passing return to sports tests after ACL reconstruction is associated with greater likelihood for return to sport but fail to identify second injury risk. *Knee* 2020; 27: 949–957. DOI: 10.1016/j.knee.2020.03.007
- [13] Nawab SH, Chang SS, De Luca CJ. High-yield decomposition of surface EMG signals. *Clin Neurophysiol* 2010; 121: 1602–1615. DOI: 10.1016/j.clinph.2009.11.092
- [14] Kurz E, Schwesig R, Röger S et al. Foot tapping and unilateral vertical jump performance in athletes after knee surgery: an explorative cross-sectional study. *BMC Sports Sci Med Rehabil* 2022; 14: 34. DOI: 10.1186/s13102-022-00422-4
- [15] Conwit RA, Stashuk D, Tracy B et al. The relationship of motor unit size, firing rate and force. *Clin Neurophysiol* 1999; 110: 1270–1275. DOI: S1388245799000541 [pii]
- [16] Tenan MS, Marti CN, Griffin L. Motor unit discharge rate is correlated within individuals: a case for multilevel model statistical analysis. *J Electromyogr Kinesiol* 2014; 24: 917–922. DOI: 10.1016/j.jelekin.2014.08.014
- [17] Herda TJ, Siedlik JA, Trevino MA et al. Motor unit control strategies of endurance- versus resistance-trained individuals. *Muscle Nerve* 2015; 52: 832–843. DOI: 10.1002/mus.24597
- [18] Hopkins JT, Ingersoll CD. Arthrogenic muscle inhibition: a limiting factor in joint rehabilitation. *J Sport Rehabil* 2000; 9: 135–159. DOI: 10.1123/jsr.9.2.135
- [19] Lepley AS, Grooms DR, Burland JP et al. Quadriceps muscle function following anterior cruciate ligament reconstruction: systemic differences in neural and morphological characteristics. *Exp Brain Res* 2019; 237: 1267–1278. DOI: 10.1007/s00221-019-05499-x
- [20] Huber A, Suter E, Herzog W. Inhibition of the quadriceps muscles in elite male volleyball players. *J Sports Sci* 1998; 16: 281–289. DOI: 10.1080/026404198366812
- [21] Welling W, Benjaminse A, Lemmink K et al. Progressive strength training restores quadriceps and hamstring muscle strength within 7 months after ACL reconstruction in amateur male soccer players. *Phys Ther Sport* 2019; 40: 10–18. DOI: 10.1016/j.pts.2019.08.004
- [22] Folland JP, Williams AG. The adaptations to strength training: morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med* 2007; 37: 145–168. doi:3724 [pii]
- [23] Kamen G, Knight CA. Training-related adaptations in motor unit discharge rate in young and older adults. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 2004; 59: 1334–1338. DOI: 10.1093/gerona/59.12.1334
- [24] Rich C, Cafarelli E. Submaximal motor unit firing rates after 8 wk of isometric resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32: 190–196. DOI: 10.1097/00005768-200001000-00028
- [25] Sterczala AJ, Miller JD, Dimmick HL et al. Eight weeks of resistance training increases strength, muscle cross-sectional area and motor unit size, but does not alter firing rates in the vastus lateralis. *Eur J Appl Physiol* 2020; 120: 281–294. DOI: 10.1007/s00421-019-04273-9
- [26] Wages NP, Mousa MH, Clark LA et al. Reductions in motor unit firing are associated with clinically meaningful leg extensor weakness in older adults. *Calcif Tissue Int* 2024; 114: 9–23. DOI: 10.1007/s00223-023-01123-x
- [27] Trevino MA, Herda TJ, Fry AC et al. Influence of the contractile properties of muscle on motor unit firing rates during a moderate-intensity contraction in vivo. *J Neurophysiol* 2016; 116: 552–562. DOI: 10.1152/jn.01021.2015
- [28] Kaneko F, Onari K, Kawaguchi K et al. Electromechanical delay after ACL reconstruction: an innovative method for investigating central and peripheral contributions. *J Orthop Sports Phys Ther* 2002; 32: 158–165. DOI: 10.2519/jospt.2002.32.4.158
- [29] Wallinga-De Jonge W, Gielen FLH, Wirtz P et al. The different intracellular action potentials of fast and slow muscle fibres. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1985; 60: 539–547. DOI: 10.1016/0013-4694(85)91115-0
- [30] Tötösy de Zepetnek JE, Zung HV, Erdebil S et al. Innervation ratio is an important determinant of force in normal and reinnervated rat tibialis anterior muscles. *J Neurophysiol* 1992; 67: 1385–1403
- [31] Semmler JG. Motor unit synchronization and neuromuscular performance. *Exerc Sport Sci Rev* 2002; 30: 8–14. DOI: 10.1097/00003677-200201000-00003
- [32] Pope ZK, Hester GM, Benik FM et al. Action potential amplitude as a noninvasive indicator of motor unit-specific hypertrophy. *J Neurophysiol* 2016; 115: 2608–2614. DOI: 10.1152/jn.00039.2016
- [33] Schilaty ND, McPherson AL, Nagai T et al. Arthrogenic muscle inhibition manifests in thigh musculature motor unit characteristics after anterior cruciate ligament injury. *Eur J Sport Sci* 2023; 23: 840–850. DOI: 10.1080/17461391.2022.2056520

- [34] Fry CS, Johnson DL, Ireland ML et al. ACL injury reduces satellite cell abundance and promotes fibrogenic cell expansion within skeletal muscle. *J Orthop Res* 2017; 35: 1876–1885. DOI: 10.1002/jor.23502
- [35] Noehren B, Andersen A, Hardy P et al. Cellular and morphological alterations in the vastus lateralis muscle as the result of ACL injury and reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 2016; 98: 1541–1547. DOI: 10.2106/JBJS.16.00035
- [36] Konishi Y, Aihara Y, Sakai M et al. Gamma loop dysfunction in the quadriceps femoris of patients who underwent anterior cruciate ligament reconstruction remains bilaterally. *Scand J Med Sci Sports* 2007; 17: 393–399. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2006.00573.x
- [37] Andersen JL, Aagaard P. Myosin heavy chain IIX overshoot in human skeletal muscle. *Muscle Nerve* 2000; 23: 1095–1104. DOI: 10.1002/1097-4598(200007)23:7<1095::aid-mus13>3.0.co;2-o
- [38] Brocca L, Cannavino J, Coletto L et al. The time course of the adaptations of human muscle proteome to bed rest and the underlying mechanisms. *J Physiol* 2012; 590: 5211–5230. DOI: 10.1113/jphysiol.2012.240267
- [39] Chalmers GR, Row BS. Common errors in textbook descriptions of muscle fiber size in nontrained humans. *Sports Biomech* 2011; 10: 254–268. DOI: 10.1080/14763141.2011.592211
- [40] Nuzzo JL. Sex differences in skeletal muscle fiber types: A meta-analysis. *Clin Anat* 2024; 37: 81–91. DOI: 10.1002/ca.24091