

**Integration sensomotorischer Testverfahren zur
Bewertung der Propriozeption in Return-to-Sport
Testbatterien:
Implikationen für Forschung und Praxis**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der Universität
Hamburg, Fakultät für Psychologie und Bewegungswissenschaft,
Institut für Bewegungswissenschaft

vorgelegt von
Juliane Wieber

Hamburg, 2025

Prüfungskommission:

Vorsitzende: Prof. Dr. Astrid Zech

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Rüdiger Reer

2. Gutachterin: Univ.-Prof. Dr. Bettina Wollesen

Ort & Datum der Disputation: Hamburg, den 10.12.2025

Sleep under the stars-who could ask for more? With the moon keeping watch over me. Not the snow, not the rain, can change my mind. The sun will come out, wait and see. And the feeling of the wind in your face can lift your heart. Oh there is nowhere I would rather be.

I am on my way, now. Well and truly, I am on my way, now.

(Koda Björnbröderna)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Zusammenfassung	1
1 Einleitung	5
2 Theoretischer Hintergrund	8
2.1 Propriozeption im Kniegelenk	8
2.1.1 Physiologie der Propriozeption im Kniegelenk	8
2.1.2 Propriozeption im verletzten vorderen Kreuzband	10
2.2 Return-to-Sport Testbatterien nach vorderer Kreuzbandruptur	11
2.2.1 Testkomponenten der Return-to-Sport Diagnostik	13
2.2.2 Cutt-Off Kriterien der Testkomponenten	15
2.3 Sensomotorische Testverfahren	17
2.3.1 Überblick der Testverfahren	17
2.3.2 Der aktive Kniewinkelreproduktionstest	19
3 Forschungsfragen und Hypothesen	25
4 Publikationen	27
4.1 Publikation A	27
4.2 Publikation B	41
4.3 Publikation C	54
4.4 Publikation D	63
4.5 Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen	82
5 Diskussion	84
5.1 Einflussfaktoren auf aktive Kniewinkelreproduktionstests	84
5.1.1 Haupteinflussfaktoren auf aktive Kniewinkelreproduktionstests	85
5.1.2 Aktiver kontralateraler Kniewinkelreproduktionstest	91
5.2 Einfluss von Körperposition und Bewegungsrichtung	94
5.2.1 Körperposition	95
5.2.2 Bewegungsrichtung	97
5.3 Einfluss der Beindominanz	99
5.4 Propriozeptive Fähigkeiten zwei Jahre nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion	103
5.5 Limitationen	106
5.6 Implikationen für weiteren Forschungsbedarf	108
5.7 Praxiserkenntnis	110

6 Schlussfolgerungen	112
Literatur	113
Danksagung	132
Anhang	134
Kurzfassungen/Abstracts	134
Veröffentlichungen mit Projektbezug	142
Eidesstattliche Erklärung	145

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung somatosensorischer Informationsquellen	9
2	Schematische Darstellung Return-to-Sport Prozess	14
3	Aktiver kontralateraler Kniewinkelreproduktionstest in sitzender Position . .	20
4	Aktiver kontralateraler Kniewinkelreproduktionstest in Bauchlage	21
5	Forest-Plot zum Einfluss der Körperposition	86
6	Forest-Plot zum Einfluss der Bewegungsrichtung	87
7	Forest-Plot zum Einfluss der Vorerermüdung	89

Abkürzungsverzeichnis

AAE Absolut angular error [7](#)

AMEDA Active movement extent [17](#)

ICC Intraklassen-Korrelationskoeffizienten [85](#)

JPR Joint position reproduction [17](#)

JPS Joint position sense [6](#)

KI Konfidenzintervall [12](#)

LSI Limb Symmetrie Index [7](#)

ROM Range of Motion [13](#)

RR Relatives Risiko [12](#)

RTS Return-to-Sport [5](#)

SEM Standardfehler der Messung [85](#)

TTDPM Threshold to detection of passive motion [17](#)

VKB Vorderes Kreuzband [5](#)

VKBR Vordere Kreuzbandruptur [5](#)

Zusammenfassung

Die Rückkehr zum Sport nach einer vorderen Kreuzbandverletzung ist ein komplexer und individueller Entscheidungsprozess. Solche Verletzungen führen zur Schädigung sensomotorischer Rezeptoren, welche auch durch chirurgische Rekonstruktion nicht wiederhergestellt werden können. Die sich daraus ergebende Verringerung propriozeptiver Fähigkeiten kann die Stabilität des Kniegelenks und die daraus resultierende motorische Leistung beeinträchtigen und damit das Risiko einer erneuten Verletzung am ipsilateralen und kontralateralen Knie erhöhen. In der Literatur gibt es verschiedene Return-to-Sport Testbatterien, welche anhand von Cutt-off Kriterien beurteilen sollen, ob der Sportler nach einer Kreuzbandverletzung wieder mit der sportlichen Aktivität und ohne das Risiko einer erneuten Verletzung beginnen kann. Die Testbatterien beinhalten unterschiedliche Zusammensetzungen verschiedener Kraft-, Sprung- und Balance-, Agilitäts- und psychologische Tests. Aktuell gibt es keine Testbatterien, welche hier zuverlässige Ergebnisse zur Verfügung stellen, was sich primär in den hohen Re- und kontralateralen Verletzungsraten zeigt. Keine dieser Testbatterien bezieht sensomotorische Testverfahren mit in den Entscheidungsprozess der sicheren Rückkehr in die sportliche Aktivität mit ein. Aktive Winkelreproduktionstest werden in der sportorthopädischen Diagnostik zur Bewertung der propriozeptiven Fähigkeiten verwendet und fallen unter den Oberbegriff der 'Joint Position Sense' Tests. Diese Verfahren messen einen Kniewinkel, welcher aktiv von der ipsilateralen oder kontralateralen Beinseite reproduziert wird. Der Winkelreproduktionsfehler ist hierbei die Differenz zwischen dem vorgegebenen und reproduzierten Winkeln. Hierzu werden Vergleiche zwischen der linken und rechten, beziehungsweise der betroffenen und nicht-betroffenen Extremität gezogen. Die einzelnen Kniewinkelreproduktionstests werden dazu mit unterschiedlichen Testverfahren durchgeführt. Hierzu zählen zum Beispiel unterschiedliche Positionen des Körpers, der Bewegungsrichtung des Knies, der Referenzwinkelvorgaben, der Gelenkwinkelgeschwindigkeiten, sowie der Messmethodik. Diese uneinheitliche Anwendung schließt die Vergleichbarkeit der Testergebnisse aus. Zusätzlich besteht im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest noch keine Evidenz zur Abhängigkeit der Winkelreproduktionsfehler von der Körperposition, der Bewegungsrichtung und der Dominanz des Beins welches den Referenzwinkel vorgibt. Dies wird relevant für die Integration des sensomotorischen Testverfahrens in eine Return-to-Sport Testbatterie, um ein Verständnis für das Testverfahren zu entwickeln und davon ein erstes Modell eines standardisierten Verfahrens in eine Return-to-Sport Testbatterie zu etablieren. Ziel der Dissertation ist es daher, durch systematische Literaturrecherche die Faktoren zu identifizieren und zu analysieren, die den absoluten Winkelreproduktionsfehler in aktiven Kniewinkelreproduktionstest beeinflussen, um wissenschaftlich fundierte Grundlagen für die Standardisierung und Integration dieses sensomotorischen Tests zur Beurteilung propriozeptiver Fähigkeiten in Return-to-Sport Testbatterien der klinischen Praxis zu schaffen. Durch empirische Untersuchungen soll der aktive kontralaterale Kniegelenkwinkelreproduktionstest als Maß für

den ‚Joint Position Sense‘ in einer gesunden Kohorte unter verschiedenen personenunabhängigen Testungen untersucht werden. Das Verständnis dieser Faktoren ist entscheidend für die Entwicklung valider Return-to-Sport Testbatterien. Dieser wissenschaftliche Fortschritt könnte Rehabilitationsprotokolle verbessern, Athleten eine sicherere und effektivere Rückkehr zum Sport ermöglichen und das Risiko erneuter Verletzungen verringern. Hierzu wurde zunächst eine systematische Übersichtsarbeit mit zusätzlicher Meta-Analyse zu den personenunabhängigen Haupttestfaktoren in aktiven Kniewinkelreproduktionstest durchgeführt. Die Arbeit zeigte, dass sich signifikante Unterschiede im aktiven Kniewinkelreproduktionsfehler abhängig von der Körperposition, der Bewegungsrichtung und der Vorermüdung ergeben. Geringe Literaturevidenz zeigte sich vor allem für den aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest, welcher jedoch als besonders sensitiv für propriozeptive Defizite nach vorderer Kreuzbandruptur scheint. Aus den Erkenntnissen resultierend wurden zwei experimentelle Studien durchgeführt, bei welchen der Unterschied im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest zwischen der Körperposition, der Bewegungsrichtung und der Beindominanz geprüft wurde. In einer aktiven und gesunden Kohorte zeigten sich die Körperposition und die Dominanz des Referenzbeins als Haupteinflussfaktoren auf das Ergebnis des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest. Die Bewegungsrichtung hatte keinen Einfluss auf den absoluten Winkelreproduktionsfehler. Um den Übertrag in die klinisch-sportwissenschaftliche Praxis zu schaffen, wurde im letzten Schritt eine randomisiert-kontrollierte Studie angeschlossen. In dieser Studie wurden Patienten mit vorderer Kreuzbandruptur zwei Jahre nach Rekonstruktionsplastik mit der Semitendinosus-Sehne mit einer gesunden Kohorte im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest verglichen. Patienten zwei Jahre nach vorderer Kreuzbandruptur zeigten keine Unterschiede im absoluten Winkelreproduktionsfehler im Vergleich zu einer gesunden Kohorte, als auch zum gesunden Referenzbein. Durch die erlangte Forschungserkenntnis ergibt sich eine direkte praktische Implikation auf die Return-to-Sport Testbatterie. Ein standardisiertes Test-Retest-Verfahren mit festgelegter Körperposition, Bewegungsrichtung, beidseitiger Messung eines Winkels im mittleren Range-of-Motion unter Ausschluss einer Vorermüdung und vorheriger Anregung der Thxopathie bildet einen ersten Entwurf eines sensomotorischen Testverfahrens zur Messung der Propriozeption zur Integration in eine Return-to-Sport Testbatterie nach Knieverletzungen. Zukünftige Forschung sollte auf dieser Basis die metrische Absicherung des Verfahrens durch quantitativen Gütekriterien, die Entwicklung normativer Referenzwerte sowie die Anwendung im Rehabilitationsverlauf fokussieren. Auch eine technologiebasierte Weiterentwicklung zur breiteren klinischen Integration sollte angestrebt werden.

Abstract

Returning to sports after an anterior cruciate ligament injury is a complex and highly individualized decision-making process. Such injuries destroy sensorimotor receptors, which cannot be restored even through surgical reconstruction. The resulting reduction in proprioceptive abilities can impair knee joint stability and athletic performance, increasing the risk of re-injury to the ipsilateral and contralateral knees. Various return-to-sport test batteries have been proposed in the literature. Based on cut-off criteria, these test batteries aim to determine whether an athlete can safely resume sports activity without a high risk of re-injury following an anterior cruciate ligament injury. They consist of different combinations of strength, jump, balance, agility, and psychological tests. However, there is currently no test battery that reliably predicts a safe return to sports, as evidenced by the high re-injury rates in both the previously affected and contralateral knees. Notably, none of the existing test batteries include sensorimotor assessments to evaluate proprioception. Active knee joint angle reproduction tests are commonly used to assess proprioceptive abilities and fall under joint position sense tests. These tests measure knee angle reproduction errors by comparing the actively reproduced angle from the ipsilateral or contralateral limb to a predetermined reference angle. The reproduction error is defined as the difference between the set and reproduced angles. Comparisons are made between the left and right legs or between the injured and uninjured extremities. Different testing protocols are used, including variations in body position, knee movement direction, reference angles, joint angle speeds, and measurement instruments. However, the lack of standardization limits the comparability of results. Furthermore, there is currently no clear evidence of how body position, movement direction, and the dominance of the reference limb influence reproduction errors in the active contralateral knee joint angle reproduction test. Understanding these factors is essential for integrating sensorimotor testing into return-to-sport test batteries. Establishing a standardized protocol could enhance the reliability of such assessments and improve clinical decision-making. This dissertation aimed to systematically review the literature to identify key person-independent factors influencing reproduction errors in active knee joint angle reproduction tests. Through empirical studies, the active contralateral knee joint angle reproduction test was examined in a healthy cohort under different controlled testing conditions. Understanding these influencing factors is crucial for developing valid return-to-sport test batteries. This scientific advancement could improve rehabilitation protocols, enable athletes to return to sports more safely and effectively, and reduce the risk of re-injury. To enhance one's understanding of , a systematic review with an additional meta-analysis was first conducted to investigate the key non-person-dependent test factors in active knee joint angle reproduction tests. The findings revealed significant differences in knee joint angle reproduction errors based on body position, movement direction, and pre-fatigue. Limited literature was available specifically for the active contralateral knee joint angle reproduction test, although this test appears to

be particularly sensitive in detecting proprioceptive deficits after anterior cruciate ligament rupture. Building on these findings, two experimental studies were conducted to investigate differences in active contralateral knee joint angle reproduction errors with respect to body position, movement direction, and leg dominance. The results indicated that body position and the dominance of the reference limb were the primary factors influencing test outcomes in a healthy, physically active cohort, whereas movement direction had no statistically significant effect. To support the application of these results in clinical and sport science practice, a randomized controlled trial was implemented in the final phase. This study examined patients two years post anterior cruciate ligament reconstruction, comparing them with a healthy controls with the active contralateral knee joint angle reproduction test. The results demonstrated no significant differences in reproduction errors between the patient group and the control group, nor between the reconstructed and contralateral limbs within the patient cohort. These findings have practical implications for integrating active knee joint angle reproduction testing into return to sport test batteries. A standardized test protocol comprising a defined body position, controlled movement direction, bilateral assessment within the mid-range of motion, exclusion of pre-fatigue, and prior activation to counteract thixotropic effects may serve as a foundational framework for proprioceptive testing in return to sports decision-making following knee injuries. Future research should focus on the metric validation of the procedure using quantitative quality criteria, the development of normative reference values and its application in the course of rehabilitation. A technology-based development for broader clinical integration might also be pursued.

1 Einleitung

Die Rückkehr eines Athleten zum Sport nach einer Verletzung ist eine vielschichtige und oft herausfordernde Entscheidung (Barber-Westin und Noyes, 2011; K. E. Webster und Hewett, 2019), die täglich von multidisziplinären Teams getroffen wird (Arderne et al., 2016). Dabei fällt vor allem die hohe Inzidenz von vorderen Kreuzbandrupturen (VKBR) auf (Sanders et al., 2016; K. E. Webster und Hewett, 2019). Diese Ruptur tritt vermehrt bei jungen und sportlich aktiven Menschen auf (Keays et al., 2022; K. E. Webster und Hewett, 2019; K. E. Webster et al., 2014; Wilke und Froböse, 2003). Die Rekonstruktion des vorderen Kreuzband (VKB) wird oft bei einem Wunsch einer schnellen Rückkehr in den Leistungssport als Behandlungsstrategie gewählt (Andrade et al., 2020; Arderne et al., 2016). Nach einer längeren Rehabilitationsphase (Grindem et al., 2016), nehmen etwa 80–82% der Patienten wieder an sportlichen Aktivität teil, 63–65% erlangen das sportliche Ausgangsniveau zurück, aber lediglich 55% kehren in den Leistungssport zurück (Andrade et al., 2020; Arderne et al., 2014; Sepúlveda et al., 2017). Es besteht ein erhebliches Risiko einer erneuten Verletzung, insbesondere wenn Athleten wieder leistungsorientiert trainieren und an Sportarten mit schnellen Richtungswechseln teilnehmen möchten (Cronström et al., 2023; Keays et al., 2022; Montalvo et al., 2019). Ein hoher Anteil erleidet in den ersten zwei Jahren nach einer VKBR erneute Verletzungen, mit Inzidenzen von 6%–27% (Pinczewski et al., 2007; Wright et al., 2007).

Das Timing der Rückkehr zum Sport wird von mehreren strukturellen, funktionellen und sensomotorischen Faktoren beeinflusst und erfordert umfassende Return-to-Sport (RTS) Testbatterien, welche bis heute keine validen Ergebnisse liefern (Gokeler et al., 2022; K. E. Webster und Hewett, 2019; Wilcke, 2013). Der hohe Anteil an ipsilateralen und kontralateralen Folgeverletzungen trotz bestandener RTS Testbatterie zeigt die Komplexität dieser Entscheidung (Arderne et al., 2016; Patel et al., 2021; K. E. Webster und Hewett, 2019; K. E. Webster et al., 2018; Wiggins et al., 2016). Meta-Analysen zeigen, dass weniger als ein Viertel (23%) der Patienten eine RTS Testbatterie erfolgreich besteht und das Bestehen der Tests das Wiederverletzungsrisiko nur geringfügig um 3% reduziert (Lokhande et al., 2013). Eine systematische Übersichtsarbeit von 2010 bis 2020 ergab, dass 98% der Studien Sprungtests, 82,5% Krafttests und 77,8% subjektiv bewertete Fragebögen einschlossen (Roe et al., 2022). Zusätzlich werden teilweise Agilitäts- und Balancetest, sowie eine Ermüdungsprovokation mit Re-Test eingesetzt (Barke et al., 2021; Moser und Bloch, 2015; Smiley et al., 2024).

Die einzelnen Komponenten der RTS Testbatterien fragen vor allem die strukturell-anatomisch, motorischen und konditionellen Anforderungen ab, nicht aber sensomotorische Fähigkeiten in Bezug auf eine funktionelle Stabilität, obwohl bekannt ist, dass der Ruptur des VKB häufig ein neuromuskuläres Ungleichgewicht zugrunde zu liegen scheint (Moser und

Bloch, 2015; Needle et al., 2017; Paterno et al., 2010; Strong et al., 2022; Wilcke, 2013). Propriozeption ist ein komplexes, multimodales Konstrukt, das die Fähigkeit umfasst, die Position und Bewegung des Körpers im Raum zu erkennen (Goble, 2010; Han et al., 2016; Hillier et al., 2015; McCloskey, 1978; Sherrington, 1906). Studien zeigen, dass eine verminderte Propriozeption stark mit motorischen Dysfunktionen und veränderter Kinematik im Kniegelenk in Risikosituationen wie Cutting-Maneuvern oder Sprüngen korreliert (Fleming et al., 2022; Nagai et al., 2013; Yang et al., 2018). Sie gilt als ein zentraler Risikofaktor für erneute Verletzungen (Fleming et al., 2022; Han et al., 2016; S. Lephart und Fu, 1995; Tayfur et al., 2020; Vitharana et al., 2025). Es konnte gezeigt werden, dass Kraftparameter, wie die häufig bei VKBR Patienten beobachteten Schwächen des Quadrizeps und der Hamstrings, durch reduzierte Muskelaktivierung verursacht werden können (Fleming et al., 2022; Konishi et al., 2002). Dies kann durch den Verlust von sensorischem Feedback aus dem verletzten VKB verursacht werden, wodurch die Funktion der Gamma-Motoneuronen beeinträchtigt scheint, die wichtig für die Muskelaktivierung sind (Konishi et al., 2002). Auch bei intaktem motorischem System zeigen Patienten mit afferenter Entkopplung Defizite in der motorischen Kontrolle (Goble, 2010; J. Rothwell et al., 1982). Meta-Analysen belegen, dass propriozeptive Einschränkungen bis zu 24 Monate postoperativ bestehen bleiben (Fleming et al., 2022). Die gestörte afferente Rückmeldung erschwert die Bewegungswahrnehmung und beeinträchtigt die dynamische Stabilität des Knies (Moussa et al., 2009; Nagai et al., 2018; Relph et al., 2014; Wojtys und Huston, 2000), was klinisch vor allem bei Gelenkbewegung und -position in terminalen Kniestellungen, besonders bei der Begrenzung anteriorer tibialer Translation oder Rotationsbelastung (Fleming et al., 2022; Markolf et al., 1995). Selbst nach 2,5 Jahren zeigen Leistungssportler noch posturale Defizite (K. A. Webster und Gribble, 2010). Als mechanischer Stabilisator und sensorisches Organ spielt das VKB eine zentrale Rolle in der Gelenkstabilität (Strong et al., 2022; Vitharana et al., 2025). Da rekonstruktive Eingriffe die zerstörten Mechanorezeptoren nicht wiederherstellen (Ordahan et al., 2015; Reider, Arcand, Diehl, Mroczek, Abulencia, Stroud et al., 2003; Relph und Herrington, 2016c; Strong et al., 2022; van Melick et al., 2016; Waldron et al., 2022; Young et al., 2016), bleiben propriozeptive Einschränkungen häufig bestehen (Busch et al., 2021; Dhillon et al., 2011; Fleming et al., 2022; Tayfur et al., 2020).

Der Joint Position Sense ([JPS](#)) gilt als ein wichtiges Kriterium der propriozeptiven Fähigkeiten (Goble, 2010; Han et al., 2016; Hillier et al., 2015). Da eine adäquate Kniegelenkwinkelreproduktion von kontinuierlicher neuromuskulärer Aktivierung abhängt, kann ein unzureichendes propriozeptives Feedback zu einer reduzierten Kniegelenkwinkelreproduktion führen (Han et al., 2016; Hanzlíková et al., 2019; Proske et al., 2000). In aktiven Kniegelenkwinkelreproduktionstests wird der JPS, und somit die propriozeptive Genauigkeit, durch die Nachahmung eines ipsi- oder kontralateral eingestellten Referenzwinkels überprüft (Han et al., 2016; Hillier et al., 2015). Hierbei wird in der Praxis meist der absolute Winkelrepro-

duktionsfehler (AAE) als Zielparameter verwendet (Goble, 2010; Hillier et al., 2015). Diese Testverfahren haben sich in Meta-Analysen vor allem bei VKB-Patienten als valides Messinstrument zur Messung der propriozeptiven Fähigkeiten erwiesen (Hillier et al., 2015; Strong et al., 2022). Unter kontrollierten und unbelasteten Bedingungen lassen sie sich bereits in der akuten Phase nach einer VKBR zur Messung der sensomotorischen Leistung einsetzen, was wertvolle Einblicke in die sensomotorische Funktion während der frühen Phase der Rehabilitation ermöglicht (Busch et al., 2021).

In der Literatur finden sich eine Vielzahl unterschiedlich angewandter aktiver Kniewinkelreproduktionstest, welche sich unter anderem in der Körperposition, der Bewegungsrichtung, dem Referenzwinkel, der Wahl des Referenzbeins und dem Messinstrument unterscheiden und auch zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (Han et al., 2016; Hillier et al., 2015; Olsson et al., 2004; Strong et al., 2022). Diese Unterschiede könnten neben methodischen Schwächen ebenso auf verschiedene physiologische Einflussfaktoren zurückzuführen sein, die zwischen den Protokollen variieren und somit den JPS beeinflussen (Elangovan et al., 2014; Strong et al., 2022). Es hat sich gezeigt, dass sich bei der aktiven Reproduktion verschiedener Kniegelenkwinkel signifikante Unterschiede in den ausgelösten Mechanorezeptoren ergeben, die in erster Linie von der Körperposition, der Richtung der Bewegung, dem Referenzwinkel, als auch der Ermüdung ergeben (Goble, 2010; Olsson et al., 2004; Relph und Herrington, 2015; Strong et al., 2022; Suner-Keklik et al., 2017; Vila-Chã et al., 2011). Ebenso gibt es Hinweise darauf, dass die Beindominanz mit der propriozeptiven Genauigkeit verbunden ist; sie wurde in einigen Studien als einflussreicher Faktor gezeigt (Azevedo et al., 2021; Galamb et al., 2018; Relph und Herrington, 2016a), in anderen jedoch nicht (Busch et al., 2023; Cug et al., 2016). Die Gliedmaßendominanz könnte vor allem in Bezug auf den Limb Symmetrie Index (LSI), als Cutt-Off Kriterium in RTS Testbatterien, relevant sein. Eine nicht adäquate Gewichtung im LSI kann zu einer Über- oder Unterschätzung der Ergebnisse und somit zu einem zu verfrühten RTS und einem erhöhten Risiko für erneute Verletzungen führen (Zumstein et al., 2022).

Eine unzureichende Berücksichtigung der genannten Faktoren, könnte zu Fehlinterpretationen und einem verfrühten RTS mit erhöhtem Verletzungsrisiko führen. Der wissenschaftliche Fortschritt zur Integration sensomotorischer Testverfahren in RTS Testbatterien, könnte Rehabilitationsprotokolle verbessern, Athleten eine sicherere,effektivere Rückkehr zum Sport ermöglichen und das Risiko erneuter Verletzungen verringern. Ziel der Dissertation ist es daher, durch systematische Literaturrecherche und empirische Untersuchungen die Faktoren zu identifizieren und zu analysieren, die den absoluten Winkelreproduktionsfehler in aktiven Kniewinkelreproduktionstest beeinflussen, um wissenschaftlich fundierte Grundlagen für die Standardisierung und Integration dieses sensomotorischen Tests zur Beurteilung propriozeptiver Fähigkeiten in Return-to-Sport Testbatterien in der klinischen Praxis zu schaffen.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Propriozeption im Kniegelenk

Die Propriozeption ist ein komplexes, mehrdimensionales Konzept, das bisher noch nicht vollständig verstanden wurde (Han et al., 2016; Hillier et al., 2015). Im frühen 1800 Jahrhundert wurde schon ein sechster Sinn von Sir Charles Bell beschrieben, welcher sich auf Sinn für die Körperposition und Bewegung der Gliedmaßen bezog (McCloskey, 1978). Sherrington war einer der Ersten, der den Begriff „Propriozeption“ verwendete und beschrieb ihn als: „(...) a character of the stimulations occurring in the deep field of receptors, which are traceable to actions of the organism itself.“ (Sherrington, 1906). Die Propriozeption ist heute beschrieben als die Fähigkeit des Körpers, die Position, Bewegung und Lage der Gelenke und Gliedmaßen im Raum, ohne visuelle Einflüsse, wahrzunehmen (Elangovan et al., 2014; Riemann und Lephart, 2002; Smith et al., 2013; Wilcke, 2013) und ist ein Teil der Somatosensorik (Fleming et al., 2022) (siehe [Abbildung 1](#)).

2.1.1 Physiologie der Propriozeption im Kniegelenk

Bei der motorischen Kontrolle ist die Propriozeption, zusammen mit den anderen Sinnen, sowohl für das Feedback als auch für das Feedforward wichtig (Hillier et al., 2015). Propriozeptoren spielen eine Rolle bei der motorischen Planung (Feedforward für Antizipation, Vorbereitung und Reaktionsplanung) sowie bei der direkten Einbindung von Anpassungsmechanismen auf Leistungsänderungen (Feedback) (Hillier et al., 2015). Diese sensorisch-motorische Fähigkeiten sind entscheidend für die Koordination, das Gleichgewicht und die Durchführung alltäglicher und sportlicher Bewegungen. Sie sind verantwortlich für die reflektorische Gelenkstabilisierung durch Ansteuerung der Muskulatur und sind abhängig vom Gelenkwinkel und der Bewegungsgeschwindigkeit (Barrack et al., 1989; Wilke und Froböse, 2003).

Vor allem aber in Bezug auf sportliche Aktivität ist eine adäquate propriozeptive Funktion wichtig für den Schutz anatomischer Strukturen wie Bändern, Sehnen und Gelenken (Wilcke, 2013). Die Propriozeptoren werden vor allem in Situationen hoher Gelenkbelastung (z.B. schnelle Bewegungsrichtungswechsel in Ballsportarten) und damit einhergehenden starken Bewegungsausschlägen aktiviert (Fleming et al., 2022; Gervasio et al., 2017; S. M. Lephart et al., 1997; Nielsen und Sinkjær, 2002).

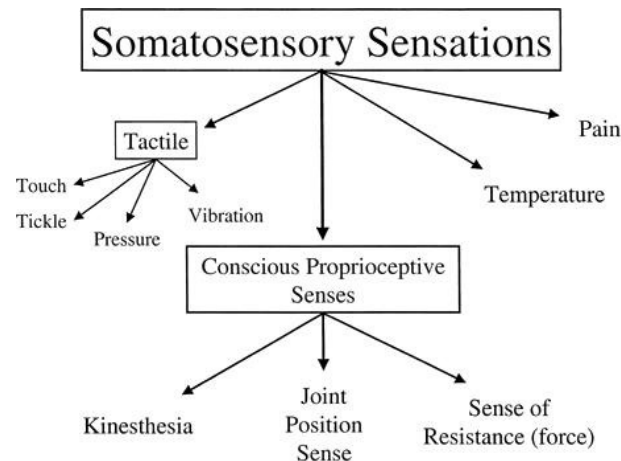


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Empfindungen, die von somatosensorischen Informationsquellen im Körper ausgehen. Die Wahrnehmung der Propriozeption ist eine Unterkomponente der Somatosensorik. Übernommen aus Fleming et al., 2022.

Um Informationen über die Körperposition und –bewegung im Raum bereitzustellen arbeiten unterschiedliche Mechanorezeptoren in der Haut, der Muskulatur, den Sehnen, den Kapseln und Bändern der Gelenke und in den Menisken zusammen (Elangovan et al., 2014; Wilcke, 2013). Die Propriozeption im Kniegelenk wird durch spezialisierte intraligamentäre und intrakapsuläre Rezeptoren vermittelt, die kontinuierlich Informationen über Gelenkstellung, Muskeldehnung und Spannung an das zentrale Nervensystem weiterleiten (S. M. Lephart et al., 1997; Schmidt, 2013; Wilcke, 2013). Reize, welche von den propriozeptiven Rezeptoren erfasst werden, werden als elektrische Signale über sensorisch afferente Nervenfasern zum Rückenmark weitergeleitet (Schmidt, 2013). Im Rückenmark werden diese Signale über verschiedenen Synapsen auf Interneurone, als unwillkürliche Cross-Reflexe und über zentrale Areale willkürlich über die Motoneurone efferent verschaltet (Gervasio et al., 2017; Pape und Kurtz, 2014; Schmidt, 2013). Durch diesen neuro-sensorischen Weg kommt es während alltäglicher oder sportlicher Bewegung zu einer kontrollierten dynamischen Führung des Kniegelenks (Barrack et al., 1989; S. Lephart und Fu, 1995; Wilcke, 2013). Die primären Rezeptoren, welche hierfür verantwortlich sind, sind Muskelspindeln, fusiforme Golgi-Rezeptoren, Ruffini-Endigungen und Pacinikörperchen (Pape und Kurtz, 2014; Proske, 2005; Schmidt, 2013; Wilcke, 2013), welche im folgenden einzeln kurz erläutert werden:

Muskelspindeln: Diese Sinnesorgane befinden sich in den Muskelfasern und reagieren auf Veränderungen in der Muskellänge und–dehnung. Sie spielen eine wesentliche Rolle bei der Regelung der Muskelspannung und der Feinabstimmung von Bewegungen (Pape und Kurtz, 2014). Sie registrieren Veränderungen in der Muskellänge und der Rekrutierung, welche kontinuierlich Informationen über Gelenkstellung, Muskeldehnung und Spannung an das zentrale Nervensystem oder unwillkürlich über Interneurone im Rückenmark weiterleiten (Clark et al., 2016; Han et al., 2016; Pape und Kurtz, 2014; Proske et al., 2000) und beeinflussen

damit auch die muskuläre Reaktion auf Bewegungsänderungen auf der kontralateralen Seite (Gervasio et al., 2017).

Golgi–Sehnenezeptoren: Diese Mechanorezeptoren befinden sich in den Ansatzzonen der Bänder, jedoch nicht im weiteren Bandverlauf. Sie messen die Spannung, die durch Muskelkontraktionen erzeugt wird. Sie helfen, übermäßige Muskelkraft zu verhindern und schützen vor Verletzungen. Golgi–Sehnenrezeptoren ermöglichen ein adäquates Gelenkpositionsempfinden, d.h. die Wahrnehmung der relativen Muskel- und Gelenkposition während der Bewegung (Pape und Kurtz, 2014; Schmidt, 2013; Wilcke, 2013).

Ruffini–Endigungen: Die Ruffini–Endigungen gehören zu den globulären Mechanorezeptoren, welches sich langsam adaptieren. Ihre primäre Aufgabe ist die Weiterleitung von Informationen an das zentrale Nervensystem über Spannungszustände und–änderungen, als auch über Beschleunigungsabläufe, wie zum Beispiel Richtungswechsel oder Cutting–Maneuvern in Sportsportarten wie Handball oder Football (Jerosch und Prymka, 1995; Wilcke, 2013).

Paccinikörperchen: Diese zylindrischen Mechanorezeptoren sind im Gegensatz zu den Ruffini–Endigungen schnell adaptierende Spannungsindikatoren, welche auf Vibration, Druckveränderungen und Beschleunigung reagieren (Schmidt, 2013; Wilke und Froböse, 2003). Ihre Hauptaufgabe ist die Weiterleitung von Informationen an das zentrale Nervensystem zur Gelenkstellung im Raum (Pape und Kurtz, 2014).

Im Alter, durch Ermüdung oder Verletzungen der Strukturen am Kniegelenk, zeigte sich eine Abnahme der propriozeptiven Fähigkeiten (Proske, 2005; Proske und Gandevia, 2012; Relph et al., 2014; Strong et al., 2021). Eine verbesserte posttraumatische propriozeptive Fähigkeit des Kniegelenks trägt wesentlich zu einem komplikationlosen Verlauf bei (Wilcke, 2013). Bei anhaltendem propriozeptivem Defizit bleibt die funktionelle Stabilität jedoch eingeschränkt, selbst wenn die mechanische oder anatomische Stabilität bereits wiederhergestellt ist (Fremerey et al., 2000; Wilcke, 2013).

2.1.2 Propriozeption im verletzten vorderen Kreuzband

Das VKB ist ein wesentlicher Bestandteil der Kniegelenkstabilität und fungiert sowohl als mechanischer Stabilisator als auch als sensorisches Organ (Wilcke, 2013). Die Hauptaufgabe des VKB bei der Stabilität des Kniegelenks besteht darin, eine übermäßige anteriore Translation der Tibia im Verhältnis zum Femur und somit eine Überstreckung des Knies, zu verhindern (Wilcke, 2013).

Die propriozeptive und neuromuskuläre Kontrolle bei Patienten mit einer VKBR ist eingeschränkt, was zu einer fortdauernden funktionellen Instabilität des betroffenen Knies führt (Dhillon et al., 2011; Fleming et al., 2022; Paterno et al., 2010; Tayfur et al., 2020). Diese Einschränkung erhöht das Risiko einer erneuten Verletzung und kann insbesondere bei hohen Leistungsanforderungen, wie schnellen Richtungswechseln, zu Koordinationsproblemen

führen (Fleming et al., 2022). Bei Sportlern, welche in Sportarten mit schnellen Richtungswechseln, zurückkehren wollen, wird eine operative Versorgung des VKB bevorzugt (Flagg et al., 2019). Die Zerstörung von Mechanorezeptoren durch die Verletzung, die durch die Rekonstruktion nicht wiederhergestellt werden können (Ordahan et al., 2015; Relph und Herrington, 2016c; Strong et al., 2021; van Melick et al., 2016; Waldron et al., 2022; Young et al., 2016), kann zu einer verminderten propriozeptiven Genauigkeit in der Bewegung führen (Fleming et al., 2022; Roberts et al., 2000). Durch die verminderte sensorische Rückmeldung nach einer VKBR werden die afferenten Signale an das zentrale Nervensystem beeinflusst. Dies erschwert die Bewegungserkennung, wodurch die dynamische Stabilität des Knies durch inadäquate Ansteuerung der Muskulatur beeinträchtigt wird (Moussa et al., 2009). In ihrer Meta-Analyse wiesen Flemming et al. (2022) darauf hin, dass das propriozeptive Feedback auch 6 bis 24 Monate nach der Operation noch beeinträchtigt sein kann (Fleming et al., 2022). Diese propriozeptiven Defizite scheinen nicht nur für die betroffene Extremität zu gelten, sondern führen auch zu propriozeptiven Defiziten der kontralateralen Extremität (Jerosch und Prymka, 1996; Laboute et al., 2019; Roberts et al., 2000).

2.2 Return-to-Sport Testbatterien nach vorderer Kreuzbandruptur

Die Ruptur des VKB ist eine häufige Verletzung, insbesondere bei jungen, leistungsorientierten Sportlern (Majewski et al., 2006; Sanders et al., 2016) und erfordert ein umfassendes Risikomanagement sowie einen strukturierten und langen Rehabilitationsprozess (Grindem et al., 2016; Moser und Bloch, 2015; Wilcke, 2013). Zugrunde liegend scheint ein neuromuskuläres Ungleichgewicht zu sein (Moser und Bloch, 2015; Needle et al., 2017; Strong et al., 2021; Wilcke, 2013). Die Rekonstruktion des VKB wird zumeist als Behandlungsstrategie für Athleten gewählt, welche schnell wieder in den Leistungssport zurückzukehren wollen (Andrade et al., 2020; Ardern et al., 2016). Nach einer operativen Versorgung nehmen etwa 80-82% der Patienten wieder an sportlichen Aktivität teil, jedoch erreichen nur 63-65% das sportliche Ausgangsniveau und lediglich 55% kehren in den Leistungssport zurück (Andrade et al., 2020; Ardern et al., 2014; Sepúlveda et al., 2017). Die Rückkehr in das sportliche Training wird teilweise zeitbasiert und teilweise kriterienbasiert gewählt (Cavanaugh und Powers, 2017; Gokeler et al., 2022; Herbst et al., 2015; Meredith et al., 2020; Waldron et al., 2022) (s. [Abbildung 2](#)). Meta-Analysen zeigen, dass in 32% der analysierten Studien die Zeit das einzige Kriterium für den RTS war, während nur 13% zusätzliche objektive Kriterien berücksichtigten (Barber-Westin und Noyes, 2011). Zeitbasiert werden die meisten Sportler nach 12 Monaten zum Training freigegeben (Waldron et al., 2022). Fachgesellschaften raten jedoch von einem rein zeitbasierten Ansatz ab (Meredith et al., 2020; Rothrauff et al., 2020). Heutzutage wird neben der zeitbasierten Komponente ein kriterienbasierter Ansatz verfolgt (Cavanaugh und Powers, 2017; Gokeler et al., 2022; Herbst et al., 2015; Smiley

et al., 2024; K. E. Webster und Hewett, 2019). Dieser Ansatz wird als Return-to-Prozess beschrieben und gliedert sich vom Return-to-Activity, über den RTS und Return-to-Play bis hin zum Return-to-Competition oder Return-to-Performance (Arderne et al., 2016; Moser und Bloch, 2015). Jeder dieser Schritte ist mit speziellen Testungen verbunden, welche je nach sportmedizinischer Einrichtung abweichen können (Barke et al., 2021; Moser und Bloch, 2015). Generell sollte jedoch der Prozess Schritt für Schritt gestaltet werden und somit erst der Return-to-Activity (Übergang klinischen Versorgung in allgemeines Rehabilitationstraining) bestanden sein, bevor eine RTS Testbatterie durchgeführt wird (Moser und Bloch, 2015). Vor allem der RTS Test ist von zentraler Bedeutung für den Sportler, da er mit dem Bestehen für das sportliche Training (z.B individualisierte Mannschaftstraining) freigegeben wird, was noch keine Rückkehr zum Leistungsniveau vor der Verletzung voraussetzt (Return-to-Performance) (Arderne et al., 2016; Moser und Bloch, 2015). Die Vermeidung einer zu frühen Rückkehr in den Sport ist, insbesondere bei Profisportlern, bei denen der Druck seitens der Athleten, des Trainers und Sponsoren hoch ist, von entscheidender Bedeutung um Rerupturen, kontralaterale Verletzungen oder Folgeschäden zu vermeiden (Arderne et al., 2016; Shrier et al., 2014).

Trotz zunehmender Evidenz bleibt die Validität der RTS Kriterien zur Beurteilung einer sicheren Rückkehr auf das vorherige Leistungsniveau jedoch unzureichend (Gokeler et al., 2022). Aktuelle Meta-Analysen zeigen, dass weniger als ein Viertel (23%) der Patientinnen eine RTS Testbatterie erfolgreich bestanden (K. E. Webster und Hewett, 2019) und das Bestehen der Testbatterien das Wiederverletzungsrisiko nur um 3% reduziert (Lokhande et al., 2013). Das Bestehen bisheriger Testbatterien reduziert das Risiko einer späteren Transplantatruptur (Relative Risiko (RR) = 0,40 (95%-Konfidenzintervall (KI): [0,23; 0,69]), $p < .001$], erhöht jedoch das Risiko für eine spätere kontralaterale VKB-Verletzung um 235% (RR = 3,35 (95%-KI: [1,52; 7,37]), $p = .003$) (K. E. Webster und Hewett, 2019). Studien berichten über eine Gesamtwiederverletzungsrate von 3–49%, wobei 7% der Fälle ipsilateral und 8% kontralateral auftreten (Patel et al., 2021; Wiggins et al., 2016). Junge Athleten und die Rückkehr zum Hochleistungssport stellen Risikofaktoren dar, wobei die Wiederverletzungsrate bei diesen Sportlern 23% beträgt (Wiggins et al., 2016). Auch scheinen Sportler in Sportarten mit schnellen Richtungswechseln, Cutting-Maneuvern oder (einbeinigen) Landungsmaneuvern häufig betroffen zu sein (Montalvo et al., 2019). Aktuelle systematische Übersichtsarbeiten zeigen, dass geschlechterunabhängig ein 20% erhöhtes Re-Ruptur Risiko ipsilateral, als auch kontralateral, besteht (Patel et al., 2021). Jedoch scheint das Risiko einer primären VKBR bei weiblichen, sportlich aktiven Personen erhöht (Arderne et al., 2016; Bram et al., 2021; Montalvo et al., 2019; Zech et al., 2022).

Insgesamt sind bisherige RTS Testbatterien nicht in der Lage, das Risiko zukünftiger VKBR zuverlässig zu identifizieren (K. E. Webster und Hewett, 2019). Diese Erkenntnisse verdeut-

lichen, dass es bislang keinen Goldstandard für die Bewertung einer sicheren Rückkehr in den Sport nach einer VKBR gibt (Gokeler et al., 2022; Smiley et al., 2024; K. E. Webster und Hewett, 2019). Zudem sind der Großteil dieser Protokolle sehr zeitaufwendig, erfordern kostspielige und komplexe Messgeräte und sind sehr aufwendig und anspruchsvoll für die Anwendung in der täglichen klinischen Praxis (Herbst et al., 2015; Narducci et al., 2011).

2.2.1 Testkomponenten der Return-to-Sport Diagnostik

Die RTS Testbatterien sollten mit einer klinischen Beurteilung des VKB durch Orthopäden und Physiotherapeuten erfolgen (Barke et al., 2021). Hierzu werden neben den körperlichen Untersuchungen, wie der Palpation des betroffenen Knies, im bilateralen Vergleich anatomische und funktionelle Test durchgeführt (Barke et al., 2021; Moser und Bloch, 2015). Beispiele hierfür sind die Messung von Beinlängendifferenzen, Extremitätenumfängen, des Bewegungsausmaßes (ROM), die objektive Beurteilung der Kniegelenksstabilität mittels KT-1000-Messung oder Pivot-Shift-Test sowie gegebenenfalls ergänzende Ultraschalluntersuchungen (Arderin et al., 2016; Barber-Westin und Noyes, 2011; Barke et al., 2021; Herbst et al., 2015; Moser und Bloch, 2015). Zeigen sich keine Auffälligkeiten, die eine aktive RTS Testbatterie ausschließen würden, beginnt der Sportler mit der Durchführung der Testbatterie. Deren Einzelkomponenten werden anhand festgelegter Cut-off-Kriterien bewertet und fließen in eine Gesamtbeurteilung ein (Barke et al., 2021; Kyritsis et al., 2016; Moser und Bloch, 2015).

Eine systematische Übersichtsarbeit von 2010 bis 2020 ergab, dass 98 % der Studien Sprungtests, 82,5% Krafttests und 77,8% subjektiv bewertete Fragebögen einschlossen (Roe et al., 2022). Zusätzlich werden auch Agilitätstest (Bsp: Agility-T-Test, Lower Extremity Functional Test) (Barke et al., 2021; Kyritsis et al., 2016; Moser und Bloch, 2015), Schnelligkeitstest (Bsp.: Tappingtest, Repeated-Sprint-Ability) (Herbst et al., 2015; Moser und Bloch, 2015) und Tests zur posturalen Kontrolle (Bsp.: Y-Balance, Star-Exkursion Test) angewendet (Barke et al., 2021; Herbst et al., 2015; Moser und Bloch, 2015; Paterno et al., 2010; Smiley et al., 2024). Des weiteren wird teilweise eine Ermüdung durch unterschiedliche Ausdauer Tests (Spiroergometrie, 6 min Lauftest, Shuttle-Run Test) mit anschließendem Re-Test von Sprung-und Krafttest durchgeführt (Barke et al., 2021; Moser und Bloch, 2015; Smiley et al., 2024). Eine schematische Darstellung des Ablaufs findet sich in [Abbildung 2](#).



Abbildung 2: Schematische Darstellung des Assessment-Tools zum zeitlichen Ablauf der durchzuführenden Testkategorien für eine Return-to-Sport Entscheidung. Basierend auf dem Konsensus-Statement der Verwaltungs-Berufsgenossenschaft in Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Gesundheit der Deutschen Sporthochschule Köln. Modifizierte Darstellung aus Moser und Bloch, 2015.

Die Testkomponenten erfassen vorwiegend anatomische, konditionelle und funktionelle Aspekte sowie subjektive Einschätzungen der Sportler zum VKB, berücksichtigen jedoch keine sensomotorischen Fähigkeiten im Hinblick auf funktionelle Stabilität, obwohl die Notwendigkeit zur Bewertung neuromuskulärer Kontrolle in der Literatur mehrfach betont wurde (Arderin et al., 2016; Barber-Westin und Noyes, 2011; Cavanaugh und Powers, 2017; Herbst et al., 2015; Smiley et al., 2024).

Studien an Personen mit eingeschränktem propriozeptivem Sinn liefern wichtige Erkenntnisse zur Bedeutung des propriozeptiven Feedbacks für die sensomotorische Leistungsfähigkeit (Goble, 2010; J. Rothwell et al., 1982). Obwohl das motorische System bei Patienten mit afferenter Entkopplung intakt ist, zeigen sich dennoch deutliche Defizite in der motorischen Kontrolle (J. Rothwell et al., 1982). Hierzu zählen beispielsweise eine verminderte Kontrolle der multi-segmentalen Bewegungsdynamik (Sainburg et al., 1993, 1995), eine unzureichende Bewegungspräzision (Messier et al., 2003) und die Unfähigkeit, längere Bewegungsabläufe

korrekt durchzuführen (J. Rothwell et al., 1982).

Die aktuellste systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse bestätigt, dass sensomotorische Komponenten wie die Kniepropriozeption bei Patienten bis zu 24 Monate nach einer VKBR im Vergleich zu gesunden Probanden weiterhin beeinträchtigt sind (Fleming et al., 2022). Auch 2,5 Jahre nach einer VKBR, zeigen Leistungssportler noch Defizite in der posturalen Kontrolle, was sich durch längere dynamische Stabilisationszeit und höhere Bodenkontaktzeiten in der Landungsphase zeigt (K. A. Webster und Gribble, 2010). Dies kann ein Risikofaktor für eine Wiederverletzung sein (Paterno et al., 2010).

Eine verminderte Propriozeption nach einer VKBR wird als eine der Hauptursachen für das erhöhte Risiko von erneuten Verletzungen und Leistungseinbußen angesehen (Fleming et al., 2022; Han et al., 2016; S. Lephart und Fu, 1995; Tayfur et al., 2020; Vitharana et al., 2025). Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, enthält das intakte VKB Mechanorezeptoren, die Veränderungen der Gelenkposition, Bewegungsrichtung, Spannung, Beschleunigung und Geschwindigkeit registrieren (Pape und Kurtz, 2014; Schmidt, 2013; Wilcke, 2013). Nach einer VKBR kommt es trotz Rekonstruktion zu keiner direkten Reinnervation dieser Mechanorezeptoren (Ordahan et al., 2015; Reider, Arcand, Diehl, Mroczek, Abulencia, Stroud et al., 2003; Relph und Herrington, 2016c; Strong et al., 2021; van Melick et al., 2016; Waldron et al., 2022; Young et al., 2016). Eine verminderte Anzahl dieser Rezeptoren führt zu einer gestörten Propriozeption (Adachi et al., 2002; Strong et al., 2021). Die in der Literatur verdeutlichte funktionelle Instabilität kann auf ein kinästhetisches Defizit und eine veränderten neuromuskulären Funktion aufgrund der verminderten somato-sensorischen Rückmeldung zurückzuführen sein (Fleming et al., 2022; Riemann und Lephart, 2002; Wilcke, 2013). Fehlende propriozeptive Informationen zur präzisen Regulierung der neuromuskulären Kontrolle können, insbesondere bei hohen Leistungsanforderungen wie schnellen Richtungswechseln, in den für VKBR prädestinierten Sportarten, zu einem erhöhten Risiko für erneute Verletzungen und Koordinationsdefizite führen (Fleming et al., 2022; Fremerey et al., 2000).

2.2.2 Cutt-Off Kriterien der Testkomponenten

Zum Bestehen der RTS Testbatterie müssen je nach Zusammenstellung der Testbatterie bestimmte Cutt-Off Kriterien erfüllt sein. Das gängigste Cutt-Off Kriterium zum Bestehen der Einzeltests ist der LSI (Barber-Westin und Noyes, 2011; Barke et al., 2021; Gokeler, Welling, Zaffagnini et al., 2017; Smiley et al., 2024; K. E. Webster und Hewett, 2019; Wellsandt et al., 2017). Der LSI bewertet die Leistung der von der Verletzung betroffenen Seite mit der nicht-betroffenen Seite. Hieraus ergibt sich dann ein Index, welcher in Prozent beurteilt wird (siehe Formel 1) (Herbst et al., 2015; Moser und Bloch, 2015; Wellsandt et al., 2017; Zumstein et al., 2022). Der Vergleich mit der gesunden Extremität minimiert Störvariablen wie die biologische interpersonelle Variabilität (Zumstein et al., 2022). Das Bestehen der Einzeltest wird

meist mit einem LSI von $\geq 80\text{-}90\%$ angegeben (Abrams et al., 2014; Barke et al., 2021; Herbst et al., 2015; Nawasreh et al., 2018; K. E. Webster und Hewett, 2019; Zumstein et al., 2022). Die Interpretation sollte mit Vorbehalt erfolgen, da der LSI allein keine Aussagen über die Bewegungsqualität liefert und funktionelle Defizite in der Bewegungsqualität somit übersehen werden könnten (Gokeler et al., 2022). Systematische Übersichtsarbeiten und klinische Untersuchungen zeigen, dass es trotz nach LSI bewerteter Sprungweite zu deutlichen kinematischen Defiziten der Probanden kam und 60% trotz einem $\text{LSI} \geq 90\%$ veränderte Bewegungsmuster bei der Landung zeigten (Kotsifaki et al., 2020; Welling et al., 2018). Ebenso kann nicht davon ausgegangen werden, dass die betroffene Seite die vermeidlich schwächere Seite ist, wenn es keine vergleichbaren Daten der Sportler vor dem Eintreten der Verletzung gab (Barke et al., 2021; Wellsandt et al., 2017). Des weiteren bestehen nach einer VKBR bilaterale neuromuskuläre Defizite und abnormale Bewegungsmuster (Gokeler, Welling, Benjaminse et al., 2017). Weiterführend spielt die Seitendominanz eine wichtige Rolle bei der Beurteilung von Einzelkomponenten der RTS Testbatterien (Herbst et al., 2015; Zumstein et al., 2022). Die Berücksichtigung der Beindominanz bei der Interpretation des LSI scheint von entscheidender Bedeutung für die Senkung des Verletzungsrisikos bei Patienten mit VKB Rekonstruktion zu sein (Herbst et al., 2015; Zumstein et al., 2022). Patienten, die sich an ihrer dominanten Extremität verletzt haben, sollten strenger mit einem höheren LSI-Cut-off-Level bewertet werden als Patienten, welche sich an der nicht-dominante Extremität verletzt haben (Herbst et al., 2015; Wellsandt et al., 2017; Zumstein et al., 2022).

$$\text{LSI} = \left(\frac{\text{Wert der verletzten Seite}}{\text{Wert der unverletzten Seite}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Weitere Kriterien sind Bewegungsanalysetools für Sprung- und Agilitätstests, welche in den Sagittal- und Frontalebene mit einem Punktesystem die unterschiedlichen Komponenten wie den Knievalgus oder die Fußposition bei der Landung, bewerten (Gokeler, Welling, Zaffagnini et al., 2017; Moser und Bloch, 2015; Smiley et al., 2024). Das meist genutzte Bewertungssystem ist das Landing Error Scoring System, von welchem es unterschiedliche Modifizierungen gibt (Barke et al., 2021; Padua et al., 2015; Smiley et al., 2024). Studien konnten zeigen, dass ein Score > 5 ein Indikator für ein erhöhtes VKBR Risiko ist und vor allem unter Ermüdung ansteigt und Fehler und Kompensationsmechanismen beim Landeverhalten als risikobehaftete Bewegungsmuster und Prädiktoren einer VKBR gelten (Bell et al., 2014; Padua et al., 2015). In Bezug auf die Krafttest werden in der Literatur zusätzlich zum LSI Verhältnisse von Hamstring:Quadrizpes Kraftwerten genutzt (Barke et al., 2021; Gokeler, Welling, Zaffagnini et al., 2017; Kyritsis et al., 2016; Smiley et al., 2024), welche mit einer Mindestanforderung von 55% für Frauen und 62,5% für Männer angegeben werden (Gokeler, Welling, Zaffagnini et al., 2017). Cutt-Off Kriterium für die psychologischen Komponenten variieren je nach Fragebogen (Moser und Bloch, 2015). In Deutschland wird ACL-Return-to-Sport after Injury Scale aufgrund ihrer prädiktiven Aussagekraft hinsicht-

lich einer erfolgreichen Rückkehr zum Sport empfohlen. Hier wird ein Cut-Off Wert von 51% (Moser und Bloch, 2015) oder einem Wert > 56 Punkten (Arderin et al., 2013; Barke et al., 2021; Gokeler, Welling, Zaffagnini et al., 2017) angegeben. Ein Wert unter 51% deutet darauf hin, dass die Testperson dem Knie noch nicht genügend Vertrauen entgegenbringt und Angst vor einer erneuten Verletzung hat (Moser und Bloch, 2015). International wird der International Knee Documentation Committee Questionnaire am häufigsten in RTS Testbatterien genutzt (Barke et al., 2021; Smiley et al., 2024). Dieser inkludiert Fragen zu Symptomen, sportlicher Aktivität und der Kniefunktion (Collins et al., 2011) und mit einem Cut-Off Wert unter dem 15.ten Perzentil gesunder alters-gematchter Personen angegeben wird (Barke et al., 2021; Gokeler, Welling, Zaffagnini et al., 2017; Logerstedt et al., 2014).

2.3 Sensomotorische Testverfahren zur Bestimmung der propriozeptiven Fähigkeiten im Kniegelenk

Die Kniepropriozeption kann bis zu 24 Monate nach der chirurgischen Behandlung einer VKBR im Vergleich zu gesunden Probanden beeinträchtigt sein (Fleming et al., 2022). Ein wichtiger Faktor für die Rückkehr zur sportlichen Aktivität scheint die adäquate Fähigkeit der propriozeptiven Rückkopplungsmechanismen, die zur Bestimmung eines adäquaten Bewegungsmusters erforderlich sind (Han et al., 2016; Roberts et al., 2000; Stone et al., 2018). Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen intensiver physischer Anstrengung und der neuronalen Repräsentation der Informationen in den primären sensomotorischen Regionen des Gehirns (Goble, 2010; Nudo, 2006, 2007). Die Propriozeption ist dabei die wichtigste Quelle für das Feedback, das zur Förderung neuronaler Anpassungsprozesse beiträgt (Schwenkreis et al., 2001; Xerri et al., 1998).

2.3.1 Überblick der Testverfahren

Testverfahren zur Bewertung der Propriozeption umfassen die Erkennung von Spannung im Kniegelenk, sowie die Reproduktion von Gelenkwinkeln (Fleming et al., 2022; Han et al., 2016). Hillier et al. (2015) haben in ihrer systematischen Übersichtsarbeit gezeigt, dass es 32 unterschiedliche Testverfahren gibt, die darauf abzielen, die propriozeptive Genauigkeit zu messen (Hillier et al., 2015). Die Testverfahren unterscheiden sich neben ihrer Terminologien vor allem in der Anwendung (Han et al., 2016; Hillier et al., 2015). Die drei am häufigsten verwendeten Protokolle zur Beurteilung der Kniepropriozeption sind der Gelenkpositionsreproduktionstest ([JPR](#)), der Schwellentest zur Erkennung passiver Bewegung ([TTDPM](#)) und der Bewegungsdiskriminierungstest ([AMEDA](#))(Cameron und Adams, 2003; Fleming et al., 2022; Goble, 2010; Han et al., 2016; Hillier et al., 2015; Waddington und Adams, 1999) (siehe [Tabelle 1](#)).

Tabelle 1: Vergleich der Testbedingungen der drei häufigsten Propriozeptionstests: Eigene Darstellung, adaptiert aus Han et al., 2016. Abkürzungen: AMEDA = Active movement extent discrimination assessment; AUC = Area under the curve; JPR = Joint position reproduction; TTDPM = Threshold to detection of passive motion.

	TTDPM	JPR	AMEDA
Messmethode	Erkennung passiver Bewegung	Fehler Ziel- und reproduzierter Winkel	Winkel auf Skala einordnen
Bewegungsart	Passiv	Passiv/aktiv	Aktiv
Bewegungsgeschwindigkeit	↓↓	↓→	→
Testdurchläufe	3–5 gültige Versuche	3–5 (bis zu 10)	50
Propriozeptive Information	Bewegung	Position	Bewegung & Position
Visuelle Information	✗	✗	✓
Akustische Information	✗	✓	✓
Häufigste Körperhaltung	Liegend/sitzend	Liegend/sitzend	Stehend
Bewegungseinschränkung	✓	✓	✗
Gewichtsbelastung	↓→	↓→	→
Aufmerksamkeitsanforderung	↑↑	↑	→
Gedächtnisanforderung	↓↓	↑	↓
Einheit	[°]	[°]	AUC-Wert
Testdauer	≤ 6 Stunden	Dauer ∝ Versuche	ca. 10 Minuten

Der JPS Test bewerten die Genauigkeit der Reproduktion einer passiven oder aktiven Gelenkwinkelstellung, während der TTDPM die Fähigkeit einer Person misst, den Beginn einer passiven Bewegung zu erkennen (Fleming et al., 2022; Goble, 2010; Han et al., 2016; Strong et al., 2022). Der AMEDA wird stets aktiv und gerätegesteuert durchgeführt und dient der Prüfung, inwieweit Patienten propriozeptive Informationen nutzen können, um den Gelenkwinkel auf einer Skala korrekt einzuordnen (Han et al., 2016). In Meta-Analysen konnte gezeigt werden, dass die Propriozeption in VKB-verletzten Knien im Vergleich zu den kon-

tralateralen, nicht verletzten Knien derselben Personen (Kim et al., 2017; Relph et al., 2014) sowie zu asymptomatischen Kontrollgruppen (Relph et al., 2014) signifikant schlechtere Ergebnisse aufweist, wobei JPS Tests größere Unterschiede zeigten als TTDPM-Tests (Strong et al., 2021, 2022). Jedes dieser propriozeptiven Testverfahren hat Vor- und Nachteile (Han et al., 2016); jedoch wird in klinischen Situationen zunehmend der JPS zur Beurteilung der propriozeptiven Genauigkeit verwendet (Goble, 2010; Hillier et al., 2015; Hoshiba et al., 2020; Strong et al., 2023) und hat sich in Meta-Analysen (Strong et al., 2022) und klinischen Studien (Hoshiba et al., 2020; Kim et al., 2017) vor allem bei VKB-Patienten als valides Messinstrument zur Messung der propriozeptiven Fähigkeiten erwiesen.

2.3.2 Der aktive Kniewinkelreproduktionstest

Bei aktiven Kniewinkelreproduktionstests, welche zu den JPS Test gehören, wird ein Kniewinkel aktiv durch die Testperson oder passiv durch eine weitere Person eingestellt und muss mit der ipsilateralen oder kontralateralen Beinseite reproduziert werden (Han et al., 2016; Hillier et al., 2015). Aktive Kniewinkelreproduktionstests stimulieren die Gelenk- und Muskelrezeptoren und können so eine funktionellere Bewertung im Vergleich zur passiven Methode gewährleisten (S. M. Lephart et al., 1997). Hierbei wird in der Praxis meist der AAE als Zielparameter verwendet (Goble, 2010; Hillier et al., 2015). Für die Anwendung dieser Testverfahren sprechen insbesondere die physiologischen Grundlagen der Propriozeption während einer Bewegungsaufgabe (Pape und Kurtz, 2014; Schmidt, 2013; Wilcke, 2013). Es werden hauptsächlich Muskelspindeln, Ruffini-Rezeptoren und Gelenksrezeptoren aktiviert (Hillier et al., 2015; Proske und Gandevia, 2012). Vor allem bei der aktiven Reproduktion einer kontralateral vorgegebenen Gelenkposition bietet dieser Test die Möglichkeit, hemisphärische Asymmetrien in den sensomotorischen Fähigkeiten zu untersuchen (Goble, 2010) (siehe [Abbildung 3](#) und [Abbildung 4](#)). Diese physiologischen Abläufe kommen den Bedingungen einer (sportlichen) Fortbewegung am nächsten (Givoni et al., 2007; Olree und Vaughan, 1995).



(a)



(b)

Abbildung 3: Aktiver kontralateraler Kniewinkelreproduktionstest: **a** Sitzend, startend aus Knieextension; **b** Sitzend, startend aus Knieflexion (Eigene Darstellung).



(a)



(b)

Abbildung 4: Aktiver kontralateraler Kniewinkelreproduktionstest: **a** Bauchlage, startend aus Knieflexion; **b** Bauchlage, startend aus Knieextension (Eigene Darstellung).

Der Winkelreproduktionsfehler ist ein nützlicher Indikator für die propriozeptive Genauigkeit, denn Personen mit höheren Fehlern bei der Positionsbestimmung weisen häufig propriozeptive Defizite auf (Goble, 2010; Mir et al., 2008). Studien zeigen, dass unzureichende propriozeptive Rückmeldungen, wie eine schlechte Wahrnehmung der Gelenkposition, die Reproduktion des Kniewinkels beeinträchtigen und die Rückkehr zur Aktivität erschweren können (Barrett, 1991; Romero-Franco et al., 2017). Eine gute Wahrnehmung der Gelenkstellung scheint daher entscheidend für die Verringerung des Verletzungsrisikos und die Ver-

besserung chirurgischer Ergebnisse (Barrett, 1991; Romero-Franco et al., 2017).

Die Reliabilität und Validität der JPS Tests wird in wissenschaftlichen Studien als hoch beschrieben, während sie in klinischen Anwendungen durch die hohen Anforderungen an Geräte und Personal eingeschränkt sein kann (Hillier et al., 2015; Olsson et al., 2004). Strong et al. (2022) zeigten in einer Meta-Analyse, dass der JPS Test valide ist, um VKB-Verletzte von Gesunden sowie verletzte von nicht-verletzten Beinen zu unterscheiden. Allerdings wurde eine hohe Fehleranfälligkeit in den Studien festgestellt, was qualitative Aussagen zu Reliabilität oder Kriteriumsvalidität einschränkt (Strong et al., 2022). Der Vorteil aktiver JPS Tests ist, dass diese die funktionelle Nutzung der Propriozeption durch willentliche Bewegungen reflektieren und nicht durch externen sensorischen Input beeinflusst werden (Hillier et al., 2015). Der Test kann jedoch durch Schmerzen, unzureichendes kinästhetisches Gedächtnis, mangelnde motorische Kontrolle und kognitive Fähigkeiten eingeschränkt werden (Goble, 2010; Hillier et al., 2015). Ein fehlender Vergleich von Daten unter ähnlichen Aufgabenbedingungen kann zu einer relativen Unter- oder Überschätzung der Anpassungsfähigkeit eines Patienten führen und somit zu einer Fehldiagnose der propriozeptiven Sensibilität beitragen (Goble, 2010). Diese Unterschiede könnten aber nicht nur auf methodische Schwächen hinweisen, sondern ebenso auf verschiedene physiologische Einflussfaktoren zurückzuführen sein, die zwischen den Protokollen variieren und somit den JPS beeinflussen (Elangovan et al., 2014; Strong et al., 2022).

Die Vielfalt der verwendeten Methoden hat die Identifizierung und Implementierung standardisierter und allgemein anwendbarer Protokolle zur zuverlässigen Erkennung von Unterschieden im JPS erschwert (Gokeler et al., 2012; Han et al., 2016; Hillier et al., 2015; Relph et al., 2014; Strong et al., 2022). Strong et al. (2022) fanden in ihrer systematischen Übersichtsarbeit 119 verschiedene JPS-Testverfahren, welche sich unter anderem in der Körperposition, der Bewegungsrichtung, dem Referenzwinkel, der Wahl des Referenzbeins und dem Messinstrument unterscheiden (Strong et al., 2022). Es hat sich gezeigt, dass sich bei der aktiven Reproduktion verschiedener Kniegelenkwinkel signifikante Unterschiede in den ausgelösten Mechanorezeptoren ergeben, die in erster Linie von der Körperposition, der Richtung der Bewegung, dem Referenzwinkel, als auch der Ermüdung ergeben (Goble, 2010; Olsson et al., 2004; Relph und Herrington, 2015; Strong et al., 2021, 2022; Suner-Keklik et al., 2017; Vila-Chã et al., 2011).

In Bezug auf die Körperposition zeigen manche Studien höhere Fehler für die liegende Position (Olsson et al., 2004; Relph und Herrington, 2015) und manche für die sitzende Position zeigen (Clark et al., 2016; Olsson et al., 2004). Auch die Bewegungsrichtung scheint einen Einfluss auf den Winkelreproduktionsfehler zu haben. Einige Studien konnten signifikant höhere Werte nachweisen, wenn sich das Bein von der Extension in die Flexion bewegt (Clark

et al., 2016; Haggerty et al., 2021; Mir et al., 2008; Relph und Herrington, 2015, 2016a) und einige wenn es sich von der Flexion in die Extension bewegt (Clark et al., 2016; Haggerty et al., 2021; Relph und Herrington, 2015). Beeinflusst werden die Ergebnisse zusätzlich von unterschiedlich vorgegebenen Referenzwinkeln (Da Silva et al., 2021; Da Silva et al., 2023; Haggerty et al., 2021; Olsson et al., 2004; Relph und Herrington, 2015). Ebenso gibt es Hinweise darauf, dass die Beindominanz mit der propriozeptiven Genauigkeit verbunden ist. Sie wurde in einigen Studien als einflussreicher Faktor identifiziert (Azevedo et al., 2021; Galamb et al., 2018; Relph und Herrington, 2016a), in anderen jedoch nicht (Busch et al., 2023; Cug et al., 2016). Unterschiede zwischen der dominanten und nicht-dominanten Seite konnten vor allem zwischen trainierten und untrainierten Teilnehmern festgestellt werden (Azevedo et al., 2021; Relph und Herrington, 2016a). Diskutiert wird noch, ob sportliches Training einen positiven Einfluss auf die propriozeptiven Fähigkeiten hat (Grinberg et al., 2022). Gezeigt werden konnte, dass Training positive morphologische Anpassungen der Muskelspindeln fördert und neuroplastische Veränderungen im zentralen Nervensystem, wie beispielsweise die Verstärkung synaptischer Verbindungen induziert (Azevedo et al., 2021).

Zusätzlich beeinflusst die Wahl des Referenzbeins das Testergebnis. Wird der Winkel ipsilateral reproduziert, werden in erster Linie kognitive und Gedächtnisfähigkeiten abgefragt, und weniger die propriozeptiven Fähigkeiten. Dies ist bei der Reproduktion des Winkels auf der kontralateralen Körperseite nicht der Fall; hier wird zusätzlich der interhemisphärische Transfer einbezogen (Goble, 2010). Wird jedoch nur eine Körperseite, wie beispielsweise die Seite der VKBR getestet, bleibt bei kontralateraler Abfrage unklar, ob das propriozeptive Defizit im ipsilateralen, kontralateralen oder in beiden Extremitäten vorhanden ist (Goble, 2010). Es lassen sich Unterschiede zwischen der rechten und linken Körperseite, sowie zwischen der dominanten und nicht-dominanten Körperseite feststellen (Azevedo et al., 2021; Cug et al., 2016; Galamb et al., 2018; Goble, 2010; Relph und Herrington, 2016a; Voight et al., 1996). Geringere Winkelreproduktionsfehler auf der linken Körperseite könnten auf eine verstärkte Rolle der rechten Hemisphäre bei der Verarbeitung propriozeptiver Rückmeldungen zurückzuführen sein (Goble, 2010; Strong et al., 2023), denn jede Extremität ist von der Gehirnregionen der kontralateralen Gehirnhälfte mit kontrolliert (Vulliemoz et al., 2005). Schließlich zeigt die Forschung, dass die kontralaterale sensorische Rückkopplung, insbesondere die sekundären Afferenzen der Muskelspindel und des Golgi-Sehnenorgans über Crossreflexe der Interneurone, vermutlich eine wesentliche Rolle bei der Entstehung einer effizienten neuronalen Antwort spielt (Gervasio et al., 2017). Dieses Erkenntnis hat eine deutliche Bedeutung für das Verständnis der Rehabilitation der Lokomotion von Patienten mit VKBR, da eine ständige Koordination zwischen dem linken und dem rechten Bein erforderlich ist, um die dynamische Stabilität menschlicher Fortbewegung, insbesondere in variablen Umgebungen wie bei schnellen sportlichen Reaktionen, zu gewährleisten (Gervasio et al., 2017; Nielsen und Sinkjær, 2002; Wilcke, 2013). Meta-Analysen zum Einfluss des Geschlecht des

Patienten konnten keinen signifikanten Einfluss auf den Winkelreproduktionsfehler nachweisen (Busch et al., 2023). In Bezug auf das Alter, als weiteren personenabhängigen Faktor, konnte gezeigt werden, dass sich die Winkelreproduktionsfähigkeit von der Kindheit über die Jugend bis zum jungen Erwachsenenalter verbessert, dann jedoch mit steigendem Alter abnimmt (Goble, 2010; Lee und Lim, 2023; Relph und Herrington, 2016a).

Die Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren ist entscheidend, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der JPS Tests zu verbessern und präzise Diagnosen der propriozeptiven Sensibilität zu ermöglichen (Strong et al., 2022). Werden die Daten nicht unter ähnlichen Bedingungen verglichen, kann dies zu einer relativen Unter- oder Überschätzung des Winkelreproduktionsfehlers, und damit zu einer Fehleinschätzung der propriozeptiven Fähigkeiten führen (Fleming et al., 2022; Goble, 2010; Hillier et al., 2015; Strong et al., 2022).

3 Forschungsfragen und Hypothesen

Auf Grundlage der in Kapitel 2 dargestellten Forschungslücke der bisherigen wissenschaftlichen Evidenz, ergeben sich folgende Forschungsfragen und Hypothesen als Basis des Erkenntnisgewinns für die sportwissenschaftliche Forschung:

Forschungsfrage 1: Welche personenunabhängigen Testfaktoren beeinflussen den AAE in aktiven Kniewinkelreproduktionstests?

Hypothese 1: Der AAE in aktiven Kniewinkelreproduktionstests wird durch personenunabhängige Faktoren beeinflusst.

(Publikation A – Systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse)

Forschungsfrage 2: Ist der AAE abhängig von der Körperposition der Person (sitzend/in Bauchlage) und der Bewegungsrichtung des Beins (Extension/Flexion) in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests bei gesunden Erwachsenen?

Hypothese 2: Die Körperposition (sitzend/in Bauchlage) und Bewegungsrichtung (Extension/Flexion) beeinflussen den resultierenden AAE in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests bei gesunden Erwachsenen.

(Publikation B & C – Prospektive randomisierte Beobachtungsstudie)

Forschungsfrage 3: Hat die Beindominanz einen Einfluss auf den AAE in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests bei gesunden Erwachsenen?

Hypothese 3: Die Beindominanz hat einen Einfluss auf den AAE des Kniewinkels in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests bei gesunden Erwachsenen.

(Publikation C – Prospektive randomisierte Beobachtungsstudie)

Forschungsfrage 4: Ist die propriozeptive Fähigkeit, gemessen über den AAE in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests, zwei Jahre nach einer VKB Rekonstruktion noch beeinträchtigt?

Hypothese 4: Patienten zwei Jahre nach vorderer VKB Rekonstruktion weisen im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest einen signifikant höheren AAE im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe auf.

(Publikation D – Randomisiert-kontrollierte Studie)

Forschungsfrage 5: Beeinflusst die Wahl des Referenzbeins (operiert/gesund; rechts/links; dominant/nicht-dominant) den AAE in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktions-tests?

Hypothese 5.1: Der AAE im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest unterscheidet sich bei Patienten zwei Jahre nach VKB Rekonstruktion signifikant, abhängig davon, ob das operierte oder das nicht-operierte Bein den Zielwinkel vorgibt.

Hypothese 5.2: Der AAE im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest unterscheidet sich bei Patienten zwei Jahre nach VKB Rekonstruktion signifikant, abhängig davon, ob das dominante oder das nicht-dominante Bein den Zielwinkel vorgibt.

Hypothese 5.3: Der AAE im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest unterscheidet sich bei gesunden Erwachsenen nicht signifikant, wenn das linke oder das rechte Bein den Zielwinkel vorgibt.

(Publikation D – Randomisiert-kontrollierte Studie)

4 Publikationen

4.1 Publikation A

Wieber, J., Müller-Rahmel, L., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2024). Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-analysis. *Journal of experimental orthopaedics*, 11(3), e12091.

<https://doi.org/10.1002/jeo2.12091>

Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-analysis

Juliane Wieber^{1,2} | Leon Müller-Rahmel^{3,4} | Rüdiger Reer¹ | Robert Rein⁴ | Bjoern Braunstein^{3,5,6,7}

¹Department of Sports and Exercise Medicine, Institute of Human Movement Science, University of Hamburg, Hamburg, Germany

²Department of Exercise Physiology and Sports Medicine, Olympic Training Centre Berlin, Berlin, Germany

³Institute of Biomechanics and Orthopaedics, German Sport University, Cologne, Germany

⁴Institute of Training Science and Sports Informatics, German Sport University, Cologne, Germany

⁵German Research Centre of Elite Sport, German Sport University, Cologne, Germany

⁶Centre for Health and Integrative Physiology in Space, German Sport University, Cologne, Germany

⁷Institute of Movement and Neurosciences, German Sport University, Cologne, Germany

Correspondence

Juliane Wieber, Department of Sports and Exercise Medicine, Institute of Human Movement Science, University of Hamburg, Turmweg 2, Hamburg 20354, Germany.
Email: j.wieber@outlook.de

Bjoern Braunstein, Institute of Movement and Neurosciences, German Sport University, Am Sportpark Müngersdorf 6, Cologne 50933, Germany.
Email: braunstein@dshs-koeln.de

Funding information

None

Abstract

Purpose: The systematic review and meta-analysis investigated subject-independent test factors that influence the absolute angle error in active knee angle reproduction tests.

Methods: Five electronic databases were searched to identify relevant studies published before 20 December 2023. Studies were included that were published in either English or German and that investigated joint proprioception in the healthy knee. Included studies were also required to have participants 18–60 years old and free of lower-limb injury, neurological disorders and diseases affecting joint position sense. Risk of bias was assessed using a Cochrane risk-of-bias tool.

Results: Of the 2023 articles identified, 26 studies (1082 participants) were included in the meta-analysis. The meta-analysis showed a significant pooled standard mean difference in the absolute angular error for body orientation, direction of movement and fatigue. Active knee angle reproduction tests were found to have a lower absolute angular error when performed in the sitting position compared to the prone position (SMD = −0.56; 95% CI = −1.00 to −0.12). The absolute angular error was found to be greater in cases of knee flexion compared to knee extension (SMD = 0.71; 95% CI = 0.18–1.24). General and local muscle fatigue were found to result in a higher absolute angular error (SMD = 1.39; 95% CI = 1.04–1.75).

Conclusion: Hence, fatigue, body orientation and direction of movement influence the extent of the absolute angular error in active knee angle reproduction tests. Practitioners should be aware that the test conditions and the patient's level of fatigue can affect the results of such tests and that directly comparing results obtained using different test protocols may not be appropriate. The test protocol should be well documented and applied consistently in the clinical setting.

Level of Evidence: Level III, systematic review with meta-analysis.

Abbreviations: AAE, absolute angular error; DOM, direction of movement; ICC, intraclass correlation coefficient; IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers library; JPS, joint position sense; ROM, range of motion; RPE, rating of perceived exhaustion; SAE, signed angular error; SD, standard deviation; SEM, standard error of measurement; SMD, standard mean difference.

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© 2024 The Author(s). *Journal of Experimental Orthopaedics* published by John Wiley & Sons Ltd on behalf of European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy.

KEYWORDS

ACL, joint position sense, orthopaedics, physiotherapy, proprioception, rehabilitation, return to activity, return to competition, return to play, return to sport

INTRODUCTION

Proprioception is a complex, multi-modal construct that is not yet fully understood. Sherrington was among the first to use the term 'proprioception', describing it as 'a character of the stimulations occurring in the deep field of receptors, which are traceable to actions of the organism itself' [51]. Grob et al. described proprioception as the sum of kinesthesia and joint position sense (JPS) [16]. Kinesthesia is defined as the awareness of joint movement and is dynamic in nature, while JPS is defined as the awareness of the position of a joint in space and is a static phenomenon [16]. Many receptors cooperate to provide information about body position and movement in space, and they are part of three body systems: the vestibular, visual and somatosensory systems. The latter is responsible for the perception of touch, movement and body segment position [17, 29] and utilizes different types of mechanoreceptors to integrate different sensory perceptions. The two primary types of proprioceptors responsible for JPS are muscle spindles and Golgi tendon organs. Muscle spindles are stretch receptors embedded within muscle fibres that detect changes in muscle length and the rate of change. They provide information about muscle stretch and contraction, which is used to determine the position of the body and the direction of movement (DOM; concentric vs. eccentric movement) [6, 19, 40, 41].

The mechanoreceptors constantly provide proprioceptive information to the motor cortex to ensure adequate movement control [29, 35, 47]. Proprioception is an important aspect of knee stability and thus plays an indispensable role in an individual being able to undertake daily activities and physical exercise. In active knee angle reproduction tests, participants are asked to replicate the position of the target knee using their unaffected or contralateral limb. The outcome of these tests is most often absolute angle error (AAE) or signed angle error (SAE) [19]. These types of joint position reproduction tests offer efficiency and the ability to explore hemispheric asymmetries in sensorimotor abilities [13]. However, the diversity of the methods used for proprioceptive assessment has prevented the identification and implementation of standardized and broadly applicable protocols for reliably detecting differences in JPS [15, 42, 44], and low test validity is an issue. This situation may have arisen due to a lack of understanding of the factors that impact the test results. While it is clear that test results may vary with the protocols and equipment

used, which are highly dependent on the clinical setting and practitioners' preferences [19], factors that influence proprioceptive perception and any resulting AAE remain to be determined. Hence, before the results from different active knee angle reproduction tests can be reliably compared, the factors that influence the AAE must be identified. Therefore, the aim of this systematic review was to identify subject-independent test factors that affect the AAE in active knee angle reproduction tests.

METHODS**Protocol and registration**

Before starting the study, it was registered in the PROSPERO International Prospective Register of Systematic Reviews (registration number: CRD420 23333162). The systematic review and meta-analysis were performed orientated on the Guidelines for Meta-Analysis from the Cochrane Collaboration (Version 6.4, 2023) [7, 21]. However, contrary to the guidelines, a librarian was not involved, and grey literature was not included. As shown in Table 1, the PICO strategy was used to define the population (P), intervention (I), comparison (C) and outcomes (O) of the included studies to address the following research question: Which subject-independent test factors influence the AAE in active knee angle reproduction tests? The study followed the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis (PRISMA) guidelines for designing and reporting systematic reviews [37].

TABLE 1 PICO strategy in accordance with the Cochrane Collaboration [21] regarding the research question: Which subject-independent test factors influence the absolute angular error in active knee angle reproduction tests?

Criteria	Description
Population	Healthy humans; age 18–60 years
Intervention	Proprioceptive assessment via active knee angle reproduction test
Control Conditions	Different active knee angle reproduction test protocols with subject-independent influencing factors
Outcome	Absolute knee angle reproduction error [°]

Search strategy

Five electronic databases (PubMed, the Institute of Electrical and Electronics Engineers [IEEE] library, SPORTDiscus, Web of Science and the Cochrane Library) were searched for articles published before 20 December 2023. To achieve high sensitivity and minimize the chance of missing relevant articles, a broad search strategy was used. To avoid overlooking any articles, none of the utilized MeSH terms were further narrowed down (see Supporting Information S5 for detailed information on the search strategy).

Eligibility criteria

For inclusion in this study, articles were required to be peer-reviewed, published in either English or German, and described studies that investigated joint proprioception in the healthy knee. To be included in our review and meta-analysis, the described studies had to have participants aged 18–60 years old who were free of lower-limb injury, neurological disorders and disease affecting JPS, since morbidities such as osteoarthritis, hypermobility syndrome and spasticity influence proprioceptive acuity [2, 22, 54].

Proprioception had to be assessed via an active knee angle reproduction test in a non-weight-bearing and open-kinetic chain position due to gravitational and inertial effects on the sense of proprioception. An active knee angle reproduction test was defined as a test in which the participant had to actively reproduce a given angle with the aim of achieving the smallest possible deviation between the target angle and the reproduced angle of the ipsilateral leg. The target angle had to be chosen by the examiner, and the lower limb had to be moved passively to the target angle (Figures 1 and 2). The subject had to remain in this position for 3–5 s to memorize the angle. Studies with retention times >5 s were excluded. The different factors influencing the active JPS had to be subject-independent (e.g., not age, gender or level of fitness), and the test had to be completed without the use of aids (e.g., sleeves, braces or tape). The test had to be performed without visual feedback, and the AAE (measured in degrees) had to be an outcome parameter. The AAE has been shown to be more reliable and valid than the SAE in practical settings [34, 42]. Interventions (e.g. playing a match or warming up) that were conducted >1 h before testing were not considered acute. Studies that included knee angle reproduction tests were conducted with additional resistance to create weight-bearing

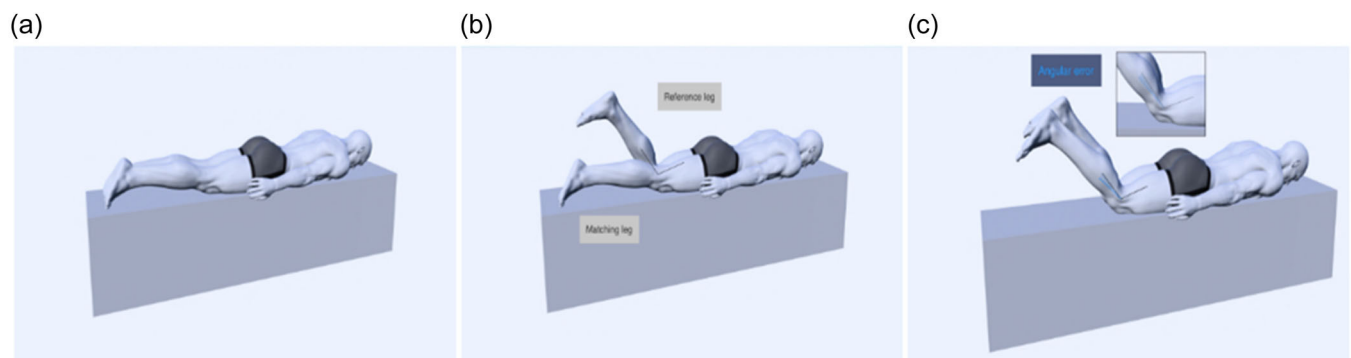


FIGURE 1 Active knee angle reproduction test in the prone position starting from extension: (a) Start position; (b) Reference leg with target angle flexed; (c) End position with the test limb matching the target angle; Angular error = target knee angle – matching knee angle.

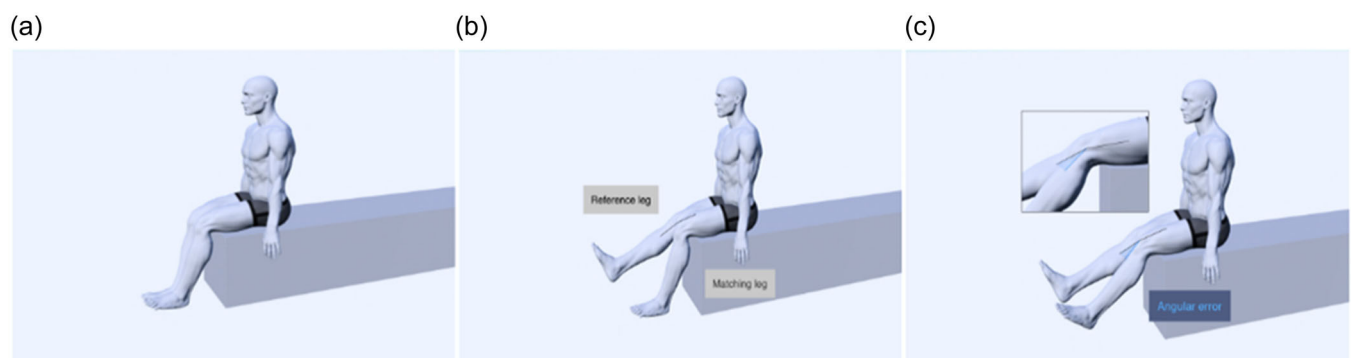


FIGURE 2 Active knee angle reproduction test in the sitting position starting from flexion: (a) Start position; (b) Reference leg with target angle flexed; (c) End position with the test limb matching the target angle; Angular error = target knee angle – matching knee angle.

conditions or knee support (e.g., braces and taping) were excluded, as they did not measure isolated knee JPS under normal conditions [55]. For inclusion in the meta-analysis, studies had to clearly state the absolute value of the AAE and the standard deviation (SD) or standard error of measurement (SEM). If the SEM was reported, it was converted into the SD (Equation 1).

$$SD = SEM \cdot N \quad (1)$$

Data collection

After the removal of duplicate articles, two researchers (JW and LMR) independently screened the titles and abstracts using the Rayyan web application [36]. Two researchers (JW and LMR) assessed all potentially eligible full-text articles to confirm their eligibility. Kappa (κ) values were used to assess the inter-reviewer agreement for the article screening and interpreted as follows: ≤ 0 no agreement, 0.01–0.20 no to slight, 0.21–0.40 fair agreement, 0.41–0.60 moderate agreement, 0.61–0.80 substantial agreement and 0.81–1.00 almost perfect agreement [28, 31]. Inconsistencies and disagreements were discussed by the researchers and a consensus was reached with the input of a third researcher (BB). Studies were only included when all the authors reached a consensus. If insufficient data were reported, the corresponding author was contacted to request missing data. If the corresponding author did not reply, two reminders were sent at least 12 weeks apart. If there was no response after two reminders or if the corresponding author was not able to provide the requested data, the data were denoted as 'not available/not retrieved'. All studies that conformed to the PICO strategy met the inclusion criteria, and showed a relevant connection to the research question were included in the systematic review.

Data extraction

Two authors (JW and LMR) performed the data extraction using standardized data extraction forms found on the Cochrane RevMan Web platform (Version: 7.1.2) [21]. Data on the following parameters were extracted: the publication's details, the number of subjects and their age and level of fitness, the test protocol (position, DOM, target angles and trial repetitions) and the AAE (mean $\pm$ SD) for the compared test conditions (see Supporting Information S4).

Meta-analysis

The meta-analysis was conducted using random-effects models with the inverse variance method, utilizing the

RevMan Web application 2023 (Version: 7.1.2) [7]. Standard mean difference (SMD) was employed as the effect measure, while the alpha (α) level was set to 0.05. Subgroup analyses were performed to separately assess the influence of subject-independent factors that were observed in two or more studies using the same test procedure. The reliability and validity of the test procedures were evaluated based on the SEM and intraclass correlation coefficient (ICC). The interpretation of the ICC values adhered to the guideline established by Koo and Li [26].

Risk of bias assessment

The quality assessment of the included studies was performed by two reviewers who used the risk-of-bias analysis tool (ROB 2.0) developed by the Cochrane Collaboration [7, 21]. κ values were used to assess the inter-reviewer agreement for the risk of bias assessment and interpreted as stated earlier. To ensure accuracy, inconsistencies and disagreements were discussed by the researchers, and a consensus was reached with the input of a third researcher (BB). In the risk of bias assessment, a '+' symbol represented low risk, a '-' symbol indicated high risk and a '?' symbol denoted some concerns.

RESULTS

A total of 38 studies were initially identified for potential inclusion in the systematic review (Cohen's $\kappa = 0.86$; 95% confidence interval [CI] = 0.85–0.87), of which 26 met the inclusion criteria for the meta-analysis (Cohen's $\kappa = 0.94$; 95% CI = 0.91–0.96). A flow diagram of the selection process is shown in Figure 3. Six studies were not retrieved due to not being able to download a full source file and the authors not responding to multiple requests. Based on the review of the current literature, the main factors that likely influence the outcome of an active knee angle reproduction test are the body position in which the participant is tested (standing vs. sitting), the direction of the movement (flexion vs. extension) and fatigue (not fatigued vs. fatigued). Protocols designed to induce local fatigue involved interventions that fatigued the knee extensors and/or flexors. Protocols designed to induce general fatigue involved subjects participating in sports matches or running to achieve whole-body metabolic stress. The comparisons are shown in Table 2. Except for two studies (8%) [33, 43], all the studies (88%) used ≤ 6 repetitions. In one study (4%), the participants did not undertake multiple trials [20]. The percentage of inter-rater agreement ranged between 63% and 90% for all seven bias domains. Cohen's kappa was poor for other bias (Cohen's

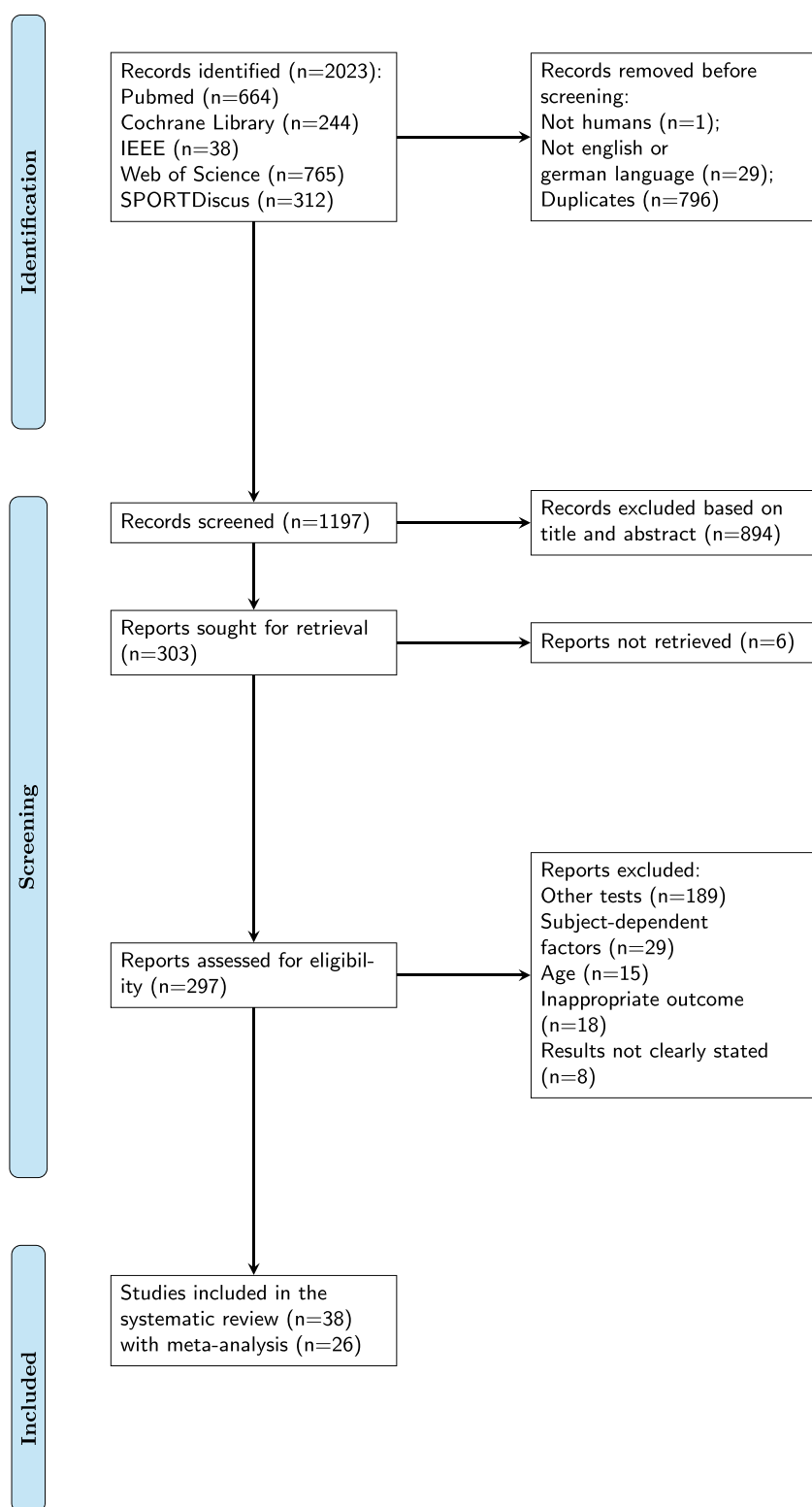


FIGURE 3 PRISMA flow chart of the study selection process according to the guidelines of the Cochrane Collaboration [21, 37]. PRISMA, Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis.

$\kappa = 0.09$; 95% CI = -0.07 to 0.22) and incomplete outcome data (Cohen's $\kappa = 0.05$; 95% CI = -0.10 to 0.20), fair for blinding of participants and personnel (Cohen's $\kappa = 0.37$; 95% CI = 0.19 – 0.55) and allocation concealment (Cohen's $\kappa = 0.32$; 95% CI = 0.12 – 0.50),

moderate for selective reporting (Cohen's $\kappa = 0.51$; 95% CI = 0.39 – 0.63) and substantial blinding of outcome assessors (Cohen's $\kappa = 0.78$; 95% CI = 0.69 – 0.87) and for random sequence generation (Cohen's $\kappa = 0.75$; 95% CI = 0.66 – 0.84).

Body orientation

The meta-analysis indicated that there was a significant difference in the AAE when the participants were tested in the prone position ($n = 271$ participants, 50%) compared to the sitting position ($n = 271$ participants, 50%). However, the heterogeneity was low ($I^2 = 27\%$) (Figure 4). In the middle of the physiological range of motion (ROM; 30–70° knee flexion), higher errors were noted in the prone position. At the lower (10–30°) and higher (70–100° knee flexion) end of the ROM, the error in the sitting position was higher [34, 42, 59]. Three studies (60%) investigated test–retest reliability and showed ICCs between 0.13 and 0.92 for the seated position and ICCs between 0.17 and 0.90 for the prone position

[6, 34, 42]. The SEM values ranged from 0.40° to 1.98° in the seated position and from 0.45° to 3.14° in the prone position [6, 34, 42, 59]. An overview of the overall AAE (mean $\pm$ SD) and SMD values is given in Figure 4 (see Supporting Information S1 for detailed study information).

Direction of movement

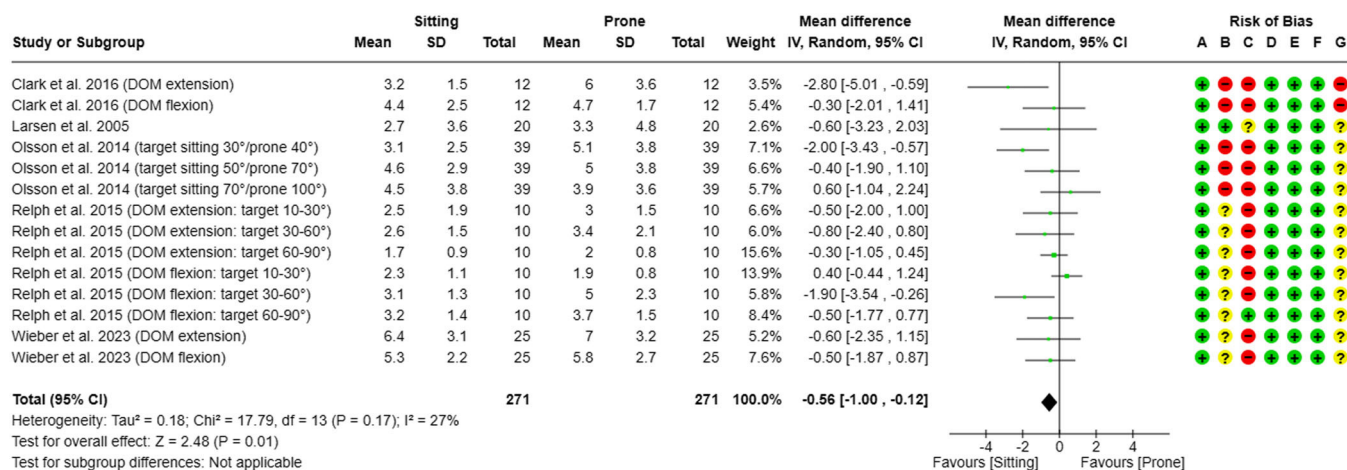
The results of the meta-analysis indicated that the AAE was significantly greater during knee extension ($n = 224$ participants, 50%) than during knee flexion ($n = 224$ participants, 50%). However, the heterogeneity was moderate ($I^2 = 68\%$) (Figure 5).

At the lower end of the ROM (10–30°), higher errors were observed during flexion. In the middle and towards the higher end of the ROM (30–90°), the error was higher during extension [42]. One study (20%) demonstrated that the AAE was higher during flexion with a target angle of 20° but higher during extension with a target angle of 70° [18]. Two studies (40%) investigated test–retest reliability and showed poor to good ICCs (0.13–0.87) for knee extension and poor to excellent ICCs (0.03–0.90) for knee flexion [6, 42]. The SEM values ranged from 0.5° to 1.8° for knee extension and from 0.4° to 3.1° for knee flexion [6, 42, 59]. An overview of all the AAE (mean $\pm$ SD) and SMD values is given in Figure 5 (see Supporting Information S2 for detailed study information).

TABLE 2 Allocation of groups for meta-analysis.

Groups	
Body orientation	Sitting vs. Prone
Direction of movement	Flexion vs. Extension
Fatigue	
Local fatigue	Non-fatigued vs. Local fatigued
General fatigue	Non-fatigued vs. General fatigued

Note: Local fatigue: involved interventions that fatigued the knee extensors and/or flexors. General fatigue: involved subjects participating in sports matches or running to achieve whole-body metabolic stress.



Risk of bias legend

- (A) Random sequence generation (selection bias)
- (B) Allocation concealment (selection bias)
- (C) Blinding of participants and personnel (performance bias)
- (D) Blinding of outcome assessment (detection bias)
- (E) Incomplete outcome data (attrition bias)
- (F) Selective reporting (reporting bias)
- (G) Other bias

FIGURE 4 Forest plot of the influence of the subjects' body position on the absolute knee angle reproduction error in active knee angle reproduction tests with subjects tested in the prone or sitting body position. CI, confidence Interval; DOM, direction of movement; IV, inverse variance; SD, standard deviation; target, target angle.

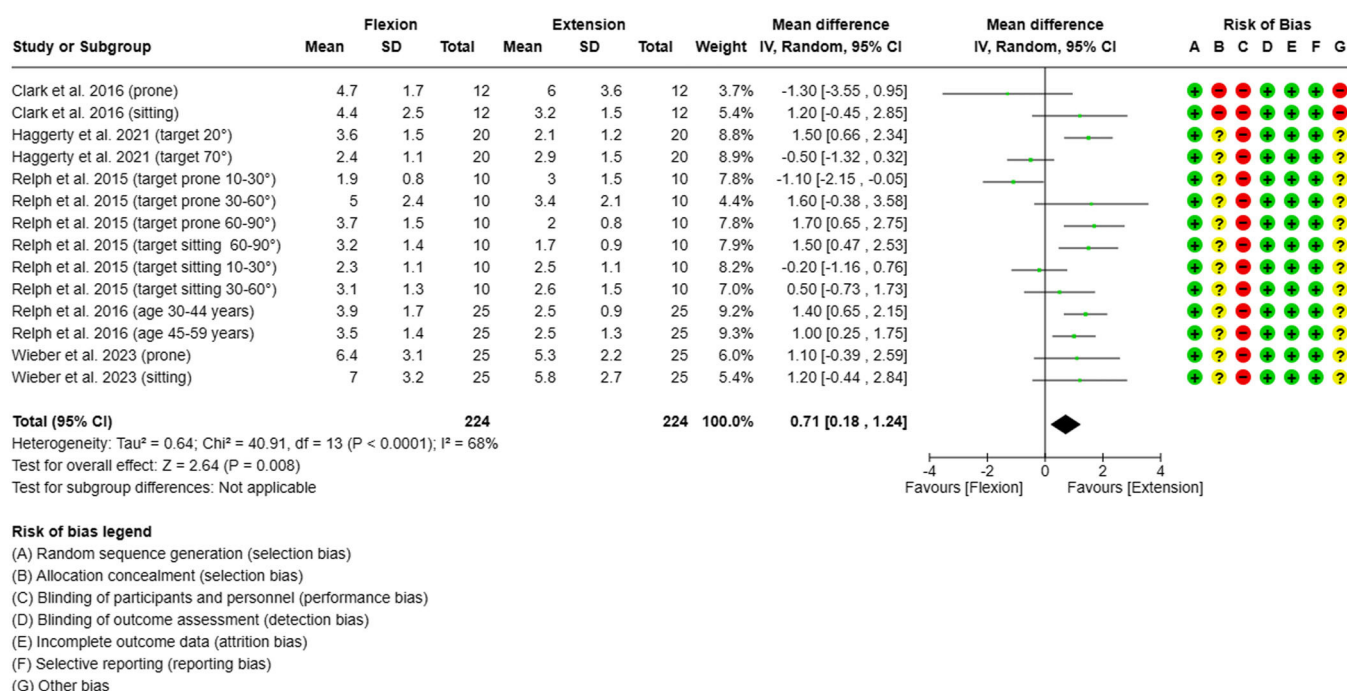


FIGURE 5 Forest plot of the influence of the direction of movement of the subjects' lower limb on the absolute knee angle reproduction error in active knee angle reproduction tests. CI, confidence interval; IV, inverse variance; SD, standard deviation; target, target angle.

Fatigue

The meta-analysis results indicated that the AAE was greater when the subject was fatigued ($n = 532$ participants, 50%) than non-fatigued ($n = 532$ participants, 50%), with the studies showing high heterogeneity ($I^2 = 81\%$) (Figure 6). Most of the studies (76%) reported a significant decline in proprioceptive acuity measured in an active knee angle reproduction test [5, 11, 14, 20, 38, 39, 45, 46, 49, 50, 53, 57, 58]. The studies were subdivided into those that involved local and general fatigue. An overview of all the AAE (mean $\pm$ SD) and SMD values is given in Figure 6 (see Supporting Information S3 for detailed study information).

General fatigue

The subgroup analysis of the effect of general fatigue indicated that the AAE was greater when subjects were fatigued ($n = 167$ participants, 50%) than non-fatigued ($n = 167$ participants, 50%), with the studies showing high heterogeneity ($I^2 = 81\%$) (see Figure 6). To induce general fatigue, three studies (43%) used treadmill protocols (incline of 1%–15%) [5, 14, 32]. One of these studies used a treadmill protocol combined with jumping exercises [14]. All these studies showed a significantly greater AAE after the general fatigue interventions were administered [5, 14, 32]. Furthermore, the systematic review included four studies that

used field-based fatigue protocols (57%); in three studies, the subjects participated in matches in pivoting sports [33, 45, 50], and in one study, the subjects undertook a running protocol [49]. The match-based protocols included playing volleyball [50], football [45] and handball [33] for 60–90 min. In the study that included the subjects playing handball, no significant decline in AAE was observed after the handball match ($p = 0.56$; $d = 0.13$, 95% CI = -0.58 to 0.31), although the subjects were subjectively fatigued (RPE pre-intervention: 7 ± 1 ; RPE post-intervention: 13 ± 2 ; $p < 0.001$) [33]. One field-based study (25%) investigated the short-term effects of anaerobic lactic exercise on track-and-field athletes and demonstrated a significant increase of 1.2° in the AAE post-intervention ($p < 0.001$) [49].

Local fatigue

The subgroup analysis of the effect of local fatigue indicated that the AAE was greater when subjects were fatigued ($n = 365$ participants, 50%) than non-fatigued ($n = 365$ participants, 50%), with the studies showing high heterogeneity ($I^2 = 81\%$) (see Figure 6). Significantly greater AAE values were observed after the local fatigue protocols, except in three studies (23%) [24, 30, 32]. In 10 studies (77%), local fatigue was induced using an isokinetic dynamometer and 15–30 concentric and eccentric hamstring [11, 46, 57] and quadriceps contractions [25, 30, 32, 38, 39, 46, 57, 58]. In one

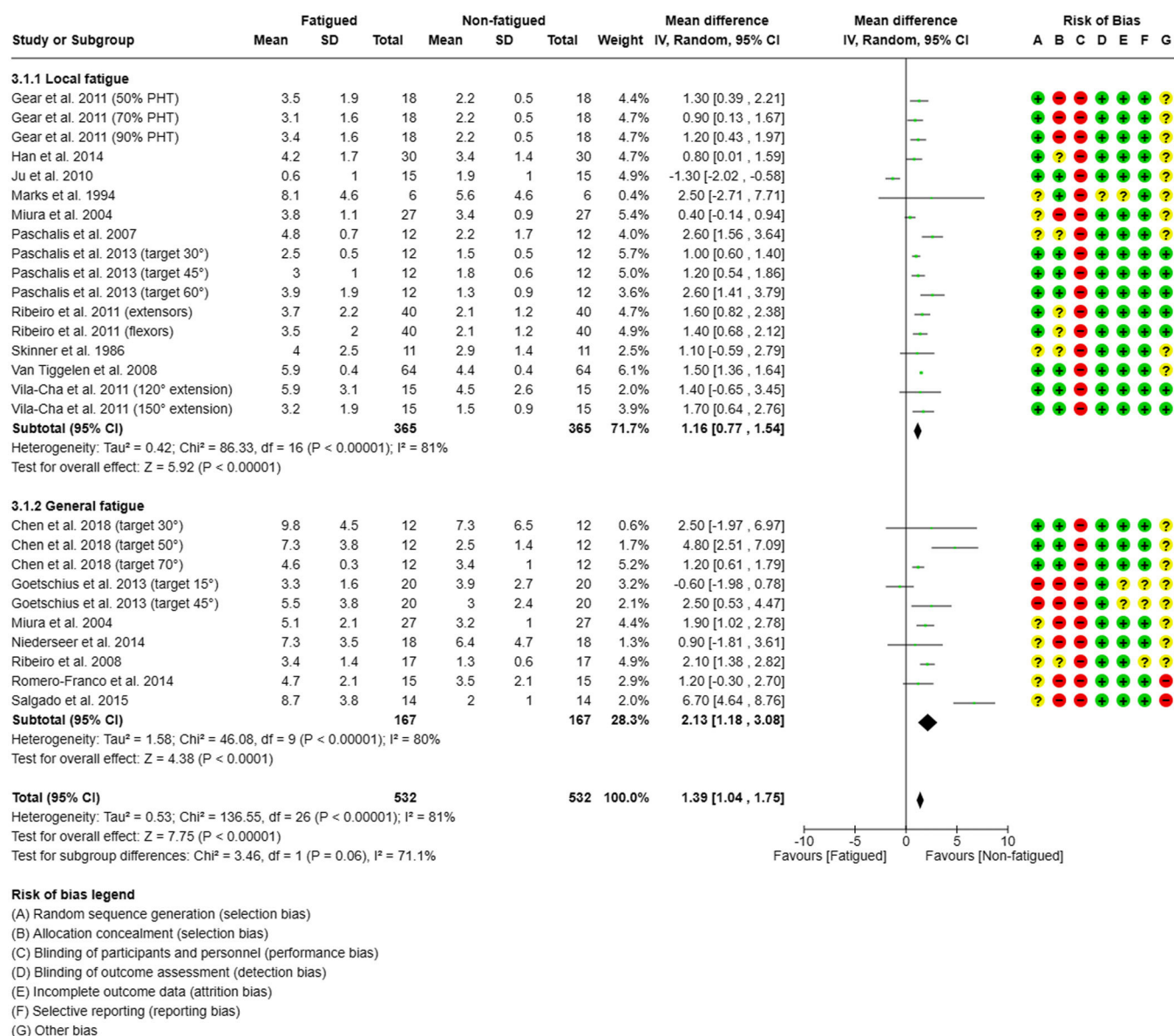


FIGURE 6 Forest plot of the influence of fatigue on the absolute knee angle reproduction error in active knee angle reproduction tests. Subgroup analyses were performed to assess the influence of fatigue, distinguishing between local fatigue (studies involving protocols that fatigued the knee extensors and/or flexors) and general fatigue (studies that used pre-post match designs and running/cycling protocols inducing whole-body metabolic stress). CI, confidence interval; IV, inverse variance; SD, standard deviation; target, target angle.

study (7%), local fatigue was induced by having the subjects perform all-out sprint intervals and included an inclined treadmill protocol (15% incline) [53]. In another study (7%), subjects performed three sets of 10 squats with 30 s of rest between sets [20]. In yet another study (7%), subjects undertook six cycles of inclined treadmill walking (5 min) and jumping exercises (1 min) [14].

The following parameters were variously measured to assess muscle damage and fatigue control: isometric peak torque (>10% decrease), lactate levels in the blood, heart rate [38, 39, 48] and a fatigue index (%) [11, 24, 25, 30, 32, 46, 53, 57]. Three studies (21%) either did not have a fatigue cutoff criterion [20, 58] or subjectively rated perceived exhaustion [14].

DISCUSSION

The purpose of this systematic review and meta-analysis was to investigate subject-independent test factors that influence the AAE in active knee angle reproduction tests. Testing in a seated position and extending the knee were both found to be associated with lower AAE values and more reliable measurements. However, both examined positions and directions of movement showed wide ICC ranges. Furthermore, the target angle and the interaction between the body position and DOM seemed to affect the AAE. Inducing fatigue by means of intensive exhaustion was found to increase the AAE irrespective of the presence

of local or general fatigue. Although the overall risk of bias was low for the included studies, the risk of bias for blinding remained present. It is worth noting that participants in these types of studies cannot be blinded in terms of the DOM, their body position or being fatigued. Additionally, there were some concerns about the use of subjective scales, such as the RPE for evaluating fatigue (see Figure 6). Due to the high heterogeneity observed, future research should focus on investigating the multi-factorial influence of the most important test factors (i.e., body position, DOM, limb dominance and the target angle) on the AAE. Furthermore, given that the accuracy of the measured outcome is of utmost importance in terms of clinically evaluating the success of interventions and rehabilitation progress, future research should also be conducted to optimize measurement reliability. Our specific findings are discussed in more detail below.

Body orientation

The systematic review revealed that body orientation had a significant effect on the AAE, with the seated position found to be favourable (SMD = -0.56 ; 95% CI = -1.00 to -0.12). Wieber et al. previously proposed that significant differences in AAEs could result from disparities in body position, particularly the position of the head (upright vs. horizontal) [59]. In addition, variation in tactile feedback from the thigh might have influenced the observed differences in JPS. One of the studies reported that, in a seated position, the primary source of tactile feedback is located on the back of the thigh, whereas in a prone position, the front of the thigh is more likely to provide tactile feedback [56]. Da Silva et al. provided further evidence for this notion and concluded that eccentric-induced position sense alterations may arise from central and/or peripheral mechanisms depending on the testing position [8]. Regarding measurement reliability, Clark et al. showed that results from seated-position tests were not reliable, with insufficient ICCs (95% CI) between 0.13 (-0.62 to 0.58) and 0.31 (-0.31 to 0.74) [6]. They demonstrated that prone-position tests generated moderate to good ICCs (95% CI) between 0.51 (0.01 – 0.83) and 0.87 (0.61 – 0.96), depending on the DOM. The SEM values associated with the prone and sitting positions were almost identical [6].

Olsson et al. found that the ICC varied greatly in both types of tests (sitting: ICC = 0.31 – 0.82 vs. prone: ICC = 0.17 – 0.75) [34]. These results were not supported by Relph and Herrington, who showed a higher reliability for the sitting position with good to excellent ICCs (0.65 – 0.90), and the highest ICC value (0.92) recorded in the seated position, while testing the dominant leg in a flexing movement at a range of 60 – 90° [42].

Selection of the target angle

Two studies concluded that the most reliable measurement was obtained when the target angle was 60 – 90° [6, 42]. In the middle of the physiological ROM (30 – 70°), higher AAE values were reported for the prone position, whereas at the lower (10 – 30° knee flexion) and higher (70 – 100° knee flexion) ends of the ROM, the AAE values were higher for the sitting position [24, 30, 41]. Clark et al. determined that selecting angles within the middle of the ROM, specifically around 45° , may lead to reduced activation of capsuloligamentous mechanoreceptors, while preferentially stimulating musculotendinous mechanoreceptors [6]. This approach might also help relax antagonistic muscles by avoiding excessive end-of-ROM stretching and minimizing the activation of antagonistic mechanoreceptors [6]. Furthermore, most sports-specific movement patterns fall in the middle of the ROM [52] and non-contact knee injuries, especially anterior cruciate ligament injuries, occur when the knee is in the middle of the ROM [27, 44]. This suggests that proprioceptive acuity is influenced by the target angle and is limited in the middle of the ROM.

Direction of movement

The analysis of the study data revealed that the DOM has a significant effect on the AAE, with higher average AAE values recorded during flexion compared to extension (SMD = -0.71 ; 95% CI = 0.18 – 1.24). Gravity has been shown to play an important role when comparing movement directions [60]. The concentric muscular strain on the joint structures is higher and the pressure conditions in the joints are different when moving against the force of gravity. This might also be due to the increased activation of the muscle spindles and the Golgi tendon organ during contraction of the larger concentric quadriceps muscle [43, 59]. Wieber et al. discussed how pre-tension of the m. quadriceps femoris, depending on the stretching ability, may result in better reproducibility [59]. However, Haggerty et al. reported that young, healthy, active individuals without negative impacts on the afferent system might not benefit from additional spindle traffic from an eccentric-to-isometric contraction [18]. They demonstrated that the DOM from extension to flexion led to a significantly greater AAE than the concentric contraction from flexion to extension of the knee joint when the target angle was 20° ; however, they could not achieve a similar result when the target angle was 70° [18]. Clark et al. did not draw any conclusions about the DOM due to poor reliability and were not clear about why hamstring-focused tests demonstrated reliability in contrast to quadriceps-focused tests [6]. They demonstrated inconclusive poor to good ICCs for extension

(ICC; 95% CI; SEM) (sitting: 0.13; -0.62 to 0.58; 1° vs. prone: 0.87; 0.61–0.96; 1°) and flexion (sitting: 0.31; -0.31 to 0.74; 2° vs. prone: 0.51; 0.01–0.83; 1°), whereas reliability was higher in the prone position compared to the seated position [6]. In contrast, Relph and Herrington tested in a seated position and demonstrated good to excellent ICCs for extension (0.51–0.87) but inconclusive ICCs for flexion (0.03–0.90) [42].

Fatigue

The results of the meta-analysis demonstrated that fatigue had a significant overall effect on the AAE (SMD = 1.33; 95% CI = 1.23–1.44). The subgroup analysis revealed that both local and general fatigue had a statistically significant effect on AAE as a parameter indicating proprioceptive acuity (see Figure 6). All the studies that investigated the effect of general fatigue demonstrated that there was a significant decline in proprioception. However, Goetschius et al.'s study, in which participants were tested with a challenging 15° angle, did not yield statistically significant results [14]. A possible reason for the decline in AAE after inducing fatigue is that the exercised muscle was perceived to be longer than it actually was, which influenced proprioceptive acuity [12, 38, 39]. This explanation is based on the 'forward model of motor commands' proposed by Bays and Wolpert [3]. According to this model, a motor command is used to recreate a reference position, which is then translated into movement. A copy of the motor command is sent to the forward model, which predicts the body position that will be reached. Fatigue-induced noise, from either the system or the environment, can introduce differences between the actual and perceived body position [3]. Furthermore, it is proposed that fatiguing the lower limbs results in a decreased efferent response and proprioceptive ability and a higher AAE, as the musculature of the thigh has a high percentage of fast-twitch muscle fibres, which rapidly fatigue during exercise and has greater afferent innervation than slow-twitch fibres [11]. It was also suggested in another study that warm-up effects may lead to neuromuscular reflex enhancement and thus cause an improvement in JPS [24]. These warm-up effects were also noted in another study [50] but were not supported by other studies that used a warm-up protocol before a fatigue protocol [39, 46, 53]. The level of fatigue and level of fitness were also found to be associated with the AAE, and fitter subjects were observed to be more resilient to fatigue [12, 39]. Even when methods were employed to control the exercise intensity before testing, researchers found that trained athletes tended to exhibit smaller differences between pre- and post-fatigue measurements compared to more sedentary participants [39, 48]. Hence, it might be important to consider the fitness level of each

participant when the testing protocol involves exercises that could induce fatigue before proprioceptive testing. Trained athletes seem to have a higher threshold for fatigue and require greater levels of fatigue to demonstrate a decline in proprioceptive acuity. Givoni et al. reported a correlation between mean AAE and a decline in force during the exercise protocol [12]. The included studies with professional athletes were inconclusive, with one study reporting much higher AAE values and broader SD values than other studies; an AAE of 7° was observed after a 90-min handball match [33]. This might have been due to the participants experiencing a long period of mental stress, which also involved jumping and running. Severe physical exertion tends to impair mental performance, while moderate physical exertion significantly improves it [9]. The protocols included in this review likely involved an intermediate level of physical exertion. Different levels of physical exertion may lead to varying results amongst individuals, indicating a dependence on the level of physical exertion and the fitness level of the participant [9]. It is also possible that pathways unaffected by muscle mechanoreceptors may have been influenced by the protocols used in the studies [32, 46]. Ribeiro et al. found that proprioception was diminished in both eccentric and concentric conditions. Since concentric exercise is expected to result in minimal to no damage or disruption of muscle spindles, diminished proprioception may not be solely attributed to insufficient muscle receptor function but also to metabolic stress (i.e., changes in concentrations of metabolites and inflammatory substances) [46]. It is worth noting that exercise-related substances, such as lactic acid, arachidonic acid and bradykinin, can also impact afferents from muscle spindles, potentially influencing proprioceptive acuity without directly affecting muscle strength [4, 10, 23].

Strengths and limitations

This study has several strengths. First, it was based on the Guidelines for Meta-Analysis from the Cochrane Collaboration (Version 6.3, 2022) [7, 21] and included a structured analysis that adhered to the PRISMA guidelines and PICO strategy [21, 37]. Second, the study protocol was registered in the PROSPERO International Prospective Register of Systematic Reviews (registration number: CRD42023333162), ensuring methodological rigor. Additionally, it employed a best-evidence synthesis approach, incorporating levels of evidence and risk of bias for all potential risk factors, thus providing a comprehensive overview of the current literature on the main subject-independent factors influencing AAE in active knee angle reproduction tests. Despite these strengths, there are methodological limitations to consider. First, only studies published in English and German were included, which potentially

introduced selection bias. Second, the meta-analysis revealed that there was considerable heterogeneity amongst the studies examined that investigated the influence of fatigue. This might have been due to the different measuring devices and interventions utilized in the studies. Therefore, the results of this part of the meta-analysis should be interpreted with caution. Third, the tests were conducted on healthy knees. Therefore, different outcomes may be observed when patients with knee injuries, such as anterior cruciate ligament injuries, are tested in clinical settings. Fourth, only participants aged 18–60 years old were included. Although only studies in which no osteoarthritis was reported were included, it cannot be assumed that people over the age of 60 may still have undetected symptoms of osteoarthritis. Fifth, a librarian was not involved in this study, and grey literature was not included, which is a Cochrane Reviews quality criterion. Finally, this review focused solely on subject-independent factors, neglecting potential influences such as body mass and menstrual cycle, which have been found to impact proprioception [1, 39].

CONCLUSION

The findings indicate that fatigue, body orientation and the direction of movement of the lower limb have an impact on the active angular error in active knee angle reproduction tests. Furthermore, these factors may impact each other and are dependent on the target angle. Thus, it is not appropriate to directly compare results obtained using different test protocols. It is also important for practitioners to recognize that altering test conditions can have diverse therapeutic implications, and it is recommended to test in a non-fatigued situation to avoid a decline in proprioceptive acuity. Finally, the test protocol should be well documented and applied consistently in the clinical setting.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Juliane Wieber: Conceptualization; methodology; software; investigation; software; visualization; writing—original draft; writing—review and editing; formal analysis; data curation. Leon Müller-Rahmel: Draft preparation; data curation; writing—review and editing. Robert Rein: Supervision; resources; conceptualization. Rüdiger Reer: Supervision; resources and editing. Bjoern Braunstein: Conceptualization; supervision; visualization; resources; project administration; writing—review and editing.

ACKNOWLEDGEMENTS

Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare no conflict of interest.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The systematic review with meta-analysis was pre-registered in the PROSPERO International Prospective Register of Systematic Reviews (registration number: CRD42023333162). All data generated or analysed during this study are included in this published article and its supplementary information file.

ETHICS STATEMENT

Due to the study design no ethics statement is required.

ORCID

Juliane Wieber  <http://orcid.org/0000-0002-2904-9305>

Robert Rein  <http://orcid.org/0000-0001-7059-5319>

Bjoern Braunstein  <http://orcid.org/0000-0002-5173-8916>

REFERENCES

1. Aydoğ, S.T., Hasçelik, Z., Demirel, H.A., Tetik, O., Aydoğ, E. & Doral, M.N. (2005) The effects of menstrual cycle on the knee joint position sense: preliminary study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 13(8), 649–653. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00167-004-0604-7>
2. Barrack, R.L., Skinner, H.B., Cook, S.D. & Haddad, R.J. (1983) Effect of articular disease and total knee arthroplasty on knee joint-position sense. *Journal of Neurophysiology*, 50(3), 684–687. Available from: <https://doi.org/10.1152/jn.1983.50.3.684>
3. Bays, P.M. & Wolpert, D.M. (2007) Computational principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability. *The Journal of Physiology*, 578(Pt 2), 387–396. Available from: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.120121>
4. Cairns, S.P. (2006) Lactic acid and exercise performance: culprit or friend? *Sports Medicine*, 36(4), 279–291. Available from: <https://doi.org/10.2165/00007256-200636040-00001>
5. Chen, C.H., Xin, Y., Lee, K.W., Lin, M.J. & Lin, J.J. (2018) Acute effects of different dynamic exercises on hamstring strain risk factors. *PLoS One*, 13(2), e0191801. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191801>
6. Clark, N.C., Akins, J.S., Heebner, N.R., Sell, T.C., Abt, J.P., Lovalekar, M. et al. (2016) Reliability and measurement precision of concentric-to-isometric and eccentric-to-isometric knee active joint position sense tests in uninjured physically active adults. *Physical Therapy in Sport*, 18, 38–45. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2015.06.005>
7. Cumpston, M., Li, T., Page, M.J., Chandler, J., Welch, V.A., Higgins, J.P. et al. (2019) Updated guidance for trusted systematic reviews: a new edition of the Cochrane handbook for systematic reviews of interventions. *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, 10(10), ED000142. Available from: <https://doi.org/10.1002/14651858.ED000142>
8. Da Silva, F., Monjo, F., Gioda, J., Blain, G.M., Piponnier, E., Corcelle, B. et al. (2023) Knee position sense and knee flexor neuromuscular function are similarly altered after two sub-maximal eccentric bouts. *European Journal of Applied Physiology*, 123(2), 311–323. Available from: <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05063-6>
9. Davey, C.P. (1973) Physical exertion and mental performance. *Ergonomics*, 16(5), 595–599. Available from: <https://doi.org/10.1080/00140137308924550>
10. Djupsjöbacka, M., Johansson, H., Bergenheim, M. & Wenngren, B.I. (1995) Influences on the γ -muscle spindle system from muscle afferents stimulated by increased

- intramuscular concentrations of bradykinin and 5-HT. *Neuroscience Research*, 22(3), 325–333. Available from: [https://doi.org/10.1016/0168-0102\(95\)00906-a](https://doi.org/10.1016/0168-0102(95)00906-a)
11. Gear, W.S. (2011) Effect of different levels of localized muscle fatigue on knee position sense. *Journal of Sports Science & Medicine*, 10(4), 725–730.
 12. Givoni, N.J., Pham, T., Allen, T.J. & Proske, U. (2007) The effect of quadriceps muscle fatigue on position matching at the knee. *The Journal of Physiology*, 584(Pt 1), 111–119. Available from: <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.134411>
 13. Goble, D.J. (2010) Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice. *Physical Therapy*, 90(8), 1176–1184. Available from: <https://doi.org/10.2522/ptj.20090399>
 14. Goetschius, J., Kuenze, C.M., Saliba, S. & Hart, J.M. (2013) Reposition acuity and postural control after exercise in anterior cruciate ligament reconstructed knees. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 45(12), 2314–2321. Available from: <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31829bc6ae>
 15. Gokeler, A., Benjamins, A., Hewett, T.E., Lephart, S.M., Engebretsen, L., Ageberg, E. et al. (2012) Proprioceptive deficits after ACL injury: are they clinically relevant? *British Journal of Sports Medicine*, 46(3), 180–192. Available from: <https://doi.org/10.1136/bjsm.2010.082578>
 16. Grob, K.R., Kuster, M.S., Higgins, S.A., Lloyd, D.G. & Yata, H. (2002) Lack of correlation between different measurements of proprioception in the knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 84(4), 614–618. Available from: <https://doi.org/10.1302/0301-620X.84B4.0840614>
 17. Guskiewicz, K.M. & Perrin, D.H. (1996) Research and clinical applications of assessing balance. *Journal of Sport Rehabilitation*, 5(1), 45–63. Available from: <https://doi.org/10.1123/jsr.5.1.45>
 18. Haggerty, A.L., Simon, J.E., Grooms, D.R. & Russell, J.A. (2021) Effect of load, angle, and contraction type on clinically assessed knee joint position sense. *Journal of Sport Rehabilitation*, 30(8), 1166–1171. Available from: <https://doi.org/10.1123/jsr.2020-0552>
 19. Han, J., Waddington, G., Adams, R., Anson, J. & Liu, Y. (2016) Assessing proprioception: a critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*, 5(1), 80–90. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.10.004>
 20. Han, J.T. & Lee, J. (2014) Effects of kinesiology taping on repositioning error of the knee joint after quadriceps muscle fatigue. *Journal of Physical Therapy Science*, 26(6), 921–923. Available from: <https://doi.org/10.1589/jpts.26.921>
 21. Higgins, J.P.T., Altman, D.G., Gotzsche, P.C., Juni, P., Moher, D., Oxman, A.D., et al. (2011) The Cochrane collaboration's tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*, 343, d5928. Available from: <https://doi.org/10.1136/bmj.d5928>
 22. Hurley, M.V., Scott, D.L., Rees, J. & Newham, D.J. (1997) Sensorimotor changes and functional performance in patients with knee osteoarthritis. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 56(11), 641–648. Available from: <https://doi.org/10.1136/ard.56.11.641>
 23. Johansson, H., Djupsjöbacka, M. & Sjölander, P. (1993) Influences on the γ -muscle spindle system from muscle afferents stimulated by KCl and lactic acid. *Neuroscience Research*, 16(1), 49–57. Available from: [https://doi.org/10.1016/0168-0102\(93\)90008-e](https://doi.org/10.1016/0168-0102(93)90008-e)
 24. Ju, Y.Y., Wang, C.W. & Cheng, H.Y.K. (2010) Effects of active fatiguing movement versus passive repetitive movement on knee proprioception. *Clinical Biomechanics*, 25(7), 708–712. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.04.017>
 25. Kellari, A., Paschalidis, D., Grigoriou, A., Kapreli, E., Koumantakis, G., Strimpakos, N. et al. (2023) The impact of quadriceps' fatigue on the proprioceptive perception of the knee joint position sense. *Gait & Posture*, 106, S95–S96. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2023.07.119>
 26. Koo, T.K. & Li, M.Y. (2016) A guideline of selecting and reporting intraclass correlation coefficients for reliability research. *Journal of Chiropractic Medicine*, 15(2), 155–163. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
 27. Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B.P., Engebretsen, L., Smith, G., Slauterbeck, J.R. et al. (2007) Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *The American Journal of Sports Medicine*, 35(3), 359–367. Available from: <https://doi.org/10.1177/0363546506293899>
 28. Landis, J.R. & Koch, G.G. (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159–174. Available from: <https://doi.org/10.2307/2529310>
 29. Lephart, S.M., Pincivero, D.M. & Rozzi, S.L. (1998) Proprioception of the ankle and knee. *Sports Medicine*, 25, 149–155. Available from: <https://doi.org/10.2165/00007256-199825030-00002>
 30. Marks, R. (1994) Effect of exercise-induced fatigue on position sense of the knee. *Australian Journal of Physiotherapy*, 40(3), 175–181. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(14\)60576-6](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(14)60576-6)
 31. McHugh, M.L. (2012) Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276–282. Available from: <https://doi.org/10.11613/BM.2012.031>
 32. Miura, K., Ishibashi, Y., Tsuda, E., Okamura, Y., Otsuka, H. & Toh, S. (2004) The effect of local and general fatigue on knee proprioception. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 20(4), 414–418. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2004.01.007>
 33. Niederseer, D., Mörtl, H., Liebensteiner, M., Egger, A., Thaler, C.W., Plöderl, M. et al. (2014) General fatigue and joint position sense in male elite handball players. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 65(6), 149–153. Available from: <https://doi.org/10.5960/dzsm.2014.129>
 34. Olsson, L., Lund, H., Henriksen, M., Rogind, H., Bliddal, H. & Danneskiold-Samsøe, B. (2004) Test–retest reliability of a knee joint position sense measurement method in sitting and prone position. *Advances in Physiotherapy*, 6(1), 37–47. Available from: <https://doi.org/10.1080/14038190310009894>
 35. Ordahan, B., Küçükşen, S., Tuncay, I., Salli, A. & Uğurlu, H. (2015) The effect of proprioception exercises on functional status in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 28(3), 531–537. Available from: <https://doi.org/10.3233/BMR-140553>
 36. Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z. & Elmagarmid, A. (2016) Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5, 210. Available from: <https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
 37. Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D. et al. (2021) The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. Available from: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
 38. Paschalis, V., Nikolaidis, M.G., Giakas, G., Jamurtas, A.Z., Pappas, A. & Koutedakis, Y. (2007) The effect of eccentric exercise on position sense and joint reaction angle of the lower limbs. *Muscle & Nerve*, 35(4), 496–503. Available from: <https://doi.org/10.1002/mus.20723>
 39. Paschalis, V., Nikolaidis, M.G., Theodorou, A.A., Deli, C.K., Raso, V., Jamurtas, A.Z., et al. (2013) The effects of eccentric exercise on muscle function and proprioception of individuals being overweight and underweight. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(9), 2542–2551. Available from: <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31827fc9a6>
 40. Proske, U. (2006) Kinesthesia: the role of muscle receptors. *Muscle & Nerve*, 34(5), 545–558. Available from: <https://doi.org/10.1002/mus.20627>

41. Proske, U., Wise, A.K. & Gregory, J.E. (2000) The role of muscle receptors in the detection of movements. *Progress in Neurobiology*, 60(1), 85–96. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0301-0082\(99\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0301-0082(99)00022-2)
42. Relph, N. & Herrington, L. (2015) Interexaminer, intraexaminer, and test-retest reliability of clinical knee joint-position-sense measurements using an image-capture technique. *Journal of Sport Rehabilitation*, 24(2), 2013–0134. Available from: <https://doi.org/10.1123/jsr.2013-0134>
43. Relph, N. & Herrington, L. (2016) The effects of knee direction, physical activity and age on knee joint position sense. *The Knee*, 23(3), 393–398. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.knee.2016.02.018>
44. Relph, N., Herrington, L. & Tyson, S. (2014) The effects of ACL injury on knee proprioception: a meta-analysis. *Physiotherapy*, 100(3), 187–195. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.physio.2013.11.002>
45. Ribeiro, F., Santos, F., Gonçalves, P. & Oliveira, J. (2008) Effects of volleyball match-induced fatigue on knee joint position sense. *European Journal of Sport Science*, 8(6), 397–402. Available from: <https://doi.org/10.1080/02614360802373060>
46. Ribeiro, F., Venâncio, J., Quintas, P. & Oliveira, J. (2011) The effect of fatigue on knee position sense is not dependent upon the muscle group fatigued. *Muscle & Nerve*, 44(2), 217–220. Available from: <https://doi.org/10.1002/mus.22018>
47. Riemann, B.L. & Lephart, S.M. (2002) The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability. *Journal of Athletic Training*, 37(1), 71–79.
48. Romero-Franco, N. & Jiménez-Reyes, P. (2017) Effects of warm-up and fatigue on knee joint position sense and jump performance. *Journal of Motor Behavior*, 49(2), 117–122. Available from: <https://doi.org/10.1080/00222895.2016.1152222>
49. Romero-Franco, N., Martínez-López, E.J., Hita-Contreras, F., Lomas-Vega, R. & Martínez-Amat, A. (2014) Short-term effects of anaerobic lactic exercise on knee proprioception of track and field athletes. *Isokinetics and Exercise Science*, 22(3), 205–210. Available from: <https://doi.org/10.3233/IES-140540>
50. Salgado, E., Ribeiro, F. & Oliveira, J. (2015) Joint-position sense is altered by football pre-participation warm-up exercise and match induced fatigue. *The Knee*, 22(3), 243–248. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.knee.2014.10.002>
51. Sherrington, C.S. (1907) On the proprioceptive system, especially in its reflex aspect. *Brain*, 29(4), 467–482. Available from: <https://doi.org/10.1093/brain/29.4.467>
52. Sigward, S.M. & Powers, C.M. (2006) The influence of gender on knee kinematics, kinetics and muscle activation patterns during side-step cutting. *Clinical Biomechanics*, 21(1), 41–48. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.08.001>
53. Skinner, H.B., Wyatt, M.P., Hodgdon, J.A., Conard, D.W. & Barrack, R.L. (1986) Effect of fatigue on joint position sense of the knee. *Journal of Orthopaedic Research*, 4(1), 112–118. Available from: <https://doi.org/10.1002/jor.1100040115>
54. Soyuer, F. & Öztürk, A. (2007) The effect of spasticity, sense and walking aids in falls of people after chronic stroke. *Disability and Rehabilitation*, 29(9), 679–687. Available from: <https://doi.org/10.1080/09638280600925860>
55. Stillman, B.C. & McMeeken, J.M. (2001) The role of weight-bearing in the clinical assessment of knee joint position sense. *Australian Journal of Physiotherapy*, 47(4), 247–253. Available from: [https://doi.org/10.1016/s0004-9514\(14\)60272-5](https://doi.org/10.1016/s0004-9514(14)60272-5)
56. Stone, K.D., Keizer, A. & Dijkerman, H.C. (2018) The influence of vision, touch, and proprioception on body representation of the lower limbs. *Acta Psychologica*, 185, 22–32. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.01.007>
57. Van Tiggelen, D., Coorevits, P. & Witvrouw, E. (2008) The use of a neoprene knee sleeve to compensate the deficit in knee joint position sense caused by muscle fatigue. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(1), 62–66. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2007.00649.x>
58. Ribeiro, F., Santos, F., Gonçalves, P. & Oliveira, J. (2008) Effects of volleyball match-induced fatigue on knee joint position sense. *European Journal of Sport Science*, 8(6), 397–402. Available from: <https://doi.org/10.1080/02614360802373060>
59. Wieber, J., Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Catalá-Lehnen, P., Rein, R. et al. (2023) Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: an experimental study. *Technology and Health Care*, 31(5), 1567–1578. Available from: <https://doi.org/10.3233/THC-220747>
60. Worringham, C.J. & Stelmach, G.E. (1985) The contribution of gravitational torques to limb position sense. *Experimental Brain Research*, 61(1), 38–42. Available from: <https://doi.org/10.1007/BF00235618>

SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information can be found online in the Supporting Information section at the end of this article.

How to cite this article: Wieber, J., Müller-Rahmel, L., Reer, R., Rein, R. & Braunstein, B. (2024) Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Experimental Orthopaedics*, 11, e12091. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12091>

4.2 Publikation B

Wieber, J., Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Catala-Lehnen, P., Rein, R., & Braunstein, B. (2023). Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study. *Technology and health care: official journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 31(5), 1567–1578. <https://doi.org/10.3233/THC-220747>

Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study

Juliane Wieber^{a,b,c,*}, Jasmin Brandt^{a,b}, Maike Pieper^{a,b}, Eva Hirschhäuser^{a,b}, Philip Catalá-Lehnen^c, Robert Rein^b and Bjoern Braunstein^{a,d,e,f,1}

^a*Institute of Movement and Neuroscience, German Sport University, Cologne, Germany*

^b*Institute of Training and Computer Science in Sport, German Sport University, Cologne, Germany*

^c*LANS Medicum Hamburg, Center for Sports and Regenerative Medicine, Hamburg, Germany*

^d*Institute of Biomechanics and Orthopaedics, German Sport University, Cologne, Germany*

^e*German Research Centre of Elite Sport, German Sport University, Cologne, Germany*

^f*Centre for Health and Integrative Physiology in Space, Cologne, Germany*

Abstract.

BACKGROUND: Joint position sense test assess patient mobility and proprioceptive ability. Yet, application used under different conditions may biases reproduction error resulting in different therapeutic consequences.

OBJECTIVE: To investigate knee angle reproduction test under different test conditions.

METHODS: 25 healthy subjects (mean $\pm$ SD, age = 25 ± 2 years, activity level: 9 ± 2 training hours/week) performed knee angle reproduction test in the sitting and prone position, while changing the knee angle starting (i) from flexion and (ii) extension, (iii) inducing vibration on the semitendinosus tendon.

RESULTS: Absolute mean knee angle reproduction error showed significant difference for body position and vibration (Position: 95% CI 0.71 to 2.32; $p < 0.001$. No Vibration & Vibration: 95% CI -1.71 to -0.12 ; $p = 0.027$). Relative knee angle reproduction error was significant different in all conditions (No Vibration & Vibration: 95% CI -3.30 to -0.45 ; $p = 0.010$. Body orientation: 95% CI 1.08 to 3.93; $p < 0.001$. Direction of movement: 95% CI 0.56 to 3.41; $p = 0.007$).

CONCLUSION: Body orientation and movement direction influence the resulting knee angle reproduction error in healthy subjects. Practitioners are advised to use standardised test procedures when comparing different within- and between-patient results.

Trial registration: DOI 10.17605/OSF.IO/AFWRP.

Keywords: Anterior cruciate ligament, proprioception, knee joint, return to sport, physiotherapy

1. Introduction

The return to sports of an athlete after injury is a multifaceted and often challenging decision [1–4],

*Corresponding author: Juliane Wieber, Eimsbütteler strasse 100, 22769 Hamburg, Germany. Tel.: +49 177 750 5666; E-mail: j.wieber@outlook.de. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2904-9305>.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5173-8916>.

made daily by clinicians, physiotherapists, and coaches [5,6]. One important criterion is the state of the proprioceptive feedback mechanisms, which are required to determine an adequate movement pattern [7–10]. Accurate proprioception is a determinant of knee stability and plays a major role in daily activities, exercises, and sports [11]. Proprioception has been shown to be particularly reduced after anterior cruciate ligament (ACL) injuries [7,12,13]. The ACL is a key component of knee stability. Clinical evidence suggests that proprioceptive deficits exist in posture after anterior cruciate ligament reconstruction [14–18]. In their systematic review and meta-analysis, Flemming et al. indicated that proprioceptive feedback is still compromised 6–24 months following surgical treatment [19]. Thus, damage to the ACL may impair the ability to reproduce joint angles [20]. Reproducing knee angles as one parameter of correct knee functioning relies on a variety of different mechanoreceptors and muscle spindles as the main sources of information [7,21,22]. Ruffini end organ-like receptors and Golgi tendon receptors enable an adequate joint position sense, that is, the perception of relative muscle and joint position during movement [23]. Injury or surgery of the anterior cruciate ligament strongly affects mechanoreceptor function and negatively affects knee function, including lower extremity neuromuscular activation [18,24,25]. As adequate knee angle reproduction relies on continuous neuromuscular activation, deficient proprioceptive feedback with poor joint position sense can result in reduced knee angle reproduction [8]. Therefore, the sense of individual joint position seems to be a crucial parameter for a safe return to activity. However, the mechanism underlying joint position sense during adequate functional posture has not been completely elucidated [7,26]. Moreover, it is associated with fatigue and can therefore be used to predict injury risk resulting from a delayed neuronal response [26]. Since joint position sense could provide key information to reduce the risk of injury and improve surgical outcomes [26,27], the assessment of joint position sense in physiotherapeutic practice may lead to a safer return to activity after injury. Further, proprioceptive exercise can reduce pain and stiffness after ACL injury [28]. A major restriction in orthopaedic-physiotherapeutic practice is the current inconsistency in proprioception measurements in knee angle reproduction testing [8,23]. As the mechanoreceptor activation pattern depends on body orientation and movement direction, we hypothesised that variations in test procedures can lead to different therapeutic consequences. Comparison of previous studies remains difficult due to heterogeneity in study protocols, equipment, and testing positions [29]. Therefore, the aim of the present study was to investigate the knee angle reproduction test as a measurement of joint position sense under varying test conditions, such as different body orientations and movement directions.

2. Methods

A clinical randomised trial with blinded outcome assessors was undertaken for two consecutive days. The study was done in accordance with the ethical standards of the Committee on Human Experimentation of the institution in which the experiments were done and in accordance with the Declaration of Helsinki of 1964 and its later amendments or comparable ethical standards. The study was approved by the Institutional Ethics Board of the Sports University Cologne (152/2019). The experimental design was preregistered on ‘Open Science Framework’ (DOI 10.17605/OSF.IO/AFWRP). Participants were recruited through voluntary participation. Consenting participants were allocated using a stratified random allocation sequence to three different test conditions (direction: ex = extension, flex = flexion; position: s = sitting, l = lying; simulation: con = no vibration induced on the semitendinosus tendon, vib = vibration induced on the semitendinosus tendon). All standardised assessments were undertaken by an experienced physiotherapist who was also a graduated sport scientist. Data collection occurred at the German Sports University Cologne. The statistical power was set at 0.8 and the effect size $d = 0.6$ a

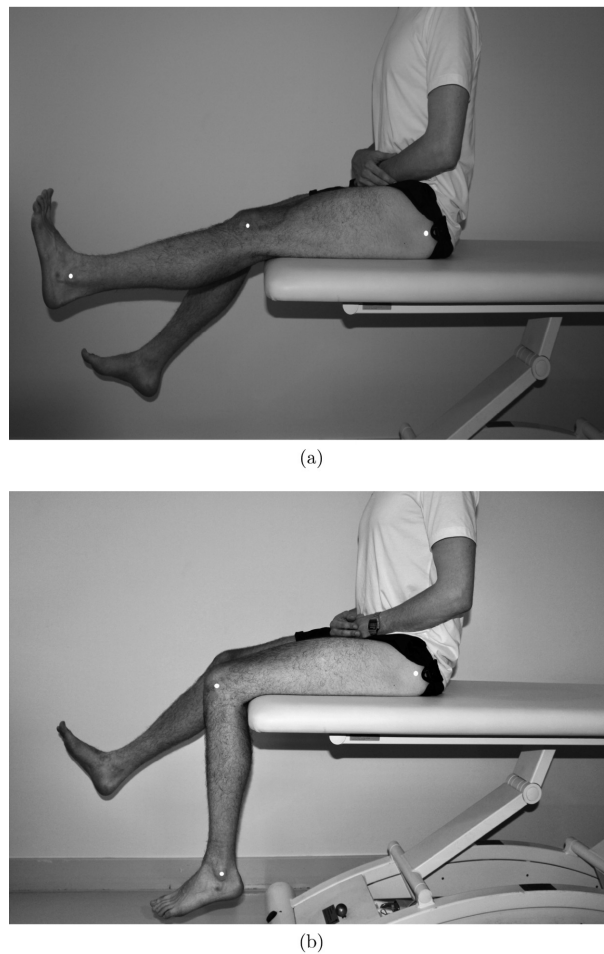


Fig. 1. Knee angle reproduction test: **a** sitting, starting from extension; **b** sitting, starting from flexion.

priori [30–33], resulting in a number of $n = 20$ subjects (G*Power, Version 3.1.9.4). Exclusion criteria were physical limitations, such as general neuronal disease and a history of muscle, ligament, tendon, or bone injuries of the lower extremities. Participants provided written informed consent for participation, data collection, and image publication prior to enrolment.

2.1. Intervention

Prior to testing, participants were familiarised with the study protocol via standardised verbal instructions. To preclude general angle reproduction disabilities, reproduction errors were tested on an elbow angle reproduction test in advance. Participants were asked to reproduce 90° elbow angle on the left and on the right side as well as mirroring a self-chosen angle with the contralateral elbow. Afterwards, participants were asked to reproduce the contralateral knee angle starting either at 90° flexion or 0° extension, both in sitting and prone positions (as shown in Figs 1 and 2).

Additionally, the participants performed the same procedure during the manipulation of the semitendinosus tendon. A common method of anterior cruciate ligament reconstruction is semitendinosus

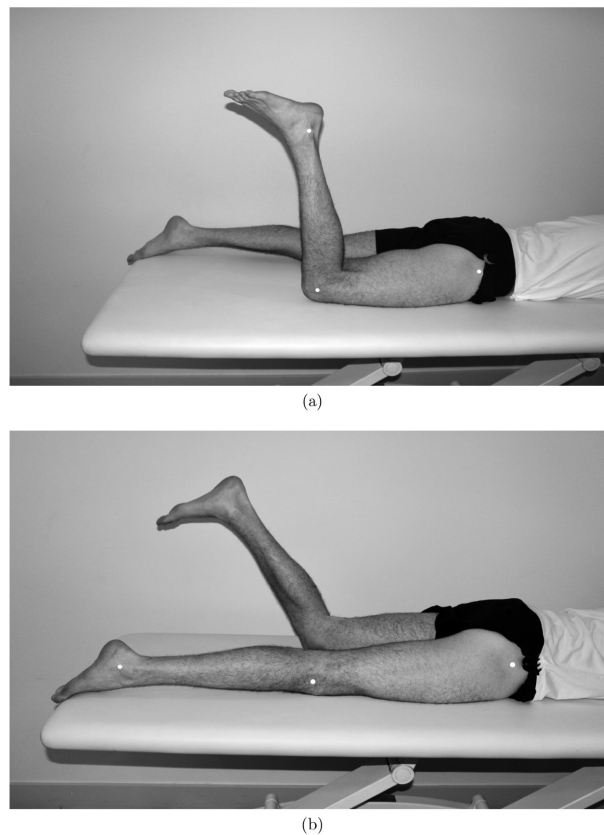


Fig. 2. Knee angle reproduction test: **a** prone position, starting from flexion, **b** prone position, starting from extension.

tendon allografting [5,34–38]. Therefore, vibration was applied to disturb the proprioceptive function of the semitendinosus tendon, mimicking post-surgical neuromechanical behaviour. Vibration was induced by a customised engine ('Braun' engine, 120 Hz) [39]. A frequency above 80 Hz was selected, as this was previously shown to activate and influence the majority of sensory fibres [17,40,41]. For the testing procedure, each participant lay down or sat on an adjustable physiotherapy bench. The participant's left knee was set passively to a random angle chosen by the test operator. Previous studies have indicated no clinically important differences in proprioceptive performance between dominant and non-dominant limbs in trained participants [42–45]. Next, the participants were instructed to actively reproduce the left knee angle with the right leg. For the subsequent knee angle determination, fixed anatomical landmarks were tagged: tuberculum majus humeri, epicondylus lateralis humeri, processus styloideus radii, trochanter major femoris, lateral knee joint cavity, and alleolus lateralis (shown in Figs 1 and 2). Each test included five trials. To minimise proprioceptive transfer to the next test, the participants walked around for about two minutes between tests. The participants were blindfolded for all conditions to prevent visual feedback.

2.2. Outcome measures

The outcome measure was the knee angle reproduction error, measured as degree [$^{\circ}$] using varying conditions in the knee angle reproduction test (direction: ex = extension; flex = flexion; position: s = sitting; l = lying; simulation: con = no vibration induced on the semitendinosus tendon; vib = vibration

induced on the semitendinosus tendon). To calculate the mean knee angle reproduction error, the absolute and signed differences [$^{\circ}$] between the target angle and the actual angle were calculated. Data were collected using two cameras (minimum spatial resolution of 1080p) positioned on tripods at a standardised distance (1.50 m) and height perpendicular to the area of interest (ROI). Knee position pictures were analysed using the Kinovea software package (Version 0.8.15, 2005–2011, Joan Charmant & Contrib). In Kinovea, elbow and knee joint angles were identified and determined by predefined anatomical landmarks (see subsection 2.1 and Figs 1 and 2).

2.3. Statistical analysis

Statistical analyses were performed using R (Version 3.3.3). Data were checked for missing values, distribution, and outliers and descriptively summarised as means $\pm$ standard deviation (SD), standard error (SE), and 95% confidence intervals (CI). Normal distribution was confirmed using Q-Q plots. Homogeneity of variance was tested using the Levene test. For the elbow pretest, paired *t*-tests were calculated. Multiple ANOVA with Tukey's post-hoc test was calculated between all conditions. In the case of statistically significant main or interaction effects, post-hoc contrasts were calculated via estimated marginal means and Tukey's multiple-testing correction. *P*-values less than 0.05 were considered statistically significant ($\alpha = 0.05$). Comparisons of different test modalities were reported as mean difference with 95% CI. Effect size was calculated and interpreted as Cohen's *d* with a small (0.2), medium (0.5), or large (0.8) effect and partial Eta-square (η_p^2) with a small (0.01), medium (0.06), or large (0.14) effect.

3. Results

Twenty-five healthy young students (age = 25 ± 2 years, body height = 175.7 ± 8.1 cm, body mass = 70.9 ± 11.3 kg; activity level: 9 ± 2 training hours/week; 14 males (56%) and 11 females (44%)) participated in all test conditions. There was no drop-out.

3.1. Pre-test

Comparison of the reproducibility of the elbow angle on the same side and on the contralateral side (mirroring) showed no statistically significant differences (mirroring: $t(24) = -1.39$, $p = 0.18$; reproduction: $t(24) = 0.93$, $p = 0.36$).

3.2. Effect of the intervention

Inspection of the normal Q-Q plot indicated that the data were normally distributed for each group. Levene testing revealed no deviation from homoscedasticity for signed angle reproduction error ($p = 0.304$) and no homogeneity of variance for absolute angle reproduction ($p = 0.005$). There were 13 outliers according to an inspection with a boxplot (compare also Fig. 3). ANOVA statistical testing demonstrated a significant effect of body position (95% CI: -3.40 to -1.69 ; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.061$) in absolute knee angle reproduction error but not for the direction of movement (95% CI: -2.42 to -0.71 ; $p = 0.195$; $\eta_p^2 = 0.08$). Furthermore, semitendinosus tendon vibration resulted in significantly different reproduced knee angles compared to no vibration (95% CI: 0.30 to 1.51 ; $p = 0.027$; $\eta_p^2 = 0.023$). The results for relative difference showed a significant difference in absolute knee angle reproduction error for body orientation (95% CI: -3.44 to -0.87 ; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.045$) and for the direction of movement (95% CI: -2.92 to -0.35 ; $p = 0.007$; $\eta_p^2 = 0.029$). Semitendinosus tendon vibration resulted

Table 1

Descriptive values of self-chosen target knee angle and the resulting absolute reproduction error in the prone and sitting position with and without vibration induced on the semitendinosus tendon in a knee angle reproduction test ($n = 25$). (Min = lowest self-chosen knee angle; Max = highest self-chosen knee angle; SD = standard deviation; SE = standard error)

	Extension	Flexion	Vibration	Min	Max	Reproduction error mean $\pm$ SD	SE	95% confidence interval
Sitting position [$^{\circ}$]								
	×			98	170	7.03 ± 3.23	0.65	5.70–8.37
		×		122	183	5.81 ± 2.71	0.54	4.69–6.93
	×		×	46	174	5.38 ± 1.70	0.34	4.67–6.08
		×	×	123	196	5.28 ± 2.50	0.50	4.25–6.31
Prone position [$^{\circ}$]								
	×			51	157	6.37 ± 3.13	0.63	5.04–7.66
		×		65	166	5.26 ± 2.24	0.45	4.34–6.19
	×		×	52	162	6.80 ± 3.73	0.75	5.26–8.34
		×	×	110	169	8.70 ± 4.18	0.84	6.98–10.4

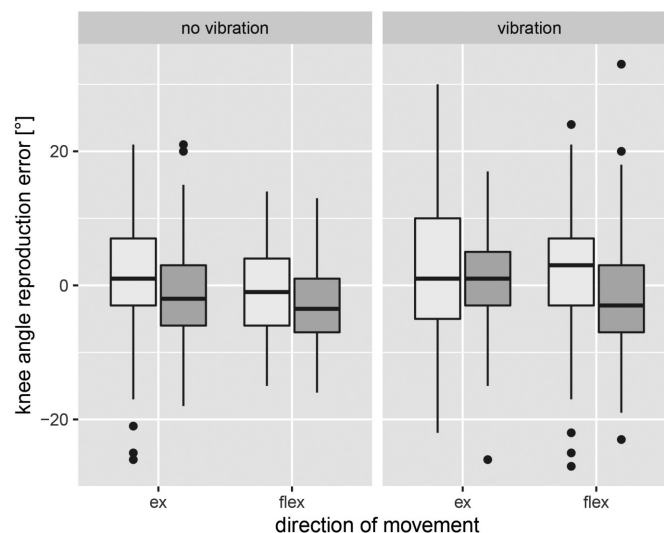


Fig. 3. Boxplot of the difference in knee angle reproduction error including all repetitions: light grey = prone position; dark grey = sitting; ex = extension; flex = flexion. Vibration was induced on the semitendinosus tendon.

in significantly different reproduced knee angles in contrast to no vibration (95% CI: 0.96 to 2.78; $p = 0.010$; $\eta_p^2 = 0.027$). Body orientation and disturbance of the semitendinosus tendon resulted in significant differences in absolute and relative knee angle reproduction errors, respectively. Estimated marginal means for signed knee angle reproduction error showed significant differences for all conditions (no vibration and vibration: $t(171) = -2.59$; 95% CI -3.3 to -0.45 ; SE = 0.72; $p = 0.0103$; $d = 0.4$). Body orientation: $t(171) = 3.46$; 95% CI 1.08 to 3.93; SE = 0.72; $p < 0.001$; $d = 0.5$. Direction of movement: $t(171) = 2.74$; 95% CI 0.56 to 3.41; SE = 0.72; $p = 0.007$; $d = 0.4$) (Fig. 4). For absolute difference in knee angle reproduction error, estimated marginal means showed a significant difference for the type of body orientation and disturbance (body orientation: $t(171) = 3.71$; 95% CI 0.71 to 2.32; SE = 0.41; $p < 0.001$; $d = 0.6$). No vibration and vibration: $t(171) = -2.23$; 95% CI -1.71 to -0.12 ; SE = 0.41; $p = 0.027$; $d = 0.4$) but not for direction of movement ($t(171) = 1.30$; 95% CI -0.276 to 1.33; SE = 0.41; $p = 0.195$; $d = 0.2$) (Fig. 5). Overall reproduction errors were smaller in sitting upright than in the prone positions (Figs 4 and 5; Table 1).

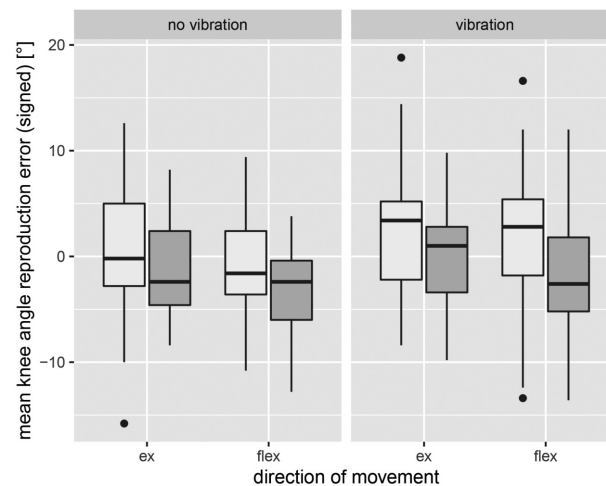


Fig. 4. Boxplot of the signed mean difference in knee angle reproduction error: light grey = prone position; dark grey = sitting position; ex = extension; flex = flexion. Vibration was induced on the semitendinosus tendon.

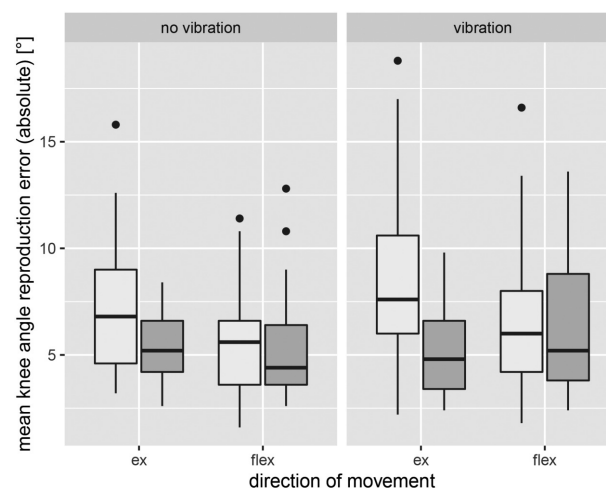


Fig. 5. Boxplot of the absolute mean difference in knee angle reproduction error: light grey = prone position; dark grey = sitting; ex = extension; flex = flexion. Vibration was induced on the semitendinosus tendon.

4. Discussion

The aim of the present study was to evaluate joint position sense by investigating knee angle reproduction ability under different testing conditions. The results confirmed the hypothesis that the ability to reproduce knee angles differs between sitting and prone positions. The results further indicate that the initial starting position, either from knee flexion or extension, influences reproduction ability. These findings are of great practical importance, as currently the literature does not prescribe uniform standards regarding the starting position of the joint position sense test [7,8,46]. Based on our results, the general ability to reproduce knee joint angles is not interchangeable between different starting positions and body orientations. An adequate reproducibility of the knee joint angle from the prone position cannot be directly compared with the same results from the sitting position. A possible explanation for this could

be the difference in body position in space and especially in the position of the head (upright versus horizontal) [47]. Different tactile feedback on the thigh could also have influenced the resulting position sense [9]. In a seated position, tactile feedback is primarily given on the back of the thigh, whereas in a prone position, tactile feedback is more likely to be found on the front. The somatosensory system is responsible for the perception of haptics, movement, position of body segments, temperature changes, and pain [48]. To perceive these diverse sensory impressions, the somatosensory system has a large number of mechanoreceptors at its disposal. Various body orientations might be relayed to different mechanoreceptors, thus making standardisation of test methods paramount. Further, primary cilia (PC) play a crucial role in the signalling between the intra- and extracellular space. Grevenstein et al. [49] detected a significantly lower rate of PC positive cells compared to other tissues and ligaments of other species, which might be a tissue-specific characteristic of the ACL [49]. Third, the elongation ability of the muscle-tendon unit of the ischiocrural musculature might be reduced while sitting with both legs extended. Furthermore, the predominant pre-tension of the m. quadriceps femoris, depending on the aforementioned stretching ability, may have caused better reproducibility [50,51]. In addition to the elasticity of ligament and tendon structures, other factors can also play a role in carrying out a knee angle reproduction test [52], such as restrictions on movement in the elderly or those with orthopaedic injuries limiting the choice of starting position. To mimic the clinical setting, testing was performed in non-weight-bearing conditions, even though weight-bearing might be more functional [41]. Therefore, transferring the results to daily activities should be done with caution. Clinical studies have shown possible impairments of proprioception in the knee joint in patients with anterior cruciate ligament rupture and lower neuromuscular activity in anterior cruciate ligament reconstruction [7,14,16,17,24]. This can be attributed to disturbed neural feedback caused by the destruction of the mechanoreceptors in the anterior cruciate ligament or the muscle spindle, as well as by the removal of the neural feedback of the semitendinosus or patella tendon after surgery [7,18,53]. Following Bock et al. [39], the present study used vibration as an interference source to induce impairment of neuronal feedback and thus proprioception of the knee joint in healthy subjects. The aim was to simulate the neuronal injury mechanisms of semitendinosus plastic surgery in anterior cruciate ligament reconstruction and to examine the possible effects on proprioception. It was expected that manipulating the semitendinosus tendon by vibration would induce a significantly reduced ability to reproduce knee angles under all joint position sense test conditions. The results showed that vibration represents a recognisable influence and thus serves as a source of interference with proprioception. However, it is questionable whether the vibration causes a disturbance in the neuronal feedback of the semitendinosus tendon. There could be other possible factors, such as the attachment of the vibration device or a pure sensitivity disturbance of the skin surface due to vibration [54]. However, anterior cruciate ligament reconstruction by means of semitendinosus allograft surgery potentially has far more consequences than what induced vibration is capable of simulating [55]. One possible approach could be the use of artificial intelligence (AI) to might reduce the risk of neurological damage and improve clinical outcome prediction. Especially in the field of diagnostics and therapy AI has already shown considerable advantages [56–59]. This could be beneficial for the patients' rehabilitation process. This is the first study to investigate and confirm the impact of body orientation and direction of movement in an active knee angle reproduction test, considering possible interaction effects. A potential influence of body orientation and movement direction, even in healthy athletic persons, could be suspicious of an even greater discrepancy in orthopedically impaired patients. Further research in non-healthy subjects, such as anterior cruciate ligament patients, is recommended before drawing clinical conclusions. To date, the current literature remains difficult to compare with the present results, because different testing protocols, equipment, and no uniform concerning testing

positions have been used. Further, no studies have considered possible interaction effects between body orientation and direction of movement of the knee [46,52]. This is the first study to compare the results of different body orientations and directions of movement in an active knee angle reproduction test.

5. Conclusion

Due to the reproduction errors in knee angle reproduction tests determined by different test conditions, practitioners are advised to use standardised test procedures to progress their clinical value and implementation into daily practice. The results in different settings should be critically analysed – that is, a direct comparison between the prone and sitting positions in a practical approach might not be recommended. Furthermore, considering the economic health aspects, the choice of test conditions should be based on the participants' resources to perform their best results. Practitioners should be aware that varying test conditions can lead to different therapeutic consequences. Future studies should focus on additional influencing factors on testing procedures, such as weight-bearing conditions. However, it would be of great interest to elucidate how the resulting reproduction error depends on the knee in setting the target angle.

5.1. Clinical messages

- Body orientation has an influence on knee angle reproducing capabilities, whereas reproduction error is significantly higher in the prone position.
- Direction of movement (starting from knee extension or knee flexion) might have a practical influence on knee angle reproduction errors.
- There is evidence that disruption of senso-motoric feedback leads to a decline in reproductive capacity.
- Practitioners should be aware that varying test conditions can lead to different therapeutic consequences.

Acknowledgments

The authors would like to thank all the subjects who participated in the study.

Authors contribution

Juliane Wieber: Conceptualisation, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing-Original Draft, Visualisation, Project administration.

Jasmin Brandt: Conceptualisation, Methodology, Investigation, Writing-Original Draft.

Eva Hirschhäuser: Conceptualisation, Methodology, Software, Investigation, Writing-Original Draft.

Maike Pieper: Conceptualisation, Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing-Original Draft.

Robert Rein: Conceptualisation, Data curation, Software, Formal analysis, Supervision, Project administration.

Philip Catalá-Lehnen: Resources, Proof-Reading-Original Draft, Data interpretation.

Bjoern Braunstein: Conceptualisation, Software, Resources, Data curation, Supervision, Project administration.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding

This research did not receive any funding from public, non-profit and/or commercial organisations.

References

- [1] Webster KE, Hewett TE. What is the evidence for and validity of return-to-sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction surgery? A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*. 2019; 49: 917-929.
- [2] Barber-Westin SD, Noyes FR. Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2011; 27(12): 1697-1705.
- [3] Grindem H, Snyder-Mackler L, Moksnes H, Engebretsen L, Risberg MA. Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: The Delaware-Oslo ACL cohort study. *British Journal of Sports Medicine*. 2016; 50(13): 804-808.
- [4] Lai CC, Ardern CL, Feller JA, Webster KE. 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. *British Journal of Sports Medicine*. 2018; 52(2): 128-138.
- [5] Ardern CL, Glasgow P, Schneiders A, Witvrouw E, Clarsen B, Cools A, Gojanovic B, Griffin S, Khan KM, Moksnes H, Mutch SA, Phillips N, Reurink G, Sadler R, Silbernagel KG, Thorborg K, Wangensteen A, Wilk KE, Bizzini M. 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *British Journal of Sports Medicine*. 2016; 50(14): 853-864.
- [6] Frobell RB, Roos EM, Roos HP, Ranstam J, Lohmander LS. A randomized trial of treatment for acute anterior cruciate ligament tears. *New England Journal of Medicine*. 2010; 363(4): 331-342.
- [7] Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: A critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*. 2016; 5(1): 80-90.
- [8] Li L, Ji ZQ, Li YX, Liu WT. Correlation study of knee joint proprioception test results using common test methods. *Journal of Physical Therapy Science*. 2016; 28(2): 478-482.
- [9] Stone KD, Keizer A, Dijkerman HC. The influence of vision, touch, and proprioception on body representation of the lower limbs. *Acta Psychologica*. 2018; 185: 22-32.
- [10] Roberts D, Fridén T, Stomberg A, Lindstrand A, Moritz U. Bilateral proprioceptive defects in patients with a unilateral anterior cruciate ligament reconstruction: A comparison between patients and healthy individuals. *Journal of Orthopaedic Research: Official Publication of the Orthopaedic Research Society*. 2000; 18(4): 565-571.
- [11] Domeika A, Slapšinskaitė A, Razon S, Šiupšinskas L, Klizienė I, Dubosienė M. Effects of an 8-week basketball-specific proprioceptive training with a single-plane instability balance platform. *Technology and Health Care*. 2020; 28(5): 561-571.
- [12] Dhillon MS, Bali K, Prabhakar S. Proprioception in anterior cruciate ligament deficient knees and its relevance in anterior cruciate ligament reconstruction. *Indian Journal of Orthopaedics*. 2011; 45(4): 294-300.
- [13] Tayfur B, Charupongs C, Morrissey D, Miller SC. Neuromuscular Function of the Knee Joint Following Knee Injuries: Does It Ever Get Back to Normal? A Systematic Review with Meta-Analyses. *Sports Medicine*. 2020; 1-18.
- [14] Hopper DM, Creagh MJ, Formby PA, Goh SC, Boyle JJ, Strauss GR. Functional measurement of knee joint position sense after anterior cruciate ligament reconstruction. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2003; 84(6): 868-872.
- [15] Jerosch J, Prymka M. Propriozeptive Fähigkeiten im Bereich des Kniegelenks bei Patienten nach vorderer Kreuzbandruptur. *Der Unfallchirurg*. 1996; 99(11): 861-868.
- [16] Kaur M, Ribeiro DC, Theis JC, Webster KE, Sole G. Movement patterns of the knee during gait following ACL reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, NZ)*. 2016; 46(12): 1869-1895.
- [17] MacDonald PB, Hedden D, Pacin O, Sutherland K. Proprioception in anterior cruciate ligament-deficient and reconstructed knees. *The American Journal of Sports Medicine*. 1996; 24(6): 774-778.
- [18] Relph N, Herrington L, Tyson S. The effects of ACL injury on knee proprioception: A meta-analysis. *Physiotherapy*. 2014; 100(3): 187-195.
- [19] Fleming JD, Ritzmann R, Centner C. Effect of an anterior cruciate ligament rupture on knee proprioception within 2 Years after conservative and operative treatment: A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*. 2022; 52(5): 1091-1102.
- [20] Suydam SM, Cortes DH, Axe MJ, Snyder-Mackler L, Buchanan TS. Semitendinosus tendon for ACL reconstruction: Regrowth and mechanical property recovery. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2017; 5(6).
- [21] Proske U, Wise AK, Gregory JE. The role of muscle receptors in the detection of movements. *Progress in Neurobiology*. 2000; 60(1): 85-96.
- [22] Hanzlíková I, Richards J, Hébert-Losier K, Smékal D. The effect of proprioceptive knee bracing on knee stability after

- anterior cruciate ligament reconstruction. *Gait Posture*. 2019; 67: 242-247.
- [23] Grob KR, Kuster MS, Higgins SA, Lloyd DG, Yata H. Lack of correlation between different measurements of proprioception in the knee. *The Journal of Bone and Joint Surgery British Volume*. 2002; 84(4): 614-618.
- [24] Wojtyś EM, Huston LJ. Longitudinal effects of anterior cruciate ligament injury and patellar tendon autograft reconstruction on neuromuscular performance. *The American Journal of Sports Medicine*. 2000; 28(3): 336-344.
- [25] Nagai T, Bates NA, Hewett TE, Schilaty ND. Effects of localized vibration on knee joint position sense in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*. 2018; 55: 40-44.
- [26] Romero-Franco N, Montaña-Munuera JA, Jiménez-Reyes P. Validity and Reliability of a Digital Inclinometer to Assess Knee Joint-Position Sense in a Closed Kinetic Chain. *Journal of Sport Rehabilitation*. 2017; 26(1).
- [27] Barrett D. Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction. *The Journal of Bone and Joint Surgery British Volume*. 1991; 73(5): 833-837.
- [28] Ojoawo AO, Olaogun MO, Hassan MA. Comparative effects of proprioceptive and isometric exercises on pain intensity and difficulty in patients with knee osteoarthritis: A randomised control study. *Technology and Health Care*. 2016; 24(6): 853-863.
- [29] Strong A, Arumugam A, Tengman E, Røijezon U, Häger CK. Properties of knee joint position sense tests for anterior cruciate ligament injury: A systematic review and meta-analysis. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2021; 9(8): 23259671211007878.
- [30] Deshpande N, Connelly DM, Culham EG, Costigan PA. Reliability and validity of ankle proprioceptive measures. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2003; 84(6): 883-889.
- [31] Elangovan N, Herrmann A, Konczak J. Assessing proprioceptive function: Evaluating joint position matching methods against psychophysical thresholds. *Physical Therapy*. 2014; 94(4): 553-561.
- [32] Gonzales TI, Goble DJ. Short-term adaptation of joint position sense occurs during and after sustained vibration of antagonistic muscle pairs. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2014; 8: 896.
- [33] Larsen R, Lund H, Christensen R, Røgind H, Danneskiold-Samsøe B, Bliddal H. Effect of static stretching of quadriceps and hamstring muscles on knee joint position sense. *British Journal of Sports Medicine*. 2005; 39(1): 43-46.
- [34] Suydam SM, Cortes DH, Axe MJ, Snyder-Mackler L, Buchanan TS. Semitendinosus tendon for ACL reconstruction: Regrowth and mechanical property recovery. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. 2017; 5(6).
- [35] Ardern CL, Webster KE. Knee flexor strength recovery following hamstring tendon harvest for anterior cruciate ligament reconstruction: A systematic review. *Orthopedic Reviews*. 2009; 1(2).
- [36] Barenius B, Webster WK, McClelland J, Feller J. Hamstring tendon anterior cruciate ligament reconstruction: Does gracilis tendon harvest matter? *International Orthopaedics*. 2013; 37(2): 207-212.
- [37] Samuelsen BT, Webster KE, Johnson NR, Hewett TE, Krych AJ. Hamstring autograft versus patellar tendon autograft for ACL reconstruction: Is there a difference in graft failure rate? A meta-analysis of 47,613 patients. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. 2017; 475(10): 2459-2468.
- [38] Chen H, Liu H, Chen L. Patellar tendon versus 4-strand semitendinosus and gracilis autografts for anterior cruciate ligament reconstruction: A meta-analysis of randomized controlled trials with mid-to long-term follow-up. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2020; 36(8): 2279-2291.
- [39] Bock O, Pipereit K, Mierau A. A method to reversibly degrade proprioceptive feedback in research on human motor control. *Journal of Neuroscience Methods*. 2007; 160(2): 246-250.
- [40] Bosco C, Cardinale M, Tarpela O. Influence of vibration on mechanical power and electromyogram activity in human arm flexor muscles. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1999; 79(4): 306-311.
- [41] Layne CS, Chelette AM, Pourmoghadam A. Impact of altered lower limb proprioception produced by tendon vibration on adaptation to split-belt treadmill walking. *Somatosensory & Motor Research*. 2015; 32(1): 31-38.
- [42] Ghai S, Driller MW, Masters RSW. The influence of below-knee compression garments on knee-joint proprioception. *Gait & Posture*. 2018; 60: 258-261.
- [43] Jerosch J, Prymka M. Knee joint proprioception in normal volunteers and patients with anterior cruciate ligament tears, taking special account of the effect of a knee bandage. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 1996; 115(3-4): 162-166.
- [44] Azevedo J, Rodrigues S, Seixas A. The influence of sports practice, dominance and gender on the knee joint position sense. *The Knee*. 2021; 28: 117-123.
- [45] Hancock GE, Hepworth T, Wembridge K. Accuracy and reliability of knee goniometry methods. *Journal of Experimental Orthopaedics*. 2018; 5(1): 1-6.
- [46] Baumeister J. Zentralnervöse und motorische Auswirkungen einer Verletzung und Rekonstruktion des vorderen Kreuzbandes bei sensomotorischen Aufgaben [Dissertation]. Universität Paderborn. Paderborn; 2007.
- [47] Liu JZ, Kubo M, Aoki H, Liu N, Kou PH, Suzuki T. A study on the difference of human sensation evaluation to whole-body vibration in sitting and lying postures. *Applied Human Science: Journal of Physiological Anthropology*. 1995; 14(5): 219-226.
- [48] Lephart SM, Pincivero DM, Rozzi SL. Proprioception of the ankle and knee. *Sports Medicine*. 1998; 25(3): 149-155.

- [49] Grevenstein D, Oppermann J, Winter L, Barsch F, Niedermair T, Mamilos A, et al. First detection of primary cilia in injured human anterior cruciate ligament: A pilot study with pathophysiological reflections. *Pathology-Research and Practice*. 2022; 237.
- [50] Ribot-Ciscar E, Roll JP. Ago-antagonist muscle spindle inputs contribute together to joint movement coding in man. *Brain Research*. 1998; 791(1-2): 167-176.
- [51] Gisler T. Dehnung des M. quadriceps femoris aus anatomisch-physiologischer Sicht. Differenzierte Längendiagnostik und Dehninterventionen für den M. rectus femoris und die drei Mm. Vasti. *Schweiz Z Med Traumatol*. 2012; 13(60): 116-124.
- [52] Wilke C, Froböse I. Quantifizierung propriozeptiver Leistungen von Kniegelenken. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*. 2003; 54(2): 49-54.
- [53] Duchman KR, Lynch TS, Spindler KP. Graft selection in anterior cruciate ligament surgery: Who gets what and why? *Clinics in Sports Medicine*. 2017; 36(1): 25-33.
- [54] Sherrick CE. Variables affecting sensitivity of the human skin to mechanical vibration. *Journal of Experimental Psychology*. 1953; 45(5): 273-282.
- [55] D'Alessandro P, Wake G, Annear P. Hamstring pain and muscle strains following anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective, randomized trial comparing hamstring graft harvest techniques. *Journal of Knee Surgery*. 2012 Sep; 26(02): 139-144.
- [56] Hafizović L, Čaušević A, Deumić A, Bećirović LS, Pokvić LG, Badnjević A. The Use of Artificial Intelligence in Diagnostic Medical Imaging: Systematic Literature Review. In: 2021 IEEE 21st International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). IEEE; 2021. pp. 1-6.
- [57] Kunze KN, Rossi DM, White GM, Karhade AV, Deng J, Williams BT, et al. Diagnostic performance of artificial intelligence for detection of anterior cruciate ligament and meniscus tears: A systematic review. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. 2021; 37(2): 771-781.
- [58] Rovčanin A, Skopljak S, Suleiman S, Smajović A, Bečić E, Bečić F, Spahić Bećirović L, Gurbeta Pokvić L, Badnjević A. Application of artificial intelligence in diagnosis and therapy of prostate cancer. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(4): 74-79.
- [59] Šeho L, Šutković H, Tabak V, Tahirović S, Smajović A, Bečić E, Deumić A, Spahić Bećirović L, Gurbeta Pokvić L, Badnjević A. Using artificial intelligence in diagnostics of meningitis. *IFAC-PapersOnLine*. 2022; 55(4): 56-61.

4.3 Publikation C

Wieber, J., Preece, A., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Knee angle reproduction tests: influences of body orientation, movement direction and limb dominance. *International journal of sports medicine*, 10.1055/a-2526-9372. Advance online publication. <https://doi.org/10.1055/a-2526-9372>

Knee angle reproduction tests: influences of body orientation, movement direction and limb dominance



Authors

Juliane Wieber^{1, 2} , Abigail Preece^{3, 4}, Robert Rein⁴ , Bjoern Braunstein^{3, 5, 6, 7}

Affiliations

- 1 Exercise Physiology and Sports Medicine, Olympic Training Centre Berlin, Berlin, Germany
- 2 Sports and Exercise Medicine, University of Hamburg Faculty of Education Psychology and Physical Science, Hamburg, Germany
- 3 Institute of Movement and Neuroscience, German Sport University Cologne, Cologne, Germany
- 4 Institute of Exercise Training and Sport Informatics, German Sport University Cologne, Cologne, Germany
- 5 Institute of Biomechanics and Orthopaedics, German Sport University Cologne, Cologne, Germany
- 6 German Research Centre of Elite Sport, German Sport University Cologne, Cologne, Germany
- 7 Centre for Health and Integrative Physiology in Space, German Sport University Cologne, Cologne, Germany

Keywords

return to sport, return to competition, physiotherapy, orthopaedics, proprioception, joint position sense

received 31.07.2024

accepted after revision 24.01.2025

published online 2025

Bibliography

Int J Sports Med

DOI 10.1055/a-2526-9372

ISSN 0172-4622

© 2025. The Author(s).

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

Correspondence

Dr. Bjoern Braunstein
Institute of Movement and Neuroscience, German Sport
University Cologne
Cologne
Germany
braunstein@dshs-koeln.de

ABSTRACT

Applying joint position sense tests under different test conditions may introduce reproduction error bias, which can result in different therapeutic consequences. This study investigated the effects of body orientation, movement direction, and limb dominance on the active knee angle reproduction error. Subjects underwent active contralateral knee angle reproduction tests in a seated versus prone position, from a starting point of knee flexion versus knee extension, and with the dominant versus nondominant limb setting the target angle. The test order was randomly determined for each subject. The primary outcome was the absolute active knee angle reproduction error (°). The data of 54 healthy subjects (mean ± standard deviation, age: 26 ± 5 years, height: 174 ± 11 cm, body mass: 69.9 ± 14.4 kg, and Tegner activity score: 5.8 ± 1.9) showed that the reproduction error was greater in the seated position than in the prone position. The use of the dominant limb as the reference limb was associated with significantly greater errors in the seated position, but not in the prone position. In conclusion, directly comparing the results obtained in the prone and seated positions is not recommended. However, the dominance of the reference limb might be relevant when testing patients and comparing healthy and injured knees.

ABBREVIATIONS

AAE	Absolute angular error
ANOVA	Analysis of variance
CI	Confidence interval
JPS	Joint position sense
LMM	Linear mixed model

Introduction

Proprioception is defined as the perception of the body's position and movement and is described as a complex construct that has not yet been fully examined [1, 2]. The outcomes of studies on proprioception play an important role in injury prevention and during the process of rehabilitation [3, 4]. Impaired proprioception is accompanied by a reduction in coordination ability, which is a possible reason for knee injuries, especially anterior cruciate ligament ruptures in pivoting sports [3].

Assessing the joint position sense (JPS) is the most widely used method for measuring the knee's proprioceptive capability, and JPS tests are performed as a part of almost every orthopedic rehabilitation program [5, 6]. The accuracy of such tests is of utmost clinical importance as the results are used to justify exercise programs and to evaluate the success of treatment programs [6]. However, the protocols used to test the knee's proprioceptive capability vary, which leads to different test results [1, 7]. Elangovan et al. suggested that differences in test protocols do not denote methodological weaknesses but are due to various physiological factors that vary across protocols and thus influence JPS results [8].

A combination of different sensory inputs for detecting, generating, and stimulating the joint position, movement velocity, direction, and force forms the basis of proprioception [2]. There are various types of sensory mechanoreceptors located in joint tissues, muscles, ligaments, tendons, and the skin [8]. These receptors are a part of the vestibular, visual, and somatosensory systems and are responsible for recognizing the body's position and the orientation of body segments with respect to other body segments [6, 8, 9]. It has been shown that, when individuals actively reproduce different knee joint angles, there are significant differences in the triggered mechanoreceptors, depending primarily on the position and direction of the limb movement [5, 7, 10–17]. The direction of movement has been shown to influence the knee's JPS: higher average error values are recorded when the leg moves from extension to flexion [7, 14, 15, 18, 19]. Furthermore, the body's position has been shown to influence the knee angle reproduction error, with greater deviations recorded in the prone position [7, 16, 20]. However, there is conflicting evidence that limb dominance is associated with proprioceptive acuity; it has been shown to be an influencing factor in some studies [15, 21–24] but not in other studies [23, 25]. To progress the clinical implementation of a standardized JPS test, the aim of this study was to investigate the effects of body orientation, movement direction, and limb dominance on knee angle reproduction errors measured in an active contralateral knee angle reproduction test. It was hypothesized reproduction errors to deviate under varying test conditions.

Materials and Methods

An observational clinical trial with blinded outcome assessors was performed in January 2024. The subject recruitment extended from October to December 2023. Due to the study's design, no follow-up was required. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki of 1964 and its later amendments or comparable ethical standards and was approved by the Institutional Ethics Boards of the German Sport University Cologne and the University of Hamburg. The experimental design was preregistered on the Open Science Framework (DOI 10.17605/OSF.IO/AFWRP) and adhered to the Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology guidelines [26]. The subjects were recruited through voluntary participation. Computer-generated tables were used to determine the order in which the subjects were exposed to the following test conditions: extension versus flexion (direction), sitting versus laying (position), and the dominant leg adjusting to the target angle versus the dominant leg setting the reference angle (simulation). All standardized assessments were performed by a graduated exercise/sport scientist. All data were collected at the German Sport University Cologne. To determine the required sample size, the statistical power was set at 0.80 and the effect size was set at $d = 0.60$, based on previous research [7, 8, 20, 27, 28]. A priori power analysis resulted in a required sample size of at least 20 subjects (G*Power, Version 3.1.9.4). The exclusion criteria were physical limitations, such as a general neuronal disease or a history of muscles, ligaments, tendons, or bone injury in the lower extremities. Furthermore, the subjects were not allowed to have chronic diseases which could lead to sensory disfunctions. Each subject provided a written informed consent for the participation, data collection, and image publication prior to enrolment.

JPS test

Prior to testing, the subjects were familiarized with the study protocol via standardized verbal instructions. The active contralateral knee angle reproduction test was performed over five trials in two different positions: sitting and prone. The subjects were blindfolded to prevent the visual feedback bias. Each lower leg was passively moved from a starting point of knee flexion (starting angle of 90°) or knee extension (starting angle of 0°) to a random target angle between 50° and 70°. To minimize detection and performance bias, the subjects were retrospectively asked about their dominant side. Under all conditions, the subject's knee joint was passively moved at a slow speed by the examiner. Once the examiner had brought the knee to the target angle, the subject had to hold the knee position without further assistance of the examiner. The subject was asked to actively reproduce the target angle with the contralateral leg while the other leg remains in the reference position. The subject stopped moving the leg when they perceived that the target angle had been replicated and gave a verbal signal. The knees were maintained at the final angles for approximately 3 s. Subjects were not permitted to adjust the angle of the contralateral leg after they signaled that they had replicated the target angle. During the test, each subject laid or sat on an adjustable physiotherapy bench. In the seated position, approximately 5 cm of an overhang of the leg was instigated to minimize cutaneous

cues. Testing was conducted in a quiet and isolated room, and the subjects wore loose-fitting shorts to minimize external stimulation. To minimize proprioceptive transfer between consecutive tests, subjects walked around for approximately 2 min between tests. The lateral knee joint cavity on both legs was marked at the beginning of the test session and remained unchanged between trials. An electrical goniometer (Vernier Software & Technology, Dynatech) was attached to the lower limb, and a fulcrum was aligned with the lateral knee joint line. One arm of the goniometer was positioned parallel to the line joining the greater trochanter and the fulcrum, while the other arm was positioned along the line joining the fulcrum and the lateral malleolus. The reliability of comparable active contralateral test procedures was found to be fair to good for the prone (intraclass correlation coefficient [ICC]: 0.50–0.68) and sitting positions (ICC: 0.26–0.65) [16]. Inter-rater and intra-rater reliabilities using a long arm goniometer were found to be high (ICC: > 0.98) [29].

Outcome measures

The outcome measure was the absolute angular error (AAE), measured in degrees (°). To calculate the mean AAE, the absolute differences between the target angles and the actual produced angles were calculated.

Statistical analysis

Statistical analyses were performed using R (Version 4.3.2). Statisticians were blinded to the different test procedures. Data were checked for missing values, distributions, and outliers and descriptively summarized as means ± standard deviations (SDs), standard errors (SEs), and 95 % confidence intervals (CIs). Statistical outliers were calculated by Z-scores and excluded if ≥ 1.96 SD [30]. Homogeneity of variance was tested using the Levene test. To account for the repeated measures and potential subject-specific variations, a linear mixed model (LMM) was employed. The fixed effects included the body orientation, the direction of movement, and limb dominance and the individual subjects were modelled as random effects. An analysis of variance (ANOVA) was conducted using Satterthwaite's method to examine the overall differences and interaction effects among the body orientation, the direction of movement, and limb dominance. The dependent variable was the AAE and the independent variables were the body orientation, the direction of movement and limb dominance. When the overall ANOVA indicated significance, post hoc Tukey's HSD tests were ap-

plied to further explore pairwise differences. Any missing data were addressed using listwise deletion. *P*-values less than 0.05 were considered to indicate a statistical significance ($\alpha = 0.05$). The effect size was calculated and interpreted as Cohen's *d* for small (0.20), medium (0.50), or large (0.80) effects.

Results

Descriptive statistics

The study included 54 healthy subjects (mean ± SD, age: 26 ± 5 years, height: 174 ± 11 cm, body mass: 69.9 ± 14.4 kg, and Tegner activity score: 5.8 ± 1.9; 20 males and 34 females). There were no dropouts. The AAE values associated with the different body positions, directions of movement, and uses of the dominant leg are shown in ► **Table 1**.

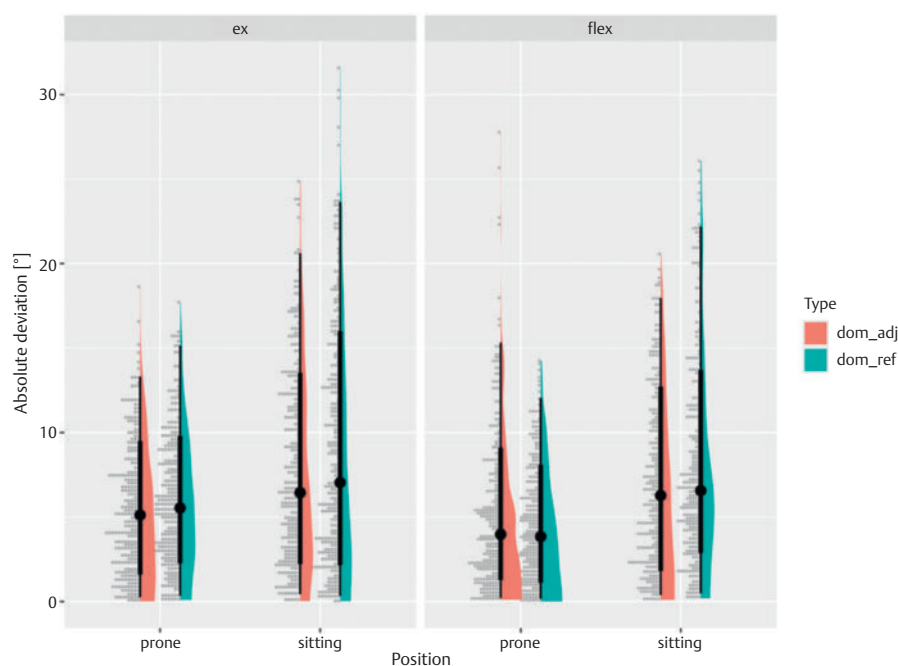
Influences of the body orientation, the direction of movement and limb dominance on the resulting angular error

Investigation of the residual plots from the LMM analysis did not indicate any relevant deviations from the testing assumption, suggesting homoscedasticity. However, posterior predictive checks indicated that the simulated and observed data differed. To improve the model fit, the AAE values were root-mean square transformed. Subsequent model checking indicated an improvement in the model fit, but did not alter the interpretation of the analysis results. Thus, further analysis was performed using the raw AAE values. However, to guard against erroneous interpretations of the statistical significance, the α -level was lowered to 0.01. The results of the ANOVA based on the LMM model fit indicated several statistically significant effects. The main effects for the body orientation ($F(1, 54) = 23.53, p < 0.001$) and limb dominance ($F(1, 1977) = 8.44, p = 0.004$) were statistically significant, whereas for the direction of movement ($F(1, 54) = 6.28, p = 0.015$) no statistically significant effect was found. The interaction effects for the body position by limb dominance ($F(1, 1977) = 12.80, p < 0.001$) was statistically significant. The movement direction by the body position ($F(1, 54) = 0.02, p = 0.875$) and the movement direction by limb dominance ($F(1, 1977) = 4.34, p = 0.036$) were not found to be statistically significant (► **Fig. 1**).

► **Table 1** Absolute reproduction errors recorded in a knee angle reproduction test in which specific conditions were varied ($n = 54$).

Position	Type	Direction	Mean (°)	SD (°)	Min (°)	Max (°)
Prone	dom_adj	Ex	5.52	3.80	0.01	18.64
Prone	dom_adj	Flex	5.26	4.61	0.10	27.78
Prone	dom_ref	Ex	6.05	3.83	0.09	17.71
Prone	dom_ref	Flex	4.52	3.39	0.00	14.26
Sitting	dom_adj	Ex	7.78	5.70	0.03	24.87
Sitting	dom_adj	Flex	7.05	5.07	0.09	20.57
Sitting	dom_ref	Ex	8.89	6.90	0.03	31.59
Sitting	dom_ref	Flex	8.05	5.91	0.20	26.07

Abbreviations: dom_adj, the dominant leg was adjusted to replicate the target angle; dom_ref, the dominant leg was set at the reference angle; ex, extension; flex, flexion; Max, the highest absolute angular error; Min, the lowest absolute angular error.



► **Fig. 1** Boxplot of the difference in the knee angle reproduction error between the prone and seated positions: dom_adj, the dominant leg was adjusted to replicate the target angle; dom_ref, the dominant leg was set at the reference angle.

Differences between the dominant and nondominant limbs

Following the identification of significant interaction effects, Tukey's HSD tests were conducted to further explore the specific differences between the groups. Post hoc testing for the body orientation when controlling for limb dominance revealed a statistically significant difference of $\Delta = 3.2^\circ$ for the body position when the dominant limb was the reference leg ($t(1,64) = -5.68$, $SE = 0.56$ [95% CI: $-4.30, -2.06$], $p < 0.001$, $d = -0.53$ [95% CI: $-0.83, -0.24$]) and when the nondominant limb was the reference leg ($t(1,64) = -3.61$, $SE = 0.56$ [95% CI: $-3.14, -0.904$], $p = 0.0006$, $d = 0.84$ [95% CI: $-1.13, -0.54$]). A lower AAE resulted when subjects were in the prone position compared to the seated position (dominant limb: $\Delta = -3.2$ and nondominant limb: $\Delta = -2.0$). In contrast, post hoc testing revealed no statistically significant difference in the prone position between the dominant limb and the nondominant limb for the reference leg ($t(1,1977) = 0.48$, $SE = 0.23$ [95% CI: $-0.341, 0.56$], $p = 0.63$, $d = -0.03$ [95% CI: $-0.09, 0.15$]). In the sitting position, there was a statistically significant difference between the dominant and nondominant limbs for the reference leg ($t(1,1977) = -4.58$, $SE = 0.23$ [95% CI: $-1.50, -0.60$], $p < 0.001$, $d = -0.28$ [95% CI: $-0.40, -0.16$]) with a 1.1° lower AAE when the nondominant limb served as the reference leg (► **Fig. 2**).

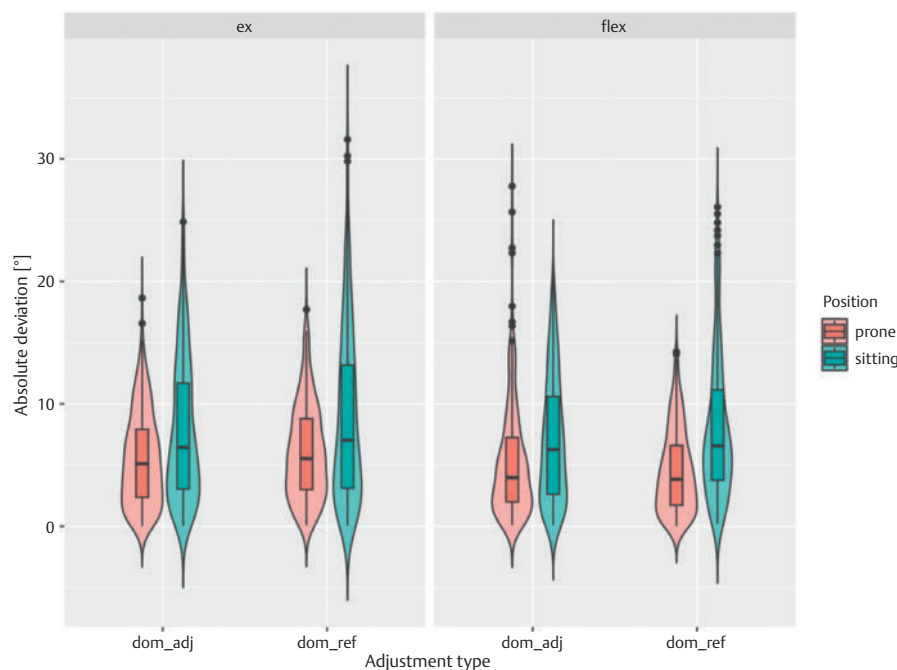
Discussion

The aim of this study was to investigate the influence of the body orientation, the direction of movement, and limb dominance on the AAE in an active knee angle reproduction test as a measure for

proprioceptive acuity. It was hypothesized that there would be significant differences in the AAE when the testing conditions varied. Furthermore, it was assumed that a different AAE would result when the dominant limb was used as the reference leg compared to the nondominant limb. The results indicated that the body orientation and limb dominance were the main factors that influenced the AAE. The reproduction error values were significantly higher in the seated position compared to those in the prone position. The effect sizes ($d = 0.50$ – 0.80) and differences in the AAE values recorded in the two positions demonstrated that the body position had a clinically important effect, independent of the dominance of the reference leg. Furthermore, the present study showed that the dominance of the reference limb had a significant impact on the resulting AAE in the sitting position but not in the prone position. The AAE was significant when the dominant limb was the reference leg. However, the AAE values differed by only 1° (95% CI: $0.6^\circ, 1.5^\circ$), and the effect size was small ($d = 0.28$). According to the recent literature, this small difference between the target and reproduction angles might not be clinically relevant [25, 31].

The present findings are of great practical relevance because numerous studies that have been conducted to evaluate knee proprioception in healthy subjects have lacked validity and comparability due to the use of different testing procedures [1, 7, 16, 32]. Furthermore, no previous study has evaluated the influence of leg dominance on the AAE in combination with different body positions or the direction of the knee movement in a JPS test.

Based on the present results, the ability to reproduce knee angles is seemingly connected to the position applied in the test protocols. This has also been highlighted by other recent studies, which



► **Fig. 2** Boxplot of the difference in the knee angle reproduction error between the dominant limb adjusting to or setting the reference angle: dom_adj, the dominant leg was adjusted to replicate the target angle; dom_ref, the dominant leg was set at the reference angle.

have shown that reproduction errors are significantly different when testing is conducted under different conditions [7, 14–16, 20]. Furthermore, the present results are in line with the recent literature on limb dominance that shows that the results of proprioceptive tests (e.g., return to sports, y-balance, or JPS tests) are dependent on limb dominance [33, 34]. Wieber et al. demonstrated that the body orientation and the movement direction influence the resulting AAE in healthy subjects but did not control for limb dominance [7]. Other studies on lateral dominance have shown that there are differences between the dominant and non-dominant legs in an active JPS test [24, 35]. A possible reason for the differences in the AAE when the movement direction and body position are varied could be the influence of gravity [36]. The effect of gravity on the hamstrings and quadriceps muscle varies between the sitting and prone positions. In the prone position, gravity-induced torques are greatest on hamstrings, whereas in the seated position they are greatest on the quadriceps muscle [36]. Because the motor unit recruitment differs between the two positions, it is expected that the muscle activity present in the two positions also differs and that the proprioceptive information available in the prone position is different from that available in the seated position [10, 37, 38]. When moving against gravity, the concentric muscular strain and load on the joint structures is greater [19]. This is also due to the increased activation of the muscle spindles and the Golgi tendon organ during the contraction of the concentric quadriceps muscle [19].

Furthermore, proprioceptive abilities and the resulting movement patterns are dependent on the tactile feedback [39]. In a seated position, the site of the tactile feedback is primarily the back of the thigh, whereas in a prone position, the tactile feedback sites

are more likely to be the front of the thighs and the patellae [40]. Hence, subjects receive different tactile feedbacks when they are in the prone and seated positions. In addition, when a subject is in the prone position, more of their body is in contact with the orthopedic bench, and therefore, they receive additional afferent inputs from cutaneous receptors located in other muscles of the lower limb [13]. These inputs may influence the knee's proprioceptive input, resulting in a more accurate perception of the knee joint angle in the prone position. Another possible reason for the differences in the AAE recorded in the prone and seated positions could be the difference in the body's position in space, especially the position of the head (upright in the seated position vs. horizontal in the prone position) [41].

To date, both positive and negative findings have been obtained regarding limb dominance; therefore, whether limb dominance influences knee proprioception among healthy subjects remains questionable. Most of the available scientific evidence is somewhat limited due to a primary focus on the upper extremities. However, considering that each brain region predominantly controls the limb on the opposite side; this implies that lateralized brain activity is a consistent feature in proprioceptive tasks, regardless of limb dominance [42–44]. Multiple investigations conducted to explore brain activity during joint position matching tasks have consistently highlighted a prevalence of right hemisphere activation, irrespective of the active leg [24, 35]. However, it is worth noting that conflicting evidence exists: other studies have demonstrated no significant differences between the dominant and nondominant sides [33, 45–48]. Limb dominance has also been shown to be strongly related to physical activity and the extremities that individuals use when they are participating in sports or specific disciplines [33]. Others

who have compared the angular reproduction performance of trained and untrained participants have noted variations in both dominant and nondominant limbs [19, 21]. Nevertheless, it is difficult to determine the effect of limb dominance in a task with which subjects are unfamiliar [49]. Engagement in training has the potential to positively influence the adaptations of muscle spindles and induce changes in the central nervous system, including the enhancement of synaptic connections [21]. Within the scope of the present study, the subjects exhibited physical activity, as evidenced by the Tegner activity scale [50].

Limitations

In the present study, no correlation analysis was conducted between physical activity, types of sports (e.g., predominantly upper body or lower body involved) or the training load and JPS accuracy. The potential causal relationship between the type and the training load/intensity of sports or physical activity and the JPS could be a point for discussion. This aspect remains an intriguing area for further investigation. A further limitation is that the JPS test used may not fully capture comprehensive sensorimotor performance during functional tasks involving multi joint movements in a weight-bearing setting. The methodology adopted for measuring the articular range of motion does not ensure the minimization of measurement errors deriving from the potential three-dimensional motion of the joints. We intentionally selected the utilized methodology due to its similarity to the return-to-sports tests used after knee injuries, which are mostly conducted in a non-weight bearing setting and without cost-intensive equipment [25, 31]. Therapeutic assessment involving weight-bearing tasks may not always be feasible, particularly during the acute phase of injury [33]. It is conceivable that a more challenging task could have elicited differences in the resulting AAE, but the results of this study therefore provide higher generalizability to the JPS measurement of patients during rehabilitation. The AAE was the main outcome measurement parameter assessed. Further parameters, for example the variable error, still provide an indication of the accuracy of the measurement but were not included as the AAE has proven to be a more reliable parameter in the recent literature on the JPS [15, 16]. Furthermore, a causal relationship can be generalized to different times, but lower generalizability for different users due to the standardized complex application of the device. Furthermore, the subjects had to perform the JPS test at a self-selected pace. It is worth noting that movement velocity may influence neuromuscular activity and thus potentially affect the resulting AAE [33, 37].

Future studies could be conducted on possible deviations in the knee angle reproduction error between injured and non-injured sides with regard to the limb dominance and what influence a particular type of sport may have on limb dominance and proprioception in the knee.

Conclusions

The aim of this study was to investigate the influences of body orientation, direction of movement, and limb dominance on the knee angle reproduction error in an active JPS test as a measure of proprioceptive acuity. The body orientation was found to greatly influence the knee angle reproduction error, showing that reproduc-

tion failure is greater in a sitting position than in a prone position, especially if the dominant limb is chosen as the reference leg. Practitioners are advised to use standardized test procedures to progress their clinical value and implement in daily practice. The results obtained in different settings should be critically analyzed; directly comparing the results obtained in the prone and sitting positions is not recommended. However, the dominance of the reference limb might be relevant when testing patients and comparing healthy and injured knees. Future studies should focus on possible differences in the knee angle reproduction error between the injured and non-injured sides with regard to limb dominance.

Clinical Trial

Registration number (trial ID): <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/AFWRP> (OSF-Open Science Framework), Trial registry: German Clinical Trials Register (<https://drks-neu.uniklinik-freiburg.de/>), Type of Study: Prospective observational study.

Acknowledgement

The funding agreement between Thieme and the German Sport University Cologne allows the authors to cover the cost of publishing their article as Open Access.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- [1] Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y. Assessing proprioception: A critical review of methods. *J Sport Health Sci* 2016; 5: 80–90. DOI: 10.1016/j.jshs.2014.10.004
- [2] Hillier S, Immink M, Thewlis D. Assessing Proprioception: A Systematic Review of Possibilities. *Neurorehabil Neural Repair* 2015; 29: 933–949. DOI: 10.1177/1545968315573055
- [3] Fleming JD, Ritzmann R, Centner C. Effect of an Anterior Cruciate Ligament Rupture on Knee Proprioception Within 2 Years After Conservative and Operative Treatment: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Med* 2022; 52: 1091–1102. DOI: 10.1007/s40279-021-01600-z
- [4] Molaei F, Shahmir M, Oliveira R et al. Can acute mobilization and oscillation training profit on the joint position sense and strength of the rotator cuff muscles in young tennis players? *Retos* 2024; 58: 534–545. DOI: 10.47197/retos.v58.107868
- [5] Lins CADA, Macedo LDB, Silveira RAG, Borges D.T., Brasileiro J.S. Influence of cryotherapy on balance and joint position sense in healthy subjects: randomized clinical trial. *Man Ther Posturology Rehabil J* 2015; 13: 1–6. DOI: 10.17784/mtprehabjournal.2015.13.276
- [6] Smith TO, Davies L, Hing CB. A systematic review to determine the reliability of knee joint position sense assessment measures. *Knee* 2013; 20: 162–169. DOI: 10.1016/j.knee.2012.06.010

- [7] Wieber J, Brandt J, Pieper M et al. Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study. *Technol Health Care* 2023; 31: 1567–1578. DOI: 10.3233/THC-220747
- [8] Elangovan N, Herrmann A, Konczak J. Assessing Proprioceptive Function: Evaluating Joint Position Matching Methods Against Psychophysical Thresholds. *Phys Ther* 2014; 94: 553–561. DOI: 10.2522/ptj.20130103
- [9] Lokhande MV, Shetye J, Mehta A, Deo MV. Assessment of Knee Joint Proprioception in Weight Bearing and in Non-Weight Bearing Positions in Normal Subjects. *JKIMSU* 2013; 2: 94–101
- [10] Suner-Keklik S, Cobanoglu-Seven G, Kafa N, Ugurlu M., Guzel NA. The Validity and Reliability of Knee Proprioception Measurement Performed With Inclinator in Different Positions. *J Sport Rehabil* 2017; 26: 1–18. DOI: 10.1123/jsr.2017-0010
- [11] Vila-Chã C, Riis S, Lund D, Møller A, Farina D, Falla D. Effect of unaccustomed eccentric exercise on proprioception of the knee in weight and non-weight bearing tasks. *J Electromyogr Kinesiol* 2011; 21: 141–147. DOI: 10.1016/j.jelekin.2010.10.001
- [12] Naseri N, Pourkazemi F. Difference in knee joint position sense in athletes with and without patellofemoral pain syndrome. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012; 20: 2071–2076. DOI: 10.1007/s00167-011-1834-0
- [13] Birmingham TB, Kramer JF, Inglis JT et al. Effect of a Neoprene Sleeve on Knee Joint Position Sense During Sitting Open Kinetic Chain and Supine Closed Kinetic Chain Tests. *Am J Sports Med* 1998; 26: 562–566. DOI: 10.1177/03635465980260041601
- [14] Clark NC, Akins JS, Heebner NR et al. Reliability and measurement precision of concentric-to-isometric and eccentric-to-isometric knee active joint position sense tests in uninjured physically active adults. *Phys Ther in Sport* 2016; 18: 38–45. DOI: 10.1016/j.ptsp.2015.06.005
- [15] Relph N, Herrington L. Interexaminer, Intraexaminer, and Test-Retest Reliability of Clinical Knee Joint-Position-Sense Measurements Using an Image-Capture Technique. *J Sport Rehabil* 2015; 24: 2013–2014. DOI: 10.1123/jsr.2013-0134
- [16] Olsson L, Lund H, Henriksen M et al. Test-retest reliability of a knee joint position sense measurement method in sitting and prone position. *Adv Physiother* 2004; 6: 37–47. DOI: 10.1080/14038190310009894
- [17] Wilke C, Froböse I. Quantifizierung propriozeptiver Leistungen von Kniegelenken. *Dtsch Z Sportmed* 2003; 2: 9–12
- [18] Mir SM, Hadian M-R, Talebian S, Nasser N. Functional assessment of knee joint position sense following anterior cruciate ligament reconstruction. *Br J Sports Med* 2008; 42: 300–303. DOI: 10.1136/bjism.2007.044875
- [19] Relph N, Herrington L. The effects of knee direction, physical activity and age on knee joint position sense. *Knee* 2016; 23: 393–398. DOI: 10.1016/j.knee.2016.02.018
- [20] Larsen R, Lund H, Christensen R, Røgind H, Danneskiold-Samsøe B., Bliddal H. Effect of static stretching of quadriceps and hamstring muscles on knee joint position sense. *Br J Sports Med* 2005; 39: 43–46. DOI: 10.1136/bjism.2003.011056
- [21] Azevedo J, Rodrigues S, Seixas A. The influence of sports practice, dominance and gender on the knee joint position sense. *Knee* 2021; 28: 117–123. DOI: 10.1016/j.knee.2020.11.013
- [22] Voight ML, Hardin JA, Blackburn TA, Tippet S., Canner G.C. The Effects of Muscle Fatigue on and the Relationship of Arm Dominance to Shoulder Proprioception. *J Orthop Sports Phys Ther* 1996; 23: 348–352. DOI: 10.2519/jospt.1996.23.6.348
- [23] Cug M, Wikstrom EA, Golshaei B, Kirazci S. The Effects of Sex, Limb Dominance, and Soccer Participation on Knee Proprioception and Dynamic Postural Control. *J Sport Rehabil* 2016; 25: 31–39. DOI: 10.1123/jsr.2014-0250
- [24] Galamb K, Szilágyi B, Magyar O et al. Effects of side-dominance on knee joint proprioceptive target-matching asymmetries. *Acta Physiol Hung* 2018; 105: 257–265. DOI: 10.1556/2060.105.2018.3.22
- [25] Busch A, Blasimann A, Mayer F, Baur H. Alterations in sensorimotor function after ACL reconstruction during active joint position sense testing. A systematic review. *PLoS One* 2021; 16: e0253503. DOI: 10.1371/journal.pone.0253503
- [26] Von Elm E, Altman DG, Egger M et al. The Strengthening the Reporting of Observational Studies in Epidemiology (STROBE) statement: guidelines for reporting observational studies. *Lancet* 2007; 370: 1453–1457. DOI: 10.1016/S0140-6736(07)61602-X
- [27] Deshpande N, Connelly DM, Culham EG, Costigan PA. Reliability and validity of ankle proprioceptive measures. *Arch Phys Med Rehabil* 2003; 84: 883–889. DOI: 10.1016/S0003-9993(03)00016-9
- [28] Gonzales TI, Goble DJ. Short-Term Adaptation of Joint Position Sense Occurs during and after Sustained Vibration of Antagonistic Muscle Pairs. *Front Hum Neurosci* 2014; 8: 896. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00896
- [29] Hancock GE, Hepworth T, Wembridge K. Accuracy and reliability of knee goniometry methods. *J Exp Ortop* 2018; 5: 46. DOI: 10.1186/s40634-018-0161-5
- [30] Aguinis H, Gottfredson RK, Joo H. Best-Practice Recommendations for Defining, Identifying, and Handling Outliers. *Organ Res Methods* 2013; 16: 270–301. DOI: 10.1177/1094428112470848
- [31] Gokeler A, Benjaminse A, Hewett TE et al. Proprioceptive deficits after ACL injury: are they clinically relevant. *Br J Sports Med* 2012; 46: 180–192. DOI: 10.1136/bjism.2010.082578
- [32] Wieber J, Müller-Rahmel L, Reer R, Rein R, Braunstein B. Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-analysis. *J Exp Orthop* 2024; 11: e12091. DOI: 10.1002/jeo2.12091
- [33] Busch A, Bangerter C, Mayer F, Baur H. Reliability of the active knee joint position sense test and influence of limb dominance and sex. *Sci Rep* 2023; 13: 152. DOI: 10.1038/s41598-022-26932-2
- [34] Schorderet C, Hilfiker R, Allet L. The role of the dominant leg while assessing balance performance. A systematic review and meta-analysis. *Gait Posture* 2021; 84: 66–78. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2020.11.008
- [35] Strong A, Grip H, Arumugam A, Boraxbekk CJ, Selling J, Häger CK. Right hemisphere brain lateralization for knee proprioception among right-limb dominant individuals. *Front Hum Neurosci* 2023; 17: 969101. DOI: 10.3389/fnhum.2023.969101
- [36] Worringham CJ, Stelmach GE. The contribution of gravitational torques to limb position sense. *Exp Brain Res* 1985; 61: 38–42. DOI: 10.1007/BF00235618
- [37] Wakeling JM, Uehli K, Rozitis AI. Muscle fibre recruitment can respond to the mechanics of the muscle contraction. *J R Soc Interface* 2006; 3: 533–544. DOI: 10.1098/rsif.2006.0113
- [38] Proske U, Gandevia SC. The Proprioceptive Senses: Their Roles in Signaling Body Shape, Body Position and Movement, and Muscle Force. *Physiol Rev* 2012; 92: 1651–1697. DOI: 10.1152/physrev.00048.2011
- [39] Macefield VG, Norcliffe-Kaufmann L, Goulding N, Palma JA. Fuente Mora C, Kaufmann H. Increasing cutaneous afferent feedback improves proprioceptive accuracy at the knee in patients with sensory ataxia. *J Neurophysiol* 2016; 115: 711–716. DOI: 10.1152/jn.00148.2015
- [40] Stone KD, Keizer A, Dijkerman HC. The influence of vision, touch, and proprioception on body representation of the lower limbs. *Acta Psychol* 2018; 185: 22–32. DOI: 10.1016/j.actpsy.2018.01.007

- [41] Liu JZ, Kubo M, Aoki H, Liu N, Kou PH, Suzuki T. A Study on the Difference of Human Sensation Evaluation to Whole-body Vibration in Sitting and Lying Postures. *J Physiol Anthropol* 1995; 14: 219–226. DOI: 10.2114/ahs.14.219
- [42] Naito E, Roland PE, Grefkes C et al. Dominance of the Right Hemisphere and Role of Area 2 in Human Kinesthesia. *J Neurophysiol* 2005; 93: 1020–1034. DOI: 10.1152/jn.00637.2004
- [43] Goble DJ. Proprioceptive Acuity Assessment Via Joint Position Matching: From Basic Science to General Practice. *Phys Ther* 2010; 90: 1176–1184. DOI: 10.2522/ptj.20090399
- [44] Vulliemoz S, Raineteau O, Jabaudon D. Reaching beyond the midline: why are human brains cross wired? *Lancet Neurol* 2005; 4: 87–99. DOI: 10.1016/S1474-4422(05)00990-7
- [45] Naughton J, Adams R, Maher C. Discriminating Overhead Points of Contact after Arm Raising. *Percept Mot Skills* 2002; 95: 1187–1195. DOI: 10.2466/pms.2002.95.3f.1187
- [46] Roy EA, MacKenzie C. Handedness Effects in Kinesthetic Spatial Location Judgements. *Cortex* 1978; 14: 250–258. DOI: 10.1016/S0010-9452(78)80051-3
- [47] Han J, Anson J, Waddington G, Adams R. Proprioceptive performance of bilateral upper and lower limb joints: side-general and site-specific effects. *Exp Brain Res* 2013; 226: 313–323. DOI: 10.1007/s00221-013-3437-0
- [48] Bullock-Saxton JE, Wong WJ, Hogan N. The influence of age on weight-bearing joint reposition sense of the knee. *Exp Brain Res* 2001; 136: 400–406. DOI: 10.1007/s002210000595
- [49] Van Melick N, Meddeler BM, Hoogeboom TJ, Nijhuis-van der Sanden M, van Cingel R. How to determine leg dominance: The agreement between self-reported and observed performance in healthy adults. *PLoS One* 2017; 12: e0189876. DOI: 10.1371/journal.pone.0189876
- [50] Tegner Y, Lysholm J. Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Classic Papers in Orthopaedics. Clin Orthop Relat Res.* 1985; 198: 43–49. DOI: 10.1097/00003086-198509000-00007

4.4 Publikation D

Wieber, J., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Absolute error in active contralateral knee angle reproduction test two years after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. Submission-no.: ksa.202501026.

Absolute error in active contralateral knee angle reproduction test two years after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial

Abstract

Purpose: To evaluate joint position sense in individuals two years following anterior cruciate ligament reconstruction in comparison to healthy controls, and to determine whether the selection of the reference limb for target angle setting influences the magnitude of the absolute knee angle reproduction error.

Methods: The absolute knee angle reproduction error was assessed in 54 healthy controls (age: 26 ± 5 years, Tegner activity score: 5 ± 2) and 13 patients two years after ACL reconstruction (age: 35 ± 6 years, Tegner score: 5 ± 2) using the active contralateral knee angle reproduction test in the sitting position starting from 90° knee flexion. Participants actively set a predefined target angle with one limb and attempted to reproduce it with the contralateral side. The starting limb (injured vs. non-injured or left vs. right) was randomized across trials. Group differences were analyzed using a linear mixed-effects model with repeated measures.

Results: The linear mixed-effects model revealed no statistically significant differences between the reconstructed and contralateral limbs in anterior cruciate ligament patients (MD: 0.8° , $p = .12$), nor between the healthy legs of ACL patients and those of healthy controls (MD: 2.3° , $p = .62$). Additionally, no side-to-side differences were detected within the healthy cohort (MD: 0.4° , $p = .48$). Pre-planned contrasts confirmed no significant group effects on joint position sense performance.

Conclusions: Proprioceptive deficits are not evident two years after anterior cruciate ligament reconstruction, with the absolute error appearing independent of whether the

reconstructed leg sets or replicates the angle. For practical applications this indicates that clinicians might use either the injured or healthy leg as the reference limb during proprioceptive assessments, simplifying testing procedures and enhancing the adaptability of rehabilitation programs including subsequent return to sport decisions.

Level of Evidence: II

Keywords

Return to Sport; Proprioception; Knee; Limb Symmetry; Anterior Cruciate Ligament

Introduction

Rupture of the anterior cruciate ligament (ACL) is a common injury in the young and active population [27, 43, 44]. Athletes typically undergo surgical reconstruction to restore knee stability and function, with the goal of an early return to sport (RTS) [27]. However, there is a substantial risk of reinjury, especially if athletes want to re-participate in high performance and pivoting sports [27, 7]. A considerable proportion of patients experience subsequent ACL injuries, with incidences ranging from 6% to 27% within two years following ACL reconstruction [33, 50]. The timing of returning to sport is influenced by multiple factors, necessitating comprehensive and valid RTS test batteries that include assessments such as strength and hop tests, psychological evaluations, and functional tests [4]. The least test batteries include proprioceptive assessment, although proprioception has been shown to be limited after ACL injuries [11, 13, 19]. Proprioception is a determinant of knee stability and plays a major role in daily activities and sports. The ACL is one key component of knee stability and functions as both a mechanical stabilizer and a sensory organ. The destruction of mechanoreceptors, which are not restored by reconstruction [21, 23, 26, 30, 36] can lead to a reduced ability of proprioceptive acuity [41]. The active contralateral knee angle reproduction test assesses knee proprioception through a position-matching task, where the

patients are asked to reproduce the angle of the contralateral leg, which acts as the reference leg [22,46, 47, 48]. Regarding the goal of testing the proprioceptive acuity of the ACL-injured limb, the question remains which limb should serve as the reference: the healthy or the injured limb. Recent literature on the use of limb symmetry indexes as a cut-off criteria in RTS test batteries indicates that the assumption of the healthy side being the superior side cannot be generally upheld [45, 51]. The lack of consideration for the limb being the reference in the interpretation can lead to misinterpretation and, consequently, to a premature return to sport with an elevated risk of reinjury [45]. The aim of the present study was first to determine if joint position sense (JPS) is deficient in individuals two years after ACL reconstruction compared to healthy controls. and second to assess whether differences in the absolute knee angular error result based on the choice of the reference limb setting the target angle.

Methods

A randomized-controlled trial with blinded outcome assessors was performed in 2024. The subject recruitment extended from October to December 2023. The ACL patients were recruited as part of an ongoing longitudinal study [4], utilizing an existing database to identify individuals who met the inclusion criteria for the present research. The healthy controls were recruited through voluntary participation. Due to the study's design, no follow-up was required. The study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki of 1964 and its later amendments or comparable ethical standards and was approved by the Institutional Ethics Boards of xxx, xxx and the xxx. The experimental design was preregistered on the xxx (DOI xxx). Computer-generated tables were used to determine the order in which the subjects were exposed to start with either the right or left limb as the reference limb. All standardized assessments were performed by a graduate sport scientist. The data were collected at the xxx and the xxxx. To determine the required sample size, the

statistical power was set at 0.80 and the effect size was set at $d = 0.60$, based on previous research [8, 10, 11, 12, 32]. A priori power analysis resulted in a required sample size of at least 20 subjects (G*Power, Version 3.1.9.4). The exclusion criteria were physical limitations, such as a general neuronal disease or a history of muscles, ligaments, tendons, or bone injury in the lower extremities. Furthermore, the subjects were not allowed to have chronic diseases which could lead to sensory disfunctions. The inclusion criterion for the patient group was ACL reconstruction two years prior (± 1 month) to enrolment, utilizing the semitendinosus tendon as an autologous graft. Each subject provided a written informed consent for the participation, data collection, and image publication prior to enrolment.

Intervention: Active contralateral knee angle reproduction test

Prior to testing, participants were familiarized with the study protocol through standardized verbal instructions. The active contralateral knee angle reproduction test was conducted in a seated position about five consecutive trials. Before each trial set, participants performed brief, voluntary isometric contractions of the knee flexor and extensor muscles for a duration of five seconds. This procedure aimed to induce a consistent thixotropic state in the muscle spindles of both limbs, thereby minimizing variability in proprioceptive [9, 34, 35]. The subjects were blindfolded to prevent visual feedback bias. Each lower leg was passively moved from a starting point of knee flexion (starting angle of 90°) to a random target angle between 50° and 70° . To minimize detection and performance bias, the subjects were retrospectively asked about their ACL reconstructed and the dominant limb side. Under all conditions, the subject's knee joint was passively moved at a slow speed by the examiner. Once the examiner had brought the knee to the target angle, the subject had to hold the knee position without further assistance of the examiner. The subject was asked to actively reproduce the target angle with the contralateral leg while the other leg remains in the reference position. The subject stopped moving the leg when they perceived that the target

angle had been replicated and gave a verbal signal. The knees were maintained at the final angles for approximately 3 seconds. Subjects were not permitted to adjust the angle of the contralateral leg after they signaled that they had replicated the target angle. During the test, each subject sat on an adjustable physiotherapy bench. In the position, approximately 5 cm of an overhang of the leg was instigated to minimize cutaneous cues. Testing was conducted in a quiet and isolated room, and the subjects wore loose-fitting shorts to minimize external stimulation. To minimize proprioceptive transfer between consecutive tests, subjects walked around for approximately 2 minutes between tests. The lateral knee joint cavity on both legs was marked at the beginning of the test session and remained unchanged between trials. An electrical goniometer (Vernier Software & Technology, Dynatech) was attached to the lower limb, and a fulcrum was aligned with the lateral knee joint line. One arm of the goniometer was positioned parallel to the line joining the greater trochanter and the fulcrum, while the other arm was positioned along the line joining the fulcrum and the lateral malleolus. The reliability of comparable active contralateral test procedures was found to be fair to good the sitting position (ICC: 0.26–0.65) [16]. Inter-rater and intra-rater reliabilities using a long arm goniometer were found to be high (ICC: > 0.98) [20].

Outcome measure

The outcome measure was the absolute angular error (AAE), measured in degrees (°). To calculate the mean AAE, the absolute differences between the target angle and the actual produced angle were calculated.

Statistical analysis

Statistical analyses were performed using R (Version 4.3.2). Statisticians were blinded to the different test procedures. Data were checked for missing values, distributions, and outliers and descriptively summarized as mean $\pm$ standard deviations (SDs), mean difference (MD)

standard errors (SEs), and 95% confidence intervals (CIs). Statistical outliers were calculated by Z-scores and excluded if ≥ 1.96 SD [2]. Homogeneity of variance was tested using the Levene test. To account for the repeated measures and potential subject-specific variations, a linear mixed model (LMM) was employed. Pre-planned pairwise comparisons were performed and adjusted using the Bonferroni method. The AAE was defined as the dependent variable, with limb side (left/right), dominance (dominant/non-dominant), and injury status (injured/non-injured) as the independent factors. When the LMM indicated significance and ANOVA with Satterthwaite's method with post hoc Bonferroni correction were applied to further explore pairwise differences. Any missing data were addressed using listwise deletion. P-values less than 0.05 were considered to indicate a statistical significance ($\alpha = 0.05$).

Results

Descriptive statistics

The study included 54 healthy subjects (mean $\pm$ SD, age: 26 ± 5 years, height: 174 ± 11 cm, body mass: 69.9 ± 14.4 kg, and Tegner activity score: 5 ± 2) and 13 patients two years after ACL reconstruction with the semitendinosus tendon (age: 35 ± 6 years, body height = 178 ± 8 cm, body mass = 74 ± 12 kg; Tegner score: 5 ± 2). There were no dropouts.

AAE two years after ACL reconstruction

The results of the LMM indicated no significant differences in AAE between healthy individuals and patients two years after ACL reconstruction ($p > 0.05$). No significant differences in AAE were observed between the ACL-reconstructed or contralateral limbs and the average of both limbs in healthy controls. The comparison between the ACL-injured and non-injured limbs revealed no significant difference (MD = 0.81° , SE = 1.26, 95% CI [$4.06^\circ, 2.43^\circ$], $t(65) = 0.64$, $p = 1.000$). Additionally, comparisons between the ACL-

reconstructed limb and the average of the healthy control limbs (MD = 1.48°, SE = 1.59, 95% CI [2.59°,5.54°], $t(88.4) = -0.93$, $p = 1.000$) and between the healthy contralateral limb in ACL patients and the control group (MD = 2.29°, SE = 1.59, 95% CI [1.77°,6.35°], $t(88.4) = -1.44$, $p = 0.62$) showed no significant differences. An omnibus test revealed no significant main effect of group ($F(3, 66.9) = 0.86$, $p = 0.465$).

Selection of reference limb

The LMM revealed no statistically significant differences between the reconstructed and contralateral limbs in anterior cruciate ligament patients (MD = 0.81°, $p = 0.12$). Additionally, no side-to-side differences were detected within the healthy cohort (MD = 0.4°, $p = .48$). Pre-planned contrasts confirmed no significant group effects on joint position sense performance. Due to the small number of participants with ACL reconstruction on their non-dominant limb ($n = 2$), a subgroup analysis stratified by limb dominance lacked statistical validity and was therefore not performed.

Discussion

The aim of the present study was first to determine if JPS is deficient in individuals two years after ACL reconstruction compared to healthy controls. and second to assess whether differences in the absolute knee angular error result based on the choice of the reference limb setting the target angle. It was hypothesized that there would be significant differences in the AAE between patients two years after ACL reconstruction and healthy controls. Furthermore, it was assumed that a different AAE would result when the ACL reconstructed limb was used as the reference leg compared to the healthy limb. It was demonstrated that no significant differences in the absolute angular error between the reconstructed and healthy legs of ACL patients two years after ACL reconstruction. Additionally, the results showed no significant differences when comparing the healthy control to the ACL-reconstructed group. This

suggests a substantial restoration of proprioceptive function both within subjects and relative to an uninjured population. These results align with prior findings by Hoshiba et al. (2020), who reported increased AAE six months after ACL reconstruction that normalized after twelve months. This supports the view that JPS deficits are primarily relevant in the early postoperative phase [22]. The active contralateral knee angle reproduction test may therefore serve as a tool, sensitive enough to detect early-stage proprioceptive deficits. However, several studies have noted a consistent overestimation of knee extension during angle reproduction tasks, irrespective of injury status [14, 22, 49]. This may reflect altered perception of the reference angle, particularly in antigravity movements [49], possibly due to increased muscle spindle activation during the holding phase of the reference limb [16, 42]. Such mechanisms could contribute to angle misinterpretation during early recovery [22]. Contrary to findings by Hoshiba et al. (2020), the present results did not show significantly higher AAE values when the ACL reconstructed limb was used to define the reference angle. Differences between test configurations (operated vs. healthy reference limb) were not significant, supporting the use of either limb for clinical proprioceptive assessment. Several meta-analyses have reported persistent JPS deficits beyond 12 months post-ACLR, though results remain inconsistent [1, 5]. For example, Fleming et al. (2022) reported significantly increased AAE in ipsilateral tests up to 24 months postoperatively compared to healthy controls (SMD = 0.57; 95% CI = [0.27; 0.87]), though this was not observed in conservatively treated patients [13]. Importantly, most AAE remain below 3°, which is under the clinically relevant threshold of 5° and may lie within the range of typical measurement error [5, 17, 39]. Thus, the clinical relevance of these proprioceptive differences remains debatable [13, 36]. The present results may be explained by a recovery of muscle spindle function during the first six postoperative months [29] and increased sensorimotor activation during voluntary movement, potentially compensating for lost graft mechanoreceptors [40]. Given

that all participants had returned to sport at the time of testing, the observed proprioceptive performance may reflect activity-induced neuroplasticity and central adaptation [15, 18]. All patients underwent arthroscopic ACL reconstruction using semitendinosus autografts, which have been shown to support sensorimotor recovery regardless of graft type [39]. Early surgical intervention, completed within one month in all cases, may have further promoted positive outcomes. Histological and imaging studies support the possibility of mechanoreceptor reinnervation within the graft and concurrent cortical reorganization during rehabilitation [25, 28, 31]. These combined factors likely contributed to the normalization of proprioceptive function observed in the present study. Recent literature suggests bilateral deficits due to central nervous system adaptations after ACL injury [5, 23, 38]. However, the present results did not show such effects, suggesting full proprioceptive recovery was achieved in both limbs two years postoperatively. From a clinical perspective, the findings support the possibility to use either the injured or contralateral healthy limb as a reference for proprioceptive assessment and suggest that, with adequate rehabilitation, long-term proprioceptive function may be restored to pre-injury levels. Nonetheless, the interpretation of JPS results should account for test design and sensitivity, particularly body position, which has been shown to significantly influence the test outcomes [46, 47, 48].

Limitations

In the present study, no correlation analysis was performed between physical activity level, sport type (e.g., predominantly upper or lower body engagement), or overtraining load, and JPS accuracy. However, a potential causal relationship between sport-specific activity or training intensity and JPS may represent a relevant topic for further investigation. This aspect remains an important avenue for future research. Additionally, participants were instructed to perform the JPS task at a self-selected movement velocity. While it is acknowledged that movement speed may influence neuromuscular activity and, in turn, affect the resulting AAE

values [12, 33], the operator made efforts to ensure a consistent execution pace across trials. This resulted in a uniformly slow, rehabilitation-typical movement velocity commonly applied in therapeutic settings. A further limitation is that the JPS test employed may not fully capture comprehensive sensorimotor performance during functional, multi-joint tasks performed under weight-bearing conditions. While the assessment technique did not control for potential three-dimensional joint motion, this limitation is expected to have minimal impact given that the task was performed in a non-weight-bearing position and involved voluntary, low-velocity movements. The chosen approach was applied intentionally due to its similarity to commonly used return-to-sport tests following knee injuries, which are typically performed in a non-weight-bearing position and without the use of cost-intensive equipment [5, 17]. Moreover, assessments involving weight-bearing conditions are often not feasible during the acute phase of injury [6]. It is conceivable that a more demanding task may have elicited greater differences in AAE. However, the current protocol enhances the generalizability of findings to clinical assessments of JPS during rehabilitation. The AAE was selected as the primary outcome variable. Although other parameters such as variable error also provide insight into proprioceptive performance, they were not included in this study, as the AAE has demonstrated superior reliability in recent JPS literature [32, 37]. Causal interpretations may be generalized across different time points; however, applicability to other user populations may be limited due to the standardized and technically demanding nature of the measurement procedure.

Conclusions

The present study aimed to evaluate whether JPS remains impaired two years following ACL reconstruction and to determine whether the selection of the reference limb influences AAE. The results suggest that, following ACL rehabilitation, individuals do not exhibit significant proprioceptive deficits compared to healthy controls. Moreover, AAE appears unaffected by

whether the reconstructed or contralateral limb is used to define the target angle. From a clinical perspective, this indicates that both limbs can be used as the reference during proprioceptive testing in an active contralateral knee angle reproduction test, thereby simplifying assessment protocols and facilitating individualized rehabilitation and RTS decision-making. Future research should investigate potential differences in JPS errors with respect to limb dominance, particularly between injured and non-injured limbs.

References

- [1] Ageberg E (2002). Consequences of a ligament injury on neuromuscular function and relevance to rehabilitation—using the anterior cruciate ligament-injured knee as model. *J Electromyogr Kinesiol* 12:205–212. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(02\)00022-6](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(02)00022-6)
- [2] Aguinis H, Gottfredson RK, Joo H (2013). Best-Practice Recommendations for Defining, Identifying, and Handling Outliers. *Organ Res Methods* 16: 270–301. <https://doi.org/10.1177/109442811247084>
- [3] Azevedo J, Rodrigues S, Seixas A (2021). The influence of sports practice, dominance and gender on the knee joint position sense. *Knee* 28:117-23. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2020.11.013>
- [4] Barke A, Wieber J, Häußner J, Catalá-Lehnen P (2021). Evaluation der Hamburger Return to Sports-Testbatterie nach ambulanter VKB-Ersatz-Operation. *Sports Orthop Traumatol* 37:185. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2021.04.028>
- [5] Busch A, Blasimann A, Mayer F, Baur H (2021). Alterations in sensorimotor function after ACL reconstruction during active joint position sense testing. A systematic review. *PloS One* 16 (6), e0253503. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253503>

- 268 [6] Busch A, Bangerter C, Mayer F, Baur H (2023). Reliability of the active knee joint position
269 sense test and influence of limb dominance and sex. *Sci Rep* 13:152.
270 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26932-2>
- 271 [7] Cronström A, Tengman E, Häger CK (2023). Return to sports: a risky business? A
272 systematic review with meta-analysis of risk factors for graft rupture following ACL
273 reconstruction. *Sports med* 53:91-110. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01747-3>
- 274 [8] Cug M, Wikstrom EA, Golshaei B, Kirazci S (2016). The effects of sex, limb dominance, and
275 soccer participation on knee proprioception and dynamic postural control. *J Sport Rehabil*
276 25:31-9. <https://doi.org/10.1123/jsr.2014-0250>
- 277 [9] Da Silva F, Monjo F, Zghal F, Chorin F, Guérin O, Colson SS (2021). Altered position sense
278 after submaximal eccentric exercise-inducing central fatigue. *Med Sci Sports Exerc* 53:218-
279 227. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002444>
- 280 [10] Deshpande N, Connelly DM, Culham EG, Costigan PA (2003). Reliability and validity of
281 ankle proprioceptive measures. *Med Sci Sports Exerc* 35:883-889.
282 [https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(03\)00016-9](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(03)00016-9)
- 283 [11] Dhillon MS, Bali K, Prabhakar S (2011). Proprioception in anterior cruciate ligament
284 deficient knees and its relevance in anterior cruciate ligament reconstruction. *Indian J Orthop*
285 45:294-300. <https://doi.org/10.4103/0019-5413.80320>
- 286 [12] Elangovan N, Herrmann A, Konczak J (2014). Assessing proprioceptive function:
287 evaluating joint position matching methods against psychophysical thresholds. *Phys Ther*
288 94:553-561. <https://doi.org/10.2522/ptj.20130103>

- 289 [13] Fleming JD, Ritzmann R, Centner C (2022). Effect of an anterior cruciate ligament rupture
290 on knee proprioception within 2 Years after conservative and operative treatment: A
291 systematic review with meta-analysis. *Sports Med* 52:1091–1102.
292 <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01600-z>
- 293 [14] Fridén T, Roberts D, Zätterström R, Lindstrand A, Moritz U (1996). Proprioception in the
294 nearly extended knee: measurements of position and movement in healthy individuals and
295 in symptomatic anterior cruciate ligament injured patients. *Knee Surg Sports Traumatol*
296 *Arthrosc* 4:217–224. <https://doi.org/10.1007/BF01567966>
- 297 [15] Ghaderi M, Letafatkar A, Thomas AC, Keyhani S (2021). Effects of a neuromuscular
298 training program using external focus attention cues in male athletes with anterior cruciate
299 ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*
300 13:49. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00275-3>
- 301 [16] Givoni NJ, Pham T, Allen TJ, Proske U (2007). The effect of quadriceps muscle fatigue on
302 position matching at the knee. *J Physiol* 584:111–119.
303 <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.134411>
- 304 [17] Gokeler A, Benjaminse A, Hewett TE, Lephart SM, Engebretsen L, Ageberg E, Engelhardt
305 M, Arnold MP, Postema K, Otten E, et al (2012). Proprioceptive deficits after ACL injury: are
306 they clinically relevant? *Br J Sports Med* 46:180–192.
307 <https://doi.org/10.1136/bjsm.2010.082578>
- 308 [18] Grinberg A, Strong A, Häger CK (2022). Does a knee joint position sense test make
309 functional sense? Comparison to an obstacle clearance test following anterior cruciate
310 ligament injury. *Phys Ther Sport* 55:256–263. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.05.004>

- 311 [19] Han J, Waddington G, Adams R, Anson J, Liu Y (2016). Assessing proprioception: A critical
312 review of methods J Sport Health Sci 5:80-90. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.10.004>
- 313 [20] Hancock GE, Hepworth T, Wembridge K (2018). Accuracy and reliability of knee
314 goniometry methods. J Exp Ortop 5: 46. <https://doi.org/10.1186/s40634-018-0161-5>
- 315 [21] Hopper DM, Creagh MJ, Formby PA, Goh SC, Boyle JJ, Strauss GR (2003). Functional
316 measurement of knee joint position sense after anterior cruciate ligament reconstruction.
317 Arch Phys Med Rehabil. 84:868-72. [https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(03\)00007-8](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(03)00007-8)
- 318 [22] Hoshiba, T, Nakata, H, Saho, Y, Kanosue, K, Fukubayashi, T (2020). Comparison of the
319 position-matching and position-reproducing tasks to detect deficits in knee position sense
320 after reconstruction of the anterior cruciate ligament. J Sport Rehabil 29:87-92.
321 <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0275>
- 322 [23] Jerosch, J, & Prymka, M (1996). Propriozeptive Fähigkeiten im Bereich des Kniegelenks
323 bei Patienten nach vorderer Kreuzbandruptur. Unfallchirurg 99:861-868.
324 <https://doi.org/10.1007/s001130050067>
- 325 [24] Jerosch J, Prymka M (1996). Knee joint proprioception in normal volunteers and patients
326 with anterior cruciate ligament tears, taking special account of the effect of a knee bandage.
327 Arch Orthop Trauma Surg 115:162-6. <https://doi.org/10.1007/BF00434546>
- 328 [25] Kapreli, E, Athanasopoulos, S, Gliatis, J, Papathanasiou, M, Peeters, R, Strimpakos, N, Van
329 Hecke, P, Gouliamos, A, Sunaert, S (2009). Anterior cruciate ligament deficiency causes brain
330 plasticity: a functional MRI study. Am J Sports Med 37:2419-2426.
331 <https://doi.org/10.1177/0363546509343201>

332 [26] Kaur M, Ribeiro DC, Theis JC, Webster KE, Sole G (2016). Movement Patterns of the Knee
 333 During Gait Following ACL Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports*
 334 *med* 46:1869-95. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0510-4>

335 [27] Keays SL, Mellifont DB, Keays AC, Stuelcken MC, Lovell DI, Sayers MG (2022). Long-term
 336 return to sports after anterior cruciate ligament injury: reconstruction vs no recon struction:
 337 a comparison of 2 case series. *Am J Sports Med* 50:912-21.
 338 <https://doi.org/10.1177/03635465211073152>

339 [28] Kosy JD, Mandalia VI (2018). Anterior cruciate ligament mechanoreceptors and their
 340 potential importance in remnant-preserving reconstruction: a review of basic science and
 341 clinical findings. *J Knee Surg* 31:736–746. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1608941>

342 [29] Lepley, A, Gribble, P, Thomas, A, Tevald, M, Sohn, D, Pietrosimone, B (2015). Quadriceps
 343 neural alterations in anterior cruciate ligament reconstructed patients: a 6-month
 344 longitudinal investigation. *Scand J Med Sci Sports* 25:828–839.
 345 <https://doi.org/10.1111/sms.12435>

346 [30] MacDonald PB, Hedden D, Pacin O, Sutherland K (1996). Proprioception in anterior
 347 cruciate ligament-deficient and reconstructed knees. *Am J Sports Med* 24:774-8.
 348 <https://doi.org/10.4103/0019-5413.80320>

349 [31] Ochi M, Iwasa, J, Uchio, Y, Adachi, N, Sumen, Y (1999). The regeneration of sensory
 350 neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg Br* 81:902–
 351 906. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.81b5.9202>

352 [32] Olsson LH, Lund M, Henriksen H, Rogind H, Bliddal H, Danneskiold-Samsøe B (2004).
 353 Test–Retest Reliability of a Knee Joint Position Sense Measurement Method in Sitting and

354 Prone Position. *Advances in Physiotherapy* 6: 37–47.
 355 <https://doi.org/10.1080/14038190310009894>.

356 [33] Pinczewski LA, Lyman J, Salmon LJ, Russell VJ, Roe J, Linklater J (2007). A 10-year
 357 comparison of anterior cruciate ligament reconstructions with hamstring tendon and patellar
 358 tendon autograft: a controlled, prospective trial. *Am J Sports Med* 35:564-74.
 359 <https://doi.org/10.1177/0363546506296042>

360 [34] Proske, U, Gandevia, SC (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body
 361 shape, body position and movement, and muscle force. *Physiol Rev* 92: 1657–1697.
 362 <https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011>

363 [35] Proske U (2023). A reassessment of the role of joint receptors in human position sense.
 364 *Exp Brain Res* 24:943-949. <https://doi.org/10.1007/s00221-023-06582-0>

365 [36] Relph, N, Herrington, L, & Tyson, S (2014). The effects of ACL injury on knee
 366 proprioception: a meta-analysis. *Physiotherapy* 100:187-195.
 367 <https://doi.org/10.1016/j.physio.2013.11.002>

368 [37] Relph N, Herrington L (2015). Interexaminer, Intraexaminer, and Test-Retest Reliability
 369 of Clinical Knee Joint-Position-Sense Measurements Using an Image-Capture Technique. *J*
 370 *Sport Rehabil* 24: 2013–0134. <https://doi.org/10.1123/jsr.2013-0134>

371 [38] Roberts, D, Fridén, T, Stomberg, A, Lindstrand, A, Moritz, U (2000) Bilateral
 372 proprioceptive defects in patients with a unilateral anterior cruciate ligament reconstruction:
 373 a comparison between patients and healthy individuals. *J Orthop Res* 18:565–571.
 374 <https://doi.org/10.1002/jor.1100180408>

375 [39] San Martín-Mohr, C, Cristi-Sánchez, I, Pincheira, PA, Reyes, A, Berral, FJ, Oyarzo, C (2018)
 376 Knee sensorimotor control following anterior cruciate ligament reconstruction: a
 377 comparison between reconstruction techniques. PLoS One 13: e0205658.
 378 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205658>

379 [40] Strong, A, Arumugam, A, Tengman, E, Röijezon, U, Häger, CK (2022). Properties of tests
 380 for knee joint threshold to detect passive motion following anterior cruciate ligament injury:
 381 a systematic review and meta-analysis. J Orthop Surg Res 17:134.
 382 <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03033-4>

383 [41] Suydam SM, Cortes DH, Axe MJ, Snyder-Mackler L, Buchanan TS (2017). Semitendinosus
 384 Tendon for ACL Reconstruction: Regrowth and Mechanical Property Recovery. Orthop J
 385 Sports Med 5:2325967117712944. <https://doi.org/10.1177/2325967117712944>

386 [42] Vila-Chã C, Riis S, Lund D, Møller A, Farina D, Falla D (2011). Effect of unaccustomed
 387 eccentric exercise on proprioception of the knee in weight and non-weight bearing tasks. J
 388 Electromyogr Kinesiol 21:141–147. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.10.001>

389 [43] Webster KE, Feller JA, Leigh WB, Richmond AK (2014). Younger patients are at increased
 390 risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction.
 391 Am J Sports Med 42:641-7. <https://doi.org/10.1177/0363546513517540>

392 [44] Webster KE, Hewett TE (2019). What is the evidence for and validity of return-to-sport
 393 testing after anterior cruciate ligament reconstruction surgery? A systematic review and
 394 meta-analysis. Sports Med 49:917-29. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01093-x>

395 [45] Wellsandt E, Failla MJ, Snyder-Mackler L (2017). Limb symmetry indexes can
 396 overestimate knee function after anterior cruciate ligament injury. J Orthop Sports Phys Ther
 397 47:334-8. <https://doi.org/10.2519/jospt.2017.7285>

- 398 [46] Wieber J, Brandt J, Pieper M, Hirschhäuser E, Catalá-Lehnen P, Rein R, Braunstein B
399 (2023). Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle
400 reproduction test in healthy subjects: An experimental study. *Technol Health Care* 31:1567–
401 1578. <https://doi.org/10.3233/THC-220747>
- 402 [47] Wieber J, Müller-Rahmel L, Reer R, Rein R, Braunstein B (2024). Factors that influence
403 the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-
404 analysis. *J Exp Orthop* 11:e12091. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12091>
- 405 [48] Wieber J, Preece A, Rein R, & Braunstein B (2025). Knee angle reproduction tests:
406 influences of body orientation, movement direction and limb dominance. *Int J Sports Med*,
407 Advance online publication. <https://doi.org/10.1055/a-2526-9372>
- 408 [49] Worringham C, Stelmach G (1985) The contribution of gravitational torques to limb
409 position sense. *Exp Brain Res* 61:38–42. <https://doi.org/10.1007/BF00235618>
- 410 [50] Wright RW, Dunn WR, Amendola A, Andrich JT, Bergfeld J, Kaeding CC, et al (2007). Risk
411 of tearing the intact anterior cruciate ligament in the contralateral knee and rupturing the
412 anterior cruciate ligament graft during the first 2 years after anterior cruciate ligament
413 reconstruction: a prospective MOON cohort study. *Am J Sports Med* 35:1131-4.
414 <https://doi.org/10.1177/0363546507301318>
- 415 [51] Zumstein F, Centner C, Ritzmann R (2022). How limb dominance influences limb
416 symmetry in ACL patients: effects on functional performance. *BMC Sports Sci Med Rehabil*
417 14:206. <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00579-y>

4.5 Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen

Die Anteile aller Autoren sind für die jeweiligen Veröffentlichungen folgend einzeln aufgeführt, wobei die Anteile der Promovierenden hervorgehoben sind. Es wurde sich hierbei an der CRediT Taxonomie ([Contributor Roles Taxonomy](#)) orientiert:

Publikation A: **Wieber, J.**, Müller-Rahmel, L., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2024). Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-analysis. *Journal of experimental orthopaedics*, 11(3), e12091. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12091>

Juliane Wieber: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Software; Visualization; Writing – original draft; Writing – review & editing.

Leon Müller-Rahmel: Draft preparation; Data curation; Writing – review & editing.

Robert Rein: Conceptualization; Resources; Supervision.

Rüdiger Reer: Resources; Supervision; Writing – review & editing.

Björn Braunstein: Conceptualization; Project administration; Resources; Supervision; Writing – review & editing.

Publikation B: **Wieber, J.**, Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Catala-Lehnen, P., Rein, R., & Braunstein, B. (2023). Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study. *Technology and health care : official journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 31(5), 1567–1578. <https://doi.org/10.3233/THC-220747>

Juliane Wieber: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology; Project administration; Software; Visualization; Writing – original draft, Writing – review & editing.

Jasmin Brandt: Conceptualization; Methodology; Investigation, Writing – original draft.

Eva Hirschhäuser: Conceptualization; Investigation; Methodology; Software; Writing – original draft.

Maike Pieper: Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Writing – original draft.

Robert Rein: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Project administration; Software; Supervision.

Philip Catalá-Lehnen: Funding acquisition; Resources; Writing – review & editing.

Björn Braunstein: Conceptualization; Data curation; Project administration; Resources; Supervision; Software; Writing – review & editing.

Publikation C: **Wieber, J.**, Preece, A., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Knee angle reproduction tests: influences of body orientation, movement direction and limb dominance. *International journal of sports medicine*, 10.1055/a-2526-9372. Advance online publication. <https://doi.org/10.1055/a-2526-9372>

Juliane Wieber: Conceptualization; Methodology, Software; Formal analysis; Investigation; Data curation, Writing – original draft; Writing – review & editing; Visualization; Project administration.

Abigail Preece: Investigation; Writing – review & editing.

Robert Rein: Formal analysis; Visualization.

Björn Braunstein: Conceptualization; Resources; Supervision; Writing – review & editing.

Publikation D: **Wieber, J.**, Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Absolute error in active contralateral knee angle reproduction test two years after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. Submission-no.: ksa.202501026.

Juliane Wieber: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Investigation; Methodology, Project administration; Software; Visualization; Writing – original draft; Writing – review & editing.

Rüdiger Reer: Resources; Supervision.

Robert Rein: Formal analysis; Visualization.

Björn Braunstein: Supervision; Writing – review & editing.

Die Promovierende Frau Juliane Wieber hat die vier Ethikanträge an der Deutschen Sporthochschule Köln (52/2019; 203/2022), Universität Hamburg (2022_059), und der Ärztekammer Hamburg (PV7099) erstellt und eingereicht. Herr Klaas Nommensen wurde von Frau Wieber bei seiner Bachelorarbeit (*Der Kniewinkelreproduktionsfehler bei Patienten 2 Jahre nach vorderer Kreuzband-Rekonstruktion: eine kontrolliert-prospektive Studie*) an der Medical School Hamburg als Zweitprüferin betreut (Erstprüfer: Prof. Dr. Carlos Marques). Frau Juliane Wieber hat bei allen Veröffentlichungen und Konferenzbeiträgen die Korrespondenzen mit den zuständigen Editoren und Reviewern übernommen und die notwendigen öffentlichen Projekt-Registrierungen eigenständig erstellt. Die Promovierende hat die Open-Access Gebühren von Publikation A übernommen. Die Kosten der Publikation B wurden durch das LANS Medicum Hamburg und die Kosten der Publikation C anteilig von der Deutschen Sporthochschule Köln und Juliane Wieber getragen. Die Open-Access Gebühren der Publikation D trägt die Universität Hamburg.

5 Diskussion

Ziel der Dissertation war es, durch systematische Literaturrecherche und empirische Untersuchungen die Faktoren zu identifizieren und zu analysieren, die den absoluten Winkelreproduktionsfehler in aktiven Kniewinkelreproduktionstest beeinflussen, um wissenschaftlich fundierte Grundlagen für die Standardisierung und Integration dieses sensomotorischen Tests zur Beurteilung propriozeptiver Fähigkeiten in Return-to-Sport Testbatterien in der klinischen Praxis zu schaffen.

Im ersten Schritt wurden im Rahmen einer systematischen Literaturübersicht personenunabhängige Einflussfaktoren identifiziert, die den JPS in aktiven Kniewinkelreproduktionstests beeinflussen können. Basierend auf diesen Erkenntnissen konnte eine strukturierte Zusammenstellung relevanter Einflussgrößen erfolgen und ein geeignetes Testverfahren für die anschließenden empirischen Untersuchungen ausgewählt werden. Im empirischen Teil wurde der aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstest als Maß für den JPS, unter Einfluss der Testbedingungen: Körperposition, Bewegungsrichtung und Beindominanz, untersucht. In einem weiteren Schritt wurden die daraus gewonnenen Erkenntnisse auf eine klinische Kohorte mit Patienten nach zwei Jahre nach VKB Rekonstruktion mit der Semitendonus-*Sehen* übertragen.

Ziel war es, durch die Identifikation und Prüfung dieser Einflussfaktoren einen Beitrag zur sportwissenschaftlichen und klinischen Diagnostik zu leisten, insbesondere hinsichtlich der Integration des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests in RTS-Testbatterien. Die in Kapitel 3 formulierten Teilfragestellungen und Hypothesen bildeten dabei die Grundlage zur Ergänzung bestehender wissenschaftlicher Evidenz. Die im Rahmen dieser Dissertation gewonnenen Ergebnisse werden im folgenden Kapitel diskutiert und anschließend in einer Gesamtbetrachtung im Hinblick auf Limitationen und die geschaffene Forschungs- und Praxiserkenntnis dargestellt.

5.1 Einflussfaktoren auf aktive Kniewinkelreproduktionstests

Als Grundlage des Promotionsprojekt wurde zunächst eine systematische Literaturrecherche mit Meta-Analyse durchgeführt. Ziel war es, personenunabhängige Einflussfaktoren zu identifizieren, die den AAE in aktiven Kniewinkelreproduktionstests beeinflussen können. In der Auswertung der vorhandenen Studienlage zeigte sich, dass insbesondere drei Faktoren über eine hohe Evidenz in der Literatur verfügen: die Körperposition der Testperson, die Bewegungsrichtung des Kniegelenks sowie eine periphere und zentrale Vorermüdung. Neben diesen zentralen Einflussgrößen konnten weitere potenzielle Variablen identifiziert werden, darunter der gewählte Zielwinkel, das verwendete Messinstrument sowie die ipsilaterale oder kontralaterale Reproduktion des Kniewinkels.

5.1.1 Haupteinflussfaktoren auf aktive Kniewinkelreproduktionstests

Die systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse (Publikation A) schloss auf Grundlage zuvor definierter Einschlusskriterien Studien ein, welche den aktiven ipsilateralen Kniewinkelreproduktionstests (82%) oder kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest (8%) untersucht haben (Wieber et al., 2024). Der Meta-Analyse zeigte, dass die Körperorientierung ($SMD = -0.56$; 95%-KI: $[-1.00; -0.12]$), die Bewegungsrichtung des Knies ($SMD = -0.71$; 95%-KI: $[0.18; 1.24]$), als auch eine zentrale und periphere Ermüdung ($SMD = 1.33$; 95%-KI: $[1.23; 1.44]$) einen signifikanten Einfluss auf den AAE haben (siehe [Abbildung 5](#), [Abbildung 6](#), [Abbildung 7](#)).

Es wurde festgestellt, dass Tests in sitzender Position und das Strecken des Knies mit niedrigeren AAE und zuverlässigeren Messungen verbunden sind (Wieber et al., 2024). Dennoch wiesen sowohl die untersuchten Positionen als auch die Bewegungsrichtungen eine breite Streuung in den Intraklassen-Korrelationskoeffizienten (ICC) auf. Hinsichtlich der Messzuverlässigkeit in verschiedenen Körperpositionen berichteten Clark et al. (2016), dass die Tests in sitzender Position nur eine geringe Reliabilität aufwiesen. Die berechneten ICCs lagen zwischen 0.13 (95%-KI: $[-0.62; 0.58]$) und 0.31 (95%-KI: $[-0.31; 0.74]$) im niedrigen bis mittleren Bereich (Clark et al., 2016). Dagegen zeigten Tests in Bauchlage moderate bis mittlere bis hohe ICC-Werte zwischen 0.51 (95%-KI: $[0.01; 0.83]$) und 0.87 (95%-KI: $[0.61; 0.96]$), abhängig von der getesteten Extremität. Die Standardfehler der Messung (SEM) fielen für beide Körperpositionen vergleichbar aus (Clark et al., 2016). Auch Olsson et al. (2004) berichteten über große Variabilität der ICCs, wobei für die sitzende Position Werte zwischen 0.31 und 0.82 und für die Bauchlage zwischen 0.17 und 0.75 festgestellt wurden (Olsson et al., 2004). Im Gegensatz dazu fanden Relph und Herrington (2015) höhere ICC für Tests in sitzender Position. Sie berichteten über gute bis exzellente ICCs im Bereich von 0.65–0.90, wobei der höchste Wert ($ICC = 0.92$) in sitzender Position erzielt wurde, wenn das dominante Bein in einer Beugebewegung im Bereich zwischen 60° und 90° getestet wurde (Relph und Herrington, 2015).

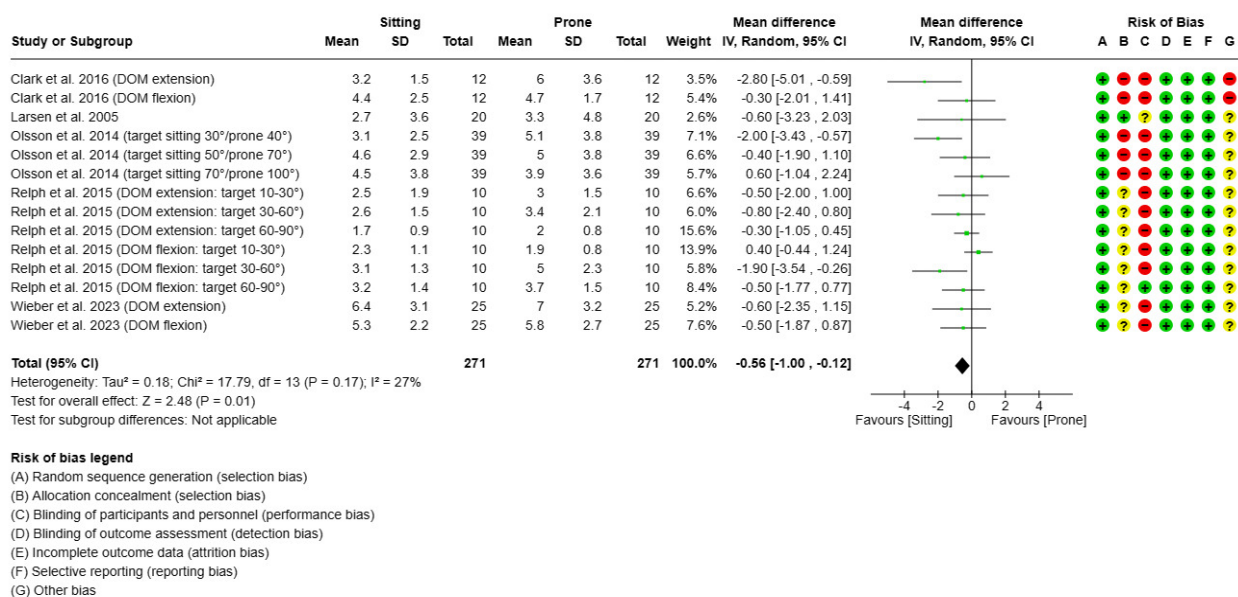


Abbildung 5: Forest-Plot zum Einfluss der Körperposition der Person auf den absoluten Winkelreproduktionsfehler des Kniewinkels [°] in aktiven Kniewinkelreproduktionstests. *CI* = Konfidenzintervall; *DOM* = Bewegungsrichtung; *IV* = Inverse Varianz; *SD* = Standardabweichung; *target* = Zielwinkel.

In Bezug auf die Bewegungsrichtung konnten Haggerty et al. (2021) zeigen, dass die Bewegung von Extension zu Flexion zu einem signifikant höheren AAE führte als die konzentrische Kontraktion von Flexion zu Extension des Kniegelenks, wenn der Zielwinkel 20° betrug; jedoch konnten sie ein ähnliches Ergebnis bei einem Zielwinkel von 70° nicht erzielen (Haggerty et al., 2021). Clark et al. (2016) konnten aufgrund der geringen Zuverlässigkeit keine abschließenden Aussagen über die DOM treffen und konnten nicht erklären, warum hamstring-fokussierte Tests im Gegensatz zu quadrizeps-fokussierten Tests eine höhere Zuverlässigkeit aufwiesen (Clark et al., 2016). Sie zeigten uneinheitliche ICC-Werte von schlecht bis gut für die Extension (ICC; [95%-KI]; SEM) (sitzend: 0,13; [-0,62; 0,58]; 1° vs. Bauchlage: 0,87; [0,61; 0,96]; 1°) und Flexion (sitzend: 0,31; -0,31 bis 0,74; 2° vs. Bauchlage: 0,51; 0,01-0,83; 1°), wobei die Zuverlässigkeit in der Bauchlage höher war als in der Sitzposition (Clark et al., 2016). Im Gegensatz dazu zeigten Relph und Herrington (2015), die in sitzender Position testeten, gute bis exzellente ICCs für die Extension (0,51–0,87), jedoch uneinheitliche ICCs für die Flexion (0,03–0,90) (Relph und Herrington, 2015).

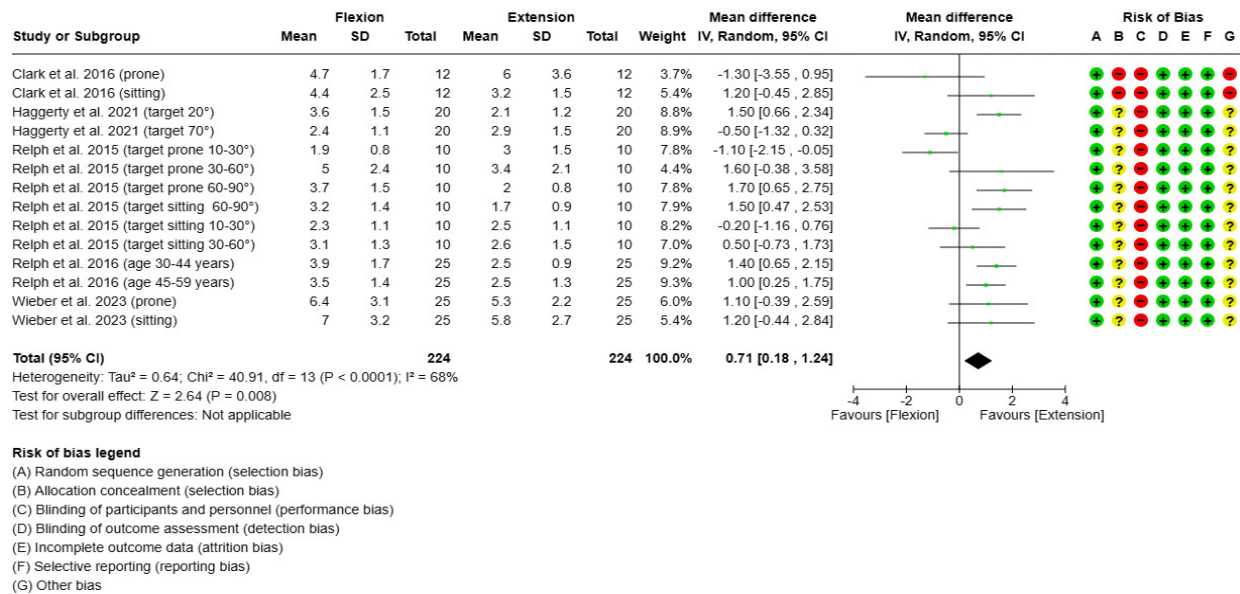


Abbildung 6: Forest-Plot zum Einfluss der Bewegungsrichtung der unteren Extremität auf den absoluten Winkelreproduktionsfehler des Kniewinkels [°] in aktiven Kniewinkelreproduktionstests. *CI* = Konfidenzintervall; *IV* = Inverse Varianz; *SD* = Standardabweichung; *target* = Zielwinkel.

Es wurde festgestellt, dass intensive Erschöpfung den AAE unabhängig vom Vorhandensein lokaler oder allgemeiner Ermüdung erhöht (Wieber et al., 2024) (siehe [Abbildung 7](#)). Alle Studien, die den Einfluss allgemeiner Ermüdung auf die Propriozeption untersuchten, zeigten einen signifikanten Rückgang der propriozeptiven Leistungsfähigkeit. Eine Ausnahme bildet die Untersuchung von Goetschius et al. (2013), in der die Teilnehmenden bei einem Zielwinkel von 15° getestet wurden und in der sich keine signifikanten Unterschiede ergaben (Goetschius et al., 2013). Ein möglicher Erklärungsansatz für den Anstieg des AAE nach muskulärer Ermüdung liegt in der veränderten Wahrnehmung der Muskellänge. Der ermüdete Muskel wird möglicherweise als länger empfunden, als er tatsächlich ist, was zu einer Beeinträchtigung der propriozeptiven Genauigkeit führen kann (Givoni et al., 2007; Paschalis et al., 2007, 2013). Diese Hypothese stützt sich auf das von Bays und Wolpert (2007) entwickelte „Forward Model of Motor Commands“ (Bays und Wolpert, 2007). Nach diesem Modell erzeugt ein motorischer Befehl eine interne Referenzposition, die in eine Bewegung umgesetzt wird. Eine Kopie des Befehls wird an ein internes Vorhersagemodell (Forward Model) gesendet, das die resultierende Körperposition simuliert. Ermüdungsbedingtes „Rauschen“, beispielsweise durch interne Prozesse oder externe Einflüsse, kann zu Abweichungen zwischen der vorhergesagten und der tatsächlich erreichten Position führen (Bays und Wolpert, 2007). Darüber hinaus wird angenommen, dass die Ermüdung der unteren Extremitäten eine verminderte efferente Reaktionsfähigkeit und eine reduzierte propriozeptive Wahrnehmung zur Folge hat. Dies äußert sich häufig in einem erhöhten AAE (Gear, 2011). Eine mögliche

Erklärung liegt in der Muskelstruktur. Die Oberschenkelmuskulatur weist einen hohen Anteil an schnell zuckenden Muskelfasern auf, die besonders schnell ermüden und eine stärkere afferente Innervation besitzen als langsam zuckende Fasern (Gear, 2011).

Einige Studien postulierten zudem, dass Aufwärmmaßnahmen positive Effekte auf die neuromuskulären Reflexe und damit auf die JPS-Leistung haben können (Ju et al., 2010; Romero-Franco und Jiménez-Reyes, 2017; Salgado et al., 2015). Solche Aufwärmeffekte wurden beispielsweise auch von Salgado et al. (2015) beobachtet (Salgado et al., 2015), jedoch nicht durch andere Untersuchungen bestätigt, die ein Aufwärmprotokoll unmittelbar einem Ermüdungsprotokoll voranstellten (Paschalis et al., 2013; Ribeiro et al., 2011; Skinner et al., 1986).

Darüber hinaus zeigten mehrere Studien, dass sowohl das Ausmaß der Ermüdung als auch das individuelle Fitnessniveau mit dem AAE korrelieren. Personen mit höherer Fitness sind offenbar weniger anfällig für ermüdungsbedingte Verschlechterungen der propriozeptiven Leistung (Givoni et al., 2007; Paschalis et al., 2013). Selbst wenn Maßnahmen zur Standardisierung der Trainingsintensität vor Testbeginn getroffen wurden, zeigten trainierte Personen insgesamt geringere Veränderungen im AAE vor und nach Belastung als weniger trainierte Personen (Paschalis et al., 2013; Romero-Franco und Jiménez-Reyes, 2017). Dies legt nahe, dass bei Tests, die eine vorangehende Belastung beinhalten, das individuelle Fitnessniveau systematisch berücksichtigt werden sollte. Trainierte Personen scheinen eine höhere Ermüdungstoleranz zu haben und benötigen ein höheres Maß an Belastung, um eine messbare Beeinträchtigung der propriozeptiven Genauigkeit zu zeigen. Givoni et al. (2007) berichteten zudem über eine signifikante Korrelation zwischen der durchschnittlichen Höhe des AAE und dem Kraftverlust während des Belastungsprotokolls (Givoni et al., 2007). Die Ergebnisse aus Studien mit professionellen Sportlern sind jedoch uneinheitlich. So wurde in einer Untersuchung ein deutlich erhöhter AAE (7°) und eine große Streuung nach einem 90-minütigen Handballspiel festgestellt (Niederseer et al., 2014). Dies könnte auf eine anhaltende Phase mentaler Belastung zurückzuführen sein, die unter anderem Sprung- und Laufkomponenten beinhaltet. Intensive körperliche Anstrengung wird allgemein mit einer Reduktion der kognitiven Leistungsfähigkeit in Verbindung gebracht, wohingegen moderate Belastung eher leistungsfördernde Effekte zeigt (Davey, 1973). Darüber hinaus ist es möglich, dass die in den Studien verwendeten Belastungsprotokolle auch Mechanismen beeinflussen, die nicht primär über Muskelmechanorezeptoren gesteuert werden (Miura et al., 2004; Ribeiro et al., 2011). Ribeiro et al. (2011) stellten fest, dass die Propriozeption sowohl unter exzentrischer als auch konzentrischer Belastung vermindert war (Ribeiro et al., 2011). Da konzentrische Übungen üblicherweise keinen relevanten Schaden an Muskelspindeln verursachen, könnte die beobachtete Einschränkung der Propriozeption vielmehr auf metabolische Faktoren zurückzuführen sein, beispielsweise auf erhöhte Konzentrationen von Metaboliten oder entzündungsfördernden Substanzen (Ribeiro et al., 2011). Substanzen wie Laktat, Arachidonsäure

oder Bradykinin könnten die Aktivität von Muskelspindelaferenzen beeinflussen, was die propriozeptive Genauigkeit beeinträchtigen kann – selbst ohne direkte Einschränkung der Muskelkraft (Cairns, 2006; Djupsjöbacka et al., 1995; Johansson et al., 1993).

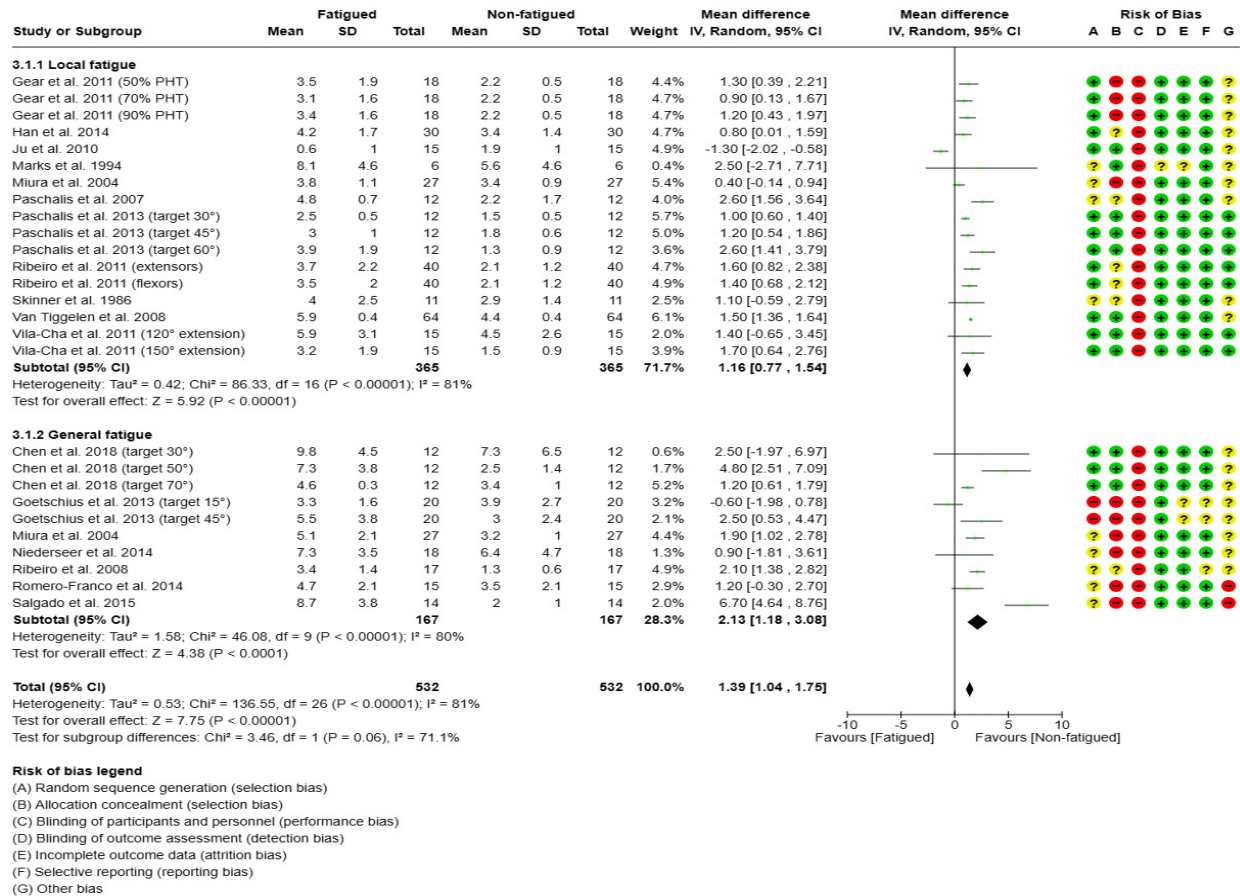


Abbildung 7: Forest-Plot zum Einfluss von Ermüdung auf den absoluten Reproduktionsfehler des Kniewinkels [°] in aktiven Kniewinkelreproduktionstests. Subgruppenanalysen wurden durchgeführt, um den Einfluss von Ermüdung differenziert zu betrachten: Es wurde zwischen lokaler Ermüdung (Studien mit Protokollen zur Ermüdung der Kniestrecker und/oder -beuger) und allgemeiner Ermüdung (Studien mit Pre-Post-Spiel-Designs sowie Lauf-/Radfahrprotokollen zur Herbeiführung eines systemischen metabolischen Stresses) unterschieden. *CI* = Konfidenzintervall; *IV* = Inverse Varianz; *SD* = Standardabweichung; *target* = Zielwinkel.

Darüber hinaus schien der Zielwinkel den Reproduktionsfehler zu beeinflussen, konnte aber durch die vorab festgestellte Heterogenität der Zielwinkel nicht mit in die Meta-Analyse aufgenommen werden. Da der Zielwinkel sich aber als Einflussfaktor auf die drei Hauptfaktoren herausstellte, wurde er mitdiskutiert.

Zwei Studien kamen zu dem Schluss, dass die zuverlässigsten Messungen erzielt wurden, wenn der Zielwinkel zwischen 60 und 90° lag (Clark et al., 2016; Relph und Herrington, 2015). Im

mittleren Bereich des ROM (30–70°) wurden höhere AAE-Werte für die Bauchlage berichtet, während in den unteren (10–30° Kniebeugung) und oberen Bereichen (70–100° Kniebeugung) des ROM die AAE-Werte in der Sitzposition höher waren (Ju et al., 2010; Marks, 1994; Proske et al., 2000). Clark et al. (2016) stellten fest, dass die Auswahl von Winkeln im mittleren ROM, insbesondere um 45°, zu einer reduzierten Aktivierung der kapsuloligamentären Mechanorezeptoren führen kann, während die muskulotendinösen Mechanorezeptoren bevorzugt stimuliert werden (Clark et al., 2016). Dieser Ansatz könnte auch dazu beitragen, antagonistische Muskeln zu entspannen, indem übermäßiges Dehnen am Ende des ROM vermieden und die Aktivierung antagonistisch wirkender Mechanorezeptoren minimiert wird (Clark et al., 2016). Darüber hinaus fallen die meisten sportspezifischen Bewegungsmuster in den mittleren ROM (Sigward und Powers, 2006), und nicht-kontaktbedingte Knieverletzungen, insbesondere Verletzungen des vorderen Kreuzbands, treten häufig auf, wenn das Knie sich im mittleren ROM befindet (Krosshaug et al., 2007; Relph et al., 2014). Dies deutet darauf hin, dass die propriozeptive Genauigkeit vom Zielwinkel beeinflusst wird und im mittleren ROM begrenzt ist.

Für die Gesamtbewertung der Ergebnisse der systematischen Übersichtsarbeit ist die hohe Heterogenität der eingeschlossenen Studien besonders zu berücksichtigen. Dies gilt insbesondere im Bezug auf die Bewegungsrichtung und die Ermüdungsprotokolle. Die Heterogenität dürfte primär auf methodische Unterschiede zwischen den Studien zurückzuführen sein, etwa hinsichtlich der verwendeten Messinstrumente (z.B. Isokinetiksysteme, Goniometer, Videoanalysen), der Art der Ermüdungsinterventionen (z.B. Wettkampfbelastung, Ergometertraining, exzentrische vs. konzentrische Ermüdung, betroffene Muskelgruppen) sowie der Durchführung der Reproduktion als ipsilaterale oder kontralaterale Aufgabe. Obwohl das Risk-of-Bias Assessment in den eingeschlossenen Studien als gering eingeschätzt wurde, bestand insbesondere im Hinblick auf die Verblindung der Teilnehmenden ein methodischer Schwachpunkt. In den meisten Studien war eine Verblindung in Bezug auf die dominante Gliedmaßen, Körperposition oder Ermüdungsstatus nicht umsetzbar. Darüber hinaus bestanden methodische Bedenken hinsichtlich der Erfassung von Ermüdung mittels subjektiver Skalen wie der Borg-RPE-Skala, deren Validität in diesem Kontext begrenzt sein kann. Aus diesen Gründen sollten die Ergebnisse dieses Teils der Meta-Analyse mit entsprechender Zurückhaltung interpretiert werden. Ein weiterer Aspekt, der die Übertragbarkeit der Ergebnisse einschränkt, ist die Auswahl der Studienpopulation. Alle Tests wurden an gesunden Kniegelenken durchgeführt. Es ist daher nicht auszuschließen, dass andere Ergebnisse auftreten würden, wenn die untersuchten Protokolle in einer klinischen Population, etwa bei Patienten mit VKBR, angewendet würden. Zudem wurden nur Studien mit Teilnehmenden im Alter zwischen 18 und 60 Jahren eingeschlossen. Auch wenn alle Studien die Einschlusskriterien so definierten, dass keine klinisch diagnostizierte Osteoarthritis vorlag, kann nicht ausgeschlossen werden, dass Personen über 60 Jahre bereits subklinische, unentdeckte Symptome aufwiesen, die

potenziell Einfluss auf die Gelenkwinkelwahrnehmung genommen hätten.

5.1.2 Aktiver kontralateraler Kniewinkelreproduktionstest

In 82% der Studien der systematischen Übersichtsarbeit wurde der aktive Kniewinkelreproduktionstest mit der ipsilateralen Reproduktion eines vorher vom Testleiter eingestellten Winkels durchgeführt (Wieber et al., 2024). Der aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktions- oder –matching Test zeigt sich jedoch als sensitiver um einen defizitären JPS bei VKBR Patienten zu erkennen (Hoshiba et al., 2020), welche ein bilaterales propriozeptives Defizit zeigen (Gokeler, Welling, Benjaminse et al., 2017). Eine ipsilaterale Reproduktionsaufgabe kann nicht mit einer kontralateralen Reproduktion-/Matching-Aufgabe verglichen werden (Han et al., 2016). Außerdem weichen die physiologischen und biomechanischen Testbedingungen eines ipsilateralen Reproduktionsverfahrens so sehr von der normalen Funktion ab, dass sie wenig zum Verständnis der Rolle der Propriozeption bei täglichen und sportlichen Aktivitäten beitragen können (Han et al., 2016).

Bis heute haben sich nur sechs Studien mit dem aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest in einer gesunden Kohorte beschäftigt (Da Silva et al., 2021; Da Silva et al., 2023; Givoni et al., 2007; Kaplan et al., 1985; Olsson et al., 2004; Vila-Chã et al., 2011). Da in vier der sechs Studien entweder kein AAE oder nur eine Abbildung dargestellt wurden, konnten diese nicht in die Meta-Analyse einfließen. Da in der folgenden empirischen Forschung des Promotionsprojekts jedoch der aktive kontralaterale Reproduktionstest gewählt wurde, sollen im folgenden nochmals explizit die für diesen spezifischen Test bekannten Einflussfaktoren diskutiert werden.

Von den sechs Studien hatten vier Studien das Ziel den Reproduktionsfehler nach einer exzentrischen oder konzentrischen muskulären Ermüdung der Quadrizeps- oder der Hamstringsmuskulatur zu untersuchen (Da Silva et al., 2021; Da Silva et al., 2023; Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011). Alle Studien untersuchten zusätzlich den Einfluss von unterschiedlichen Vorgaben des Referenzwinkel und testeten hierbei in der sitzenden Position. Zwei Studien untersuchte zusätzlich in der liegenden Position (Da Silva et al., 2023; Olsson et al., 2004) und eine in der stehenden Position (Vila-Chã et al., 2011). Die Anzahl der Probanden lag im Mittel bei $n = 22$ ($n = 13$ (Da Silva et al., 2021); $n = 16$ (Da Silva et al., 2023); $n = 15$ (Vila-Chã et al., 2011); $n = 18$ (Givoni et al., 2007); $n = 29$ (Kaplan et al., 1985); $n = 39$ (Olsson et al., 2004)).

In Bezug auf die Körperposition des Teilnehmers konnte Olsson et al. (2014) zeigen, dass es unabhängig vom vorgegebenen Winkel zu signifikanten Unterschieden im AAE zwischen der sitzenden Position und der Position in Bauchlage kam (30° vs. 40° : $p < .003$; 50° vs. 70° : $p < 0.013$; 70° vs. 100° : $p < 0.002$), geben jedoch keine mittleren AAE Werte einzeln für den

aktiven kontralateralen Test in beiden Positionen an (Sitzend: 3.8°-5.0°; Bauchlage: 4.9°-6.2°) (Olsson et al., 2004). Da Silva et al. (2023) konnte an $n = 16$ sportlich aktiven Männern zeigen, dass es zu keinen signifikanten Unterschieden im SAE abhängig von der Position in Bauchlage oder in der sitzenden Position kommt ($p > .17$) (Da Silva et al., 2023). Die Werte des SAE wurden jedoch nur durch Graphiken angegeben, durch welche man keine genauen Werte ablesen kann. Nach einer exzentrischen Ermüdung der Knieflexoren, konnte jedoch nachgewiesen werden, dass es einen signifikanten Interaktionseffekt zwischen Testposition x Winkel x Zeitpunkt für SAE gibt ($F(2,30) = 6.35$, $p < .01$, $\eta_p^2 = 0.30$). Die exzentrischen Belastungen führte somit zu unterschiedliche SAE in Abhängigkeit von der Testposition (sitzende vs. Bauchlage) und dem Referenztestwinkel (40° vs. 70° Knieflexion). Der SAE in beiden Positionen änderte sich bei einer Knieflexion von 70° über beide Messzeitpunkte nicht, wobei der SAE sich bei einer Knieflexion von 40° signifikant direkt nach der Kraftintervention verschlechterte ($p > .01$) und nach 24 Stunden keinen signifikanten Unterschied mehr zur Pre-Messung zeigte ($p = .92$). Die Teilnehmenden nahmen mit ihrem ermüdeten Bein eine stärker gebeugte Position ein als mit dem nicht ermüdeten Referenzbein. Während die Wahrnehmung der Knieposition in der sitzenden Position bei 40° Flexion 24 Stunden nach der Intervention nicht mehr verändert war, wurden in der liegenden Position signifikante verzögerte Reproduktionsfehler festgestellt ($p < .01$). Auch hier nahmen alle Teilnehmer eine stärker gebeugte Position mit ihrem zuvor exzentrisch ermüdeten Testbein ein (Da Silva et al., 2023). Diese Ergebnisse bestätigen auch Untersuchungen zu extzentrischen Ermüdung von Knieextensoren, die zeigen konnte, dass es signifikante Unterschiede im SAE abhängig vom eingestellten Winkel (70° vs. 30° Knieflexion) direkt nach einer exzentrischen Ermüdung der Knieextensoren gab, jedoch nicht mehr 24 und 48 Stunden später (Da Silva et al., 2021). Für die Knieextensoren konnten bei 70 ° ein signifikanter anstieg des SAE gezeigt werden. Für den Referenzwinkel von 30° konnte sich dies nicht bestätigen lassen (Da Silva et al., 2021). Givoni et al. (2007) und Vila-Cha et al. (2011) bestätigen die Ergebnisse beider Studien, sowohl für eine konzentrische (Givoni et al., 2007), als auch für eine exzentrische Ermüdung der Knieextensoren (Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011). Vila-Cha et al. (2001) konnte in einer weiteren Testbedingungen, bei der die Teilnehmer den JPS Test stehend durchführten, keine Unterschiede im JPS zeigen. Sie erklären dies durch zusätzliche propriozeptive Informationen aus der Kompression durch die Fußsohlen, der Kontraktion anderer, nicht betroffener Muskelgruppen oder durch zusätzliche sensorische neuronale Weiterleitungen aus dem vestibulären System (Vila-Chã et al., 2011).

Unabhängig von der konzentrischen oder exzentrischen Muskelermüdung und der Körperposition konnte gezeigt werden, dass der SAE immer in die Richtung einer übermäßigen Flexion gingen, wenn das ermüdete Bein das Referenzbein war (Givoni et al., 2007) und in die Richtung der Extension, wenn das nicht-ermüdete Bein das Referenzbein war (Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011). Dies unterstreicht, dass der Einfluss auf den SAE die Ermüdung und

damit ein als mehr gestreckter wahrgenommener Quadrizepsmuskel sein muss und nicht beispielsweise die Dominanz des Beins (Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011). Es wird davon ausgegangen, dass die Fehler bei der Positionsanpassung mit größerer Muskellänge zunehmen, da die Unterschiede in den Spindelfrequenzentladungen zwischen der trainierten und der Referenzgliedmaße größer sind (Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011). Weitergehend kann auch ein bereits in früheren Studien postuliertes internes Forward-Model Grundlage dafür sein (Bays und Wolpert, 2007; Wolpert und Ghahramani, 2000). Dieses Model basiert darauf, dass ein motorische Befehl auf frühere Bewegungserfahrungen zugreift und die erwartete Rückmeldung mit der tatsächlichen Rückmeldung vergleicht. Wenn es Verzögerungen in der Rückmeldung gibt, arbeitet das vorhergesagte Signal eigenständig (Dassonville, 1995; Wolpert et al., 1995). Nur Unterschiede zwischen den erwarteten und tatsächlichen Signalen werden wahrgenommen. Bei belasteten Extremitäten stimmen die Signale oft überein, da solche Bedingungen vertraut sind. Wenn ein Muskel jedoch ermüdet ist, weicht die sensorische Rückmeldung ab, was zu Fehlern in der Wahrnehmung führt, wie z. B. das Gefühl, dass der Muskel länger ist und dann an der Richtung der erhobenen Winkelreproduktionsfehler zu erkennen ist (Allen et al., 2007; Givoni et al., 2007). Alle Studien widersprechen der Hypothese, dass das Gefühl der Anstrengung die Person dazu veranlasst, ihr Knie als gestreckter wahrzunehmen, als es tatsächlich war. Dies würde bedeuten, dass der Teilnehmer eine stärker gebeugte Knieposition einnimmt. Stattdessen nahmen die Probanden in allen Studien ihr Knie als stärker gebeugt wahr und nahmen eine gestrecktere Knieposition ein (Da Silva et al., 2021; Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011).

Es scheint, dass die AAE in sitzender Position, wenn die Kniestrecker agonistisch (Da Silva et al., 2023) und die Kniebeuger antagonistisch (Da Silva et al., 2021) arbeiten, stark von der direkten zentralen Ermüdung nach einer Trainingsintervention beeinflusst werden (Da Silva et al., 2021), unabhängig von den ermüdeten Muskeln (Da Silva et al., 2023). Nach 24 Stunden zeigt sich dann der Einfluss der peripheren Muskelermüdung, welche nach Ermüdung der Knieflexoren in der liegenden Position (Da Silva et al., 2023) und bei den Knieextensoren in der sitzenden Position (Vila-Chã et al., 2011) zu einem niedrigeren JPS führen. Dies könnte daran liegen, dass im Vergleich zu der sitzenden Aufgabe, die liegende Position eine Aktivierung der Knieflexoren erfordert, die mit erhöhter fusimotorischer Aktivität und der muskulären Arbeit gegen die Schwerkraftkräften verbunden ist (Da Silva et al., 2023).

Da Silva et al. (2023) konnten aus Ihren Studien zur Ermüdung der Knieextensoren und Flexoren ziehen, dass der JPS weniger sensitiv auf eine Ermüdung der Knieflexoren, als auf eine Ermüdung der Knieextensoren im sitzen reagiert, wobei in der sitzenden Position 48 Stunden nach der Ermüdung der Knieextensoren und 24 Stunden nach Ermüdung der Knieflexoren, die Ausgangswerte wieder erreicht werden (Da Silva et al., 2021; Da Silva et al., 2023). Givoni et al. (2007) und Vila-Cha et al. (2011) konnten keinen Rückgang auf die Ausgangswerte im JPS nach 24 Stunden nachweisen (Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011).

Insgesamt verdeutlichen die Studien, dass die Körperposition (sitzend vs. liegend) und der Referenzwinkel einen Einfluss darauf haben könnten, wie Muskelermüdung die Propriozeption beeinflusst. Deutlich wird in allen Studien, dass in der sitzenden Position zentrale Mechanismen, eine größere Rolle spielen, könnten in der liegenden Position periphere Mechanismen (z.B. Muskelschäden) dominanter sein und zu einer verzögerten Beeinträchtigung der Propriozeption führen (Da Silva et al., 2021; Da Silva et al., 2023; Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011). Die Integrität der Spindel scheint bei der exzentrischen Kontraktionen keinen Einfluss zu haben (Da Silva et al., 2021; Givoni et al., 2007). Das sensomotorische System scheint über die erhöhte Längenwahrnehmung, der Muskulatur nach einer muskulären Ermüdung einen protektiven Mechanismus zu haben, welcher vor Überlastungen des Muskel-Sehnen-Apparates schützt. Die Fehler in der Propriozeption durch Ermüdung könnten somit ein Einflussfaktor auf Verletzungen im Sport sein (Givoni et al., 2007). Die nicht signifikanten Befunde in einer Referenzposition von 30° bei der Ermüdung der Knieextensoren könnte erstens daran liegen, dass es durch die Startposition von 0° Flexion, also kompletter Extension, zu einer deutlichen neuronalen Voraktivierung kam, zweitens könnte der Winkel von 30° Grad zu nah an der Ausgangsposition gelegen haben, sodass er besser wahrgenommen wurde (Givoni et al., 2007).

Kaplan et al. (1985), welche die Auswirkungen des Alters ($n = 15$, Alter: 22–27 Jahre; $n = 14$, Alter: 60–80 Jahre) auf unterschiedliche Referenzwinkel untersuchten, zeigten, dass jüngerer Probanden in allen Tests eine höhere Genauigkeit in der Wahrnehmung und Reproduktion der Knieposition als die ältere Kohorte (Kaplan et al., 1985). Bei der Untersuchung spezifischer Winkel (15°, 30° und 70° Knieflexion) wurde festgestellt, dass ältere Probanden bei 70° Kniebeugung signifikant größere Fehler machten als die jüngere Probanden. Insgesamt zeigte die jüngere Kohorte einen mittleren Fehler von 4° und die ältere Kohorte einen Fehler von 7°. Dies deutet darauf hin, dass die Fähigkeit, die Gelenkposition genau zu bestimmen, bei größeren Gelenkwinkeln im Alter stärker beeinträchtigt sein könnte. Ältere Personen neigten dazu einen Winkel von 70° zu überschätzen (Kaplan et al., 1985). Dies könnte auf den Rückgang der Gelenkbewegungswahrnehmung im Alter zurückzuführen sein, was aktuelle Studien bestätigen (Négyesi et al., 2019; Relph und Herrington, 2016a; Ribeiro und Oliveira, 2010). Sie zeigen auch, dass im Alter die Variabilität der Winkelreproduktionsfehler zunimmt (Négyesi et al., 2019).

5.2 Einfluss von Körperposition und Bewegungsrichtung

Auf Grundlage der Erkenntnisse sportlicher Bewegung, welche sich zumeist auf bilaterale neuronale und muskuläre Anforderungen beziehen (Alibiglou et al., 2009; Olree und Vaughan, 1995), sowie der in der systematischen Übersichtsarbeit (Publikation A) erkannten Forschungslücken zu aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest in Bezug auf die

Körperposition und die Bewegungsrichtung (Wieber et al., 2024), wurde sich im Verlauf der zwei weiteren empirischen Studien (Publikation B & C) mit der Fragestellung beschäftigt, ob der resultierende AAE in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests abhängig von der Körperposition der Probanden und Bewegungsrichtung des Beines ist (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023).

5.2.1 Körperposition

Die Ergebnisse beider im Zuge der Dissertation publizierten experimentellen Studien (Publikation B & C) zeigten, dass die Körperorientierung ein Hauptfaktor ist, welcher den AAE beeinflusst (Wieber et al., 2023, 2024). Die systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse (Publikation A) zeigte einen signifikanten Unterschied der Daten von der sitzenden Position und der Position in Bauchlage ($Z(542) = 2.48$; $p < .01$), wobei die Fehler in der sitzenden Position um 0.6° (95%–KI: $[1^\circ; 0.1^\circ]$) niedriger waren als in der Bauchlage (Wieber et al., 2024). Die experimentelle Studien (Publikation B & C) zeigten jedoch gegensätzliche Ergebnisse. In der Pilotstudie an $n = 25$ Sportstudenten konnten wie in der Meta-Analyse signifikant höhere Werte für die Position in der Bauchlage nachgewiesen werden (95%–KI: $[-3.40; -1.69]$; $p < 0.001$; $\eta_p^2 = 0.061$) (Wieber et al., 2023, 2024). Die Winkelreproduktionsfehler in der Folgestudie mit $n = 56$ gesunden Probanden zeigten in der sitzenden Position signifikant höhere AAE ($F(1, 54) = 23.53$, $p < .001$) (Wieber, Preece et al., 2025). Die Effektgrößen (Publikation B: $\eta_p^2 = .061$; Publikation C: $d = .80$) zeigten zwar einen mittleren bis starken Effekt der Körperposition, jedoch können die mittleren Unterschiede in den AAE–Werten in einer gesunden Kohorte zwischen den beiden Positionen (Sitzend vs. Bauchlage: Meta-Analyse: 0.6° ; Studie B: 1° ; Studie C: 1.5°) als nicht klinisch relevant eingestuft werden (Busch et al., 2021; Gokeler et al., 2012). Eine klinische Relevanz wird ab einem AAE von 5° angegeben (Kim et al., 2017; Relph und Herrington, 2016b). Jedoch sind klinische Erkenntnisse über die Auswirkungen des Ausmaß propriozeptiver Defizite auf die Kinematik und Kinetik menschlicher Bewegungen bislang noch unzureichend erforscht (Fleming et al., 2022).

Basierend auf den Ergebnissen der Meta-Analyse (Publikation A) und der innerhalb des Promotionsprojekt durchgeführten experimentellen Studien (Publikation B & C) scheint die Fähigkeit, Kniewinkel aktiv ipsilateral und kontralateral reproduzieren zu können, mit der angewendeten Testposition verbunden zu sein (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023, 2024). Dies konnte jedoch nicht in der bisher einzigen Studie zur Auswirkung der Position auf den aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest von Silva et al. (2023) bestätigt werden (Da Silva et al., 2023). Sie zeigten, dass es keine Unterschiede zwischen der sitzenden und liegenden Position gab ($p = .17$). Die mittleren AAE Werte für die einzelne Körperposition wurden nur graphisch dargestellt und lagen bei ca. $0,5^\circ$ – $1,2^\circ$ für die sitzende Position und bei $0,6^\circ$ – $0,7^\circ$ für die Position in Bauchlage (Da Silva et al., 2023). Diese Werte weichen deutlich von den Werten der Publikation A startend aus der Flexion (Sitzende

Position: 5.8° ; Bauchlage: 5.3°) und Publikation B (Sitzende Position: 6° ; Bauchlage: 4.5°) ab (Wieber et al., 2023, 2024). Die Kohorte, die Markierung der anatomischen Punkte und eine Bildaufnahme und spätere Analyse, waren in Publikation A dieselben wie in der Studie von da Silva et al. (2023). In Publikation B wurde ein digitales Goniometer verwendet und die Werte direkt in eine Software exportiert (Wieber, Preece et al., 2025). Die Werte der Publikationen A und B sind jedoch im Einklang mit den Werten weiterer Studien in der sitzenden Position (3.9° – 5° (Vila-Chã et al., 2011); 5° – 5.6° (Givoni et al., 2007); 4° (Kaplan et al., 1985); 3.8° – 5.0° (Olsson et al., 2004), sowie in Bauchlage (4.9° – 6.2° (Olsson et al., 2004)). Ein klinisch relevanter Unterschied bei einem JPS-Test sollte mindestens 5° AAE betragen (Kim et al., 2017; Relph und Herrington, 2016c).

Die Ergebnisse aus diversen Meta-Analysen zeigen, dass der direkte Vergleich mit Ergebnissen anderer Kniewinkelreproduktionstests hier nicht gezogen werden kann, da diese Testverfahren andere propriozeptive und kognitive Anforderungen und Einflüsse integrieren (Fleming et al., 2022; Han et al., 2016; Hillier et al., 2015; Strong et al., 2021). Goble et al. (2010) konnten zeigen, dass wenn Winkel ipsilateral reproduziert werden, in erster Linie kognitive und Gedächtnisfähigkeiten abgefragt werden, und weniger die propriozeptiven Fähigkeiten (Goble, 2010). Dies ist bei der Reproduktion des Winkels auf der kontralateralen Körperseite nicht der Fall, da hier zusätzlich der interhemisphärische Transfer einbezogen wird (Goble, 2010). Wird jedoch nur eine Körperseite, wie beispielsweise die verletzte VKB-Seite, getestet, bleibt bei kontralateraler Abfrage unklar, ob das propriozeptive Defizit im ipsilateralen, kontralateralen oder in beiden Extremitäten vorhanden ist (Goble, 2010). Die Testbedingungen ipsilateraler Reproduktionstest weichen sehr von der normalen Funktion ab, sodass sie wenig zum Verständnis der Rolle der Propriozeption bei täglichen und sportlichen Aktivitäten beitragen können (Han et al., 2016; Olree und Vaughan, 1995). Jedoch soll versucht werden die grundlegenden Mechanismen der propriozeptiven Fähigkeit aus der schon vorhandenen Literatur anderer aktiver Kniewinkelreproduktionstest auf den aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest zu übertragen und zu diskutieren.

Die Propriozeption basiert auf Informationen, welche von Propriozeptoren in Muskeln, Sehnen und Gelenken bereitgestellt werden und die auf Veränderungen der Körperposition reagieren (Moser und Bloch, 2015; Pape und Kurtz, 2014; Schmidt, 2013). In der sitzenden Position werden andere Rezeptoren aktiviert als in der liegenden Position (Busch et al., 2021; Han et al., 2016), wobei die Muskelspindeln und das Golgi-Sehnenorgan die Hauptrezeptoren darstellen (Busch et al., 2021; McCloskey, 1978; Olsson et al., 2004). Die Propriozeption im Kniegelenk ist noch nicht vollständig verstanden und der Anteil der Beteiligung weiterer Rezeptoren in einer funktionellen Bewegung wird weiterhin diskutiert (Riemann und Lephart, 2002). Man weiß jedoch heutzutage, dass die propriozeptiven Fähigkeiten und die daraus resultierenden Bewegungsmuster von taktilen Feedback abhängig sind (Macefield et al., 2016). In sitzender Position ist der Ort des taktilen Feedbacks in erster Linie die Rück-

seite des Oberschenkels, während in liegender Position die taktilen Feedbackstellen eher die Vorderseite der Oberschenkel und die Kniescheiben sind (Stone et al., 2018). Darüber hinaus ist in der Bauchlage ein größerer Teil des Körpers in Kontakt mit der orthopädischen Bank, so dass die Probanden zusätzliche afferente Rückmeldungen von Hautrezeptoren erhalten, die sich in anderen Muskeln der unteren Gliedmaßen befinden (Birmingham et al., 1998). Diese neuronalen Rückmeldungen könnten den JPS und damit den AAE beeinflussen, was zu einer genaueren Wahrnehmung des Kniegelenkwinkels in der Bauchlage geführt haben könnte. Ein weiterer möglicher Grund für die Unterschiede in der AAE, die in der Bauchlage und in der sitzenden Position aufgezeichnet wurden, könnte die unterschiedliche Position des Körpers im Raum sein, insbesondere die Position des Kopfes (Liu et al., 1995). Studien zeigen, dass auch die unterschiedliche Wirkung der Schwerkraft auf die Quadrizeps- und Hamstringsmuskulatur einen Einfluss auf den JPS im sitzen und liegen haben kann (Worringham und Stelmach, 1985). In sitzender Position sind die Schwerkraftmomente auf den Quadrizeps am größten, in der Bauchlage auf den Hamstrings (Olsson et al., 2004; Worringham und Stelmach, 1985).

In Bezug auf die Testbedingungen und Validität zeigen die Studie sehr kontroverse Ergebnisse. Die Test-Retest-Reliabilität bezog sich auf ICCs zwischen 0.13 und 0.92 für die sitzende Position und ICCs zwischen 0.17 und 0.90 für die liegende Position (Clark et al., 2016; Olsson et al., 2004; Relph und Herrington, 2015). Die SEM-Werte reichten von $0,40^\circ$ bis $1,98^\circ$ in der sitzenden Position und von $0,45^\circ$ bis $3,14^\circ$ in der Bauchlage (Clark et al., 2016; Olsson et al., 2004; Relph und Herrington, 2015; Wieber et al., 2023). Dies ist voraussichtlich auf die hohe Heterogenität der Studienprotokolle und Messinstrumente zurückzuführen (Han et al., 2016; Hillier et al., 2015; Wieber et al., 2024). Schaut man sich nur die bisher einzige Reliabilitäts-Studie zum aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest an, so zeigen sich Werte von ICC 0.31–0.82 in der sitzenden Position und 0.17–0.75 in der liegenden Position (Olsson et al., 2004).

5.2.2 Bewegungsrichtung

Die Ergebnisse der Meta-Analyse (Publikation A) und der zwei experimentellen Studien (Publikation B & C) des Promotionsprojekts deuten darauf hin, dass die Bewegungsrichtung im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest keinen signifikanten Einfluss auf den AAE hat (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023, 2024). In Studie B konnte jedoch ein signifikanter Effekt der Bewegungsrichtung auf den SAE nachgewiesen werden (95%-KI: $[-2.92; -0.35]$; $p = .007$; $\eta_p^2 = .029$) (Wieber et al., 2023) und in Studie C war das Ergebnis durch eine p-Wert Korrektur aufgrund des Modellfittings auf $p < .01$ ($p = .015$) knapp nicht signifikant (Wieber, Preece et al., 2025).

Die bisherige Forschung weißt hier eine Lücke auf. Der Einfluss der Bewegungsrichtung im Kontext des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests wurde in der Literatur

nicht untersucht. Eine mögliche Erklärung für den beobachteten Einfluss der Bewegungsrichtung auf den Winkelfehler könnte die Rolle der Schwerkraft sein (Relph und Herrington, 2016a). Die konzentrische Muskelbelastung ist bei Flexionsbewegungen höher und die Druckverhältnisse im Gelenk variieren abhängig davon, ob gegen oder mit der Schwerkraft gearbeitet wird. Dies könnte zu einer stärkeren Aktivierung von Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorganen während der Kontraktion des *Musculus quadriceps femoris* führen, insbesondere aufgrund dessen Vorspannung und Dehnfähigkeit (Haggerty et al., 2021; Relph und Herrington, 2016a). Auch die Tatsache, dass Muskelspindeln während der Dehnung stärker innerviert sind als bei Verkürzung, könnte die Unterschiede in der Reproduktionsgenauigkeit erklären (Olsson et al., 2004; Ribot-Ciscar und Roll, 1998). Haggerty et al. (2021) berichteten, dass gesunde, junge und körperlich aktive Personen möglicherweise nicht von einer erhöhten Spindelaktivität infolge exzentrisch-isometrischer Kontraktion profitieren (Haggerty et al., 2021). In ihrer Studie war der AAE bei Bewegungen von Extension zu Flexion signifikant höher als bei konzentrischen Bewegungen von Flexion zu Extension – allerdings nur bei einem Zielwinkel von 20°. Bei einem Zielwinkel von 70° konnte kein vergleichbarer Effekt festgestellt werden (Haggerty et al., 2021).

Clark et al. (2016) führen die Unterschiede zwischen Extension und Flexion im ipsilateralen aktiven Test vor allem auf biomechanische und neuromuskuläre Faktoren zurück. Die unterschiedliche Muskelarchitektur von Quadrizeps (monoartikulär) und Hamstrings (biartikulär) beeinflusse die Spindelaktivität und damit die propriozeptive Rückmeldung. Zudem scheint die exzentrisch-isometrische Belastung zuverlässigere Ergebnisse zu liefern als konzentrisch-isometrische Bewegungen. Auch zentrale Steuerungsmechanismen wie die Alpha-Gamma-Koaktivierung könnten zur Variabilität beitragen (Clark et al., 2016). Dabei werden die motorischen Alpha-Neurone, die die extrafusalen Muskelfasern aktivieren, gemeinsam mit den Gamma-Motoneuronen angesteuert, welche die intrafusalen Fasern der Muskelspindeln regulieren. Diese Koaktivierung dient dazu, die Spindelspannung während aktiver Bewegungen konstant zu halten und eine kontinuierliche propriozeptive Rückmeldung zu ermöglichen. Unterschiede in der Koaktivierung, in Abhängigkeit von Muskelgruppe, Gelenkwinkel und Bewegungsart (konzentrisch vs. exzentrisch), könnten dazu führen, dass die Spindelsensitivität bei Quadrizeps-dominierte Aktivität variabler und damit weniger zuverlässig ist als bei Hamstring-dominierte Bewegung (Banks, 2006; Clark et al., 2016; J. C. Rothwell, 2012). Clark et al. (2016) weisen darauf hin, dass diese komplexe neuromuskuläre Steuerung noch nicht vollständig verstanden ist, aber einen Einfluss auf die Qualität propriozeptiver Rückmeldung haben dürfte (Clark et al., 2016). Sie sahen jedoch aufgrund der insgesamt geringen Reliabilität von JPS Tests keine belastbaren Rückschlüsse hinsichtlich der Bewegungsrichtung und wiesen darauf hin, dass hamstrings-dominierte Tests im Vergleich zu quadrizeps-dominierten Tests tendenziell eine höhere Zuverlässigkeit aufwiesen (Clark et al., 2016).

Die Abhängigkeit der Ergebnisse von der gewählten Zielwinkleinstellung könnte eine weitere Erklärung für die widersprüchlichen Befunde sein. Während im Pilotprojekt (Publikation B) der Referenzwinkel frei gewählt werden konnte (Wieber et al., 2024), wurde er in beiden Folgestudien auf einen Bereich zwischen 50° und 70° Kniebeugung eingegrenzt (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber, Reer et al., 2025). Diese Entscheidung basiert auf der Tatsache, dass viele sportspezifische Bewegungsmuster im mittleren Bewegungsbereich ROM des Knies stattfinden (Sigward und Powers, 2006). Dieser Bereich ist biomechanisch besonders relevant, da hier die höchste Reizweiterleitung über Rezeptoren erfolgt, die dem zentralen Nervensystem Informationen zur Gelenkstellung übermitteln und so zu einer höheren propriozeptiven Genauigkeit führen können (Nam et al., 2016). Zudem treten nicht-kontaktbedingte Knieverletzungen, insbesondere Rupturen des VKB, häufig im mittleren ROM auf, wenn das Knie weder vollständig gestreckt noch maximal gebeugt ist. In dieser Position ist die passive Stabilität des Kniegelenks reduziert, wodurch es anfälliger für valgus-rotatorische Belastungen und mangelnde neuromuskuläre Kontrolle wird (Krosshaug et al., 2007; Shimokochi und Shultz, 2008). Der gewählte Zielwinkelbereich wurde auch deshalb festgelegt, um die Beugeposition des Knies während der Standphase des Gehens abzubilden (Marks und Quinney, 1993). Dieser Bereich ist eng mit dem propriozeptiven Feedback während des Gehens verbunden (Co et al., 1993) und wurde auch in der bislang einzigen Reliabilitätsstudie zum aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest empfohlen (Olsson et al., 2004). Unterschiede in der Wahl des Referenzwinkels konnten auch in Abhängigkeit von der Körperposition festgestellt werden. Die Literatur zeigt, dass im mittleren ROM (30°–70° Kniebeugung) in Bauchlage tendenziell höhere AAE-Werte auftreten, während in den Endbereichen des Bewegungsumfanges (10°–30°; 70°–100°) die Sitzposition mit höheren Fehlerwerten assoziiert ist (Ju et al., 2010; Marks, 1994; Proske et al., 2000; Wieber et al., 2024). Bezüglich der Richtung des Fehlers gibt es bislang nur wenige Hinweise auf einen Zusammenhang mit dem Verletzungsrisiko. Es bleibt unklar, ob die Überschätzung oder die Unterschätzung der Gelenkposition funktionell problematischer ist (Olsson et al., 2004; Relph und Herrington, 2015). Zudem wurde diskutiert, dass die Mittelwertbildung beim SAE zu einem systematischen Bias führen kann, wodurch die tatsächliche Reproduktionsfähigkeit verzerrt dargestellt wird. Wiederholte Testungen könnten den mittleren Fehlerwert künstlich verringern (Olsson et al., 2004). Daher wird in der Literatur zunehmend empfohlen, sich bei der Bewertung des JPS auf den AAE als primären Messwert zu konzentrieren (Relph und Herrington, 2015).

5.3 Einfluss der Beindominanz

Auf Grundlage der in der systematischen Übersichtsarbeit (Publikation A) erkannten Forschungslücken zu aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest in Bezug auf die Beindominanz (Wieber et al., 2024), wurde sich in zwei weiteren empirischen Studien (Publikation C & D) mit der Fragestellung beschäftigt, ob der AAE abhängig von der Dominanz des

Beines in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests ist (Wieber, Preece et al., 2025). Die Ergebnisse der Studie C zum Einfluss der Beindominanz im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest zeigten, dass die Dominanz der Referenzgliedmaße einen signifikanten Einfluss auf den resultierenden AAE bei gesunden Erwachsenen hat (Wieber, Preece et al., 2025). Dies zeigte sich in der sitzenden Position, jedoch nicht in der Position in Bauchlage. Der AAE war signifikant höher, wenn das dominante Bein das Referenzbein war (1° ; 95%–KI: $[0,6^\circ; 1,5^\circ]$) (Wieber, Preece et al., 2025). Die in Studie D geplante Durchführung der statistischen Auswertung der Daten in Bezug auf Unterschiede im AAE abhängig davon, ob die dominante oder nicht–dominante Seite verletzt war, konnte nicht durchgeführt werden, da sich nur zwei Patienten das VKB der nicht–dominanten Seite gerissen hatten (Wieber, Reer et al., 2025).

Die Ergebnisse der Studien des Promotionsprojekts sind im Einklang mit der bisherigen Literatur zur Auswirkung der Beindominanz in JPS–Test in der sitzenden Position. Zwei Studien konnten hier signifikante Unterschiede in der Beindominanz zeigen (Azevedo et al., 2021; Galamb et al., 2018). Andererseits konnten Studien auch keine Unterschiede im AAE in Abhängigkeit von der Beindominanz aufzeigen (Bullock-Saxton et al., 2001; Busch et al., 2023; Cug et al., 2016; Lee und Lim, 2023; Muaidi et al., 2009; Nitsure und Prabhu, 2015). Daher bleibt es fraglich, ob die Gliedmaßendominanz die Kniepropriozeption beeinflusst.

Alle der bisherig verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse sind auf den aktiven ipsilaterale Kniewinkelreproduktionstest (Azevedo et al., 2021; Busch et al., 2023; Lee und Lim, 2023; Strong et al., 2023) oder passive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstest (Cug et al., 2016; Galamb et al., 2018) begrenzt. Der Einfluss der Beindominanz wurde jedoch im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest bis lang nicht geprüft. Der aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstest kann im Gegensatz zum ipsilateralen Kniewinkelreproduktionstest hemisphärische Asymmetrien überprüfen und ist nicht zusätzlich beeinflusst von einem Memory–Effekt (Goble, 2010). Des weiteren haben bis heute alle Studien zur Auswirkung des Beindominanz auf den AAE während eines ipsilateralen Kniewinkelreproduktionstest ohne Einfluss des Körpergewichts nur in der sitzenden Position (Azevedo et al., 2021; Busch et al., 2023; Galamb et al., 2018; Lee und Lim, 2023) oder in der Rückenlage (Strong et al., 2023) getestet und nicht in der Position in Bauchlage. Daher ist ein direkter Vergleich der vorliegenden Ergebnisse des Promotionsprojekts mit den Ergebnissen vorheriger Studien nur mit Vorsicht zu schließen.

Strong et al. (2023) konnten zeigen, dass Teilnehmer mit ihrem dominanten rechten Knie signifikant höhere AAE (5.2 ± 2.0) als mit dem nicht–dominanten linken Knie (4.4 ± 1.8) ($p = 0.02$) erreichten, wobei unabhängig von der aktiven Knieseite, eine rechtsseitige zentrale Lateralisierung nachgewiesen wurde (Strong et al., 2023). Diese Ergebnisse wurde zuvor schon

so in anderen JPS-Testverfahren wie dem AMEDA bestätigt (Han et al., 2013). Azevedo et al. (2021) zeigte jedoch signifikant niedrigere AAE für die dominante Seite im aktiven ipsilateralen Kniewinkelreproduktionstest (Azevedo et al., 2021). Ein Grund hierfür könnte der Einfluss der Körperposition sein. Höhere AAE auf der dominanten Seite resultieren in der Position in Rückenlage (Strong et al., 2023) und für die nicht-dominante Seite in der sitzenden Position (Azevedo et al., 2021). Wie auch in den Studien des Promotionsprojekts bestätigt, hat die Körperposition einen Einfluss auf den resultierenden AAE (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023, 2024). Des weiteren konnte Galamb et al. (2018) zeigen, dass es zu Unterschieden im AAE in einem matching-task abhängig von der Beindominanz kommt. Rechts-dominante Personen produzierten geringere AAEs ($2.82^\circ \pm 0.72^\circ$) mit dem nicht-dominanten linken Bein im Gegensatz zu den links-dominanten Personen ($3.54^\circ \pm 0.33^\circ$). Die Unterschiede im AAE zwischen der dominanten und nicht-dominanten Seite wurde jedoch nur für die links-dominanten Teilnehmer signifikant (Galamb et al., 2018). Damit belegen die Ergebnisse bisheriger Studien eine Prävalenz der Aktivierung der rechten Hemisphäre, unabhängig vom aktiven Bein (Galamb et al., 2018; Strong et al., 2023). Diese Annahme wurde auch in weiteren Studien zur Lateralisierung bestätigt, die zeigten, dass die lateralisierte Hirnaktivität bei propriozeptiven Aufgaben unabhängig von der Dominanz der Gliedmaße ein durchgängiges Merkmal ist (Goble, 2010; Naito et al., 2005; Vulliemoz et al., 2005).

Die in diesem Promotionsprojekt durchgeführten Untersuchungen (Publikation D), konnten an einer gesunden Kontrollgruppe keine signifikanten Unterschiede zwischen der linken und rechten Beinseite (unabhängig von der Dominanz des Beins) bestätigen ($t(65.0) = -0.72$, $p = 1.00$, 95%-KI: $[-2.04; 1.15]$) (Wieber, Reer et al., 2025), was die zuvor genannte lateralisierte Hirnaktivität der rechten Hemisphäre nicht bestätigt.

Es ist jedoch anzumerken, dass es widersprüchliche Belege gibt. Weitere Studien haben, wie in Studie D, keine signifikanten Unterschiede zwischen der dominanten und der nicht-dominanten Seite nachgewiesen (Bullock-Saxton et al., 2001; Busch et al., 2023; Han et al., 2013; Nitsure und Prabhu, 2015; Wieber, Reer et al., 2025). Mögliche Gründe für die unterschiedlichen Ergebnisse könnten die verschiedenen Methoden der Testverfahren, wie unterschiedliche Referenzwinkel, passive\aktive\kontralaterale Bewegung oder Messinstrumente sein (Busch et al., 2023; Hoshiba et al., 2020; Strong et al., 2022, 2023).

Eine Hypothese, welche mit den Ergebnissen des Promotionsprojekts vereinbar ist, ist die 'Dynamic-Dominance Hypothesis' von Robert L. Sainsburg, welche besagt, dass die nicht-dominante Beinseite auf die rückkopplungsvermittelte Kontrolle der Position und die dominante Seite auf die Feedforward-Kontrolle spezialisiert ist (Sainsburg, 2005). Übertragen auf die untere Extremität würde dies bedeuten, dass das nicht-dominante Bein den Körper stabilisiert (Positionskontrolle), während das dominante Bein z.B einen Ball durch eine

dynamische gezielte Bewegungsausführung kontrolliert (Kontrolle der Bewegungsdynamik) (Han et al., 2013; Strong et al., 2023). Die Abhängigkeit des JPS von der Dominanz der Beinseite kann auch mit der körperlichen Aktivität und den Extremitäten zusammenhängen, die Personen bei der Ausübung bestimmter Sportarten einsetzen (Azevedo et al., 2021; Busch et al., 2023; Muaidi et al., 2009). So konnte gezeigt werden, dass die propriozeptive Genauigkeit in ipsilateralen aktiven Kniewinkelreproduktionstest besser bei Trainierten als Untrainierten ist (Azevedo et al., 2021; Relph und Herrington, 2016b), wobei es keine Unterschiede im AAE zwischen dominantem und nicht-dominanten Bein in bei Untrainierten, jedoch bei Trainierten gab (Azevedo et al., 2021). Trainierte erzielten signifikant niedrigere AAE in einer ipsilateralen Reproduktionsaufgabe mit ihrem dominanten, als mit dem nicht-dominanten Bein (2.6° vs. 5.3°), für einen Zielwinkel von 45° , jedoch einen niedrigeren AAE auf der nicht-dominanten Seite für einen Zielwinkel von 20° (Azevedo et al., 2021). Training hat das Potenzial, die Anpassungen der Muskelspindeln positiv zu beeinflussen und Veränderungen im zentralen Nervensystem durch synaptische Verbindungen zu bewirken (Azevedo et al., 2021). Im Rahmen der experimentellen Studien (Publikation B, C & D) wiesen die Probanden eine hohe körperliche Aktivität auf (Tegner Score: 6 ± 2) (Tegner und Lysholm, 1985; Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023). Einige der Teilnehmer waren auch auf Wettkampfniveau aktiv (Tegner Score >8 ; $n=21$) und nur wenige haben ein geringes Aktivitätsniveau gehabt (Tegner Score <3 ; $n=5$) (Wieber, Preece et al., 2025). Diese Ergebnisse unterstreichen die Annahme, dass es Unterschiede in der propriozeptiven Fähigkeit bei sportlich aktiven Personen im Gegensatz zu Untrainierten gibt (Azevedo et al., 2021). Der Unterschied zwischen dem dominanten und nicht-dominanten Bein konnte auch in anderen funktionellen RTS Test nachgewiesen werden (Myers et al., 2014; Noyes et al., 1991; Zumstein et al., 2022). In den untersuchten Kraft- und Hop-Tests wurde gezeigt, dass, wenn die dominante Seite verletzt war ein höherer LSI (95%) und wenn die nicht-dominante Seite verletzt war ein niedriger LSI (80%) als Cutt-off Kriterium festgelegt werden sollte (Zumstein et al., 2022). Dies begründet sich darin, dass in diesen funktionellen Tests die dominante Seite die höheren Werte erzielte (Zumstein et al., 2022). Auf Grundlage der Studien des Promotionsprojekts zu Beindominanz in aktiven Kniewinkelreproduktionstest (Publikation C) lässt sich dies nicht eindeutig festlegen (Wieber, Preece et al., 2025).

Im Hinblick auf eine RTS Testbatterie innerhalb der Rehabilitation nach einer VKBR könnte eine Verletzungen an der dominanten Extremität die Seitendifferenzen zwischen beiden Beinen und den LSI beeinflussen. Die Literaturevidenz und die Ergebnisse der Studien des Promotionsprojekts lassen ableiten, dass im Gegensatz zu den Ergebnissen der Untersuchungen anderer funktioneller Test (Zumstein et al., 2022), tendenziell die nicht-dominante Seite niedrigere AAE aufwies (Azevedo et al., 2021; Strong et al., 2023; Wieber, Preece et al., 2025). Der fehlende Einbezug der Gliedmaßendominanz könnte daher, vor allem bei Sportlern, zu einer Über- oder Unterschätzung führen. Dies könnte wiederum eine zu frühe

Rückkehr zum Sport und ein erhöhtes Risiko für eine erneute Verletzung zur Folge haben (Wellsandt et al., 2017; Zumstein et al., 2022).

Abschließend zeigt sich, dass unabhängig davon, ob der Test passiv oder aktiv, ipsilateral oder kontralateral durchgeführt wurde es nicht generell zu signifikanten Unterschieden zwischen der dominanten und nicht-dominanten Seite kommt, es jedoch Unterschiede im AAE abhängig von der Dominanz der Seite bei sportlich aktiven Personen gibt (Azevedo et al., 2021; Relph und Herrington, 2016b). Es besteht kein Konsens über die Bestimmung der Beindominanz (Leung et al., 2021; van Melick et al., 2016), sodass Vergleiche mit anderen Studien, die über Unterschiede in der Beindominanz berichten, mit Vorsicht vorgenommen werden sollten (Busch et al., 2023). Ebenso zu beachten gilt, dass keiner der Teilnehmer der Studien B, C und D den aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest zuvor durchgeführt hat (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber, Reer et al., 2025; Wieber et al., 2023). Es ist schwierig, die Auswirkungen der Dominanz der Gliedmaßen bei einer Aufgabe zu bestimmen, mit der die Probanden nicht vertraut sind (van Melick et al., 2016). Beim Übertrag in die Praxis sollte jedoch beachtet werden, dass die AAE-Werte zwischen der dominanten und nicht-dominanten Beinseite nur um 1° (95%–KI: $[0,6^\circ; 1,5^\circ]$) bzw. um $0,5^\circ$ (95%–KI: $[1,15^\circ; 2,04^\circ]$) im Vergleich der linken und rechten Beinseite bei gesunden Erwachsenen abwichen. Die Effektgrößen waren für den Vergleich der Beindominanz gering ($d = .28$) (Wieber et al., 2023) und den rechts–links Vergleich im mittleren Effektbereich ($d = .50$) (Wieber, Reer et al., 2025). Laut aktueller Literatur könnte dieser geringe Unterschied zwischen Ziel- und Reproduktionswinkel klinisch nicht relevant sein (Busch et al., 2021; Gokeler et al., 2012). Klinische Erkenntnisse über die Auswirkungen der Höhe propriozeptiver Defizite auf die Kinematik und Kinetik menschlicher Bewegungen sind jedoch bislang noch unzureichend erforscht (Fleming et al., 2022).

5.4 Propriozeptive Fähigkeiten zwei Jahre nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion

Die Ergebnisse der Studie D zeigen, dass Patienten zwei Jahre nach einer VKB Rekonstruktion im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest keine signifikanten propriozeptiven Defizite im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe oder dem kontralateralen gesunden Bein aufweisen (Wieber, Reer et al., 2025). Damit wird die ursprüngliche Hypothese nicht bestätigt. Die Resultate deuten auf eine weitgehende Wiederherstellung der propriozeptiven Funktion hin, sowohl im Seitenvergleich als auch im Vergleich zu einer gesunden Kohorte (Wieber, Reer et al., 2025).

Bislang liegt nur eine vergleichbare Studie vor, die den JPS mithilfe eines aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests nach VKB Rekonstruktion untersucht hat. Hoshiba et

al. (2020) zeigten signifikante Unterschiede im AAE sechs Monate postoperativ, die nach zwölf Monaten nicht mehr nachweisbar waren (Hoshiba et al., 2020). Unsere Ergebnisse stimmen mit diesen Beobachtungen überein und deuten darauf hin, dass propriozeptive Defizite primär in der frühen Rehabilitationsphase auftreten. Der aktive kontralaterale Test scheint somit besonders sensitiv für Defizite in den ersten Monaten nach der Operation zu sein (Hoshiba et al., 2020).

Interessant ist die in mehreren Studien beobachtete Tendenz zur systematischen Überschätzung der Extension, unabhängig vom Verletzungsstatus (Fridén et al., 1996; Hoshiba et al., 2020; Worringham und Stelmach, 1985). Diese Überschätzung könnte durch eine verzerrte Wahrnehmung des Referenzwinkels entstehen, insbesondere bei Bewegungen gegen die Schwerkraft (Worringham und Stelmach, 1985). Es bleibt jedoch offen, ob die Überschätzung auf den wahrgenommenen Referenz- oder Reproduktionswinkel zurückzuführen ist. Eine mögliche Erklärung ist die verstärkte Muskelinnervation durch die Haltephase im Referenzbein, was in der Literatur als Einflussfaktor für eine veränderte Wahrnehmung beschrieben wird (Givoni et al., 2007; Vila-Chã et al., 2011). Dies könnte zu einer Fehlinterpretation der tatsächlichen Knieposition führen, insbesondere in den frühen Stadien nach der Operation (Hoshiba et al., 2020). Hoshiba et al. (2020) gehen davon aus, dass Sportler ihr VKB-rekonstruiertes Knie als weniger gebeugt wahrnehmen, was möglicherweise an sensorischen Defiziten nach der Rekonstruktion liegt (Busch et al., 2021; Hoshiba et al., 2020).

Des weiteren scheint es zu höheren AAE zu kommen, wenn das VKBR Knie den Referenzwinkel vorgibt (Hoshiba et al., 2020). Dieser Effekt konnte in Studie D nicht bestätigt werden. Die Unterschiede zwischen beiden Beinen (Referenzbein operiert vs. gesund) waren in der VKB Kohorte zwei Jahre nach VKBR nicht signifikant (Wieber, Reer et al., 2025). Eine aktuelle systematische Übersichtsarbeit zu aktiven ipsilateralen Kniewinkelreproduktionstest zeigte, dass die sensomotorische Funktion nach einer VKBR im Vergleich zu dem kontralateralen gesunden Bein oder einer gesunden Kontrollgruppe beeinträchtigt ist (Busch et al., 2021). Die inkludierten Studien, welche den JPS > 12 Monate nach der VKBR gemessen haben, zeigten uneinheitliche Ergebnisse. Somit können Veränderungen im AAE nicht nur zeitbasiert sein (Ageberg, 2002; Busch et al., 2021). Auch weitere Meta-Analysen bestätigen, dass es zu signifikanten Unterschieden im AAE im Vergleich zum gesunden Bein oder einer gesunden Kohorte kam (Fleming et al., 2022; Kim et al., 2017; Relph et al., 2014). Dabei zeigten Fleming et al. (2022), dass es 6–24 Monate nach einer VKBR zu signifikante höheren AAE im aktiven ipsilateralen Kniewinkelreproduktionstest im Vergleich zu einer gesunden Kohorte kommt ($SMD = 0.57^\circ$ (95%–KI: [0.27; 0.87])), dies sich jedoch nicht für konservativ behandelte Patienten bestätigen lässt ($SMD = 0.57^\circ$ (95%–KI: [-0.69; 1.84])) (Fleming et al., 2022). Die Ergebnisse von Fleming et al. (2022) verdeutlichen, dass ein chirurgischer Eingriff zwar die mechanische Stabilität wiederherstellen kann, jedoch mit einem funktionellen Ver-

lust der sensorischen Rückkopplung einhergeht (Fleming et al., 2022) und sensomotorische Aspekte in die postoperative Rehabilitation und Entscheidungsfindung zur Rückkehr in den Sport gezielt integriert werden sollten (Fleming et al., 2022). Allerdings lagen die durchschnittlichen Abweichungen meist unter 3° , was unterhalb der klinisch relevanten Schwelle von 5° liegt und im Bereich möglicher Messfehler (Busch et al., 2021; Gokeler et al., 2012; San Martín-Mohr et al., 2018). Die Relevanz dieser Differenzen für die funktionelle Belastbarkeit des Knies bleibt daher fraglich (Busch et al., 2021; Fleming et al., 2022; Gokeler et al., 2012; Kim et al., 2017; Relph et al., 2014). Gokeler et al. (2012) schlussfolgern, dass durch nur mittlere Korrelationen des JPS mit klinischen Parametern wie Kraft- oder Hop-Tests eine geringere klinische Relevanz besteht, da sie sich nicht konsistent auf funktionelle oder subjektive Ergebnisse von RTS Tests auswirken (Gokeler et al., 2012). Ein methodischer Aspekt, der in bisherigen Meta-Analysen unzureichend berücksichtigt wurde, betrifft die Körperposition während der Testung. Eigene Vorarbeiten konnten zeigen, dass sich sitzende und liegende Testpositionen signifikant auf das Ergebnis auswirken (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023, 2024).

Generell zeigen Meta-Analysen, dass JPS-Tests eine ausreichende Validität haben eine Knie nach VKBR von gesunden Knien, der selben Person oder einer Kontrollgruppe zu unterscheiden (Strong et al., 2022). Im speziellen zeigte sich der aktive ipsilaterale Kniewinkelreproduktionstest, dass VKBR Knie ($MD = 1.9^\circ$), als auch konservativ behandelte Knie ($MD = 1.1^\circ$) signifikant höhere AAE im Vergleich zum kontralateralen gesunden Bein (Strong et al., 2021). Insgesamt scheint eine VKB Rekonstruktion zu signifikant niedrigeren AAE als eine konservative Behandlung zu führen ($MD = 0.5^\circ$). Die Meta-Analysen zeigen, dass statt Referenzwerten einer gesunden Kontrollgruppe, auch das kontralaterale gesunde Bein als Referenz ausreicht (Relph et al., 2014; Strong et al., 2022). Andere Studien widersprechen dem und zeigen, dass es nach einer VKB Verletzung oder VKBR zu bilateralen Defiziten kommt (Jerosch und Prymka, 1996; Roberts et al., 2000), welche infolge von Reorganisationen im zentralen Nervensystem bedingt sein können, und damit beide Beine von einem propriozeptiven Defizit betroffen sind (Busch et al., 2021). Roberts et al. (2000) berichteten über signifikante propriozeptive Defizite nicht nur im operierten, sondern auch im gesunden kontralateralen Bein (Roberts et al., 2000). Diese Befunde werfen Fragen zur Eignung des gesunden Beins als Referenz auf, insbesondere bei länger zurückliegender Verletzung oder subklinischen Veränderungen.

In Studie D des Promotionsprojekts zeigten sich weder Unterschiede zwischen den Beinseiten, noch im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe (Wieber, Reer et al., 2025). Ein Grund für die in Studie D nicht signifikanten Unterschiede könnte sein, dass die Funktion der Muskelspindel innerhalb der ersten sechs Monate nach der Operation wiederhergestellt ist (Lepley et al., 2015) und dass diese den potenziellen Verlust von Propriozeptoren im VKBR durch die aktive Bewegung, und dadurch höhere Innervierung durch die Muskelspindelreize,

kompensieren (Strong et al., 2022). Die Patienten haben zum Zeitpunkt der Messung schon wieder sportliche Aktivitäten ausgeübt, daher könnten die nicht signifikanten Ergebnisse der Kniepropriozeption auf eine Aktivitätsabhängigkeit der Propriozeption beispielsweise durch Anpassungen des zentralen Nervensystems an die peripheren Signale von Muskelspindeln und Gelenkrezeptoren zurückzuführen sein (Ghaderi et al., 2021; Grinberg et al., 2022).

Alle Patienten der Studie D wurden arthroskopisch mit einem Semitendinosus-Autograft versorgt (Wieber, Reer et al., 2025). Laut San Martín-Mohr et al. (2018) bestehen keine relevanten Unterschiede in der sensomotorischen Kontrolle zwischen Graft-Typen oder Operationstechniken (San Martín-Mohr et al., 2018). Die frühzeitige Operation innerhalb eines Monats in Studie D könnte zusätzlich zu ausbleibenden signifikanten Unterschieden beigetragen haben (Wieber, Reer et al., 2025). Meta-Analysen zur Histologie des VKB zeigen einen positiven Zusammenhang zwischen der Abnahme der Mechanorezeptoren in den Überresten des VKB und der Zeit nach der VKBR (Kosy und Mandalia, 2018). Des Weiteren konnten Kosy und Mandalia (2018) in ihrem Übersichtsartikel zeigen, dass Mechanorezeptoren im VKB nach einer Ruptur rasch abnehmen, dass jedoch eine Reinnervation des Transplantats nach Rekonstruktion grundsätzlich möglich ist (Kosy und Mandalia, 2018). Eine Reinnervation von Mechanorezeptoren im Transplantatgewebe wurde etwa sechs Monate nach VKBR nachgewiesen (Ochi et al., 1999). Klinische Studien berichten über eine schrittweise Normalisierung der propriozeptiven Funktion im Verlauf des ersten postoperativen Jahres, insbesondere bei Verwendung von Autografts, welche bessere Voraussetzungen für Reinnervation bieten als Allografts (Fremerey et al., 2000; Kosy und Mandalia, 2018; Reider, Arcand, Diehl, Mroczek, Abulencia, Stroud et al., 2003). Darüber hinaus deuten funktionelle MRT-Studien auf zentrale neuroplastische Anpassungen hin, wie eine Reorganisation der kortikalen Aktivierungsmuster, die eine Kompensation peripherer Defizite begünstigen (Fleming et al., 2022; Kapreli et al., 2009). Die Kombination aus Bewegung, frühzeitiger Versorgung und aktiver Reha könnte den zentralen Reorganisationsprozess unterstützt haben. Insgesamt scheinen die Ergebnisse der Studie zu propriozeptiven Defiziten zwei Jahre nach VKBR gemessen durch JPS-Tests jedoch stark vom Testdesign abzuhängen (Busch et al., 2021).

5.5 Limitationen

Die im Rahmen dieses Promotionsprojekts durchgeführten Studien weisen diverse Limitationen auf, welche bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten. Im Fokus der experimentellen Studien (Publikation B, C & D) war es, ein praxisnahes, einfach umsetzbares und kostengünstiges Testverfahren zu entwickeln, um dessen Anwendung in der klinischen Praxis zu vereinfachen. Dies ging jedoch mit mehreren Einschränkungen einher. Es wurde keine standardisierte Bewegungsgeschwindigkeit zur Einstellung und Reproduktion des Kniewinkels festgelegt. Aufgrund des sogenannten Tau-Effekts könnte dies

zu Wahrnehmungsverzerrungen führen, da eine schnellere Bewegung die subjektive Positionswahrnehmung beeinflusst (Goble, 2010; Proske et al., 2014). Obwohl bekannt ist, dass die Bewegungsgeschwindigkeit die neuromuskuläre Aktivität und damit die resultierenden AAE-Werte beeinflussen kann (Elangovan et al., 2014; Proske und Gandevia, 2012), bemühte sich der Testleiter um die Einhaltung einer gleichmäßigen Ausführungsgeschwindigkeit über alle Versuche hinweg. Des weiteren beschränkt sich die Erfassung der Propriozeption in dieser Arbeit ausschließlich auf die bewusste Komponente. Unbewusste Prozesse, die insbesondere bei sportlicher Aktivität eine entscheidende Rolle spielen, wurden nicht berücksichtigt (Hillier et al., 2015). Auch wurde die Muskelaktivität während der Tests nicht erfasst, obwohl bekannt ist, dass sich die Viskosität eines Muskels in Bewegung verändert und dies die Messergebnisse beeinflussen könnte (Hillier et al., 2015). Hinzu kommt, dass der verwendete Test nicht ausschließlich die propriozeptiven Fähigkeiten misst. Mit zunehmender Komplexität der Bewegungsaufgabe steigt der Einfluss kognitiver Faktoren auf den Fehlerwert (Goble, 2010; Han et al., 2016). Auch psychologische Aspekte wie Motivation, Konzentration oder Testangst könnten das Messergebnis beeinflusst haben. Dies gilt insbesondere für Tests, die auf subjektiver Einschätzung basieren (Elangovan et al., 2014; Han et al., 2016; Hillier et al., 2015). Weitere potenzielle Einflussgrößen wie die Art der Sportart, Trainingsintensität, motorische Vorerfahrung oder das individuelle Aktivitätsniveau wurden nicht systematisch erhoben, könnten jedoch das propriozeptive Ergebnis beeinflusst haben (Azevedo et al., 2021; Relph und Herrington, 2016b). Das Geschlecht wurde im Promotionsprojekt nicht als Einflussgröße berücksichtigt, da der Fokus auf intraindividuellen Vergleichen lag und frühere Studien keinen signifikanten Zusammenhang zwischen Geschlecht und JPS nachweisen konnten (Busch et al., 2023). Auch hormonelle Schwankungen im Zyklus zeigten laut aktueller Forschung keinen relevanten Einfluss auf die propriozeptive Wahrnehmung (Roditi et al., 2024). Weitere Limitationen betreffen die fehlende Berücksichtigung interindividueller anatomischer Unterschiede, wie etwa in Muskelansatz oder Sehnenlänge, welche die Testresultate beeinflussen könnten (Han et al., 2016; Proske und Gandevia, 2012; Riemann und Lephart, 2002). Eine longitudinale Erhebung zur Verletzungs- und Rehabilitationsdokumentation konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, da der Zugang zu geeigneten Probanden mit VKBR eingeschränkt war. Auch potenzielle Lerneffekte im Rahmen wiederholter Testungen konnten aufgrund des gewählten Querschnittsdesigns nicht überprüft werden. In dieser Untersuchung wurde ausschließlich der AAE verwendet, da dieser in der Forschung und Praxis am häufigsten Anwendung findet (Goble, 2010; Hillier et al., 2015). Dennoch könnten sowohl der konstante als auch der variable Winkelreproduktionsfehler ergänzende Einblicke in die propriozeptive Leistungsfähigkeit geben (Clark et al., 2016; Elangovan et al., 2014). Zudem wurde lediglich ein einzelner Test zur Bewertung der Propriozeption eingesetzt. Eine Kombination verschiedener Methoden könnte ein differenzierteres Bild liefern. Die Tests wurden ausschließlich unter nicht-gewichtstragenden Bedingungen durchgeführt, wodurch die Übertragbarkeit auf funktionelle Bewegungssituationen begrenzt

ist. Aufgrund der eingesetzten Methodik konnte außerdem keine dreidimensionale Gelenkbewegung erfasst werden, was mögliche Messfehler in komplexeren Bewegungsebenen begünstigen könnte. Jedoch wird diese Limitation voraussichtlich nur minimale Auswirkungen gehabt haben, da die Aufgabe in einer nicht-gewichtstragenden Position durchgeführt wurde und willkürliche Bewegungen mit geringer Geschwindigkeit beinhaltete. Die Ergebnisse der randomisiert-kontrollierten Studie sollten mit Zurückhaltung interpretiert werden, da ein Stichprobenumfang von lediglich $n = 13$ Probanden zwei Jahre nach VKB-Rekonstruktion keine ausreichende Repräsentativität für die Gesamtpopulation gewährleistet.

5.6 Implikationen für weiteren Forschungsbedarf

Die vorliegende Dissertation befasste sich mit der Integration sensomotorischer Testverfahren, explizit dem aktiven Kniewinkelreproduktionstest, in den RTS Entscheidungsprozess nach VKBR. Durch eine systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse, sowie drei experimentellen Studien, wurden aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstests hinsichtlich ihrer Einflussfaktoren untersucht. Die Arbeit liefert wichtige empirische Aspekte für die standardisierte Erfassung propriozeptiver Fähigkeiten in der sportorthopädischen Diagnostik. Zugleich offenbaren sich zentrale Felder für weiterführende Forschung, die im Folgenden systematisch dargestellt werden.

Ein zentraler nächster Schritt besteht in der wissenschaftlichen Validierung des vorgeschlagenen Testprotokolls. Zwar zeigen die vorliegenden Daten, dass der Test durch Faktoren wie Körperposition, Vorer müdung oder Beindominanz beeinflusst wird, jedoch fehlen bislang belastbare Daten zu metrischer Absicherung des Verfahrens durch quantitativen Gütekriterien. Künftige Studien sollten sich daher gezielt der Untersuchung der Test-Retest-Reliabilität, der Interrater-Reliabilität sowie der Kriteriums- und Konstruktvalidität widmen. Die bisherige Literatur zur Reliabilität des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest zeigt eine breite Streuung der ICC zwischen 0.17 bis 0.81 abhängig von der Körperposition (Olsson et al., 2004). Dies ist ein Aspekt, der in dieser Dissertation vorerst unberücksichtigt blieb, aber für künftige Studien zum aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest von Bedeutung ist. Die Untersuchung der Test-Retest-Reliabilität und Validität in einer größeren Stichprobe unter Berücksichtigung der Körperposition, Bewegungsrichtung und Seitigkeit des Beins wäre hier empfehlenswert. Auch der Vergleich mit etablierten Verfahren wie dem ipsilateralen Kniewinkelreproduktionstest oder anderen Kohorten könnte zur Überprüfung der externen Validität beitragen. Ein Zusammenhang zu funktionellen Rehabilitationszielen wie Hop-, Kraft- oder Agilitätstest könnte ein weiterer Forschungsansatz sein. Die in dieser Dissertation erhobenen AAE basieren auf einer gesunden, sportlich aktiven Kohorte. Sie liefern somit erste Vergleichswerte, die als Ausgangspunkt für normative Daten dienen können. Allerdings ist diese Datenbasis begrenzt in ihrer Generalisierbarkeit. Zur Einordnung

individueller Testergebnisse ist die Etablierung normativer Vergleichswerte unabdingbar. In zukünftigen Studien sollte untersucht werden, welche AAE in gesunden Populationen unterschiedlicher Altersgruppen, Geschlechter, Leistungsniveaus und Sportarten typisch sind. Diese Datenbasis kann helfen individuelle Ergebnisse nicht nur im Seitenvergleich (z.B. LSI), sondern auch um populationsspezifischen Werte, wie beispielsweise von VKB Patienten interpretieren und werten zu können. In Studie D konnte gezeigt werden, dass sich der AAE bei Patienten zwei Jahre nach VKBR nicht signifikant von Werten einer gesunden Kohorte unterscheidet. Diese Erkenntnis kann nicht konsequent von bisherigen Studien zu propriozeptiven Defiziten nach VKBR über diesen Zeitraum hinweg beschrieben haben. Hieraus könnten sich neue Forschungsfragen ergeben. Sind bestehende Defizite tatsächlich vollständig kompensiert oder ist der aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstest in seinem aktuellen vorläufigen Entwurf nicht ausreichend sensitiv, um Unterschiede im Langzeitverlauf zu detektieren? Eine longitudinale Untersuchung mit mehreren Messzeitpunkten (z.B. präoperativ, 6 Monate, 12 Monate, 24 Monate post-operativ, vor dem RTS usw.) könnte helfen, den zeitlichen Verlauf der propriozeptiven Regeneration systematisch abzubilden. Ein weiterer Forschungsschwerpunkt liegt in der praktischen Integration des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest in bestehende RTS Testbatterien. Es stellt sich die Frage, ob durch die Kombination von motorischen Parametern (z.B. Kraft, Sprungkraft, Agilität) mit sensomotorischen Variablen eine bessere Prädiktion für eine sichere Rückkehr zum Sport erreicht werden kann. Hierbei sollte in klinischen Studien untersucht werden, ob Sportler nach einer VKBR, die propriozeptiv auffällige Werte zeigen, ein signifikant erhöhtes Risiko für Re-Rupturen aufweisen. Darüber hinaus sollten einfache und zeiteffiziente Screening-Versionen des Tests entwickelt und validiert werden, um die Umsetzbarkeit in der klinischen Praxis zu gewährleisten. Das im Promotionsprojekt vorgestellte Messprotokoll könnte dabei als eine erste Referenz dienen. Hier sollte jedoch zusätzlich die Auswirkung unterschiedlicher Referenzwinkel und der Bewegungsgeschwindigkeit mit überprüft werden, da sich in der Literatur zeigte, dass der AAE in aktiven Kniewinkelreproduktionstest hiervon beeinflusst wird (Clark et al., 2016; Da Silva et al., 2021; Ju et al., 2010; Marks, 1994; Proske et al., 2000, 2014). Aufgrund des apparativen Aufwands in der Durchführung bisheriger Kniewinkelreproduktionstest besteht eine Grenze seiner breiten Anwendbarkeit (Han et al., 2016; Hillier et al., 2015). Im Promotionsprojekt wurde sich aufgrund des Ziels nach breiter Anwendbarkeit in der Praxis für ein digitales Goniometer entschieden. Die manuelle Anbringung am Patienten birgt jedoch einige Fehlerquellen bei nicht routinierter Anwendung. Ein zukunftsgerichteter Forschungszweig ergibt sich aus der Möglichkeit, den Test durch moderne Technologien zu erweitern. Der Einsatz tragbarer Bewegungssensoren könnte die Genauigkeit, Effizienz und Anwendbarkeit des Tests gegebenenfalls verbessern. Studien sollten sich damit befassen, wie sensorbasierte Lösungen in den Test integriert werden können, welche Auswirkungen dies auf Messqualität und Zeitaufwand hat, und ob der Test dadurch in der Fläche, wie etwa in ambulanten Praxen oder im Feld, einsetzbar wird. In Kombination mit der Weiter-

entwicklung KI-gestützter Auswertung könnten sich hier Möglichkeiten für automatisierte Analysen und individuelle Therapieempfehlungen ergeben. Auf Grundlage dieser weiteren Forschungsausblicke, wird man dann gesicherter entscheiden können, ob der aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstest mittelfristig ein fester Bestandteil evidenzbasierter RTS Testbatterien werden kann.

5.7 Praxiserkenntnis

Die vorliegenden Untersuchungen unterstreichen die Auswirkung unterschiedlicher personeneinzelabhängiger Einflüsse auf aktive Kniewinkelreproduktionstests. Der aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstest könnte sich dabei unter Berücksichtigung der Körperposition, der Beindominanz und der Vorermüdung, im Hinblick weiterer Forschung, als geeignetes sensomotorisches Testverfahren zur Integration in zukünftige RTS Testbatterien nach VKBR erweisen.

Ein zentrales Ergebnis dieser Arbeit betrifft die Körperposition, in welcher der Test durchgeführt wird. Es zeigte sich, dass der AAE abhängig von der Körperposition in Bauchlage oder in der sitzenden Position ist (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023). Auf Grundlage der Ergebnisse lässt sich aber noch kein Rückschluss auf eine favorisierte Körperposition ziehen, zeigt jedoch, dass der Anwender (Sportwissenschaftler, Orthopäden, Physiotherapeuten usw.) sich für eine Position in Verlaufsdiagnostiken und im interindividuellen Vergleich entscheiden sollte. Bezüglich der Bewegungsrichtung (Flexion vs. Extension) ergaben sich hingegen keine signifikanten Unterschiede im AAE (Wieber, Preece et al., 2025; Wieber et al., 2023). Dies spricht für eine gewisse Robustheit des Verfahrens gegenüber diesem Faktor und erlaubt in der Anwendung eine flexible Wahl der Bewegungsrichtung. Von zusätzlicher Bedeutung ist auch der Einfluss der Vorermüdung. Die durchgeführte Meta-Analyse zeigte, dass Ermüdung zu einer signifikanten Erhöhung des AAE führt. Dies ist klinisch relevant, da propriozeptive Defizite unter Ermüdung häufiger auftreten, aber auch zu Fehldiagnosen führen können. Für eine valide Durchführung des Tests ist daher sicherzustellen, dass dieser unter ermüdungsfreien Bedingungen erfolgt und nach einer Ermüdung wiederholt wird. Eine moderate vorherige Aktivierung, wie etwa durch ein kurzes Durchbewegen, zur Reduktion thixotroper Effekte kann hingegen förderlich sein (Proske et al., 2014). Ein weiterer entscheidender Einflussfaktor ist die Beindominanz (Azevedo et al., 2021; Galamb et al., 2018; Relph und Herrington, 2016a; Wieber, Preece et al., 2025). Die experimentellen Untersuchungen zeigen, dass das dominante Referenzbein eine geringere Reproduktionsgenauigkeit aufweist als das nicht-dominante Bein (Wieber, Preece et al., 2025). Dies hat direkte Implikationen für die Auswertung und Interpretation. Die Beindominanz sollte systematisch erfasst und dokumentiert werden. Zudem sollte bei bilateralen Vergleichen (z.B. zur Berechnung des LSI) berücksichtigt werden, ob die dominante oder nicht-dominante Seite betroffen ist.

Die Anwendung einheitlicher LSI–Cut–off–Werte ohne Berücksichtigung der Beindominanz könnte zu Fehlinterpretationen und einer fehlerhaften Freigabe zum Sport führen.

Die Anwender des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest sollten sich bewusst sein, dass die Testbedingungen und der Ermüdungsgrad des Patienten die Ergebnisse beeinflussen können und dass ein direkter Vergleich von Ergebnissen, die mit verschiedenen Testprotokollen erzielt wurden, nicht empfohlen wird. Das Testprotokoll sollte mit Angaben zur Körperposition, Bewegungsrichtung und Werten für beide Beinseiten dokumentiert und in der sportwissenschaftlichen Praxis konsequent angewendet werden. Die Integration des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests in bestehende RTS Testbatterien bietet eine sinnvolle Erweiterung zur Erfassung propriozeptiver Fähigkeiten. Sie kann die diagnostische Validität erhöhen, eine sicherere Rückkehr in den Sport ermöglichen und somit das Risiko für erneute Verletzungen senken.

6 Schlussfolgerungen

Ziel der Dissertation war es, durch systematische Literaturrecherche und empirische Untersuchungen die Faktoren zu identifizieren und zu analysieren, die den AAE in aktiven Kniewinkelreproduktionstest beeinflussen, um wissenschaftlich fundierte Grundlagen für die Standardisierung und Integration dieses sensomotorischen Tests zur Beurteilung propriozeptiver Fähigkeiten in Return-to-Sport Testbatterien in der klinischen Praxis zu schaffen. Als Integration in RTS Testbatterien geeignetstes Testverfahren ergab sich, aus der in Publikation A durchgeführten Übersichtsarbeit, der aktive kontralaterale Kniewinkelreproduktionstest. Die bisherigen empirischen Studien des Promotionsprojekts zeigen, dass die Körperorientierung einen erheblichen Einfluss auf den Winkelreproduktionsfehler des Kniewinkels hat, insbesondere wenn die dominante Extremität als Referenzbein gewählt wird. Zwei Jahre nach einer vorderen Kreuzbandrekonstruktion konnte bei den Patienten kein propriozeptives Defizit nachgewiesen werden, unabhängig davon, ob das gesunde oder operierte Bein den Kniewinkel reproduziert oder vorgibt. Erstmals konnte in einem zusammenhängenden experimentellen Studiendesign gezeigt werden, dass sowohl die Körperposition als auch die Beindominanz signifikant den AAE im aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest beeinflussen, die Bewegungsrichtung des Beins jedoch keinen Einfluss auf den AAE hat, unabhängig von der Dominanz des Beins und der Körperposition. Ergänzend liefert die Meta-Analyse erstmals Evidenz zur Wirkung von peripherer und zentraler Vorerrmüdung auf die propriozeptive Genauigkeit. Die vorliegenden Ergebnisse leisten somit einen originären Beitrag zur sportwissenschaftlichen Forschung. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für ein standardisiertes Testprotokoll zur Überprüfung sensomotorischer Komponenten, das als Erweiterung in bestehende RTS Testbatterien unter Aspekten weiterer Forschung integriert werden kann. Zusammenfassend wird Anwendern empfohlen, standardisierte Testverfahren zu verwenden und die Ergebnisse kritisch zu analysieren. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse in Bauchlage und im Sitzen wird nicht empfohlen. Der AAE scheint hierbei unabhängig von der Wahl des Referenzbeins zwei Jahre nach VKB Rekonstruktion mit der Semitendinosus-Sehne zu sein. Die Dominanz der Referenzgliedmaße könnte jedoch beim Vergleich von gesunden und verletzten Knien von Bedeutung sein, bleibt jedoch noch im Ausblick weiterführender Forschungsprojekte. Die Anwender sollten sich bewusst sein, dass die Testbedingungen und der Ermüdungsgrad des Patienten die Ergebnisse beeinflussen können und dass ein direkter Vergleich von Ergebnissen, die mit verschiedenen Testprotokollen erzielt wurden, nicht empfohlen wird. Das Testprotokoll sollte mit Angaben zur Körperposition, Bewegungsrichtung und Werten für beide Beinseiten dokumentiert und in der sportwissenschaftlichen Praxis konsequent angewendet werden. Einen erster Entwurf der Integration eines sensomotorischen Testverfahrens durch den aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest in RTS Testbatterien konnte dieses Promotionsprojekt somit abschließend als pars pro toto weiterer ergänzender Forschungsansätze liefern.

Literatur

- Abrams, G. D., Harris, J. D., Gupta, A. K., McCormick, F. M., Bush-Joseph, C. A., Verma, N. N., Cole, B. J., & Bach, B. R. (2014). Functional Performance Testing After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 2(1), 232–259. <https://doi.org/10.1177/2325967113518305>
- Adachi, N., Ochi, M., Uchio, Y., Iwasa, J., Ryoike, K., & Kuriwaka, M. (2002). Mechanoreceptors in the anterior cruciate ligament contribute to the joint position sense. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 73(3), 330–334. <https://doi.org/doi.org/10.1080/000164702320155356>
- Ageberg, E. (2002). Consequences of a ligament injury on neuromuscular function and relevance to rehabilitation—using the anterior cruciate ligament-injured knee as model. *Journal of electromyography and kinesiology*, 12(3), 205–212. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(02\)00022-6](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(02)00022-6)
- Alibiglou, L., López-Ortiz, C., Walter, C. B., & Brown, D. A. (2009). Bilateral limb phase relationship and its potential to alter muscle activity phasing during locomotion. *Journal of neurophysiology*, 102(5), 2856–2865. <https://doi.org/10.1152/jn.00211.2009>
- Allen, T. J., Ansems, G. E., & Proske, U. (2007). Effects of muscle conditioning on position sense at the human forearm during loading or fatigue of elbow flexors and the role of the sense of effort. *The Journal of physiology*, 580(2), 423–434. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.125161>
- Andrade, R., Pereira, R., van Cingel, R., Staal, J. B., & Espregueira-Mendes, J. (2020). How should clinicians rehabilitate patients after ACL reconstruction? A systematic review of clinical practice guidelines (CPGs) with a focus on quality appraisal (AGREE II). *British journal of sports medicine*, 54(9), 512–519. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-100310>
- Ardern, C. L., Glasgow, P., Schneiders, A., Witvrouw, E., Clarsen, B., Cools, A., Gojanovic, B., Griffin, S., Khan, K. M., Moksnes, H., Mutch, S. A., Phillips, N., Reurink, G., Sadler, R., Silbernagel, K. G., Thorborg, K., Wangensteen, A., Wilk, K. E., & Bizzini, M. (2016). 2016 Consensus statement on return to sport from the First World Congress in Sports Physical Therapy, Bern. *British journal of sports medicine*, 50(14), 853–864. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096278>
- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., & Webster, K. E. (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. *British journal of sports medicine*, 48(21), 1543–1552. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093398>

- Ardern, C. L., Taylor, N. F., Feller, J. A., Whitehead, T. S., & Webster, K. E. (2013). Psychological responses matter in returning to preinjury level of sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *The American journal of sports medicine*, 41(7), 1549–1558. <https://doi.org/10.1177/0363546513489284>
- Azevedo, J., Rodrigues, S., & Seixas, A. (2021). The influence of sports practice, dominance and gender on the knee joint position sense. *The Knee*, 28(1), 117–123. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2020.11.013>
- Banks, R. (2006). An allometric analysis of the number of muscle spindles in mammalian skeletal muscles. *Journal of anatomy*, 208(6), 753–768. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2006.00558.x>
- Barber-Westin, S. D., & Noyes, F. R. (2011). Factors used to determine return to unrestricted sports activities after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy: the journal of arthroscopic & related surgery*, 27(12), 1697–1705. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2011.09.009>
- Barke, A., Wieber, J., Häußner, J., & Catalá-Lehnen, P. (2021). Evaluation der Hamburger Return to Sports-Testbatterie nach ambulanter VKB-Ersatz-Operation. *Sports Orthopaedics and Traumatology*, 37(2), 185. <https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2021.04.028>
- Barrack, R. L., Skinner, H. B., & Buckley, S. L. (1989). Proprioception in the anterior cruciate deficient knee. *The American journal of sports medicine*, 17(1), 1–6. <https://doi.org/10.1177/036354658901700101>
- Barrett, D. (1991). Proprioception and function after anterior cruciate reconstruction. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, 73(5), 833–837. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.73B5.1894677>
- Bays, P. M., & Wolpert, D. M. (2007). Computational principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability. *The Journal of physiology*, 578(2), 387–396. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.120121>
- Bell, D. R., Smith, M. D., Pennuto, A. P., Stiffler, M. R., & Olson, M. E. (2014). Jump-Landing Mechanics After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Landing Error Scoring System Study. *Journal of Athletic Training*, 49(4), 435–441. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-49.3.21>
- Birmingham, T. B., Kramer, J. F., Inglis, J. T., Mooney, C. A., Murray, L. J., Fowler, P. J., & Kirkley, S. (1998). Effect of a neoprene sleeve on knee joint position sense during sitting open kinetic chain and supine closed kinetic chain tests. *The American journal of sports medicine*, 26(4), 562–566. <https://doi.org/10.1177/03635465980260041601>
- Bram, J. T., Magee, L. C., Mehta, N. N., Patel, N. M., & Ganley, T. J. (2021). Anterior cruciate ligament injury incidence in adolescent athletes: a systematic review and meta-analysis. *The American journal of sports medicine*, 49(7), 1962–1972. <https://doi.org/10.1177/0363546520959619>

- Bullock-Saxton, J., Wong, W., & Hogan, N. (2001). The influence of age on weight-bearing joint reposition sense of the knee. *Experimental Brain Research*, 136(3), 400–406. <https://doi.org/10.1007/s002210000595>
- Busch, A., Bangerter, C., Mayer, F., & Baur, H. (2023). Reliability of the active knee joint position sense test and influence of limb dominance and sex. *Scientific Reports*, 13(1), 152. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26932-2>
- Busch, A., Blasimann, A., Mayer, F., & Baur, H. (2021). Alterations in sensorimotor function after ACL reconstruction during active joint position sense testing. A systematic review. *PloS one*, 16(6), e0253503. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0253503>
- Cairns, S. P. (2006). Lactic acid and exercise performance: culprit or friend? *Sports medicine*, 36, 279–291. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636040-00001>
- Cameron, M., & Adams, R. (2003). Kicking footedness and movement discrimination by elite Australian Rules footballers. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 6(3), 266–274. [https://doi.org/10.1016/s1440-2440\(03\)80020-8](https://doi.org/10.1016/s1440-2440(03)80020-8)
- Cavanaugh, J. T., & Powers, M. (2017). ACL rehabilitation progression: where are we now? *Current reviews in musculoskeletal medicine*, 10(3), 289–296. <https://doi.org/10.1007/s12178-017-9426-3>
- Clark, N. C., Akins, J. S., Heebner, N. R., Sell, T. C., Abt, J. P., Lovalekar, M., & Lephart, S. M. (2016). Reliability and measurement precision of concentric-to-isometric and eccentric-to-isometric knee active joint position sense tests in uninjured physically active adults. *Physical Therapy in Sport*, 18(1), 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2015.06.005>
- Co, F. H., Skinner, H. B., & Cannon, W. D. (1993). Effect of reconstruction of the anterior cruciate ligament on proprioception of the knee and the heel strike transient. *Journal of orthopaedic research*, 11(5), 696–704. <https://doi.org/10.1002/jor.1100110512>
- Collins, N. J., Misra, D., Felson, D. T., Crossley, K. M., & Roos, E. M. (2011). Measures of knee function: International Knee Documentation Committee (IKDC) Subjective Knee Evaluation Form, Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS), Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score Physical Function Short Form (KOOS-PS), Knee Outcome Survey Activities of Daily Living Scale (KOS-ADL), Lysholm Knee Scoring Scale, Oxford Knee Score (OKS), Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index (WOMAC), Activity Rating Scale (ARS), and Tegner Activity Score (TAS). *Arthritis care & research*, 63(11), 208–228. <https://doi.org/10.1002/acr.20632>
- Cronström, A., Tengman, E., & Häger, C. K. (2023). Return to sports: a risky business? A systematic review with meta-analysis of risk factors for graft rupture following ACL reconstruction. *Sports medicine*, 53(1), 91–110. <https://doi.org/10.1007/s40279-022-01747-3>

- Cug, M., Wikstrom, E. A., Golshaei, B., & Kirazci, S. (2016). The effects of sex, limb dominance, and soccer participation on knee proprioception and dynamic postural control. *Journal of sport rehabilitation*, 25(1), 31–39. <https://doi.org/10.1123/jsr.2014-0250>
- Da Silva, F., Monjo, F., Zghal, F., Chorin, F., Guérin, O., & Colson, S. S. (2021). Altered position sense after submaximal eccentric exercise-inducing central fatigue. *Medicine and science in sports and exercise*, 53(1), 218–227. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002444>
- Da Silva, F., Monjo, F., Gioda, J., Blain, G. M., Piponnier, E., Corcelle, B., & Colson, S. S. (2023). Knee position sense and knee flexor neuromuscular function are similarly altered after two submaximal eccentric bouts. *European Journal of Applied Physiology*, 123(2), 311–323. <https://doi.org/10.1007/s00421-022-05063-6>
- Dassonville, P. (1995). Haptic localization and the internal representation of the hand in space. *Experimental brain research*, 106(3), 434–448. <https://doi.org/10.1007/BF00231066>
- Davey, C. (1973). Physical exertion and mental performance. *Ergonomics*, 16(5), 595–599. <https://doi.org/10.1080/00140137308924550>
- Dhillon, M. S., Bali, K., & Prabhakar, S. (2011). Proprioception in anterior cruciate ligament deficient knees and its relevance in anterior cruciate ligament reconstruction. *Indian journal of orthopaedics*, 45(4), 294–300. <https://doi.org/10.4103/0019-5413.80320>
- Djupsjöbacka, M., Johansson, H., Bergenheim, M., & Wenngren, B.-I. (1995). Influences on the γ -muscle spindle system from muscle afferents stimulated by increased intramuscular concentrations of bradykinin and 5-HT. *Neuroscience research*, 22(3), 325–333. [https://doi.org/10.1016/0168-0102\(95\)00906-a](https://doi.org/10.1016/0168-0102(95)00906-a)
- Elangovan, N., Herrmann, A., & Konczak, J. (2014). Assessing proprioceptive function: evaluating joint position matching methods against psychophysical thresholds. *Physical therapy*, 94(4), 553–561. <https://doi.org/10.2522/ptj.20130103>
- Flagg, K. Y., Karavatas, S. G., Thompson Jr, S., & Bennett, C. (2019). Current criteria for return to play after anterior cruciate ligament reconstruction: an evidence-based literature review. *Annals of Translational Medicine*, 7(7). <https://doi.org/10.21037/atm.2019.08.23>
- Fleming, J. D., Ritzmann, R., & Centner, C. (2022). Effect of an anterior cruciate ligament rupture on knee proprioception within 2 Years after conservative and operative treatment: A systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine*, 52(5), 1091–1102. <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01600-z>
- Fremerey, R., Lobenhoffer, P., Zeichen, J., Skutnek, M., Bosch, U., & Tscherne, H. (2000). Proprioception after rehabilitation and reconstruction in knees with deficiency of the anterior cruciate ligament: a prospective, longitudinal study. *The Journal of bone*

- and joint surgery. *British volume*, 82(6), 801–806. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.82b6.10306>
- Fridén, T., Roberts, D., Zätterström, R., Lindstrand, A., & Moritz, U. (1996). Proprioception in the nearly extended knee: measurements of position and movement in healthy individuals and in symptomatic anterior cruciate ligament injured patients. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 4(4), 217–224. <https://doi.org/10.1007/BF01567966>
- Galamb, K., Szilágyi, B., Magyar, O., Hortobágyi, T., Nagatomi, R., Váczi, M., & Négyesi, J. (2018). Effects of side-dominance on knee joint proprioceptive target-matching asymmetries. *Physiology international*, 105(3), 257–265. <https://doi.org/10.1556/2060.105.2018.3.22>
- Gear, W. S. (2011). Effect of different levels of localized muscle fatigue on knee position sense. *Journal of sports science & medicine*, 10(4), 725.
- Gervasio, S., Voigt, M., Kersting, U. G., Farina, D., Sinkjær, T., & Mrachacz-Kersting, N. (2017). Sensory feedback in interlimb coordination: contralateral afferent contribution to the short-latency crossed response during human walking. *PloS one*, 12(1), e0168557. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168557>
- Ghaderi, M., Letafatkar, A., Thomas, A. C., & Keyhani, S. (2021). Effects of a neuromuscular training program using external focus attention cues in male athletes with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized clinical trial. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 13(1), 49. <https://doi.org/10.1186/s13102-021-00275-3>
- Givoni, N. J., Pham, T., Allen, T. J., & Proske, U. (2007). The effect of quadriceps muscle fatigue on position matching at the knee. *The Journal of physiology*, 584(1), 111–119. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2007.134411>
- Goble, D. J. (2010). Proprioceptive Acuity Assessment Via Joint Position Matching: From Basic Science to General Practice. *Physical Therapy*, 90(8), 1176–1184. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090399>
- Goetschius, J., Kuenze, C. M., Saliba, S., & Hart, J. M. (2013). Reposition acuity and postural control after exercise in anterior cruciate ligament reconstructed knees. *Med Sci Sports Exerc*, 45(12), 2314–2321. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31829bc6ae>
- Gokeler, A., Benjaminse, A., Hewett, T. E., Lephart, S. M., Engabretsen, L., Ageberg, E., Engelhardt, M., Arnold, M. P., Postema, K., Otten, E., et al. (2012). Proprioceptive deficits after ACL injury: are they clinically relevant? *British journal of sports medicine*, 46(3), 180–192. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2010.082578>
- Gokeler, A., Dingenen, B., & Hewett, T. E. (2022). Rehabilitation and return to sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction: where are we in 2022? *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 4(1), 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.10.025>

- Gokeler, A., Welling, W., Benjaminse, A., Lemmink, K., Seil, R., & Zaffagnini, S. (2017). A critical analysis of limb symmetry indices of hop tests in athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: a case control study. *Orthopaedics & traumatology: surgery & research*, 103(6), 947–951. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2017.02.015>
- Gokeler, A., Welling, W., Zaffagnini, S., Seil, R., & Padua, D. (2017). Development of a test battery to enhance safe return to sports after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy*, 25(1), 192–199. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4246-3>
- Grinberg, A., Strong, A., & Häger, C. K. (2022). Does a knee joint position sense test make functional sense? Comparison to an obstacle clearance test following anterior cruciate ligament injury. *Physical Therapy in Sport*, 55, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2022.05.004>
- Grindem, H., Snyder-Mackler, L., Moksnes, H., Engebretsen, L., & Risberg, M. A. (2016). Simple decision rules can reduce reinjury risk by 84% after ACL reconstruction: the Delaware-Oslo ACL cohort study. *British journal of sports medicine*, 50(13), 804–808. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-096031>
- Haggerty, A. L., Simon, J. E., Grooms, D. R., & Russell, J. A. (2021). Effect of Load, Angle, and Contraction Type on Clinically Assessed Knee Joint Position Sense. *Journal of Sport Rehabilitation*, 30(8), 1166–1171. <https://doi.org/10.1123/jsr.2020-0552>
- Han, J., Anson, J., Waddington, G., & Adams, R. (2013). Proprioceptive performance of bilateral upper and lower limb joints: side-general and site-specific effects. *Experimental brain research*, 226(3), 313–323. <https://doi.org/10.1007/s00221-013-3437-0>
- Han, J., Waddington, G., Adams, R., Anson, J., & Liu, Y. (2016). Assessing proprioception: a critical review of methods. *Journal of Sport and Health Science*, 5(1), 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.10.004>
- Hanzlíková, I., Richards, J., Hébert-Losier, K., & Smékal, D. (2019). The effect of proprioceptive knee bracing on knee stability after anterior cruciate ligament reconstruction. *Gait Posture*, 67(1), 242–247. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.10.026>
- Herbst, E., Hoser, C., Hildebrandt, C., Raschner, C., Hepperger, C., Pointner, H., & Fink, C. (2015). Functional assessments for decision-making regarding return to sports following ACL reconstruction. Part II: clinical application of a new test battery. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 23(5), 1283–1291. <https://doi.org/10.1007/s00167-015-3546-3>
- Hillier, S., Immink, M., & Thewlis, D. (2015). Assessing proprioception: a systematic review of possibilities. *Neurorehabilitation and neural repair*, 29(10), 933–949. <https://doi.org/10.1177/1545968315573055>
- Hoshiba, T., Nakata, H., Saho, Y., Kanosue, K., & Fukubayashi, T. (2020). Comparison of the position-matching and position-reproducing tasks to detect deficits in knee

- position sense after reconstruction of the anterior cruciate ligament. *Journal of sport rehabilitation*, 29(1), 87–92. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0275>
- Jerosch, J., & Prymka, M. (1995). Propriozeptive Fähigkeiten des gesunden Kniegelenks: Beeinflussung durch eine elastische Bandage. *Sportverletzung & Sportschaden*, 9(3), 72–76. <https://doi.org/10.1055/s-2007-993428>
- Jerosch, J., & Prymka, M. (1996). Propriozeptive Fähigkeiten im Bereich des Kniegelenks bei Patienten nach vorderer Kreuzbandruptur. *Der Unfallchirurg*, 99(11), 861–868. <https://doi.org/10.1007/s001130050067>
- Johansson, H., Djupsjöbacka, M., & Sjölander, P. (1993). Influences on the γ -muscle spindle system from muscle afferents stimulated by KCl and lactic acid. *Neuroscience research*, 16(1), 49–57. [https://doi.org/10.1016/0168-0102\(93\)90008-e](https://doi.org/10.1016/0168-0102(93)90008-e)
- Ju, Y.-Y., Wang, C.-W., & Cheng, H.-Y. K. (2010). Effects of active fatiguing movement versus passive repetitive movement on knee proprioception. *Clinical biomechanics*, 25(7), 708–712. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2010.04.017>
- Kaplan, F. S., Nixon, J. E., Reitz, M., Rindfleish, L., & Tucker, J. (1985). Age-related changes in proprioception and sensation of joint position. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 56(1), 72–74. <https://doi.org/10.3109/17453678508992984>
- Kapreli, E., Athanasopoulos, S., Gliatis, J., Papathanasiou, M., Peeters, R., Strimpakos, N., Van Hecke, P., Gouliamos, A., & Sunaert, S. (2009). Anterior cruciate ligament deficiency causes brain plasticity: a functional MRI study. *The American journal of sports medicine*, 37(12), 2419–2426. <https://doi.org/10.1177/0363546509343201>
- Keays, S. L., Mellifont, D. B., Keays, A. C., Stuelcken, M. C., Lovell, D. I., & Sayers, M. G. (2022). Long-term return to sports after anterior cruciate ligament injury: reconstruction vs no reconstruction—a comparison of 2 case series. *The American Journal of Sports Medicine*, 50(4), 912–921. <https://doi.org/10.1177/03635465211073152>
- Kim, H.-J., Lee, J.-H., & Lee, D.-H. (2017). Proprioception in patients with anterior cruciate ligament tears: a meta-analysis comparing injured and uninjured limbs. *The American journal of sports medicine*, 45(12), 2916–2922. <https://doi.org/10.1177/0363546516682231>
- Konishi, Y., Fukubayashi, T., & Takeshita, D. (2002). Possible mechanism of quadriceps femoris weakness in patients with ruptured anterior cruciate ligament. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(9), 1414–1418. <https://doi.org/10.1097/00005768-200209000-00003>
- Kosy, J. D., & Mandalia, V. I. (2018). Anterior cruciate ligament mechanoreceptors and their potential importance in remnant-preserving reconstruction: a review of basic science and clinical findings. *The journal of knee surgery*, 31(08), 736–746. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1608941>
- Kotsifaki, A., Korakakis, V., Whiteley, R., Van Rossom, S., & Jonkers, I. (2020). Measuring only hop distance during single leg hop testing is insufficient to detect deficits in knee

- function after ACL reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 54(3), 139–153. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2018-099918>
- Krosshaug, T., Nakamae, A., Boden, B. P., Engebretsen, L., Smith, G., Slauterbeck, J. R., Hewett, T. E., & Bahr, R. (2007). Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *The American journal of sports medicine*, 35(3), 359–367. <https://doi.org/doi.org/10.1177/0363546506293899>
- Kyritsis, P., Bahr, R., Landreau, P., Miladi, R., & Witvrouw, E. (2016). Likelihood of ACL graft rupture: not meeting six clinical discharge criteria before return to sport is associated with a four times greater risk of rupture. *British journal of sports medicine*, 50(15), 946–951. <https://doi.org/DOI:10.1136/bjsports-2015-095908>
- Laboute, E., Verhaeghe, E., Ucay, O., & Minden, A. (2019). Evaluation kinaesthetic proprioceptive deficit after knee anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction in athletes. *Journal of experimental orthopaedics*, 6(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s40634-019-0174-8>
- Lee, Y., & Lim, C. (2023). Reference value of knee position sense in weight-bearing and non-weight-bearing conditions. *Knee Surgery & Related Research*, 35(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s43019-023-00199-x>
- Lephart, S. M., Pincivero, D. M., Giraudo, J. L., & Fu, F. H. (1997). The role of proprioception in the management and rehabilitation of athletic injuries. *The American journal of sports medicine*, 25(1), 130–137. <https://doi.org/10.1177/036354659702500126>
- Lephart, S., & Fu, F. (1995). The role of proprioception in the treatment of sports injuries. *Sports Exerc Inj*, 1(2), 96–102. <https://doi.org/10.1177/036354659702500126>
- Lepley, A., Gribble, P., Thomas, A., Tevald, M., Sohn, D., & Pietrosimone, B. (2015). Quadriceps neural alterations in anterior cruciate ligament reconstructed patients: a 6-month longitudinal investigation. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 25(6), 828–839. <https://doi.org/10.1111/sms.12435>
- Leung, A., Greenberg, E., Dyke, J., Lawrence, J. T., & Ganley, T. (2021). Defining limb dominance: A comparison of performance-based and Self-selected Measures. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 9(7), 2325967121S00052. <https://doi.org/10.1177/2325967121S00052>
- Liu, J. Z., Kubo, M., Aoki, H., Liu, N., Kou, P. H., & Suzuki, T. (1995). A study on the difference of human sensation evaluation to whole-body vibration in sitting and lying postures. *Applied human science : journal of physiological anthropology*, 14(5), 219–226. <https://doi.org/10.2114/ahs.14.219>
- Logerstedt, D., Di Stasi, S., Grindem, H., Lynch, A., Eitzen, I., Engebretsen, L., Risberg, M. A., Axe, M. J., & Snyder-Mackler, L. (2014). Self-reported knee function can identify athletes who fail return-to-activity criteria up to 1 year after anterior cruciate

- ligament reconstruction: a Delaware-Oslo ACL cohort study. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 44(12), 914–923. <https://doi.org/10.2519/jospt.2014.4852>
- Lokhande, M. V., Shetye, J., Mehta, A., & Deo, M. V. (2013). Assessment of knee joint proprioception in weight bearing and in non-weight bearing positions in normal subjects. *Journal of Krishna Institute of Medical Sciences University*, 2(2), 94–101.
- Macefield, V. G., Norcliffe-Kaufmann, L., Goulding, N., Palma, J.-A., Fuente Mora, C., & Kaufmann, H. (2016). Increasing cutaneous afferent feedback improves proprioceptive accuracy at the knee in patients with sensory ataxia. *Journal of Neurophysiology*, 115(2), 711–716. <https://doi.org/10.1152/jn.00148.2015>
- Majewski, M., Susanne, H., & Klaus, S. (2006). Epidemiology of athletic knee injuries: A 10-year study. *The knee*, 13(3), 184–188. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2006.01.005>
- Markolf, K. L., Burchfield, D. M., Shapiro, M. M., Shepard, M. F., Finerman, G. A., & Slauterbeck, J. L. (1995). Combined knee loading states that generate high anterior cruciate ligament forces. *Journal of orthopaedic research*, 13(6), 930–935. <https://doi.org/10.1002/jor.1100130618>
- Marks, R., & Quinney, A. (1993). Reliability and validity of the measurement of position sense in women with osteoarthritis of the knee. *The Journal of rheumatology*, 20(11), 1919–1924.
- Marks, R. (1994). Effect of exercise-induced fatigue on position sense of the knee. *Australian Journal of Physiotherapy*, 40(3), 175–181. [https://doi.org/10.1016/S0004-9514\(14\)60576-6](https://doi.org/10.1016/S0004-9514(14)60576-6)
- McCloskey, D. I. (1978). Kinesthetic sensibility. *Physiological reviews*, 58(4), 763–820. <https://doi.org/10.1152/physrev.1978.58.4.763>
- 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., et al. (2020). Return to sport after anterior cruciate ligament injury: Panther Symposium ACL Injury Return to Sport Consensus Group. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 8(6), 2325967120930829. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06009-1>
- Messier, J., Adamovich, S., Berkinblit, M., Tunik, E., & Poizner, H. (2003). Influence of movement speed on accuracy and coordination of reaching movements to memorized targets in three-dimensional space in a deafferented subject. *Experimental Brain Research*, 150(4), 399–416. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1413-9>
- Mir, S., Hadian, M., Talebian, S., & Nasser, N. (2008). Functional assessment of knee joint position sense following anterior cruciate ligament reconstruction. *British journal of sports medicine*, 42(4), 300–303. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2007.044875>
- Miura, K., Ishibashi, Y., Tsuda, E., Okamura, Y., Otsuka, H., & Toh, S. (2004). The effect of local and general fatigue on knee proprioception. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 20(4), 414–418. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2004.01.007>

- Montalvo, A. M., Schneider, D. K., Webster, K. E., Yut, L., Galloway, M. T., Heidt Jr, R. S., Kaeding, C. C., Kremcheck, T. E., Magnussen, R. A., Parikh, S. N., et al. (2019). Anterior cruciate ligament injury risk in sport: a systematic review and meta-analysis of injury incidence by sex and sport classification. *Journal of athletic training*, 54(5), 472–482. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-407-16>
- Moser, N., & Bloch, H. (2015). Return-to-Competition: Testmanual zur Beurteilung der Spielfähigkeit nach Ruptur des vorderen Kreuzbands. *Ihre gesetzliche Unfallversicherung (VBG)*, 1(1), 6–38.
- Moussa, A. Z. B., Zouita, S., Dziri, C., & Salah, F. B. (2009). Single-leg assessment of postural stability and knee functional outcome two years after anterior cruciate ligament reconstruction. *Annals of physical and rehabilitation medicine*, 52(6), 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.rehab.2009.02.006>
- Muaidi, Q., Nicholson, L., & Refshauge, K. (2009). Do elite athletes exhibit enhanced proprioceptive acuity, range and strength of knee rotation compared with non-athletes? *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 19(1), 103–112. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2008.00783.x>
- Myers, B. A., Jenkins, W. L., Killian, C., & Rundquist, P. (2014). Normative data for hop tests in high school and collegiate basketball and soccer players. *International journal of sports physical therapy*, 9(5), 596–603.
- Nagai, T., Bates, N. A., Hewett, T. E., & Schilaty, N. D. (2018). Effects of localized vibration on knee joint position sense in individuals with anterior cruciate ligament reconstruction. *Clinical Biomechanics*, 55(1), 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.04.011>
- Nagai, T., Sell, T. C., House, A. J., Abt, J. P., & Lephart, S. M. (2013). Knee proprioception and strength and landing kinematics during a single-leg stop-jump task. *Journal of athletic training*, 48(1), 31–38. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-48.1.14>
- Naito, E., Roland, P. E., Grefkes, C., Choi, H., Eickhoff, S., Geyer, S., Zilles, K., & Ehrsson, H. H. (2005). Dominance of the right hemisphere and role of area 2 in human kinesthesia. *Journal of Neurophysiology*, 93(2), 1020–1034. <https://doi.org/10.1152/jn.00637.2004>
- Nam, Y., Lee, H. J., Choi, M., Chung, S., Park, J., & Yu, J. (2016). The effect of co-stabilizer muscle activation on knee joint position sense: a single group pre-post test. *Journal of Physical Therapy Science*, 28(7), 2119–2122. <https://doi.org/10.1589/jpts.28.2119>
- Narducci, E., Waltz, A., Gorski, K., Leppla, L., & Donaldson, M. (2011). The clinical utility of functional performance tests within one-year post-acl reconstruction: a systematic review. *International journal of sports physical therapy*, 6(4), 333.
- Nawasreh, Z., Logerstedt, D., Cummer, K., Axe, M., Risberg, M. A., & Snyder-Mackler, L. (2018). Functional performance 6 months after ACL reconstruction can predict return to participation in the same preinjury activity level 12 and 24 months after surgery.

- British journal of sports medicine*, 52(6), 375–375. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2016-097095>
- Needle, A. R., Lepley, A. S., & Grooms, D. R. (2017). Central nervous system adaptation after ligamentous injury: a summary of theories, evidence, and clinical interpretation. *Sports medicine*, 47(7), 1271–1288. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0666-y>
- Négyesi, J., Galamb, K., Szilagyi, B., Nagatomi, R., Hortobagyi, T., & Tihanyi, J. (2019). Age-specific modifications in healthy adults' knee joint position sense. *Somatosensory & Motor Research*, 36(4), 262–269. <https://doi.org/10.1080/08990220.2019.1684888>
- Niederseer, D., Mörtl, H., Liebensteiner, M., Egger, A., Thaler, C., Plöderl, M., Niebauer, J., & Raschner, C. (2014). General fatigue and joint position sense in male elite handball players. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 65(6), 149–153. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2014.129>
- Nielsen, J. B., & Sinkjær, T. (2002). Reflex excitation of muscles during human walking. In *Sensorimotor Control of Movement and Posture* (S. 369–375). Springer.
- Nitsure, P., & Prabhu, S. (2015). Study of differences in proprioception of knee joint with age, gender and lower limb dominance in healthy asymptomatic individuals: An observational study. *Sports Med*, 2015(2), 1–5.
- Noyes, F. R., Barber, S. D., & Mangine, R. E. (1991). Abnormal lower limb symmetry determined by function hop tests after anterior cruciate ligament rupture. *The American journal of sports medicine*, 19(5), 513–518. <https://doi.org/10.1177/036354659101900518>
- Nudo, R. J. (2006). Plasticity. *Neurotherapeutics*, 3(4), 420–427. <https://doi.org/10.1016/j.nurx.2006.07.006>
- Nudo, R. J. (2007). Postinfarct cortical plasticity and behavioral recovery. *Stroke*, 38(2), 840–845. <https://doi.org/DOI:10.1161/01.STR.0000247943.12887.d2>
- Ochi, M., Iwasa, J., Uchio, Y., Adachi, N., & Sumen, Y. (1999). The regeneration of sensory neurones in the reconstruction of the anterior cruciate ligament. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume*, 81(5), 902–906. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.81b5.9202>
- Olree, K. S., & Vaughan, C. L. (1995). Fundamental patterns of bilateral muscle activity in human locomotion. *Biological cybernetics*, 73(5), 409–414. <https://doi.org/10.1007/BF00201475>
- Olsson, L., Lund, H., Henriksen, M., Rogind, H., Bliddal, H., & Danneskiold-Samsøe, B. (2004). Test–retest reliability of a knee joint position sense measurement method in sitting and prone position. *Advances in Physiotherapy*, 6(1), 37–47. <https://doi.org/10.1080/14038190310009894>
- Ordahan, B., Küçükşen, S., Tuncay, İ., Sallı, A., & Uğurlu, H. (2015). The effect of proprioception exercises on functional status in patients with anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, 28(3), 531–537. <https://doi.org/10.3233/bmr-140553>

- Padua, D. A., DiStefano, L. J., Beutler, A. I., De La Motte, S. J., DiStefano, M. J., & Marshall, S. W. (2015). The landing error scoring system as a screening tool for an anterior cruciate ligament injury–prevention program in elite-youth soccer athletes. *Journal of athletic training*, 50(6), 589–595. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-50.1.10>
- Pape, H.-C., & Kurtz, A. (2014). *Physiologie (Silbernagl)*, 9. Auflage. Thieme.
- Paschalis, V., Nikolaidis, M. G., Giakas, G., Jamurtas, A. Z., Pappas, A., & Koutedakis, Y. (2007). The effect of eccentric exercise on position sense and joint reaction angle of the lower limbs. *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 35(4), 496–503. <https://doi.org/10.1002/mus.20723>
- Paschalis, V., Nikolaidis, M. G., Theodorou, A. A., Deli, C. K., Raso, V., Jamurtas, A. Z., Giakas, G., & Koutedakis, Y. (2013). The effects of eccentric exercise on muscle function and proprioception of individuals being overweight and underweight. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(9), 2542–2551. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31827fc9a6>
- Patel, A. D., Bullock, G. S., Wrigley, J., Paterno, M. V., Sell, T. C., & Losciale, J. M. (2021). Does sex affect second ACL injury risk? A systematic review with meta-analysis. *British journal of sports medicine*, 55(15), 873–882. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2020-103408>
- Paterno, M. V., Schmitt, L. C., Ford, K. R., Rauh, M. J., Myer, G. D., Huang, B., & Hewett, T. E. (2010). Biomechanical Measures during Landing and Postural Stability Predict Second Anterior Cruciate Ligament Injury after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction and Return to Sport. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(10), 1968–1978. <https://doi.org/10.1177/0363546510376053>
- Pinczewski, L. A., Lyman, J., Salmon, L. J., Russell, V. J., Roe, J., & Linklater, J. (2007). A 10-year comparison of anterior cruciate ligament reconstructions with hamstring tendon and patellar tendon autograft: a controlled, prospective trial. *The American journal of sports medicine*, 35(4), 564–574. <https://doi.org/10.1177/0363546506296042>
- Proske, U. (2005). What is the role of muscle receptors in proprioception? *Muscle & Nerve: Official Journal of the American Association of Electrodiagnostic Medicine*, 31(6), 780–787. <https://doi.org/10.1002/mus.20330>
- Proske, U., & Gandevia, S. C. (2012). The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological reviews*, 92(4), 1657–1697. <https://doi.org/10.1152/physrev.00048.2011>
- Proske, U., Tsay, A., & Allen, T. (2014). Muscle thixotropy as a tool in the study of proprioception. *Experimental Brain Research*, 232(11), 3397–3412. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4088-5>

- Proske, U., Wise, A. K., & Gregory, J. E. (2000). The role of muscle receptors in the detection of movements. *Progress in neurobiology*, 60(1), 85–96. [https://doi.org/10.1016/s0301-0082\(99\)00022-2](https://doi.org/10.1016/s0301-0082(99)00022-2)
- Reider, B., Arcand, M. A., Diehl, L. H., Mroczek, K., Abulencia, A., Stroud, C. C., Palm, M., Gilbertson, J., & Staszak, P. (2003). Proprioception of the knee before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*, 19(1), 2–12. <https://doi.org/10.1053/jars.2003.50006>.
- Reider, B., Arcand, M. A., Diehl, L. H., Mroczek, K., Abulencia, A., Stroud, C., Palm, M., Gilbertson, J., & Staszak, P. (2003). Proprioception of the knee before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic Related Surgery*, 19(1), 2–12. <https://doi.org/10.1053/jars.2003.50006>
- Relph, N., & Herrington, L. (2015). Interexaminer, intraexaminer, and test-retest reliability of clinical knee joint-position-sense measurements using an image-capture technique. *Journal of Sport Rehabilitation*, 24(2), 2013–0134. <https://doi.org/10.1123/jsr.2013-0134>
- Relph, N., & Herrington, L. (2016a). The effect of conservatively treated ACL injury on knee joint position sense. *International Journal of Sports Physical Therapy*, 11(4), 536–543.
- Relph, N., & Herrington, L. (2016b). The effects of knee direction, physical activity and age on knee joint position sense. *The Knee*, 23(3), 393–398. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2016.02.018>
- Relph, N., & Herrington, L. (2016c). Knee joint position sense ability in elite athletes who have returned to international level play following ACL reconstruction: A cross-sectional study. *The Knee*, 23(6), 1029–1034. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2016.09.005>
- Relph, N., Herrington, L., & Tyson, S. (2014). The effects of ACL injury on knee proprioception: a meta-analysis. *Physiotherapy*, 100(3), 187–195. <https://doi.org/10.1016/j.physio.2013.11.002>
- Ribeiro, F., & Oliveira, J. (2010). Effect of physical exercise and age on knee joint position sense. *Archives of gerontology and geriatrics*, 51(1), 64–67. <https://doi.org/10.1016/j.archger.2009.07.006>
- Ribeiro, F., Venâncio, J., Quintas, P., & Oliveira, J. (2011). The effect of fatigue on knee position sense is not dependent upon the muscle group fatigued. *Muscle & nerve*, 44(2), 217–220. <https://doi.org/10.1002/mus.22018>
- Ribot-Ciscar, E., & Roll, J.-P. (1998). Ago-antagonist muscle spindle inputs contribute together to joint movement coding in man. *Brain research*, 791(1-2), 167–176. [https://doi.org/10.1016/s0006-8993\(98\)00092-4](https://doi.org/10.1016/s0006-8993(98)00092-4)
- Riemann, B. L., & Lephart, S. M. (2002). The sensorimotor system, part I: the physiologic basis of functional joint stability. *Journal of athletic training*, 37(1), 71–79.

- Roberts, D., Fridén, T., Stomberg, A., Lindstrand, A., & Moritz, U. (2000). Bilateral proprioceptive defects in patients with a unilateral anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison between patients and healthy individuals. *Journal of Orthopaedic Research*, 18(4), 565–571. <https://doi.org/10.1002/jor.1100180408>
- Roditi, E.-E., Tsatalas, T., Sakkas, G. K., Koutedakis, Y., Giakas, G., & Karatzaferi, C. (2024). Effects of Muscular Fatigue on Position Sense in Two Phases of the Menstrual Cycle. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, 9(3), 115. <https://doi.org/10.3390/jfmk9030115>
- Roe, C., Jacobs, C., Hoch, J., Johnson, D. L., & Noehren, B. (2022). Test batteries after primary anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review. *Sports Health*, 14(2), 205–215. <https://doi.org/10.1177/19417381211009473>
- Romero-Franco, N., & Jiménez-Reyes, P. (2017). Effects of warm-up and fatigue on knee joint position sense and jump performance. *Journal of motor behavior*, 49(2), 117–122. <https://doi.org/10.1080/00222895.2016.1152222>
- Romero-Franco, N., Montaña-Munuera, J. A., & Jiménez-Reyes, P. (2017). Validity and reliability of a digital inclinometer to assess knee joint-position sense in a closed kinetic chain. *Journal of sport rehabilitation*, 26(1), 332–338. <https://doi.org/10.1123/jsr.2015-0138>
- Rothrauff, B. B., Karlsson, J., Musahl, V., Irrgang, J. J., & Fu, F. H. (2020). ACL consensus on treatment, outcome, and return to sport. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 28, 2387–2389. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06088-0>
- Rothwell, J., Traub, M., Day, B., Obeso, J., Thomas, P., & Marsden, C. (1982). Manual motor performance in a deafferented man. *Brain*, 105(3), 515–542. <https://doi.org/10.1093/brain/105.3.515>
- Rothwell, J. C. (2012). *Control of human voluntary movement*. Springer Science & Business Media.
- Sainburg, R. L. (2005). Handedness: differential specializations for control of trajectory and position. *Exercise and sport sciences reviews*, 33(4), 206–213. <https://doi.org/10.1097/00003677-200510000-00010>
- Sainburg, R. L., Ghilardi, M. F., Poizner, H., & Ghez, C. (1995). Control of limb dynamics in normal subjects and patients without proprioception. *Journal of neurophysiology*, 73(2), 820–835. <https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.2.820>
- Sainburg, R. L., Poizner, H., & Ghez, C. (1993). Loss of proprioception produces deficits in interjoint coordination. *Journal of neurophysiology*, 70(5), 2136–2147. <https://doi.org/10.1152/jn.1993.70.5.2136>
- Salgado, E., Ribeiro, F., & Oliveira, J. (2015). Joint-position sense is altered by football pre-participation warm-up exercise and match induced fatigue. *The Knee*, 22(3), 243–248. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2014.10.002>

- San Martín-Mohr, C., Cristi-Sánchez, I., Pincheira, P. A., Reyes, A., Berral, F. J., & Oyarzo, C. (2018). Knee sensorimotor control following anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison between reconstruction techniques. *PLoS One*, 13(11), e0205658. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205658>
- Sanders, T. L., Maradit Kremers, H., Bryan, A. J., Larson, D. R., Dahm, D. L., Levy, B. A., Stuart, M. J., & Krych, A. J. (2016). Incidence of anterior cruciate ligament tears and reconstruction: a 21-year population-based study. *The American journal of sports medicine*, 44(6), 1502–1507. <https://doi.org/10.1177/0363546516629944>
- Schmidt, R. F. (2013). *Neuro-und Sinnesphysiologie*. Springer-Verlag.
- Schwenkreis, P., Pleger, B., Höffken, O., Malin, J.-P., & Tegenthoff, M. (2001). Repetitive training of a synchronised movement induces short-term plastic changes in the human primary somatosensory cortex. *Neuroscience letters*, 312(2), 99–102. [https://doi.org/10.1016/s0304-3940\(01\)02196-6](https://doi.org/10.1016/s0304-3940(01)02196-6)
- Sepúlveda, F., Sánchez, L., Amy, E., & Micheo, W. (2017). Anterior cruciate ligament injury: return to play, function and long-term considerations. *Current sports medicine reports*, 16(3), 172–178. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000356>
- Sherrington, C. (1906). The integrative action of the nervous system. *Yale University Press*. <https://doi.org/doi.org/10.1037/13798-000>
- Shimokochi, Y., & Shultz, S. J. (2008). Mechanisms of noncontact anterior cruciate ligament injury. *Journal of athletic training*, 43(4), 396–408. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-43.4.396>
- Shrier, I., Safai, P., & Charland, L. (2014). Return to play following injury: whose decision should it be? *British journal of sports medicine*, 48(5), 394–401. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092492>
- Sigward, S. M., & Powers, C. M. (2006). The influence of gender on knee kinematics, kinetics and muscle activation patterns during side-step cutting. *Clinical biomechanics*, 21(1), 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2005.08.001>
- Skinner, H., Wyatt, M., Hodgdon, J., Conard, D., & Barrack, R. (1986). Effect of fatigue on joint position sense of the knee. *journal of orthopaedic research*, 4(1), 112–118. <https://doi.org/10.1002/jor.1100040115>
- Smiley, T., Dallman, J., Long, R., Kapple, M., Aldag, L., Mok, A., Bernard, C., Martin, K., Vopat, L., & Vopat, B. (2024). Lower extremity return to sport testing: A systematic review. *The Knee*, 50(1), 115–146. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2024.07.021>
- Smith, T. O., Davies, L., & Hing, C. B. (2013). A systematic review to determine the reliability of knee joint position sense assessment measures. *The Knee*, 20(3), 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2012.06.010>
- Stone, K. D., Keizer, A., & Dijkerman, H. C. (2018). The influence of vision, touch, and proprioception on body representation of the lower limbs. *Acta Psychologica*, 185(1), 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.01.007>

- Strong, A., Arumugam, A., Tengman, E., Røijezon, U., & Häger, C. K. (2021). Properties of knee joint position sense tests for anterior cruciate ligament injury: A systematic review and meta-analysis. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 9(8), 23259671211007878. <https://doi.org/10.1177/23259671211007878>
- Strong, A., Arumugam, A., Tengman, E., Røijezon, U., & Häger, C. K. (2022). Properties of tests for knee joint threshold to detect passive motion following anterior cruciate ligament injury: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 17(1), 134. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03033-4>
- Strong, A., Grip, H., Arumugam, A., Boraxbekk, C.-J., Selling, J., & Häger, C. K. (2023). Right hemisphere brain lateralization for knee proprioception among right-limb dominant individuals. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 969101. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.969101>
- Suner-Keklik, S., Cobanoglu-Seven, G., Kafa, N., Ugurlu, M., & Guzel, N. A. (2017). The validity and reliability of knee proprioception measurement performed with inclinometer in different positions. *Journal of sport rehabilitation*, 26(6), 1–18. <https://doi.org/10.1123/jsr.2017-0010>
- Tayfur, B., Charupongsas, C., Morrissey, D., & Miller, S. C. (2020). Neuromuscular Function of the Knee Joint Following Knee Injuries: Does It Ever Get Back to Normal? A Systematic Review with Meta-Analyses. *Sports Medicine*, 51(2), 321–338. <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01386-6>
- Tegner, Y., & Lysholm, J. (1985). Tegner score. *Clinical orthopaedics and related research*, 198(1), 43–49.
- van Melick, N., van Cingel, R. E. H., Brooijmans, F., Neeter, C., van Tienen, T., Hullegie, W., & der Sanden, M. W. G. N.-v. (2016). Evidence-based clinical practice update: practice guidelines for anterior cruciate ligament rehabilitation based on a systematic review and multidisciplinary consensus. *British Journal of Sports Medicine*, 50(24), 1506–1515. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095898>
- Vila-Chã, C., Riis, S., Lund, D., Møller, A., Farina, D., & Falla, D. (2011). Effect of unaccustomed eccentric exercise on proprioception of the knee in weight and non-weight bearing tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 21(1), 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.10.001>
- Vitharana, T. N., King, E., Welch, N., Devitt, B., & Moran, K. (2025). Sensorimotor Dysfunction Following Anterior Cruciate Ligament Injury (Part 1). What Is It? How Can Clinicians Assess It? *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 55(6), 1–37. <https://doi.org/10.2519/jospt.2025.12725>
- Voight, M. L., Hardin, J. A., Blackburn, T. A., Tippet, S., & Canner, G. C. (1996). The effects of muscle fatigue on and the relationship of arm dominance to shoulder proprioception. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 23(6), 348–352. <https://doi.org/10.2519/jospt.1996.23.6.348>

- Vulliemoz, S., Raineteau, O., & Jabaudon, D. (2005). Reaching beyond the midline: why are human brains cross wired? *The Lancet Neurology*, 4(2), 87–99. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(05\)00990-7](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(05)00990-7)
- Waddington, G., & Adams, R. (1999). Discrimination of active plantarflexion and inversion movements after ankle injury. *Australian Journal of Physiotherapy*, 45(1), 7–13. [https://doi.org/10.1016/s0004-9514\(14\)60335-4](https://doi.org/10.1016/s0004-9514(14)60335-4)
- Waldron, K., Brown, M., Calderon, A., & Feldman, M. (2022). Anterior Cruciate Ligament Rehabilitation and Return to Sport: How Fast Is Too Fast? *Arthroscopy, Sports Medicine, and Rehabilitation*, 4(1), e175–e179. <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.10.027>
- Webster, K. A., & Gribble, P. A. (2010). Time to stabilization of anterior cruciate ligament-reconstructed versus healthy knees in National Collegiate Athletic Association Division I female athletes. *Journal of athletic training*, 45(6), 580–585. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-45.6.580>
- Webster, K. E., Feller, J. A., Leigh, W. B., & Richmond, A. K. (2014). Younger patients are at increased risk for graft rupture and contralateral injury after anterior cruciate ligament reconstruction. *The American journal of sports medicine*, 42(3), 641–647. <https://doi.org/10.1177/0363546513517540>
- Webster, K. E., & Hewett, T. E. (2019). What is the evidence for and validity of return-to-sport testing after anterior cruciate ligament reconstruction surgery? A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 49, 917–929. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01093-x>
- Webster, K. E., Nagelli, C. V., Hewett, T. E., & Feller, J. A. (2018). Factors associated with psychological readiness to return to sport after anterior cruciate ligament reconstruction surgery. *The American journal of sports medicine*, 46(7), 1545–1550. <https://doi.org/10.1177/0363546518773757>
- Welling, W., Benjaminse, A., Seil, R., Lemmink, K., Zaffagnini, S., & Gokeler, A. (2018). Low rates of patients meeting return to sport criteria 9 months after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective longitudinal study. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26(12), 3636–3644. <https://doi.org/10.1007/s00167-018-4916-4>
- Wellsandt, E., Failla, M. J., & Snyder-Mackler, L. (2017). Limb symmetry indexes can overestimate knee function after anterior cruciate ligament injury. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 47(5), 334–338. <https://doi.org/10.2519/jospt.2017.7285>
- Wieber, J., Preece, A., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Knee angle reproduction tests: influences of body orientation, movement direction and limb dominance. *International journal of sports medicine, Advance online publication*. <https://doi.org/10.1055/a-2526-9372>

- Wieber, J., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Reference limb selection in active contralateral knee angle reproduction tests two years after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *German Journal of Sports Medicine*, 76(4).
- Wieber, J., Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Catalá-Lehnen, P., Rein, R., & Braunstein, B. (2023). Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study. *Technology and health care : official journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 31(5), 1567–1578. <https://doi.org/10.3233/THC-220747>
- Wieber, J., Müller-Rahmel, L., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2024). Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-analysis. *Journal of experimental orthopaedics*, 11(3), e12091. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12091>
- Wiggins, A. J., Grandhi, R. K., Schneider, D. K., Stanfield, D., Webster, K. E., & Myer, G. D. (2016). Risk of secondary injury in younger athletes after anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. *The American journal of sports medicine*, 44(7), 1861–1876. <https://doi.org/10.1177/0363546515621554>
- Wilcke, A. (2013). *Vordere Kreuzbandläsion: Anatomie Pathophysiologie Diagnose Therapie Trainingslehre Rehabilitation*. Springer-Verlag.
- Wilke, C., & Froböse, I. (2003). Quantifizierung propriozeptiver Leistungen von Kniegelenken. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 54(2), 49–54.
- Wojtys, E. M., & Huston, L. J. (2000). Longitudinal effects of anterior cruciate ligament injury and patellar tendon autograft reconstruction on neuromuscular performance. *The American journal of sports medicine*, 28(3), 336–344. <https://doi.org/10.1177/03635465000280030901>
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature neuroscience*, 3(11), 1212–1217.
- Wolpert, D. M., Ghahramani, Z., & Jordan, M. I. (1995). An internal model for sensorimotor integration. *Science*, 269(5232), 1880–1882. <https://doi.org/10.1126/science.7569931>
- Worringham, C., & Stelmach, G. (1985). The contribution of gravitational torques to limb position sense. *Experimental Brain Research*, 61(1), 38–42. <https://doi.org/10.1007/BF00235618>
- Wright, R. W., Dunn, W. R., Amendola, A., Andrish, J. T., Bergfeld, J., Kaeding, C. C., Marx, R. G., McCarty, E. C., Parker, R. D., Wolcott, M., et al. (2007). Risk of tearing the intact anterior cruciate ligament in the contralateral knee and rupturing the anterior cruciate ligament graft during the first 2 years after anterior cruciate ligament reconstruction: a prospective MOON cohort study. *The American journal of sports medicine*, 35(7), 1131–1134. <https://doi.org/10.1177/0363546507301318>

- Xerri, C., Merzenich, M. M., Peterson, B. E., & Jenkins, W. (1998). Plasticity of primary somatosensory cortex paralleling sensorimotor skill recovery from stroke in adult monkeys. *Journal of neurophysiology*, 79(4), 2119–2148. <https://doi.org/10.1152/jn.1998.79.4.2119>
- Yang, C., Tashiro, Y., Lynch, A., Fu, F., & Anderst, W. (2018). Kinematics and arthrokinematics in the chronic ACL-deficient knee are altered even in the absence of instability symptoms. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 26(5), 1406–1413. <https://doi.org/10.1007/s00167-017-4780-7>
- Young, S. W., Valladares, R. D., Loi, F., & Dragoo, J. L. (2016). Mechanoreceptor reinnervation of autografts versus allografts after anterior cruciate ligament reconstruction. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 4(10), 2325967116668782. <https://doi.org/10.1177/2325967116668782>
- 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. *Journal of sport and health science*, 11(1), 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.04.003>
- Zumstein, F., Centner, C., & Ritzmann, R. (2022). How limb dominance influences limb symmetry in ACL patients: effects on functional performance. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 14(1), 206. <https://doi.org/10.1186/s13102-022-00579-y>

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wäre ohne die Unterstützung und Begleitung vieler Menschen nicht möglich gewesen. Ihnen allen gilt mein tief empfundener Dank.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater, Prof. Dr. med. Rüdiger Reer, meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Seine fachliche Expertise, wertvollen Anregungen und konstruktiven Kritiken haben meine Arbeit entscheidend geprägt. Mein tief empfundener Dank gilt vor allem Dr. Björn Braunstein, der mich nicht nur während dieser Dissertation, sondern während dem Großteil meines akademischen Werdegangs begleitet und geprägt hat. Seine und Dr. Robert Reins fachliche Expertise, unermüdliche Unterstützung und ihr Vertrauen in meine Fähigkeiten haben entscheidend dazu beigetragen, dass ich diesen Weg erfolgreich gehen konnte. Besonders dankbar bin ich für die Zeit, die er sich stets für mich genommen hat – sei es für ausführliche Diskussionen, konstruktive Kritik oder wertvolle Ratschläge. Seine Tür stand immer offen, und mit seinem großem Herz, wunderbarem Humor und offenen Ohr für fachliche wie auch persönliche Anliegen hat er mir weit mehr als nur akademische Anleitung gegeben. Er hat mich durch viele Herausforderungen begleitet und mir geholfen, über mich hinauszuwachsen.

Ein herzliches Dankeschön gebührt meinen Kollegen und Kolleginnen Karsten Ronge, Janina Schwarzer, Urda Höfeler, Stefan Caspari und Florian Bosse ohne die eine reibungslose Rekrutierung und Messung der Kreuzbandpatienten nicht möglich gewesen wäre. Danke vor allem, dass ich Euch jederzeit nach Eurer Meinung und kleinen Hilfen fragen durfte! In diesem Zusammenhang auch nochmals vielen Dank an Prof. Dr. med. Philip Catalá-Lehnen, welcher mir jederzeit alle verfügbaren Ressourcen in Zusammenhang mit den Messungen der Probanden zur Verfügung gestellt hat. Ohne diese Möglichkeit wäre eine Promotion neben meiner Vollzeitanstellung nicht realisierbar gewesen. Großer Dank gilt auch meinen Student*innen Abigail Preece, Leon Müller-Rahmel und Klaas Nommensen, sowie Jasmin Brandt und Maike Pieper, für die anregenden Diskussionen, die gemeinsame Zeit und die freundschaftliche Unterstützung während der gesamten Forschungszeit.

Nicht zuletzt danke ich vor allem meiner Familie und meinen Freunden. Ein besonderer Dank gilt meinen lieben Freundinnen Kathrin Michalak, Urda Höfeler, Marie Ullrich und Kristina Mergenthaler, die mich auf diesem Weg begleitet haben. Eure Unterstützung, euer Zuspruch und euer Glaube an mich haben mir oft die nötige Motivation gegeben, weiterzumachen. Ob mit aufmunternden Nachrichten, Gesprächen, die mich aus stressigen Phasen herausgeholt haben, oder einfach dadurch, dass ihr für mich da wart – Ihr habt einen großen Teil dazu beigetragen, dass ich diese Dissertation vollenden konnte. Eure Freundschaft bedeutet mir unendlich viel. Danke auch an meine Cousine Dr. Daniela Rohrbach-Schmidt für das Gegenlesen der Dissertation; du warst mir immer ein Vorbild!

Der größte Dank gilt meinem Lebenspartner und meinen Eltern. Nils, du warst von Tag eins an meiner Seite, mit dem Start der Promotion kamst auch du in meinem Leben. Danke für deine unerschütterliche Unterstützung, dein Verständnis für lange Arbeitsphasen und deinen Glaube an mich. Du hast mich in allen stressreichen Zeiten zum Lachen gebracht, mich motiviert und mich daran erinnert, auch mal Pausen einzulegen. Ohne Dich wäre dieser Weg um ein Vielfaches schwerer gewesen. Sibylle und Ulrich Wieber, meine Eltern, danke für Alles! Ihr habt mich von Anfang an auf meinen, immer ganz eigenem, Wegen begleitet. Ihr habt mir nicht nur durch die Ermutigung zur Ausbildung zur Gesundheits- und Krankenpflegerin die Grundlagen für meine Laufbahn ermöglicht, sondern mich auch mit unermüdlicher Liebe und Vertrauen gestärkt. Eure beständige Unterstützung und Euer Zuspruch haben mir viel Kraft gegeben. Eure Werte und Euer Glaube an mich haben mich zu dem Menschen gemacht, der ich heute bin.

Anhang

Kurzfassungen/Abstracts

Publikation A: Wieber, J., Müller-Rahmel, L., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2024). Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-analysis. *Journal of experimental orthopaedics*, 11(3), e12091. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12091>

Abstract

Purpose: The systematic review and meta-analysis investigated subject-independent test factors that influence the absolute angle error in active knee angle reproduction tests.

Methods: Five electronic databases were searched to identify relevant studies published before 20 December 2023. Studies were included that were published in either English or German and that investigated joint proprioception in the healthy knee. Included studies were also required to have participants 18–60 years old and free of lower-limb injury, neurological disorders and diseases affecting joint position sense. Risk of bias was assessed using a Cochrane risk-of-bias tool.

Results: Of the 2023 articles identified, 26 studies (1082 participants) were included in the meta-analysis. The meta-analysis showed a significant pooled standard mean difference in the absolute angular error for body orientation, direction of movement and fatigue. Active knee angle reproduction tests were found to have a lower absolute angular error when performed in the sitting position compared to the prone position (SMD = -0.56; 95%-CI: [-1.00; -0.12]). The absolute angular error was found to be greater in cases of knee flexion compared to knee extension (SMD = 0.71; 95%-CI: [0.18; 1.24]). General and local muscle fatigue were found to result in a higher absolute angular error (SMD = 1.39; 95%-CI: [1.04; 1.75]).

Conclusion: Hence, fatigue, body orientation and direction of movement influence the extent of the absolute angular error in active knee angle reproduction tests. Practitioners should be aware that the test conditions and the patient's level of fatigue can affect the results of such tests and that directly comparing results obtained using different test protocols may not be appropriate. The test protocol should be well documented and applied consistently in the clinical setting.

Level of Evidence: Level III, systematic review with meta-analysis.

Keywords: ACL, joint position sense, orthopaedics, physiotherapy, proprioception, rehabilitation, return to activity, return to competition, return to play, return to sport

Zusammenfassung

Fragestellung: Die systematische Übersichtsarbeit und Meta-Analyse untersuchte personenunabhängige Faktoren, die den absoluten Winkelfehler in aktiven Kniewinkelreproduktions-tests beeinflussen.

Methoden: Zur Identifikation relevanter Studien wurden fünf elektronische Datenbanken durchsucht. Berücksichtigt wurden Arbeiten, die bis zum 20. Dezember 2023 veröffentlicht und entweder in deutscher oder englischer Sprache verfasst wurden. Eingeschlossen wurden Studien, die die Gelenkpropriozeption am gesunden Knie untersuchten. Die teilnehmenden Probanden mussten zwischen 18 und 60 Jahre alt sein und durften keine Verletzungen der unteren Extremitäten, neurologischen Erkrankungen oder sonstige Störungen aufweisen, die die Wahrnehmung der Gelenkstellung beeinträchtigen könnten. Zur Bewertung des Verzerrungsrisikos wurde das Cochrane Risk-of-Bias Tool genutzt.

Ergebnisse: Von den 2023 identifizierten Artikeln wurden 26 Studien (1082 Probanden) in die Meta-Analyse einbezogen. Die Meta-Analyse zeigte einen signifikanten gepoolten Standardmittelwertunterschied des absoluten Winkelfehlers für die Körperposition, die Bewegungsrichtung und die Ermüdung. Aktive Kniewinkelreproduktionstests wiesen einen geringeren absoluten Winkelfehler in der sitzenden Position im Vergleich zur liegenden Position auf (SMD = -0,56; 95%-KI: [-1,00; -0,12]). Der absolute Winkelfehler war bei der Kniebeugung größer als bei der Kniestreckung (SMD = 0,71; 95%-KI: [0,18; 1,24]). Allgemeine und lokale muskuläre Ermüdung führten zu einem höheren absoluten Winkelfehler (SMD = 1,39; 95% -KI: [1,04; 1,75]).

Schlussfolgerung: Die Ermüdung, Körperposition und Bewegungsrichtung beeinflussen das Ausmaß des absoluten Winkelfehlers in aktiven Kniewinkelreproduktionstests. Anwender sollten sich bewusst sein, dass diese Testbedingungen sowie der Grad der Vorermüdung der Patienten die Ergebnisse solcher Tests beeinflussen können. Ein direkter Vergleich von Ergebnissen, die unter verschiedenen Testprotokollen erhoben wurden, ist somit möglicherweise nicht geeignet. Aus diesem Grund sollte das gewählte Testprotokoll klar dokumentiert und im klinischen Kontext konsequent und einheitlich angewendet werden.

Evidenzlevel: Level III, Systematische Übersichtsarbeit mit Meta-Analyse.

Schlüsselwörter: VKB, Gelenkwinkelpositionssinn, Orthopädie, Physiotherapie, Propriozeption, Rehabilitation, Return-to-Activity, Return-to-Competition, Return-to-Play, Return-to-Sport.

Publikation B: Wieber, J., Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Catala-Lehnen, P., Rein, R., & Braunstein, B. (2023). Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study. *Technology and health care : official journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 31(5), 1567–1578. <https://doi.org/10.3233/THC-220747>

Abstract

Background: Joint position sense test assess patient mobility and proprioceptive ability. Yet, application used under different conditions may biases reproduction error resulting in different therapeutic consequences.

Objective: To investigate knee angle reproduction test under different test conditions.

Methods: 25 healthy subjects (mean $\pm$ SD, age = 25 ± 2 years, activity level: 9 ± 2 training hours/week) performed active contralateral knee angle reproduction tests in the sitting and prone position, while changing the knee angle starting (i) from flexion and (ii) extension, (iii) inducing vibration on the semitendinosus tendon.

Results: Absolute mean knee angle reproduction error showed significant difference for body position and vibration (Position: 95%–CI: [0.71; 2.32]; $p < .001$. No Vibration & Vibration: 95%–CI: [-1.71; -0.12]; $p = .027$). Relative knee angle reproduction error was significant different in all conditions (No Vibration & Vibration: 95%–CI: [-3.30; -0.45]; $p = .010$. Body orientation: 95%–CI: [1.08; 3.93]; $p < .001$. Direction of movement: 95%–CI: [0.56; 3.41]; $p = .007$).

Conclusion: Body orientation and movement direction influence the resulting knee angle reproduction error in the active contralateral knee angle reproduction test in healthy subjects. Practitioners are advised to use standardised test procedures when comparing different within- and between-patient results.

Trial registration: DOI 10.17605/OSF.IO/AFWRP

Keywords: Anterior cruciate ligament, proprioception, knee joint, return to sport, physiotherapy

Zusammenfassung

Hintergrund: Testverfahren zur Erfassung der Gelenkposition dienen der Beurteilung der Beweglichkeit und der propriozeptiven Fähigkeiten von Patienten. Die Durchführung unter variierenden Testbedingungen kann jedoch den Winkelreproduktionsfehler beeinflussen was somit zu unterschiedlichen therapeutischen Konsequenzen führen kann.

Zielsetzung: Untersuchung des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests unter verschiedenen Testbedingungen.

Methoden: 25 gesunde Probanden (Mittelwert $\pm$ SD, Alter = 25 ± 2 Jahre, Aktivitätsniveau: 9 ± 2 Trainingsstunden/Woche) führten den aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstest in sitzender und liegender Position durch, während der Kniewinkel aus (i) der Flexion und (ii) der Extension eingestellt und (iii) Vibrationen auf die auf die Semitendinosus-Sehne induziert wurde.

Ergebnisse: Der absolute mittlere Winkelreproduktionsfehler des Kniewinkels zeigte signifikante Unterschiede für die Körperposition und induzierte Vibration (Position: 95%-KI: [0,71; 2,32]; $p < .001$). Keine Vibration & Vibration: 95%-KI: [-1,71; -0,12]; $p = .027$). Der relative Winkelreproduktionsfehler des Kniewinkels unterschied sich in allen Bedingungen signifikant (Keine Vibration & Vibration: 95%-KI: [-3,30; -0,45]; $p = .010$. Körperposition: 95%-KI: [1,08; 3,93]; $p < .001$. Bewegungsrichtung: 95%-KI: [0,56; 3,41]; $p = .007$).

Schlussfolgerung: Die Körperposition und Bewegungsrichtung beeinflussen den resultierenden Winkelreproduktionsfehler in aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests bei gesunden Probanden. Es wird empfohlen, die Testverfahren standardisiert anzuwenden, insbesondere wenn Ergebnisse aus unterschiedlichen Tests innerhalb eines Patienten oder zwischen verschiedenen Patienten verglichen werden sollen.

Prä-Registrierung: DOI 10.17605/OSF.IO/AFWRP

Schlüsselwörter: Vorderes Kreuzband, Propriozeption, Kniegelenk, Return-to-Sport, Physiotherapie

Publikation C: Wieber, J., Preece, A., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Knee angle reproduction tests: influences of body orientation, movement direction and limb dominance. *International journal of sports medicine*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1055/a-2526-9372>

Abstract

Applying joint position sense tests under different test conditions may introduce reproduction error bias, which can result in different therapeutic consequences. This study investigated the effects of body orientation, movement direction, and limb dominance on the active knee angle reproduction error. Subjects underwent active contralateral knee angle reproduction tests in a seated versus prone position, from a starting point of knee flexion versus knee extension, and with the dominant versus nondominant limb setting the target angle. The test order was randomly determined for each subject. The primary outcome was the absolute active knee angle reproduction error ($^{\circ}$). The data of 54 healthy subjects (mean $\pm$ standard deviation, age: 26 ± 5 years, height: 174 ± 11 cm, body mass: 69.9 ± 14.4 kg, and Tegner activity score: 5.8 ± 1.9) showed that the reproduction error was greater in the seated position than in the prone position. The use of the dominant limb as the reference limb was associated with significantly greater errors in the seated position, but not in the prone position. In conclusion, directly comparing the results obtained in the prone and seated positions is not recommended. However, the dominance of the reference limb might be relevant when testing patients and comparing healthy and injured knees.

Keywords: return to sport, return to competition, physiotherapy, orthopaedics, proprioception, joint position sense

Zusammenfassung

Die Anwendung von Tests zur Beurteilung der Gelenkpositionswahrnehmung unter verschiedenen Testbedingungen kann zu Unterschieden im resultierenden Winkelreproduktionsfehler führen, was potenziell unterschiedliche therapeutische Implikationen zur Folge haben kann. Ziel der vorliegenden Studie war es, die Auswirkungen von Körperhaltung, Bewegungsrichtung und Bein-Dominanz auf den aktiven Winkelreproduktionsfehler des Kniegelenkwinkels zu untersuchen. Hierzu führten die Probanden aktive, kontralaterale Kniewinkelreproduktionstests unter unterschiedlichen Bedingungen durch: in sitzender Position oder in Bauchlage, ausgehend von einer gebeugten oder gestreckten Kniegelenksstellung, sowie unter Verwendung der dominanten oder nicht-dominanten Gliedmaße als Referenz für den Zielwinkel. Die Reihenfolge der Testbedingungen wurde randomisiert festgelegt. Als primärer Messparameter diente der absolute aktive Winkelreproduktionsfehler des Kniegelenkwinkels ($^{\circ}$). Die Auswertung der Daten von 54 gesunden Probanden (Mittelwert $\pm$ Standardabweichung: Alter 26 ± 5 Jahre, Körpergröße 174 ± 11 cm, Körpergewicht $69,9 \pm 14,4$ kg, Tegner-Aktivitätsscore: $5,8 \pm 1,9$) zeigte, dass der Winkelreproduktionsfehler in sitzender Position signifikant größer war als in Bauchlage. Darüber hinaus führte die Verwendung der dominanten Gliedmaße als Referenz im Sitzen zu einem signifikant höheren Fehler, während dieser Effekt in Bauchlage nicht beobachtet wurde. Ein direkter Vergleich der Testergebnisse zwischen Sitz- und Bauchlage erscheint daher nicht empfehlenswert. Die Dominanz der Referenzgliedmaße könnte jedoch insbesondere bei der Untersuchung von Patienten oder im Vergleich zwischen gesunden und verletzten Knien eine relevante Rolle spielen.

Schlüsselwörter: Return-to-Sport, Return-to-Competition, Physiotherapie, Orthopädie, Propriozeption, Gelenkwinkelpositionssinn

Publikation D: Wieber, J., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Reference limb selection in active contralateral knee angle reproduction tests two years after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. Submission-no.: ksa.202501026.

Abstract

Purpose: To evaluate joint position sense in individuals two years following anterior cruciate ligament reconstruction in comparison to healthy controls, and to determine whether the selection of the reference limb for target angle setting influences the magnitude of the absolute knee angle reproduction error.

Methods: The absolute knee angle reproduction error was assessed in 54 healthy controls (age: 26 ± 5 years, Tegner activity score: 5 ± 2) and 13 patients two years after ACL reconstruction (age: 35 ± 6 years, Tegner score: 5 ± 2) using the active contralateral knee angle reproduction test in the sitting position starting from 90° knee flexion. Participants actively set a predefined target angle with one limb and attempted to reproduce it with the contralateral side. The starting limb (injured/non-injured; left/right) was randomized across trials. Group differences were analyzed using a linear mixed-effects model with repeated measures.

Results: The linear mixed-effects model revealed no statistically significant differences between the reconstructed and contralateral limbs in anterior cruciate ligament patients (mean difference: 0.8° , $p = .13$), nor between the healthy legs of ACL patients and those of healthy controls (mean difference: 2.3° , $p = .62$). Additionally, no side-to-side differences were detected within the healthy cohort (mean difference: 0.4° , $p = .48$). Pre-planned contrasts confirmed no significant group effects on joint position sense performance.

Conclusions: Proprioceptive deficits are not evident two years after anterior cruciate ligament reconstruction, with the absolute error appearing independent of whether the reconstructed leg sets or replicates the angle. For practical applications this indicates that clinicians might use either the injured or healthy leg as the reference limb during proprioceptive assessments, simplifying testing procedures and enhancing the adaptability of rehabilitation programs including subsequent return to sport decisions.

Level of Evidence: II

Keywords: Return to Sport; Proprioception; Knee; Limb Symmetry; Anterior Cruciate Ligament

Zusammenfassung

Hintergrund: Ziel dieser Studie war die Evaluation der Gelenkpositionswahrnehmung bei Personen zwei Jahre nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe, sowie die Analyse eines möglichen Einflusses Wahl des Referenzbeins auf den absoluten Kniewinkelreproduktionsfehler.

Methodik: Der absolute Kniewinkelreproduktionsfehler wurde bei 54 gesunden Kontrollpersonen (Alter: 26 ± 5 Jahre; Tegner-Score: 5 ± 2) und 13 Patienten zwei Jahre nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion (Alter: 35 ± 6 Jahre; Tegner-Score: 5 ± 2) mittels des aktiven kontralateralen Kniewinkelreproduktionstests in sitzender Position ausgehend von 90° Knieflexion bestimmt. Die Reihenfolge der Zielwinkeleinstellung (operiertes/gesundes; rechtes/linkes Bein) erfolgte randomisiert. Zur Analyse der Gruppenunterschiede wurde ein linear-gemischtes Modell mit Messwiederholungen genutzt. Die vorgeplanten Kontraste wurden mit Bonferroni-Korrektur adjustiert.

Ergebnisse: Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede im absoluten Winkelreproduktionsfehler zwischen dem rekonstruierten und dem kontralateralen Bein der Patienten (MD: $0,8^\circ$, $p = 0,125$) sowie zwischen den Beinen der Patienten und der gesunden Kohorte (MD: $2,3^\circ$, $p = .62$). Innerhalb der gesunden Kontrollgruppe waren ebenfalls keine Seitenunterschiede nachweisbar (MD: $0,4^\circ$, $p = .48$). Die Analyse auf Kontraste bestätigten keine signifikanten Gruppeneffekte auf die Gelenkpositionswahrnehmung.

Schlussfolgerung: Zwei Jahre nach vorderer Kreuzbandrekonstruktion lassen sich keine klinisch relevanten propriozeptiven Defizite nachweisen. Der absolute Winkelreproduktionsfehler ist unabhängig von der Auswahl des Referenzbeins. Dies ermöglicht eine flexible Anwendung der Testverfahren im klinischen Alltag und eine vereinfachte Integration in Rehabilitationsprogramme und einer daraus folgenden Return-to-Sport Entscheidung.

Evidenzlevel: II

Schlüsselwörter: Return-to-Sport; Propriozeption; Knie; Gliedmaßensymmetrie; Vorderes Kreuzband

Veröffentlichungen mit Projektbezug

2025

Knee angle reproduction tests: influences of body orientation, movement direction and limb dominance

Wieber, J., Preece, A., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Knee angle reproduction tests: influences of body orientation, movement direction and limb dominance. *International journal of sports medicine*, 10.1055/a-2526-9372. Advance online publication. <https://doi.org/10.1055/a-2526-9372>

Absolute error in active contralateral knee angle reproduction test two years after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial

Wieber, J., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2025). Absolute error in active contralateral knee angle reproduction test two years after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. Submission-no.: ksa.202501026.

Person-independent factors affecting active knee angle reproduction tests: a systematic review and meta-analysis

Wieber, J., Reer, R., Rein, R. & Braunstein, B. (2025). Person-independent factors affecting active knee angle reproduction tests: a systematic review and meta-analysis, *German Journal of Sports Medicine*, 76(4).

Knee joint position sense two years after anterior cruciate ligament reconstruction and the role of limb dominance – a randomised controlled trial

Wieber, J., Brandt, J., Rein, R. & Braunstein, B. (2025). Knee joint position sense two years after anterior cruciate ligament reconstruction and the role of limb dominance – a randomised controlled trial, *German Journal of Sports Medicine*, 76(4).

2024

Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: a systematic review and meta-analysis.

Wieber, J., Müller-Rahmel, L., Reer, R., Rein, R., & Braunstein, B. (2024). Factors that influence the angular error in active knee angle reproduction tests: A systematic review and meta-analysis. *Journal of experimental orthopaedics*, 11(3), e12091. <https://doi.org/10.1002/jeo2.12091>

2023

The measurement of the knee joint position sense – Different test settings affecting the resulting angle reproduction error

Wieber, J., Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Rein, R., Catala-Lehnen, P., Reer, R. & Braunstein, B. (2023). Abstractsband des 7. Forschungssymposiums für Physiotherapiewissenschaft. Forschungssymposium Physiotherapiewissenschaft - Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Göttingen, Deutschland.

Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study

Wieber, J., Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Catala-Lehnen, P., Rein, R., & Braunstein, B. (2023). Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: An experimental study. *Technology and health care : official journal of the European Society for Engineering and Medicine*, 31(5), 1567–1578. <https://doi.org/10.3233/THC-220747>

Validity of a novel return to sports test battery to predict reinjury rate after rehabilitation for anterior cruciate ligament injuries

Wieber, J., Häußer, J., Barke, A., Beil, F.T., Ries, C., Reer, R. & Catala-Lehnen, P. (2023). *German Journal of Sports Medicine*, 74(4).

Effects of body orientation and direction of movement on a knee joint angle reproduction test in healthy subjects: an experimental study

Wieber, J., Brandt, J., Pieper, M., Hirschhäuser, E., Catala-Lehnen, P., Rein, R., Reer, R. & Braunstein, B. (2023). *German Journal of Sports Medicine*, 74(4).

2022

Auswirkungen unterschiedlicher Körperorientierungen auf den Kniegelenkwinkel Reproduktionstest: eine experimentelle Studie

Wieber, J., Brandt, J., Hirschhäuser, E., Pieper, M., Rein, R., Catala-Lehnen, P., & Braunstein, B. (2022). Auswirkungen unterschiedlicher Körperorientierungen auf den Kniegelenkwinkelreproduktionstest: eine experimentelle Studie. in *eProceedings of the 37th GOTS Annual Congress [GOTS22-19]*.

2021

Evaluation der Hamburger Return to Sports-Testbatterie nach ambulanter VKB-Ersatz-Operation

Barke, A., **Wieber, J.**, Häußner, J., & Catala-Lehnen, P. (2021). Evaluation der Hamburger Return to Sports-Testbatterie nach ambulanter VKB-Ersatz-Operation. *Sports Orthopaedics and Traumatology*, 37(2), 185. doi.org/10.1016/j.orthtr.2021.04.028.

Eidesstattliche Erklärung



FAKULTÄT
FÜR PSYCHOLOGIE UND
BEWEGUNGSWISSENSCHAFT
Institut für Bewegungswissenschaft
Institut für Psychologie

Eidesstattliche Erklärung nach *(bitte Zutreffendes ankreuzen)*

- ☒ § 7 (4) der Promotionsordnung des Instituts für Bewegungswissenschaft der Universität Hamburg vom 18.08.2010
- ☐ § 9 (1c und 1d) der Promotionsordnung des Instituts für Psychologie der Universität Hamburg vom 20.08.2003

Hiermit erkläre ich an Eides statt,

1. dass die von mir vorgelegte Dissertation nicht Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen oder in einem solchen Verfahren als ungenügend beurteilt worden ist.
2. dass ich die von mir vorgelegte Dissertation selbst verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und keine kommerzielle Promotionsberatung in Anspruch genommen habe. Die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche kenntlich gemacht.

Hamburg, 29.05.2025

Ort, Datum



Unterschrift