

Aus dem Institut für Bewegungs- und Neurowissenschaft

der Deutschen Sporthochschule Köln

Geschäftsführender Leiter: Univ.- Prof. Dr. H.K. Strüder

**Untersuchung des Muskeldehnungsreflexes als
Voraussetzung des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus
für die Generierung mechanischer Leistung in den
internalen Rotatoren der Schulter**

Von der Deutschen Sporthochschule Köln

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Sportwissenschaft

(Dr. Sportwiss.)

angenommene Dissertation

vorgelegt von

Lars Niklas Heinke

aus Meerbusch

Köln, 2022

Erste Gutachterin:	Jun.-Prof. Dr. Kirsten Albracht
Zweiter Gutachter:	Univ.-Prof. Dr. Thomas Abel
Vorsitzender des Promotionsausschusses:	Univ.-Prof. Dr. Mario Thevis
Datum der Disputation:	19. Januar 2022

Eidesstattliche Versicherungen gem. § 7 Abs. 2 Nr. 4 und 5 der Promotionsordnung der Deutschen Sporthochschule Köln, 20.02.2013:

Hierdurch versichere ich:

Ich habe diese Arbeit selbständig und nur unter Benutzung der angegebenen Quellen und technischen Hilfen angefertigt; sie hat noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegen. Wörtlich übernommene Textstellen, auch Einzelsätze oder Teile davon, sind als Zitate kenntlich gemacht worden.

Hierdurch erkläre ich, dass ich die „Leitlinien guter wissenschaftlicher Praxis“ der Deutschen Sporthochschule Köln eingehalten habe.

Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ALLGEMEINER KOMMENTAR	II
PUBLIKATIONEN.....	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VI
TABELLENVERZEICHNIS.....	VII
1. EINLEITUNG.....	1
1.1 ALLGEMEINE EINLEITUNG.....	1
1.2 DER MUSKELDEHNUNGSREFLEX ALS BESTANDTEIL DES DEHNUNGS-VERKÜRZUNGS-ZYKLUS	5
1.3 DARSTELLUNG POTENZIELLER EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE AUSPRÄGUNG DES MUSKELDEHNUNGSREFLEX.....	8
1.4 DARSTELLUNG DES AKTUELLEN FORSCHUNGSSTANDES ZUM MUSKELDEHNUNGSREFLEX IN DER SCHULTERUMSPANNENDEN MUSKULATUR.....	13
1.4.1 METHODIK DER LITERATURRECHERCHE.....	13
1.4.2 ERGEBNISSE DER LITERATURRECHERCHE	15
1.4.3 SCHLUSSFOLGERUNG.....	26
1.5 ZIELSTELLUNG UND GLIEDERUNG.....	32
2. EVALUATION OF PASSIVELY INDUCED SHOULDER STRETCH REFLEX	34
3. INFLUENCE OF SUBJECT POSTURE ON STRETCH REFLEX RESPONSE	35
4. RELIABILITY OF INTERNAL SHOULDER MUSCLE STRETCH REFLEXES.....	36
5. HAUPTERGEBNISSE UND AUSBLICK.....	37
6. LITERATURVERZEICHNIS.....	44
7. ZUSAMMENFASSUNG	59
8. ABSTRACT	61
DANKSAGUNG	63

Allgemeiner Kommentar

Die vorliegende kumulative Dissertation beinhaltet eine Zusammenstellung von drei wissenschaftlichen Manuskripten, die jeweils in englischer Sprache verfasst und in internationalen Fachzeitschriften nach einem Peer-Review-Verfahren publiziert wurden, beziehungsweise zur Publikation in der nächsten Ausgabe des Journal akzeptiert wurden. Gemäß § 6 Absatz 2 der Promotionsordnung der Deutschen Sporthochschule Köln (Version vom 20. Februar 2013) ist der Manteltext dieser Dissertationsschrift in deutscher Sprache verfasst. Eine zusätzliche Zusammenfassung in englischer Sprache ist der Dissertation beigelegt.

Die im Rahmen dieser kumulativen Dissertation vorgestellten Artikel wurden formal überarbeitet, um die Einheitlichkeit von Abkürzungen, Zitierstil, Abbildungen und Tabellen sicherzustellen. Daher können die ursprünglich publizierten Artikel geringfügig von den Kapiteln dieser Arbeit abweichen.

Aus Gründen des Urheberrechts finden sich in dieser Print-Version der kumulativen Dissertation, veröffentlicht in der Zentralbibliothek der Sportwissenschaften, lediglich der Titel, das Abstract sowie die Referenz der entsprechenden veröffentlichten Publikationen.

Publikationen

Nachfolgend werden die der vorliegenden kumulativen Dissertation zu Grunde liegenden Publikationen in chronologischer Reihenfolge aufgeführt.

Heinke, L. N., Knicker, A. J., & Albracht, K. (2018). Evaluation of passively induced shoulder stretch reflex using an isokinetic dynamometer in male overhead athletes. *Isokinetics and Exercise Science*, 26(4), 265-274. <https://doi.org/10.3233/ies-184111>

Heinke, L. N., Knicker, A. J., & Albracht, K. (2020). Increased shoulder muscle stretch reflex elicibility in supine subject posture. *Isokinetics and Exercise Science*, 28(2), 139-146. <https://doi.org/10.3233/IES-192219>

Heinke, L. N., Knicker, A. J., & Albracht, K. (2022). Test-Retest Reliability of the Internal Shoulder Rotator Muscles' Stretch Reflex in Healthy Men. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 62, February 2022, 102611. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2021.102611>

Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
%	Prozent
bzw.	beziehungsweise
CMJ	Countermovement Jump
EMG	Elektromyografie
LLR	long latency reflex
Fig.	Figure / Abbildung
ICC	Intraclass Correlation Coefficient / Intraklassen-Korrelationskoeffizient
M. deltoideus	Musculus deltoideus
M. infraspinatus	Musculus infraspinatus
M. latissimus dorsi	Musculus latissimus dorsi
M. pectoralis major	Musculus pectoralis major
M. supraspinatus	Musculus supraspinatus
M. supscapularis	Musculus supscapularis
M. teres minor	Musculus teres minor
MLR	medium latency reflex
ms	Millisekunde
MTU	muscle-tendon unit / Muskel-Sehnen- Einheit
MVC	maximal voluntary contraction / maximal willkürliche Kontraktion
Rad	Radiant
RFD	Rate of force development
s	Sekunde
sEMG	surface electromyography / Oberflächen Elektromyografie
SLR	short latency stretch reflex
sog.	sogenannt
SRD 95%	smallest real difference 95% covidence interval / kleinster reeller Unterschied 95% Konfidenzintervall

SRES	short-range elastic stiffness
SSC	stretch-shortening cycle / Dehnungs- Verkürzungs-Zyklus
Tab.	Tabelle
u. a.	unter anderem
u. w.	und weitere
vgl.	vergleiche
ZNS	Zentralnervensystem

Abbildungsverzeichnis

Fig. 1: Prozessbeschreibung der systematischen Literaturrecherche.15

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Ergebnisübersicht der systematischen Literaturrecherche	15
Tab. 2: Parameterübersicht inkludierter Publikationen.....	28

1. Einleitung

1.1 Allgemeine Einleitung

„Die wahre Natur der muskulären Arbeitsweise ist nicht ausschließlich durch die isolierte Betrachtung isometrischer, konzentrischer oder exzentrischer Kontraktionen zu bemessen“ (Komi, 2000). Vielmehr beruht die Fortbewegung des Menschen und vieler zweibeiniger und vierbeiniger Tiere, sowie eine Vielzahl weiterer Bewegungen, auf der Ausnutzung des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (stretch-shortening cycle; SSC) (Taube et al., 2012). Per Definition beschreibt der Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus das natürliche Zusammenspiel isometrischer, exzentrischer und konzentrischer Muskelkontraktionen im Rahmen verschiedener Phasen einer Bewegung (vgl. Komi & Nicol, 2010). Am Beispiel des Laufens dargestellt, kommt es im Rahmen eines SSC während des Fußaufsatzes innerhalb der exzentrischen Bewegungsphase zu einer akuten Längenzunahme einer vorinnervierten Muskel-Sehnen-Einheit (muscle-tendon unit; MTU), unmittelbar gefolgt von einer Verkürzung innerhalb der konzentrischen Phase der Bewegung, während der hinteren Stützphase. Im Falle eines funktionierenden Zusammenspiels der natürlichen Muskelfunktionen liegt der Hauptvorteil des SSC gegenüber isolierter exzentrischer und / oder konzentrischer Kontraktionen in der teilweisen Speicherung und anschließenden Freisetzung kinetischer Energie begründet (Komi & Nicol, 2010). Während bei Bewegungen des Alltags eine möglichst effiziente Bewegungsausführung den entscheidenden Faktor für die Ausnutzung eines SSC bildet, zielen sportliche Bewegungen in erster Linie darauf ab, die mechanische Leistung zu maximieren. Die Fähigkeit, innerhalb kürzest möglicher Zeit größtmögliche Impulse zu erzeugen, gilt daher bei vielen sportlichen Bewegungen (z.B. sprinten, springen etc.) als leistungsdeterminierender Faktor (vgl. Wilson et al., 1993). Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit wird häufig die „rate of force development“ (RFD) betrachtet, welche die maximal willkürliche Aktivierung motorischer Einheiten innerhalb der ersten 50 – 75 ms einer Kontraktion widerspiegelt. Diese wird vor allem durch die maximale Entladungsrate der rekrutierten motorischen Einheiten beeinflusst (Maffioletti et al., 2016), welche durch entsprechende Trainingsinterventionen modulierbar ist. So haben

beispielsweise Van Cutsem et al. (1998) dargestellt, dass es bedingt durch eine um 38 % schneller Entladungsrate der ersten 4 Aktionspotenziale zu einer trainingsinduzierten Verbesserung des RFD bei einer ballistischen Dorsalflexion des Fußes kam. Als potenzielle Mechanismen für diese Beobachtung werden mögliche Adaptionen auf kortikospinaler Ebene diskutiert.

Die zugrundeliegenden Wirkmechanismen des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus sowie der Einfluss elastischer Energie auf die Kraftentfaltung, die Arbeit sowie die Leistung werden seit mehreren Dekaden untersucht. Cavagna et al. haben bereits 1965 dargestellt, dass die leistungssteigernde Wirkung des SSC in erster Linie auf gespeicherte elastische Energie zurückzuführen ist. Dabei wird vor allem der Übergangsdauer zwischen der Dehnung und der Verkürzung der Muskulatur ein signifikanter Einfluss auf die Kraftpotenzierung zugeschrieben. Mit zunehmender Verzögerung zwischen Dehnung und Verkürzung vermindert sich der positive Einfluss der vorausgegangenen Dehnung (vgl. Komi & Nicol, 2010). Erfolgt der Übergang zwischen Dehnung und Verkürzung jedoch ohne jegliche bzw. mit einer minimalen zeitlichen Verzögerung, kann die konzentrisch generierbare Kraft das vorausgegangene exzentrische Kraftpotenzial übersteigen (Komi & Nicol, 2010). In einer späteren Studie haben Cavagna et al. (1971) aufgezeigt, dass beim Sprintlauf die Leistung der Muskulatur bis zu einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 5 m/s steigt. Dieser Anstieg wird durch die Eigenschaften der zugrundeliegenden Muskelkontraktionen erklärt. Ein weiterer Anstieg der Leistung, welcher für das Erreichen der maximalen Sprintgeschwindigkeit der Probanden (9,4 m/s) notwendig ist, wird von den Autoren der Speicherung und Freisetzung elastischer Energie der Antriebsmuskulatur zugeschrieben.

In der Literatur werden verschiedene Mechanismen der Energiespeicherung in den parallel sowie serienelastischen Elementen der MTU dargestellt. Ausgehend von diesen, werden verschiedenen Modelle der Energiespeicherung beschrieben. So beschreibt zum Beispiel Komi (2000) dass während eines SSC sowohl die kontraktile Komponenten, als auch die Sehnen, Bänder und Aponeurosen ihre Länge ändern. Manche Autoren präsentieren Argumente dafür, dass die kontraktile Elemente während der

exzentrischen Phase eines SSC keiner Längenänderung unterliegen (Belli & Bosco, 1992), wohingegen andere Autoren der Meinung sind, dass sich die kontraktile Elemente zu Beginn der Bodenkontaktphase verkürzen, obwohl die Länge des gesamten Muskel-Sehnen-Komplex zunimmt. In diesem Fall gilt die Annahme, dass Energie ausschließlich in den elastischen Strukturen der MTU gespeichert wird (Griffiths, 1991). Zu den elastischen Elementen der MTU sind die Sehnen, die Bänder, die Aponeurosen, das Bindegewebe zwischen den Muskelzellen, das Sarkolemm sowie das Titin zu zählen. Konow & Roberts (2015) haben im Tierversuch an Truthähnen darstellen können, dass Sehnen zu Beginn einer exzentrischen Bewegungsphase als initialer Energieabsorber fungieren. Durch die Betrachtung unterschiedlicher Fallhöhen konnten die Autoren zeigen, dass ein Großteil der Längenänderung der MTU der Dehnung der Sehne unmittelbar nach der Landung zuzuschreiben ist. Diese Energieabsorption ist mit sehr hohen Krafteinwirkungen auf die Sehne verbunden, während der Muskel Kraft erzeugt, aber keine Energie absorbiert (Roberts, 2016). Neben der Speicherung in serienelastischen Strukturen wird in der Literatur dargestellt, dass Energiespeicherung in den parallel zu den kontraktilelementen der MTU verlaufenden Strukturen erfolgen kann. Die exakten mechanischen Eigenschaften bindegewebiger Strukturen innerhalb einer MTU sind in vivo äußerst schwierig zu determinieren, da es im Rahmen ihrer Quantifizierung messtechnisch problematisch ist, eine eindeutige Abgrenzung zu den Steifigkeitseigenschaften fibrillärer Strukturen wie beispielsweise dem Titin zu schaffen. Allerdings bestehen Strukturen wie die Muskelfazie, das Epimysium sowie das Perimysium ähnlich wie Sehnen und Bänder zu einem großen Teil aus Kollagenfasern. Es ist daher davon auszugehen, dass diese Strukturen im Rahmen einer SSC-Bewegung einen Beitrag an der Speicherung und anschließenden Freisetzung von Energie haben. Der Vergleich der Steifigkeit isolierter Muskelfasern, die relativ wenig Bindegewebe enthalten, mit Muskelfaserbündeln verdeutlicht, dass der Beitrag des Bindegewebes an der Energiespeicherung signifikant sein kann und in vielen Muskeln ursächlich für den Großteil der passiven Muskelkraft ist (Gillies & Lieber, 2011). Das Titin, als bedeutsames Strukturprotein des Sarkomers, wurde ausgehend von der 3. Filament-Theorie (Herzog et al., 2012) in einer Vielzahl wissenschaftlicher

Abhandlungen hinsichtlich seiner mechanischen Eigenschaften analysiert (u. a. DuVall et al., 2017; Herzog, 2018; Schappacher-Tilp et al., 2015). Powers et al. (2014) haben im Tierversuch dargestellt, dass Titin während exzentrischer Bewegungsphasen einen signifikanten Beitrag an der Kraftpotenzierung leistet. Die Steigerung der Kraft im Vergleich zu einer passiven Dehnung wird zu einem gewissen Anteil den veränderten Steifigkeitseigenschaften des Titins, aufgrund der Bindung von Calcium an das Protein, zugeschrieben. Ein Großteil der Kraftpotenzierung konnte allerdings im Rahmen der Untersuchung nicht eindeutig erklärt werden. Ausgehend von dem bisherigen Stand der Forschung zu den mechanischen Eigenschaften kann davon ausgegangen werden, dass das Titin einen substantiellen Beitrag an der Speicherung sowie anschließenden Freisetzung elastischer Energie im Rahmen von SSC-Bewegungen hat. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass unterschiedliche anatomische Voraussetzungen innerhalb verschiedener Skelettmuskeln sowie deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Muskulatur die exakte Quantifizierung des Beitrags der verschiedenen Strukturen an der Speicherung elastischer Energie im Kontext einer SSC-Bewegung erschweren und dieser Sachverhalt zu einer teilweise uneindeutigen Evidenzlage führt.

Als ein weiterer entscheidender Faktor, für die Kraftpotenzierung mittels SSC, wird die Geschwindigkeit der Dehnung während der exzentrischen Bewegungsphase erachtet. Um die Bedeutung dieses Faktors darzustellen, wurden Drop-Jump-Untersuchungen mit unterschiedlichen Fallhöhen durchgeführt. Die maximal erzielte Sprunghöhe wird im Rahmen dieser Untersuchungen in Abhängigkeit der Fallhöhe ermittelt (Komi & Bosco, 1978). Es wird dargestellt, dass die Leistung bis zu einer bestimmten, für jeden Probanden individuellen Fallhöhe, zunimmt und über diese hinaus ein linearer Abfall der Leistung zu beobachten ist. Die Autoren führen den beobachteten Leistungsabfall auf verschiedene körpereigene Schutzmechanismen zurück. Zum einen steigt der Einfluss des Typ Ib Golgi-Sehnenorgans, welches für die Regulierung der Muskelspannung verantwortlich ist. Zum anderen vermuten die Autoren, dass es, im Falle einer zu starken Dehnung, zu einem Verrutschen bzw. einer Trennung der Querbücker kommt (vgl. Komi & Nicol, 2010).

Taube et al. (2012) beschreiben weitere neuromuskuläre Mechanismen des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus und deren Einfluss auf die energetischen Eigenschaften des tendomuskulären Systems. Dabei wird vor allem der neuronalen Steuerung komplexer hierarchischer Kopplungen verschiedener kortikaler sowie spinaler Mechanismen durch das Zentralnervensystem ein substantieller Einfluss auf den SSC zugesprochen. So belegt eine starke Evidenz, dass SSC Bewegungen wesentlich durch eine Vorprogrammierung muskulärer Aktivierungsschemata auf supraspinaler Ebene beeinflusst werden (vgl. McDonagh & Duncan, 2002). Die zentrale Vorprogrammierung muskulärer Aktivität hat direkten Einfluss auf die Vorinnervation einzelner Muskeln innerhalb einer MTU sowie die Steifigkeitsregulation während des SSC (vgl. Taube et al., 2008) und beeinflusst so auch Teile des Aktivierungsschemas nach dem initialen Bodenkontakt beim Laufen oder Springen. Auf spinaler Ebene wird vor allem dem Muskeldehnreflex ein signifikanter Einfluss auf die Kraftpotenzierung zugeschrieben. Dieser soll im Weiteren genauer betrachtet werden.

1.2 Der Muskeldehnungsreflex als Bestandteil des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus

Bei einem Reflex handelt es sich um eine unwillkürliche Reaktion auf einen äußeren Reiz (Latash, 2008). Der Muskeldehnreflex wird den spinalen Reflexen des Menschen zugeschrieben. Grundlegend unterscheidet man zwischen reflexinduzierten Muskelkontraktionen mit kurzer Latenzzeit, dem sogenannten „short latency stretch reflex“ (SLR), Reflexen mit einer mittleren Latenz („medium latency reflex; MLR) und Reflexen mit langer Latenzzeit („long latency reflex“; LLR) (vgl. Voerman et al., 2005). Die Latenzzeit spiegelt die Leitungsgeschwindigkeit peripherer Nerven wider. Sie ist definiert als Zeitspanne zwischen Reiz und Reizantwort. Im Falle des Muskeldehnreflexes also zwischen der Dehnung des Muskels und dem Beginn seiner Kontraktion in Folge dieser. Je nach Reflex-Komponente und Muskel findet man Latenzzeiten von ca. 20 ms bis etwa 120 ms (Voerman et al., 2005).

Einige Autoren stellen einen positiven Beitrag des Dehnungsreflexes innerhalb der Kraftpotenzierung mittels Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus in Frage. Vor allem das Ausbleiben einer adäquaten Längenänderung der

intrafusalen Muskelfasern wird als limitierende Komponente erachtet. So haben beispielsweise Schenau et al. (1997) kritisch beleuchtet, dass es im Rahmen eines Countermovement Jumps (CMJ) nicht zu einer Stimulation der Muskelspindeln in Folge einer raschen Dehnung des Muskels kommt und so eine reflexinduzierte Aktivierung des Muskels ausbleibt. Demgegenüber konnten Untersuchungen von Ishikawa et al. (2007) sowie Ishikawa & Komi (2007) mittels hochfrequenter Sonografieaufzeichnungen nachweisen, dass es beim Laufen bereits bei moderaten Geschwindigkeiten zu einer eindeutigen, kurzzeitigen Dehnung der Fasciculi kommt und diese Dehnung zu einem Dehnungsreflex mit kurzer Latenzzeit im Musculus gastrocnemius führt. Der Faktor Zeit wird ebenfalls als mögliche Limitation einer effizienten Ausnutzung reflexinduzierter Muskelaktivität erachtet. Eine starke Evidenz belegt, dass zwischen dem Eintreten der reflektorischen Aktivierung eines Muskels und dem Beginn der darauffolgenden Kraftpotenzierung eine Verzögerung von 10-12 ms vorliegt. Komi (2000) hat dargestellt, dass die maximale Verzögerung zwischen der initialen Dehnung des Musculus soleus und der anschließenden Kraftpotenzierung 50 - 55 ms beträgt. Dieses Zeitintervall liegt deutlich innerhalb des Zeitfensters von 100 – 120 ms, welches repräsentativ für einen Bodenkontakt im Sprintlauf ist. Selbst Athleten der absoluten Weltklasse erreichen lediglich Bodenkontaktzeiten von circa 90 ms (vgl. Čoh et al., 2018). Es ist daher davon auszugehen, dass der Dehnungsreflex trotz der von Komi (2000) dargestellten Verzögerung einen entscheidenden Beitrag an der Kraftpotenzierung innerhalb der hinteren Stützphase des Bodenkontakts beim Sprinten hat.

Für den Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus scheint vor allem die Komponente des Dehnungsreflexes mit einer kurzen Latenzzeit von besonderer Bedeutung zu sein. Diese kann als ein wesentlicher Bestandteil sogenannter „Feedback“-Mechanismen im Rahmen eines Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (Taube et al., 2012) betrachtet werden und hat so einen entscheidenden Anteil an der Regulierung der Steifigkeit von Muskelfasern (Hoffer & Andreassen, 1981). Sofern die Integrität des Reflexbogens gewahrt ist, ist die gemessene Muskelsteifigkeit signifikant höher, als bei einer Störung des Reflexbogens (vgl. Hoffer & Andreassen, 1981). Diese Erkenntnis unterstützt die „Short-range elastic stiffness“ Hypothese (SRES) (vgl. Komi,

2000; Komi & Nicol, 2010). Die SRES Hypothese geht davon aus, dass der Muskel dazu in der Lage ist, kurzzeitig der Dehnung zu widerstehen, sofern die Dehnungsamplitude nicht zu groß wird. Der Dehnungsreflex führt zu einer zusätzlichen Aktivierung der Muskulatur und damit zu einer Erhöhung der Muskelkraft. Durch die erhöhte Steifigkeit der kontraktile Anteile wird ein Teil der dehnungsbedingten Längenveränderung von den serienelastischen Komponenten der MTU erbracht (vgl. Schmidtbleicher, 1987). Weiterführend beschreiben Shemmell et al. (2010), dass die Steifigkeit eines Gelenkes bzw. einer Extremität niemals konstant ist. Sie kann gemäß den spezifischen Anforderungen einer Bewegung reguliert werden, wobei Muskeldehnreflexe mit kurzer Latenzzeit einen signifikanten Einfluss auf die Steifigkeitseigenschaften haben können. Diese Beobachtung kann als logische Konsequenz der Regulierung durch die Muskelspindeln und die Golgi-Sehnenorgane betrachtet werden.

Erstmalige Evidenz für das Vorhandensein eines SLR im Musculus gastrocnemius innerhalb einer Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus Bewegung lieferten Dietz et al. (1979). In einer späteren Studie haben Fellows et al. (1993) mittels ischämischer Nervenblockade die afferente Information der spinalen Signalkaskade isoliert und so dargestellt, dass bei gleicher Vorinnervation des Gastrocnemius die Muskelaktivität beim Laufen mit moderater Geschwindigkeit während des Bodenkontaktes deutlich reduziert ist. Aus dieser Beobachtung leiten die Autoren ab, dass es zu keiner reflexinduzierten Muskelkontraktion während des Bodenkontaktes gekommen ist.

Die Kalkulation des exakten Beitrags des Muskeldehnreflexes an der Potenzierung der Muskelkraft bei nichtstandardisierten Bewegungen mit einer hohen Varianz der gemessenen Muskelaktivität ist methodisch nicht trivial. Dies liegt vor allem daran, dass es äußerst kompliziert ist, den Unterschied zwischen reflexinduzierter Potenzierung und resistiver Kraft der kontraktile Komponenten sowie der passiven Strukturen darzustellen. Mittels rein passiver Dorsalflexion des Fußes haben Nicol & Komi (1998); (1999) darstellen können, dass es bei einer schnellen Dehnung der Flexoren des Unterschenkels zu einem signifikanten Anstieg, der in vivo gemessenen Kraft an der Achillessehne kommt. Um diese exakt zu quantifizieren, wurde den

Probanden ein spezieller schnallenförmiger Kraftsensor (sog. „buckle force transducer“) unter lokaler Betäubung implantiert. Mittels diesem konnte determiniert werden, dass es in Folge einer schnellen passiven Dehnung zu einer reflexinduzierten Kraftpotenzierung von 200 – 500 % der zuvor gemessenen rein passiven, resistiven Kraft der MTU kommt. Dabei entsprach die höchste, durch passive Dehnung, hervorgerufene Kraft jedoch gerade einmal 6,7 % der Peak-Kräfte, welche während submaximalen Hüpfens gemessen wurden (Nicol & Komi, 1998). Es ist davon auszugehen, dass der reale Beitrag der reflexinduzierten Kraftpotenzierung bei nichtstandardisierten Bewegungen um ein Vielfaches höher liegt. In Folge wesentlich höherer Dehnungsgeschwindigkeiten bei einer Vielzahl komplexer Bewegungen, welche unter standardisierten Laborbedingungen aufgrund messtechnischer Limitationen nicht reproduzierbar sind, wird eine substantiell größere Anzahl motorischer Einheiten rekrutiert.

1.3 Darstellung potenzieller Einflussfaktoren auf die Ausprägung des Muskeldehnungsreflex

In der Theorie können Dehnungsreflexe in allen Muskeln des menschlichen Körpers auftreten. Dehnungsreflexe werden in der Regel durch kurze Muskelkontraktionen, Verschiebungen von Gliedmaßen oder Rotationen eines Gelenkes ausgelöst (vgl. Voerman et al., 2005). Am häufigsten wird in der Literatur der SLR betrachtet. Die kurzlatente Reflexkomponente wird mittels eines monosynaptischen Reflexbogens über Ia Afferenzen im Sinne eines Eigenreflexes des Muskels ausgelöst. Die Latenzzeit dieser Reflexkomponente beträgt je nach Muskel 20 – 50 ms (Lee et al., 1983). Die zweite reflexinduzierte Muskelreaktion tritt mit einer leichten Verzögerung nach dem SLR auf. Es wird vermutet, dass diese Komponente des Dehnungsreflexes durch Gruppe II Afferenzen der Muskelspindel mit einer langsameren Nervenleitgeschwindigkeit induziert wird (vgl. Schieppati & Nardone, 1997). Alternative Überlegungen gehen davon aus, dass der SLR und der MLR mittels Afferenz mit gleicher Nervenleitgeschwindigkeit induziert werden, dass es im Falle des MLR allerdings zu einer zentralen Verzögerung der Signalverarbeitung kommt (Noth et al., 1991). Die mittels Elektromyografie (EMG) gemessene Muskelaktivität des MLR übersteigt bei gesunden

Menschen in der Regel die des SLR deutlich (vgl. Noth et al., 1991). Die dritte Komponente des Dehnungsreflexes, mit der längsten Latenzzeit der reflexinduzierten Muskelreaktionen, wird in der Literatur kontrovers betrachtet. Es wird angenommen, dass es sich beim LLR um einen tonischen Reflex handelt, der nicht im relaxierten Muskel gesunder Menschen auftritt (Berardelli et al., 1983; Noth et al., 1991; Yeo et al., 1998). Uneinigkeit herrscht allerdings über den genauen Ursprung des LLR (vgl. Toft et al., 1989). Verschiedene Hypothesen zur Signaltransduktion der späten Reflexkomponente werden in der Literatur dargestellt. So wird vermutet, dass die späte reflektorische muskuläre Reaktion mittels transkortikaler Signalwege induziert wird (Rothwell et al., 1983). Auch eine polysynaptische Transduktion auf spinaler Ebene (Hultborn & Wigstrom, 1980), beziehungsweise eine aufeinander folgende monosynaptische Erregung, durch sich wiederholende Reize der Muskelspindel (Hagbarth et al., 1981), werden als möglicher Ursprung des LLR in Betracht gezogen. Die mittels EMG gemessene Stärke der reflektorischen Muskelaktivität des LLR erscheint teilweise abhängig von der gemessenen Aktivität des SLR. So kann es je nach Stärke des SLR zu einer Zunahme der Muskelaktivität während des LLR kommen, oder aber zu einer Hemmung der reflektorischen Muskelreaktion (vgl. Voerman et al., 2005). Der LLR bildet aufgrund seiner Latenzzeit den Übergang zwischen reflektorischer Muskelkontraktion und willkürlicher Innervation des Muskels.

Wie bereits dargestellt, scheint vor allem der SLR von besonderer Bedeutung für die effiziente Ausnutzung des SSC zu sein. Daher wird diese Komponente der reflektorischen Muskelreaktion im Weiteren genauer betrachtet. In der Literatur werden mehrere Faktoren beschrieben, die den SLR in seiner Ausprägung beeinflussen können. Als ein wesentlicher Faktor ist die Geschwindigkeit der Dehnung zu nennen. Diese beeinflusst sowohl die Stärke des Reflexes, abgebildet durch die Amplitude des EMG-Signals, als auch die Latenzzeit der reflektorischen Muskelreaktion. Eine Zunahme der Dehnungsgeschwindigkeit führt zu einer Vergrößerung der Reflexamplitude. Rothwell et al. (1983) haben für die extrinsische Handmuskulatur dargestellt, dass es bei steigender Dehnungsgeschwindigkeit, bis zu Rotationsgeschwindigkeit von 300°/s, zu einer Zunahme der Reflexaktivität bei gesunden Probanden kommt. Dabei kann die Zunahme der Reflexamplitude

mittels eines logarithmisch-linearen Modells beschrieben werden, bei dem zu beobachten ist, dass es vor allem bei höheren Dehnungsgeschwindigkeiten zu einem substantziellen Anstieg der Reflexstärke kommt. Die verminderte Latenzzeit bei steigender Dehnungsgeschwindigkeit ist darauf zurückzuführen, dass bei höheren Geschwindigkeiten die Aktivierungsschwelle der Muskelspindel schneller erreicht wird und somit der Prozess der Reiztransduktion früher initiiert wird (vgl. Jobin & Levin, 2000). Auf die Nervenleitgeschwindigkeit hat die Geschwindigkeit der Dehnung keinen direkten Einfluss. Des Weiteren wird im Zusammenhang mit der Dehnungsgeschwindigkeit auch die Beschleunigung als Einflussfaktor auf die Reflexamplitude betrachtet. Finley et al. (2013) haben in ihrer Untersuchung dargestellt, dass die Reflexamplitude des SLR mit einer Steigerung der Beschleunigung der Dehnung skaliert. Eine schrittweise Erhöhung der Beschleunigung von 87 rad/s^2 ($\approx 5000^\circ/\text{s}^2$) bis auf 873 rad/s^2 ($\approx 50000^\circ/\text{s}^2$) führt in ihrer Untersuchung zu einer streng monotonen Steigerung der Reflexamplitude des SLR im Musculus soleus und Musculus gastrocnemius. Als eine mögliche Erklärung für die Beschleunigungsabhängigkeit der SLR-Amplitude wird die erhöhte Sensitivität der Ia-Afferenzen für die Geschwindigkeit der Dehnung diskutiert. So haben Haftel et al. (2004) dargestellt, dass die afferenten Nervenfasern der Muskelspindel zu Beginn einer Dehnung ein Peak in ihrer Aktivierung erreichen und dass dieser Peak darauf zurückzuführen ist, dass zu diesem Zeitpunkt der Dehnung die größte Geschwindigkeitsänderungsrate zu verzeichnen ist.

Als weiterer Einflussfaktor für die Ausprägung des Dehnungsreflexes wird in der Literatur die Voraktivierung der Muskulatur diskutiert. Die Evokation des Reflexes in einem vorinnervierten Muskel hat den Vorteil, dass der Grad der Reflexvariabilität deutlich abnimmt (vgl. Voerman et al., 2005). Die Vorinnervation des zu dehnenden Muskels führt zu einer deutlich verbesserten Reproduzierbarkeit der reflektorischen Response (vgl. Voerman et al., 2005), da die Steifigkeit des Muskels durch die erhöhte Aktivität zunimmt. Edin & Vallbo (1990) haben dargestellt, dass es bei einer moderaten Muskelaktivität zu einer verbesserten Rekrutierung der intrafusalen Fasern der Muskelspindel durch das fusimotorische System kommt. Somit ist die Wahrnehmung einer Längenänderung durch die Muskelspindel in Folge

einer $\alpha - \gamma$ Co-Aktivierung, und einer mit dieser einhergehenden gesteigerten Sensitivität der Muskelspindel, begünstigt (vgl. Ogiso et al., 2002). Zudem beschreiben Musampa et al. (2007), dass bei gesunden Probanden die Reflexschwelle der Ellenbogenflexoren im relaxierten Muskel erst bei Dehnungsgeschwindigkeiten von über 300°/s erreicht wird. Unterhalb dieser Dehnungsgeschwindigkeit liegt die Reflexschwelle außerhalb der physiologischen Möglichkeiten des Ellenbogengelenkes. Der Einsatz einer leichten Vorinnervation hingegen, ermöglichte die Evokation eines Dehnreflexes bei deutlich geringeren Dehnungsgeschwindigkeiten innerhalb dieser Untersuchungen. Des Weiteren bewirkt eine Vorinnervation der Muskulatur eine Verringerung der Latenzzeit (Toft et al., 1993) der SLR und MLR Komponente des Dehnungsreflexes. Als mögliche Erklärung für diese Beobachtung nennen Toft et al. (1993) eine Reduktion der synaptischen Verzögerungszeit im Rahmen der Informationsübertragung innerhalb des Reflexbogens. Zudem gehen die Autoren davon aus, dass es zu einer Rekrutierung von Nervenfasern mit größerem Durchmesser und somit höherer Nervenleitgeschwindigkeit im Sinne des Hennemanschen Größenordnungsprinzips kommt (Henneman et al., 1965). Neben einer Reduktion der Latenzzeit bewirkt die Voraktivierung der Muskulatur eine Zunahme der Reflexamplitude. In der Literatur wird dargestellt, dass die Reflexamplitude linear mit der Voraktivierung der Muskulatur ansteigt (Matthews, 1986; Sinkjaer et al., 1988). Allerdings kann dieser lineare Zusammenhang nur bis zu einem gewissen Grad der Voraktivierung beobachtet werden. So haben Cronin et al. (2008) für den *Musculus triceps surae* dargestellt, dass es bei einer Voraktivierung über 50 % einer maximal willkürlichen Muskelkontraktion (MVC) zu einer Verminderung der Dehnungsgeschwindigkeit der Faszikel kommt und sich diese in einer Reduktion der Reflexamplitude niederschlägt.

Ein weiterer Einflussparameter für die Ausprägung der reflektorischen Muskelreaktion ist die Frequenz, mit welcher der Dehnungsreiz appliziert wird sowie die „muscle history“ des zu dehnenden Muskels. In der Literatur wird empfohlen, dass eine Stimulationsfrequenz von mindestens 0,1 Hz genutzt werden sollte, um einen Dehnungsreflex zu evozieren (Rothwell et al., 1986). Eine Erhöhung der Stimulationsfrequenz kann zu einer Beeinflussung des

Dehnungsreflexes, bedingt durch Ermüdungs- beziehungsweise Gewöhnungseffekte führen. So haben Nicol et al. (1996) dargestellt, dass muskuläre Ermüdung, induziert mittels wiederholter Durchführung eines Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus, zu einer unmittelbaren Reduktion der Reflexamplitude im *Musculus triceps surae* führt. Im Rahmen der Untersuchung war eine signifikante Hemmung der Reflexamplitude noch zwei Tage nach der akuten Ermüdungsintervention nachweisbar. In einer anderen Studie haben Avela et al. (1999) dargestellt, dass die „muscle history“ eines Muskels Einflussnahme auf die reflektorische Muskelreaktion in Folge einer schnellen Dehnung des Muskels haben kann. So führte eine prolongierte Dehnung der Wadenmuskulatur zu einer Abnahme der Reflexsensitivität im *Musculus gastrocnemius* und *Musculus soleus*. Die Autoren führen diese Beobachtung auf eine verminderte Empfindlichkeit der Muskelspindel sowie eine reduzierte Rekrutierung von afferenten Nervenfasern mit großem Faserdurchmesser zurück.

In einigen Studien wird zudem die Ausgangslänge des zu dehnenden Muskels als ein weiterer möglicher Einflussfaktor für den kurzlatenten Dehnungsreflex der Muskulatur betrachtet. Die Länge des Muskels wird direkt beeinflusst durch die Winkelstellung der interagierenden Gelenke. Stein & Kearney (1995) haben in ihren Untersuchungen einen direkten Zusammenhang zwischen der Gelenkwinkelstellung des Sprunggelenkes und der Reflexamplitude des *Musculus triceps surae* dargestellt. Im Rahmen der Testungen führte, ausgehend von einem rechten Winkel im Sprunggelenk, eine weitere Flexion des Gelenks in dorsale Richtung um $0,2 \text{ rad}$ ($\approx 11,4^\circ$) zu einem starken Anstieg der Reflexamplitude. Wohingegen eine Extension des Gelenkes im gleichen Maße zu einer signifikanten Reduktion der Reflexstärke führte. Die Autoren erklären ihre Beobachtung mittels der stabilisierenden Funktion der Unterschenkelmuskulatur im aufrechten Stand. Eine Flexion des Sprunggelenkes über die neutrale Gelenkstellung hinaus resultiert in einer vorwärtsgerichteten Verlagerung des Körperschwerpunktes. Um den Körper dennoch im Gleichgewicht zu halten ist eine verstärkte Aktivierung des *Musculus triceps surae* notwendig. Weitere Evidenz für eine positions- sowie ansteuerungsabhängige Modulation des Dehnungsreflexes liefern unter

anderem Fellows & Thilmann (1989); Signorile et al. (1995) und Hwang et al. (2000).

1.4 Darstellung des aktuellen Forschungsstandes zum Muskeldehnungsreflex in der schulterumspannenden Muskulatur

Bei der Analyse des aktuellen Forschungsstandes zum SLR ist auffällig, dass ein Großteil der Evidenz auf Ergebnissen von Untersuchungen beruht, die vorrangig die hintere Kette der Sprunggelenksmuskulatur, die knieumspannende Muskulatur sowie die Ellenbogengelenksmuskulatur und die extrinsische Handmuskulatur betrachtet haben. Bewegungen der oberen Extremität stellen aufgrund der Freiheitsgrade des Glenohumeralgelenks besondere Anforderungen an die gewählte Messmethodik und scheinen daher bisher nicht von besonderer Relevanz für das klassische Anwendungsfeld von Reflexuntersuchungen im Rahmen der neurophysiologischen Begutachtung von Spastizität und weiteren Erkrankungen zu sein. Um eine möglichst exakte Quantifizierung der Evidenzlage zu erlangen, wurden Literaturdatenbanken hinsichtlich einer Begutachtung des aktuellen Kenntnisstandes zum SLR in der schulterumspannenden Muskulatur systematisch gesichtet.

1.4.1 Methodik der Literaturrecherche

Die Suche wurde bis November 2020 in den Meta-Datenbanken *PubMed*, *Web of Science* und *SPORTDiscus* durchgeführt. Als Schlagwörter für die Recherche wurden folgende Begriffe beziehungsweise Begriffskombinationen genutzt:

- „stretch reflex“ / „muscle reflex“
- **AND**
- „shoulder“
- „arm“
- „upper body“
- „upper limb“
- „upper extremity“

Insgesamt ergaben sich aus der gewählten Suchmatrix zehn unterschiedliche Schlagwortkombinationen. Die Suchroutine wurde im Weiteren so gestaltet, dass ausschließlich nach Veröffentlichungen in englischer Sprache der

folgenden Publikationsformen gesucht wurde: *Clinical Study, Clinical Trial, Controlled Clinical Trial, Journal Article, Randomized Controlled Trial, Technical Report und Validation Study*. Zudem wurde die Zeitspanne, in welcher Untersuchungsergebnisse veröffentlicht wurden nicht limitiert, sodass es im Rahmen der Recherche möglich war den Stand der Forschung über mehrere Dekaden zu sichten. Des Weiteren wurden Publikationen für die weitere Betrachtung berücksichtigt, die im Rahmen der Analyse relevanter Publikationen als Primärquellen identifiziert wurden, deren Veröffentlichungsjournals allerdings nicht selbst in den genutzten Meta-Datenbanken gelistet sind. Im folgenden Arbeitsschritt wurden Ein- sowie Ausschlusskriterien definiert, welche auf die vorhandenen Suchergebnisse angewandt wurden, um die Publikationen gemäß ihrer Relevanz, hinsichtlich des SLR in der schulterumspannenden Muskulatur, zu analysieren. Die Einschlusskriterien für die weitere Betrachtung von Publikationen waren wie folgt definiert:

- Die Studie untersucht menschliche Probanden
- Die Probanden sind erwachsen (> 18 Jahre)
- Die Studie untersucht die schulterumspannende Muskulatur
- Die Probanden sind körperlich sowie geistig gesund
- Die Studie betrachtet Muskeldehnungsreflexe
- In den Studienergebnissen werden die Reflexlatenzzeit und / oder die Reflexamplitude und / oder der „reflex gain“ dargestellt

Die Ausschlusskriterien für die weitere Betrachtung von Studien wurden wie folgt definiert:

- Die Studie untersucht nichtmenschliche Probanden
- Die Studie untersucht minderjährige Probanden
- Die Studie untersucht Probanden mit Erkrankungen (Schlaganfall, Spastik, Parkinson u.w.)
- Die Studie betrachtet elektrisch evozierte Reflexe (H-Reflex) und / oder mittels Schlags auf die Sehne evozierte Reflexe (Sehnenreflex)
- Die Studie untersucht ausschließlich den MLR und / oder LLR
- Die Studienergebnisse beruhen auf virtuellen Modellen oder ähnlichen Verfahren

1.4.2 Ergebnisse der Literaturrecherche

Die systematische Recherche innerhalb der gewählten Meta-Datenbanken ergab 1112 Ergebnisse (Tab. 1).

Tab. 1: Ergebnisübersicht der systematischen Literaturrecherche

	Pubmed	Web of Science	SPORTDiscus
„stretch reflex“			
AND			
... shoulder	38	76	10
... arm	205	359	15
... „upper body“	5	7	3
... „upper limb“	54	134	3
... „upper extremity“	34	55	2
Gesamt „stretch reflex“ AND	336	631	33
„muscle reflex“			
AND			
... shoulder	4	7	30
... arm	8	23	1
... „upper body“	0	1	10
... „upper limb“	0	4	1
... „upper extremity“	2	3	11
Gesamt „muscle reflex“ AND	14	38	53
Gesamt (1112)	350	669	86

Die Reduktion, der auf Grundlage der beschriebenen Suchstrategie identifizierten Publikationen, auf die für die schulterumspannende Muskulatur relevanten Forschungsergebnisse, erfolgte innerhalb mehrerer Arbeitsschritte (vgl. Fig. 1). In einem ersten Arbeitsschritt wurden sämtliche Duplikate aus der Grundgesamtheit der Publikationen entfernt. Die übrigen 652 Publikationen wurden im Weiteren hinsichtlich ihrer Kongruenz mit den vordefinierten Einschlusskriterien überprüft. In einem ersten Schritt wurden alle Publikationen entfernt, deren Überschrift die Betrachtung nichtrelevanter Inhalte vermuten ließ. Im Falle nicht eindeutig formulierter Publikationstitel, erfolgte eine gesonderte Betrachtung der Abstracts. Auf Grundlage dieses Arbeitsschrittes wurden 553 Publikationen von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Die übrigen 99 Studien wurden im Rahmen einer detaillierten

Betrachtung hinsichtlich ihrer tatsächlichen Relevanz eingehender analysiert. Die Analyse führte zum Ausschluss weiterer 81 Publikationen auf Grundlage unterschiedlicher Verletzungen der definierten Einschlusskriterien (vgl. Fig. 1).

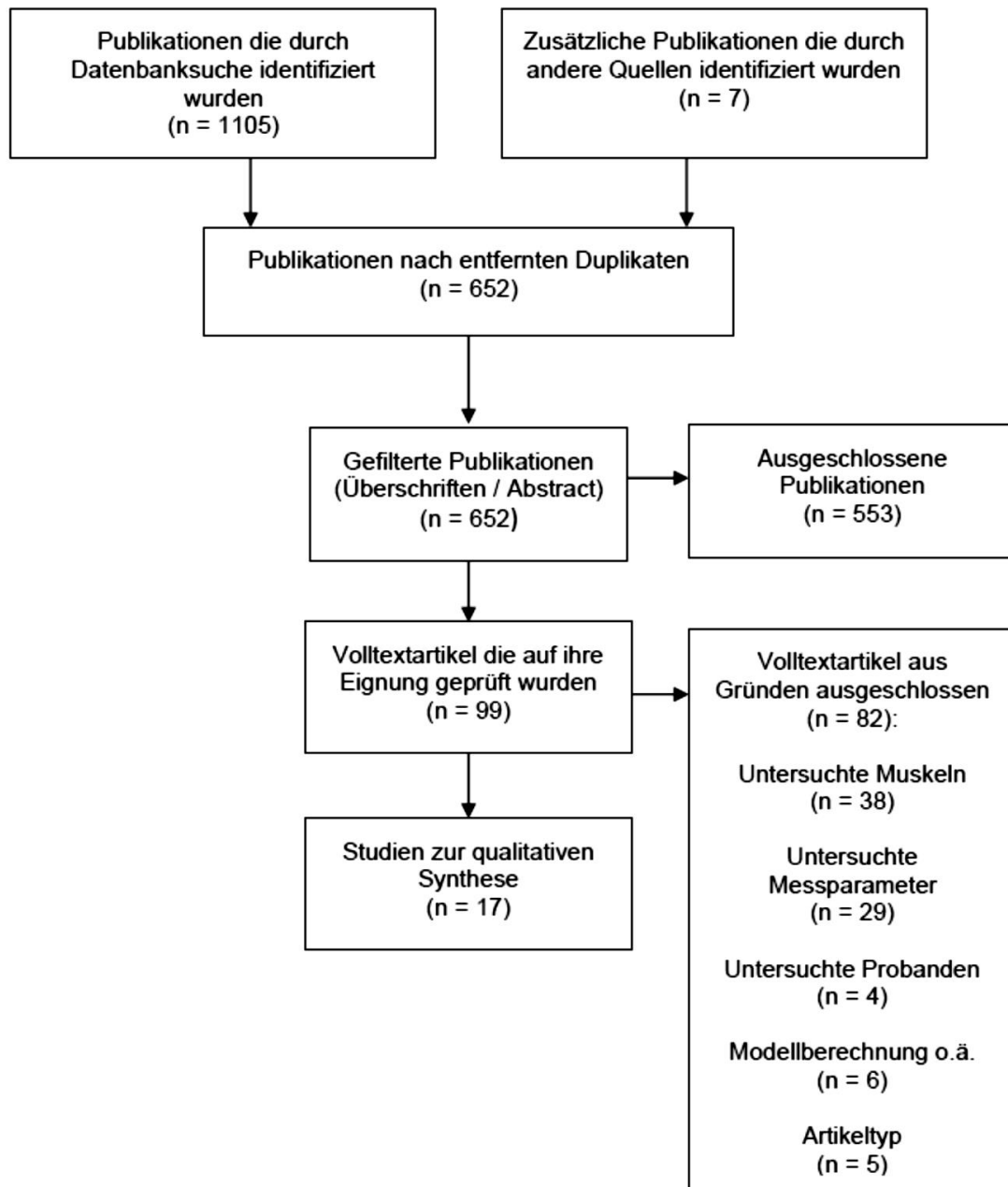


Fig. 1: Prozessbeschreibung der systematischen Literaturrecherche. (Modifiziertes Vorgehen nach „Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses“ - Standard (vgl. Moher et al., 2009))

Nach Abschluss des Prozesses blieben 17 inhaltlich relevante Publikationen übrig. Diese 17 Studien beinhalten die erste und zweite Publikation (Heinke et al., 2018, 2020) der vorliegenden kumulativen Dissertation, welche für die Darstellung des aktuellen Forschungsstandes nicht weiter berücksichtigt wurden.

Die Ergebnisse der verbliebenen Publikationen sind in Tabelle 2 (Tab. 2) zusammengefasst. In 13 der verbliebenen 15 Studien wurde der Musculus pectoralis major und / oder der Musculus deltoideus untersucht. Des Weiteren wurden in vereinzelt Studien der Musculus infraspinatus, der Musculus latissimus dorsi, der Musculus supraspinatus, der Musculus supscapularis sowie der Musculus teres minor betrachtet¹. In allen 15 Studien wird die Reflexlatenz als Messparameter dargestellt. In 7 Untersuchungen wird zudem die Reflexamplitude als Indikator, des mittels Dehnung rekrutierten Motoneuronen-Pool, dargestellt. In 2 der 15 Studien wird der Parameter „reflex gain“ als Indikator einer Modulation des SLR betrachtet. Das Probandenkollektiv bestand je nach Untersuchung aus 4 bis 30 Probanden, wobei in mehreren Studien (n = 8) sowohl das weibliche als auch das männliche Geschlecht unter den Probanden vertreten war. Große Divergenz ist bei der Wahl der Evokationsmethode zu beobachten. Der Dehnungsreiz wurde in 14 der 15 betrachteten Studien in sitzender Position appliziert. Die Dehnung der untersuchten Muskeln erfolgte dabei mittels eines Manipulandums (n = 6), durch ein robotisches Exoskelett (n = 4) oder durch ein isokinetisches Dynamometer (n = 2). Brindle et al. (1999) nutzen in ihrer Studie ein speziell angefertigtes, federgespanntes Perturbationsgerät zur Applikation einer internalen Schulterrotation. In der Untersuchung von Wyrick & Duncan (1974) wurde der Dehnungsreflex im M. deltoideus mittels einer Falltürkonstruktion evoziert. Die Perturbation des in einem rechten Winkel abduzierten Arms der Probanden erfolgte durch die Freigabe einer magnetisch gesteuerten Falltür und einem damit einhergehenden Herunterfallen des Arms. Lediglich in der Untersuchung von Latimer et al. (1998) wurde der Dehnungsreiz in einer liegenden Position appliziert. Die Autoren nutzten ein Flaschenzug sowie verschiedene Zusatzgewichte, um eine externale Schulterrotation, mit dem Ziel einen Dehnreflex in der schulterumspannenden Muskulatur hervorzurufen, zu induzieren.

In 5 der betrachteten 15 Untersuchungen resultierte die applizierte Perturbation der schulterumspannenden Muskulatur nicht in einer reflexinduzierten Muskelkontraktion mit kurzer Latenzzeit (vgl. Tab. 2). In der

¹ Im Folgenden wird Musculus durch M. abgekürzt.

Studie von Allum (1975) wird diskutiert, dass die in der Methodik gewählte Geschwindigkeit der Dehnung nicht ausreichend war, um eine monosynaptische Reaktion der gedehnten Muskulatur auszulösen. Der Autor geht davon aus, dass bei einer zu schwachen Perturbation die Stabilisation einer Bewegung im Schultergelenk mittels der inhärenten, viskoelastischen Eigenschaften der Muskulatur erfolgt und es zu keinem positiven Einfluss des Muskeldehnreflexes kommt. Der in der Studie gemessene MLR führte lediglich zu einer Zunahme von 10 % der gemessenen Kraft und wurde somit als nicht substantiell für die Haltungskontrolle des Arms der Probanden in der Untersuchung eingeschätzt. Crevecoeur et al. (2012) stellen in ihrer Studie dar, dass eine Perturbation des Armes mittels eines robotischen Exoskeletts einen SLR in der Ellenbogenmuskulatur hervorruft, jedoch nicht in der schulterumspannenden Muskulatur. Die Perturbation des Arms der Probanden mittels des robotischen Exoskeletts führte an der Schulter erst ≥ 100 ms nach der Perturbation zu nachweisbaren Bewegungen des Gelenks. Die verzögerte Übertragung der Perturbation des Arms auf das Schultergelenk resultierte in einem LLR der schulterumspannenden Muskulatur. Im Rahmen einer Kontrolluntersuchung innerhalb der Studie haben Crevecoeur et al. (2012) dargestellt, dass bei vollständiger Fixation des Schultergelenks reflexinduzierte Kontraktionen der Ellenbogenflexoren und -extensoren eine eindeutige Reaktion in den Extensoren der Schulter hervorrufen. Die Autoren gehen davon aus, dass das ZNS die Ellenbogenbewegung berücksichtigen kann, um für die Haltungskontrolle des Arms notwendige Schulterdrehmoment über ein internes Modell zu extrahieren und eine muskuläre Reaktion mit einer Latenz von ~ 50 ms in der Schultermuskulatur auszulösen (vgl. Kurtzer et al., 2009). In der Untersuchung von Hernandez-Castillo et al. (2020) konnten die Autoren keinen SLR im M. deltoideus oder im M. pectoralis major während eines simulierten Abrutschens eines Gegenstandes aus der Hand der Probanden nachweisen. Die beobachtete Muskelreaktion in Folge des simulierten Abrutschens eines Gegenstandes aus der Hand ließ dennoch das Vorhandensein eines unwillkürlichen Feedbacksystems mit reflektorischem Einfluss vermuten. Die innerhalb der Studie gemessenen Latenzzeiten wurden eindeutig durch die Testbedingungen und die mit diesen einhergehenden Anweisungen an die untersuchten Probanden moduliert. Die Autoren führen

ihre Ergebnisse auf eine Kombination spinaler, subkortikaler sowie kortikaler Mechanismen zurück. Die schnellste gemessene Latenzzeit von 67 ms innerhalb der Testbedingung, in welcher die Probanden dem Abrutschen des Gegenstandes aus der Hand aktiv nachgehen sollten, lag außerhalb derer spinaler Reflexe. Die Autoren vermuten, dass es sich bei der gemessenen muskulären Reaktion um eine automatisierte Reaktion auf den applizierten Reiz handelte, welche mittels direktem sensorischen Inputs für die Afferenzen der Schulter durch taktile Sensoren in der Hand ausgelöst wurde (vgl. Scott, 2016). In der Untersuchung von Latimer et al. (1998) haben die Autoren nicht die Latenzzeit im klassischen Verständnis dieses Messparameters, als Zeitdauer zwischen Reizapplikation und Beginn der muskulären Reaktion auf diese, dargestellt, vielmehr wird die Dauer zwischen Reizapplikation und Erreichen von 5 %, beziehungsweise 20 % der zuvor determinierten maximalen Muskelkraft in Folge des Reizes als Messparameter betrachtet. Die Studie von Latimer et al. (1998) ist die einzige der betrachteten Untersuchungen, in der die Evokation der Reflexe in der schulterumspannenden Muskulatur in liegender Position erfolgte. Die Autoren nutzten für die Perturbation des Arms ein spezielles Flaschenzugsystem, bei dem ein Gewicht von 5 Pfund am Handgelenk der Probanden, mittels eines Riemens fixiert wurde und ein weiteres Gewicht von 2,5 Pfund am distalen Ende des Humerus, unmittelbar oberhalb des Ellenbogengelenks. Das Flaschenzugsystem wurde durch ein, mit dem genutzten EMG-System synchronisierten, elektromagnetischen Regler gesteuert. Die gemessene Latenz, bis zum Erreichen von 5 % der maximalen Muskelkraft, lag je nach Muskel zwischen 110 und 200 ms. Bis zum Erreichen von 20 % der maximalen Muskelkraft wurden Werte zwischen 190 und 310 ms gemessen. Die tatsächliche Latenzzeit lässt sich auf Grundlage der beschriebenen Ergebnisse nicht exakt ableiten. Es ist allerdings davon auszugehen, dass diese nicht in das zu erwartende Zeitintervall rein spinaler Muskelreaktionen einzuordnen ist. Die Autoren argumentieren, dass die gewählte Messmethodik ein realistisches Modell auftretender traumatischer Kräfte, die in einer Luxation des Humeruskopfes resultieren könnten, darstellt. Ungeklärt bleibt jedoch, ob die gewählte Messmethodik und das zum Einsatz gekommene Flaschenzugsystem in der Lage war, einen überschwelligem Stimulus im Sinne

der zuvor beschriebenen Einflussfaktoren für den SLR zu initiieren. Die Beschreibung der Messmethodik innerhalb der Studie erlaubt keinerlei Rückschlüsse auf die resultierende Geschwindigkeit sowie die Beschleunigung der applizierten Dehnung. Die Studie von Myers et al. (2003) verdeutlicht einen eindeutigen Einfluss der Vorinnervation der zu dehnenden Muskulatur auf die gemessenen Reflexlatenzzeit in der schulterumspannenden Muskulatur. Die Latenzzeit der reflektorischen Muskelreaktionen variierte, je nach Muskel, zwischen 92,7 und 133,1 ms, sofern die Muskulatur nicht vorinnerviert wurde. Bei einer Innervation von 20 % einer maximal willkürlichen Kontraktion verringerte sich die Latenzzeit signifikant auf 63,9 bis 80,9 ms. Eine weitere Steigerung der Vorinnervation auf 50 % MVC bewirkte allerdings keine weitere Verkürzung der Latenz der gemessenen Muskelreaktionen. Vielmehr kam es im Vergleich zu den Messbedingungen mit 20 % MVC zu einer unverkennbaren, wenn auch nicht signifikanten, Verzögerung der Reiztransduktion (Latenzzeiten zwischen 78,4 und 88,9 ms). Der zu beobachtende Anstieg der Latenzzeit innerhalb der 50 % MVC Messbedingung steht in Kongruenz zu den Ergebnissen von Edin & Vallbo (1990) sowie Cronin et al. (2008), die dargestellt haben, dass bei 20 – 25 % einer maximal willkürlichen Kontraktion das Maximum der Muskelspindelsensitivität erreicht wird und dass ein weiterer Anstieg der Kontraktionsstärke zu einer Reduktion der Dehnungsgeschwindigkeit der Faszikel führt, welche sich potenziell negativ auf die Dehnungsreflexparameter auswirkt. Trotz der Reduktion der Latenzzeit, bedingt durch die Vorinnervation der zu dehnenden Muskulatur, lagen die gemessenen Latenzzeiten innerhalb der Studie von Myers et al. (2003) außerhalb des Zeitintervalls spinaler, monosynaptischer Muskelreflexe. Vielmehr ist in Anbetracht der gemessenen Latenzen innerhalb der Studie, von einer polysynaptischen Transduktion des Reizes sowie weiterer subkortikaler und kortikaler Einflussfaktoren auf die Studienergebnisse auszugehen. Eine mögliche Erklärung für eine verzögerte reflektorische Muskelreaktion könnte in der gewählten Ausgangsposition für die Applikation der in der Studie genutzten externalen Schulterrotation, mit dem Ziel einer Dehnung der untersuchten schulterumspannenden Muskulatur, begründet liegen. Die Standardabweichung der gemessenen Latenzzeiten betrug je nach Messbedingung zwischen 19,9 und 30,4 %. Wie für die

Muskulatur der unteren Extremität berichtet wurde, sind Dehnungsreflexe der Muskulatur sensibel für die Ausgangslänge des zu dehnenden Muskels. In der Untersuchung von Myers et al. (2003) haben sich die Autoren dazu entschlossen für jeden Probanden individuell den aktiven Bewegungsumfang während einer externalen Schulterrotation zu quantifizieren und ausgehend von diesem die Ausgangsposition für die applizierte Dehnung der Probanden individuell festzulegen. Dieses methodische Vorgehen resultierte in unterschiedlichen Ausgangslängen der untersuchten Muskulatur der Probanden. Des Weiteren wird in der Studie beschrieben, dass für die Untersuchungen ein isokinetisches Dynamometer genutzt wurde, allerdings erfolgte keine exakte Benennung der gewählten Geschwindigkeit der Dehnung sowie der Beschleunigung dieser. Unklar bleibt somit, ob die gewählte Messmethodik dazu führte, dass die Aktivierungsschwelle der Muskelspindeln für eine kurzlatente Muskelreaktion ohne wesentliche Verzögerungen erreicht werden konnte.

Koshland & Hasan (2000) berichten in ihrer Studie, dass die von ihnen gewählte Messmethodik in inkonsistenten SLR Reaktionen der untersuchten Muskulatur resultierte. Innerhalb der Untersuchungen erfolgte die Perturbation des M. deltoideus und M. pectoralis major während die Probanden dazu angewiesen waren ihren Arm gezielt zu bewegen. Bei zwei von vier Probanden kam es zu keiner SLR Reaktion in Folge der applizierten Perturbation im M. pectoralis major. Im M. deltoideus war bei keinem der Probanden eine SLR Reaktion in Folge des Dehnungsreizes zu beobachten. Die Autoren vermuten das die eingesetzten Perturbationen zu gering waren und es unabhängig von der Perturbationsrichtung teilweise nicht zu einem Erreichen der individuellen Reflexschwelle der Probanden kam. Zudem berichten Koshland & Hasan (2000) das die Perturbationsrichtung keinen Einfluss auf die Reflexamplitude hatte. Der Reflex war nicht vermindert, wenn die Perturbation in die gleiche Richtung erfolgte, in welche der Arm der Probanden willkürlich bewegt wurde. Interessante Ergebnisse liefert die Studie von Brindle et al. (1999). In dieser wurden trainierte Baseballspieler und eine nicht spezifisch trainierte Kontrollgruppe aus jeweils 15 Probanden untersucht. Alle untersuchten Probanden zeigten eine reflektorische Reaktion auf die applizierte internale Schulterrotation innerhalb der untersuchten Muskulatur.

Allerdings lag die Latenzzeit der Reaktionen der Baseballspieler im Mittel mit 52,69 bis 65,42 ms für alle untersuchten Muskeln außerhalb des zu erwartenden Zeitintervalls einer SLR Reaktion. Die Probanden der Kontrollgruppe hingegen zeigten für den M. infraspinatus eine mittlere Latenz von $44,9 \pm 19,9$ ms und für den M. teres minor eine mittlere Latenz von $42,4 \pm 17,5$ ms. Die Autoren vermuten, dass bei den untersuchten Baseballspielern eine trainingsinduzierte Modulation des Aktivierungsschemata der Muskeln der Rotatorenmanschette für die verzögerte reflektorische Reaktion der Muskulatur verantwortlich ist. Die verspätete Aktivierung der dorsalen Schultermuskulatur ermöglicht den Baseballspielern eine verlängerte Beschleunigungsphase beim Überkopfwurf, da die Muskeln der Rotatorenmanschette erst zu einem späteren Zeitpunkt der Bewegung den Wurfarm abbremsen. Diese Adaption an ein entsprechendes Training kann einerseits als leistungssteigernder Faktor erachtet werden, da Athleten in der Lage sind höhere Abwurfgeschwindigkeiten zu realisieren. Andererseits wird berichtet, dass die Muskeln der Rotatorenmanschette häufig von Verletzungen betroffen sind und eine Modulation der Steifigkeitseigenschaften der schulterumspannenden Muskulatur ein möglicher Faktor für diese sein könnte (vgl. Brown et al., 1988). Die Reflexamplitude der untersuchten Baseballspieler war im Vergleich zu den gemessenen Amplituden der Kontrollgruppe bei allen reflektorischen Reaktionen höher. Allerdings erlauben diese Ergebnisse keine Aussage über eine verstärkte Rekrutierung größerer motorischer Einheiten in Folge des Dehnungsreiz bei trainierten Probanden, da die Reflexamplituden beider Gruppen im Rahmen der Studie von Brindle et al. (1999) nicht zu einem entsprechenden individuellen Referenzwert normalisiert wurde. Konträre Resultate zu den Ergebnissen von Brindle et al. (1999) zeigt die Studie von Auge & Morrison (2000), in welcher der M. infraspinatus unter anderem von weiblichen Probanden mit und ohne spezifischen Trainingshintergrund der oberen Extremitäten untersucht wurde. In dieser Untersuchung konnte kein signifikanter Unterschied der Latenzzeit der reflektorischen Muskelreaktion zwischen den beiden Untersuchungsgruppen nachgewiesen werden. Die Latenzzeit der beiden Gruppen betrug im Mittel 38,6 bis 41,8 ms und lag somit innerhalb des zu erwartenden zeitlichen Rahmens einer SLR Reaktion. Die

Reflexamplitude wies ebenfalls keinerlei Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsgruppen auf. Allerdings zeigten die trainierten Probandinnen eine reduzierte Evokationshäufigkeit im Vergleich zu den Probandinnen der Kontrollgruppe. Die Autoren erklären diese Beobachtung durch eine mögliche trainingsbedingte Adaption der zentralen motorischen Kontrollmechanismen, welche sich in einer verminderten Notwendigkeit der Aufrechterhaltung spinaler Reflexe bei neuromuskulären Aktivitäten darstellt. Ähnliche Beobachtungen werden für die untere Extremität von Goode & Van Hoven (1982) beschrieben. Die Untersuchung von 20 weiblichen Balletttänzerinnen resultierte bei 4 der Probandinnen in einem Ausbleiben eines Sehnenreflexes der Patellar- und Achillessehne. Die Autoren diskutieren als mögliche Erklärung für diese Beobachtung den Einfluss hoch entwickelter zentralnervöser Kontrollmechanismen, hervorgerufen durch jahrelanges intensives Training.

Die Studien von Kimura & Gomi (2009) und Niu et al. (2010) betrachten den M. deltoideus und den M. pectoralis major. In beiden Studien wurde ein ähnliches Verfahren zur Evokation einer reflektorischen Reaktion der untersuchten Muskeln eingesetzt. Beide Studien kommen zu dem Ergebnis, dass die reflektorische Reaktion der perturbierten Muskeln durch Antizipationseffekte der Probanden moduliert wird. In der Studie von Niu et al. (2010) bewirkten konkrete Testinstruktionen durch die Untersuchungsleitung eine Veränderung der Reflexamplitude. So führte die Anweisung die Haltungskontrolle schnellstmöglich nach dem Einsetzen des Dehnungsreizes wiederzuerlangen zu größeren Reflexamplituden innerhalb der Untersuchung. Die Antizipation der Perturbationsrichtung zeigte vergleichbare Modulationseffekte in den Versuchen von Kimura & Gomi (2009). Die Autoren führen eine Vergrößerung der Reflexamplitude darauf zurück, dass die Probanden den Zeitpunkt der Perturbation zuvor korrekt antizipierten. Als mögliche Erklärung nehmen die Autoren an, dass die Reflexamplitude aufgrund der zeitlich korrekten Antizipation der Probanden für die Interaktion mit instabilen dynamischen Wechselwirkungen während der Bewegung mittels einer gesteigerten Sensitivität der Propriozeptoren angepasst wurde. Allerdings war in beiden Untersuchungen eine Modulation der Reflexamplitude lediglich für die MLR- und LLR-Komponente der reflektorischen

Muskelreaktion nachweisbar. Die Ausprägung der SLR Reaktion wurde nicht beeinflusst. Auch die Studie von Pruszynski et al. (2008) kommt zu vergleichbaren Ergebnissen, obwohl das methodische Vorgehen Abweichungen zu den zuvor genannten Studien aufwies.

In den Studien von Perreault et al. (2008) sowie Smeets & Erkelens (1991) wird neben dem Parameter Reflexlatenz noch der Parameter „reflex gain“ als Indikator einer Modulation des Reflexes dargestellt. Perreault et al. (2008) beschreiben, dass die Ausprägung der reflektorischen Muskelreaktion der Schultermuskulatur durch mehrere Faktoren beeinflusst wird. So nennen die Autoren als Einflussfaktor den Umgang der Probanden mit den mechanischen Eigenschaften der Testumgebung. Die Perturbation des Arms der Probanden mittels eines robotischen Manipulandums resultierte während der Simulation einer instabilen Umgebung in einem vergrößerten „reflex gain“, im Vergleich zur Perturbation des Arms innerhalb einer stabilen Testumgebung. Auch der Grad der Vorinnervation der Muskulatur sowie die Richtung der Perturbation beeinflussten die Zuwachsrate der reflektorischen Reaktion. Die Autoren diskutieren, dass der propriozeptive Stimulus der instabilen Testbedingung eine verstärkte Aktivierung der Gamma-Motoneuronen bewirkte, welche sich positiv auf die Sensitivität der Muskelspindel auswirkt. Außerdem wird argumentiert, dass die Bewältigung der instabilen Testumgebung zu verstärkten Kokontraktionen der umliegenden Muskulatur führte und sich diese letztlich in einem verstärkten afferenten Input aus heteronymen Signalwegen und einer gesteigerten Reflexsensitivität darstellte. Hervorzuheben ist für die Ergebnisse der Studie von Perreault et al. (2008) das die Modulation der Reflexausprägung, wie bereits bei den Ergebnissen von Kimura & Gomi (2009) und Niu et al. (2010) beschrieben, vor allem bei der MLR Reflexkomponente im Zeitintervall von 50 bis 100 ms nach Perturbationsbeginn zu beobachten war. Die SLR Komponente der reflektorischen Muskelreaktion im Zeitintervall zwischen 20 und 50 ms zeigte nur in 18 von 240 untersuchten Fällen eine signifikante Modulation ihrer Ausprägung. Zudem fiel diese in ihrer Stärke substantiell geringer aus als bei der MLR Reaktion. Die Ergebnisse der Studie von Smeets & Erkelens (1991) stellen dar, dass bei gesteigerter Vorinnervation nicht nur der „reflex gain“ der Reflexkomponenten mit längerer Latenzzeit beeinflusst wird, sondern auch die

SLR Reaktion durch die Vorinnervation der Muskulatur modelliert wird. Für den M. pectoralis major konnten die Autoren einen linearen Zusammenhang zwischen dem Grad der Voraktivierung und der Stärke der reflektorischen Reaktion des gedehnten Muskels aufzeigen. Diese Beobachtung deckt sich mit den zuvor dargestellten Erkenntnissen zu den Einflussfaktoren für die Ausprägung des SLR, welche vorrangig auf Beobachtungen der unteren Extremitäten beruhen. Der von Smeets & Erkelens (1991) beschriebene lineare Zuwachs des „reflex gain“ bei steigender Vorinnervation des Muskels weist darauf hin, dass es in Folge der erhöhten Aktivierung der Muskulatur nicht zu einem exponentiellen Zuwachs der Muskelspindelsensitivität gekommen ist und die größeren Reflexamplituden vorrangig über die gesteigerte Aktivierung der Muskulatur unmittelbar vor der Applikation des Dehnungsreizes erklärt werden kann.

Die Studien von Muraoka & Kurtzer (2020) sowie Wyrick & Duncan (1974) untersuchen, ob eine plötzliche Perturbation der Schultermuskulatur in einer kontralateralen, kurzlatenten reflektorischen Reaktion der Extensoren und Flexoren des Schultergelenkes resultiert. Die Untersuchung von Wyrick & Duncan (1974) konnte für den M. deltoideus eine SLR Reaktion im perturbierten Muskel darstellen, allerdings konnte keine intermuskuläre, reflektorische Verknüpfung zu der nicht perturbierten, kontralateralen Schultermuskulatur nachgewiesen werden. Eine solche kontralaterale Reflexevokation wurde in Untersuchungen der unteren Extremität bereits vielfach dargestellt (vgl. Gervasio et al., 2013; Stevenson et al., 2015). So haben Stevenson et al. (2015) für den M. biceps femoris gezeigt, dass es bei einer isometrischen Kontraktion des Muskels zu einer kurzlatenten reflektorischen Reaktion, mit einer Latenz von 44 ms, in Folge einer Perturbation des kontralateralen Beines kommt. Im Durchschnitt lag diese Latenz 16 ms über der des ipsilateralen, perturbierten Muskels. Die Autoren vermuten, dass diese Beobachtung auf eine transkortikale Verknüpfung der Extremitäten zurückzuführen ist, welche für die Koordination während komplexer Bewegungen unerlässlich ist. Die gemessene Verzögerung des kontralateralen Reflexes spiegelt die Transduktion sowie Verarbeitung der afferenten Signale wider. Für die oberen Extremitäten konnte eine solche intermuskuläre reflektorische Verknüpfung bisher nur für die LLR Komponente

des Dehnungsreflexes gezeigt werden. Dimitriou et al. (2012) konnten darstellen, dass die Dehnung des Ellenbogenflexors des einen Arms eine LLR Reaktion des ungedehnten, kontralateralen Ellenbogenextensors hervorrief. Eine interneuronale Verknüpfung auf der Ebene der Spinalnerven und damit einhergehend eine SLR Reaktion der Ellenbogenmuskeln konnte allerdings nicht nachgewiesen werden. Muraoka & Kurtzer (2020) haben eine solche Verknüpfung für die Schultermuskulatur dargestellt. Die SLR Reaktion des kontralateralen M. deltoideus und M. pectoralis major zeigten eine Amplitude von ~ 20 % derer des ipsilateralen Reflexes. Eine Modulation der kontralateralen Reflexausprägung durch die Richtung der Perturbation der ipsilateralen Schulter konnte für die SLR Reaktion nicht gezeigt werden. Die Autoren berichten, dass aufgrund der deutlich verminderten Reflexamplitude des kontralateralen Reflexes 4- bis 8-mal mehr Wiederholungen notwendig waren, um diesen zweifelsfrei zu identifizieren.

1.4.3 Schlussfolgerung

Die systematische Sichtung der vorhandenen Literatur mit einer Fokussierung auf die Muskulatur des Schultergelenkes offenbart eine ambivalente Evidenzlage. Zusammengefasst verdeutlicht die Darstellung des aktuellen Forschungsstandes des SLR in der schulterumspannenden Muskulatur, dass diese ohnehin durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusste unwillkürliche Reaktion des menschlichen Bewegungsapparates, durch die mechanische Komplexität des Schultergelenkes zusätzliche Anforderungen an ihre Evaluationsmethode stellt. Die bisherigen Studienergebnisse veranschaulichen ein überaus heterogenes methodisches Vorgehen, aus welchem sich keinesfalls ein methodischer Goldstandard für zukünftige Forschungsvorhaben ableiten lässt. Auf Grundlage des dargestellten Kenntnisstandes ist die Bewertung eines potenziellen Beitrags des Dehnungsreflexes an der Steifigkeitsregulation des Gelenkes sowie der Energiespeicherung im Rahmen einer Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus Bewegung in den umliegenden Strukturen schwierig zu eruieren. Wie von Roach et al. (2013) dargestellt scheint aber vor allem diese Fähigkeit evolutionär betrachtet von besonderer Bedeutung für das Gelingen eines

zielgenauen und hochdynamischen Überkopfwurfes sowie potenziell weiterer komplexer Bewegungen der oberen Extremitäten zu sein.

Tab. 2: Parameterübersicht inkludierter Publikationen.

Autor	Probandenkollektiv	Untersuchte(r) Muskel(en)	Evokationsmethode	Messparameter	Hauptergebnisse
Allum (1975)	n = 4 (männlich, Studenten)	M. infraspinatus M. latissimus dorsi M. pectoralis major M. teres major	Manipulandum, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in stabiler Position	Reflexlatenz, Reflexamplitude	keine SLR Reaktion, MLR Reaktion zu schwach, um Arm in Ausgangsposition zu halten
Auge & Morrison (2000)	n = 10 (weiblich, 5 Athletinnen und 5 Kontrollgruppe)	M. infraspinatus	Isokinetisches Dynamometer, sitzende Position, internale Schulterrotation (150°/s)	Reflexlatenz, Reflexamplitude	SLR Latenz 38,6 - 41,8 ms, keine Unterschiede zwischen Athletinnen und Kontrollgruppe, keine Unterschiede in der Reflexamplitude
Brindle et al. (1999)	n = 30 (männlich, Baseballspieler (College), Kontrollgruppe)	M. deltoideus M. infraspinatus M. supraspinatus M. teres minor	Federgespanntes Perturbationsgerät, sitzende Position, internale Schulterrotation	Reflexlatenz	Latenzzeiten in Kontrollgruppe kürzer (42,44 – 63,25 ms); Baseballspieler (52,69 – 65,42 ms)
Crevecoeur et al. (2012)	n = 25 (16 männlich, 9 weiblich)	M. deltoideus M. pectoralis major	Robotisches Exoskelett, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in stabiler Position, Perturbation während Greifaufgabe	Reflexlatenz	keine SLR Reaktion, reflektorische Reaktion (MLR / LLR) stark durch Perturbationsstärke moduliert
Hernandez-Castillo et al. (2020)	n = 14 (6 männlich, 8 weiblich)	M. deltoideus M. pectoralis major	Robotisches Exoskelett, sitzende Position, Bewegungskorrektur während simulierten Abrutschens eines Gegenstandes aus der Hand	Reflexlatenz	Keine SLR Reaktion, Feedbackreaktion innerhalb ≈ 67 ms, Reaktion durch Geschwindigkeit des Abrutschens moduliert, Kombination spinaler, subkortikaler und kortikaler Mechanismen für Reaktion verantwortlich

Autor	Probandenkollektiv	Untersuchte(r) Muskel(en)	Evokationsmethode	Messparameter	Hauptergebnisse
Kimura & Gomi (2009)	n = 16 (männlich)	M. deltoideus M. pectoralis major	Manipulandum, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in Bewegung	Reflexlatenz, Reflexamplitude	Latenzzeiten: 43,9 – 50,3 ms, MLR Reflexamplitude durch Perturbationsrichtung moduliert (Antizipationseffekte)
Koshland & Hasan (2000)	n = 4 (3 männlich, 1 weiblich)	M. deltoideus M. pectoralis major	Manipulandum, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in Bewegung	Reflexlatenz, Reflexamplitude	Inkonsistente SLR Reaktion (2 von 4 Probanden zeigen keinen SLR) im M. pectoralis major, kein SLR im M. deltoideus, kein Effekt von Perturbationsrichtung auf Reflexparameter
Latimer et al. (1998)	n = 15 (männlich)	M. deltoideus M. infraspinatus M latissimus dorsi M. pectoralis major M. supraspinatus M. supscapularis M. teres minor	Flaschenzugsystem, liegende Position, externale Schulterrotation sowie horizontale Abduktion	Reflexlatenz	Keine SLR Reaktion, muskuläre Reaktion (erreichen 5% MVC) erst nach 110 – 220 ms
Muraoka & Kurtzer (2020)	n = 23 (10 männlich, 13 weiblich)	M. deltoideus M. pectoralis major	Robotisches Exoskelett, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in Bewegung	Reflexlatenz, Reflexamplitude	Kontralaterale SLR Reaktion (1/5 der ipsilateralen Amplitude)

Autor	Probandenkollektiv	Untersuchte(r) Muskel(en)	Evokationsmethode	Messparameter	Hauptergebnisse
Myers et al. (2003)	n = 17 (10 männlich, 7 weiblich)	M. deltoideus M. infraspinatus M. latissimus dorsi M. pectoralis major M. supraspinatus M. supscapularis	Isokinetisches Dynamometer, sitzende Position, externale Schulterrotation	Reflexlatenz	Keine SLR Reaktion, Reflexmodulation durch Vorinnervation (Verkürzung der Latenzzeit), Latenzzeiten zwischen 63,9 – 133,1 ms
Niu et al. (2010)	n = 8 (5 männlich, 3 weiblich)	M. deltoideus M. pectoralis major	Robotisches Manipulandum, sitzende Position, Perturbation während Greifaufgabe	Reflexlatenz, Reflexamplitude	Keine Effekte von Testinstruktionen auf SLR Latenzzeit, Effekt von Testinstruktionen auf MLR Reflexamplitude
Perreault et al. (2008)	n = 9 (keine Angaben zum Geschlecht)	M. deltoideus M. pectoralis major	Robotisches Manipulandum, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in stabiler Position	Reflexlatenz, „reflex gain“	SLR Latenz zwischen 37,1 – 50,3 ms, „reflex gain“ durch „compliant enviroment“, Vorinnervation, und Richtung der Perturbation moduliert
Pruszynski et al. (2008)	n = 18 (11 männlich, 7 weiblich)	M. deltoideus M. pectoralis major	Robotisches Exoskelett, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in stabiler Position	Reflexlatenz, Reflexamplitude	Keine Modulation der SLR Parameter durch Intention der Probanden

Autor	Probandenkollektiv	Untersuchte(r) Muskel(en)	Evokationsmethode	Messparameter	Hauptergebnisse
Smeets & Erkelens (1991)	n = 7 (keine Angaben zum Geschlecht)	M. pectoralis major	Manipulandum, sitzende Position, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in stabiler Position	Reflexlatenz, „reflex gain“	„reflex gain“ durch Vorinnervation des Muskels moduliert
Wyrick & Duncan (1974)	n = 30 (männlich)	M. deltoideus	Sitzende Position, elektromagnetisch gesteuertes Falltür System, Perturbation während Haltungskontrolle des Arms in abduzierter Position	Reflexlatenz	SLR Latenz $24,2 \pm 12,0$ ms, keine kontralaterale reflektorische Reaktion

1.5 Zielstellung und Gliederung

Wie in der Darstellung des aktuellen Forschungsstandes des Dehnungsreflex in der schulterumspannenden Muskulatur aufgezeigt, stellt sich die Evidenzlage in Bezug auf die Ausprägung des kurzlatenten Dehnungsreflex sowie dessen Modulation in Folge diverser Einflussfaktoren als überaus heterogen dar. Eine eindeutige Aussage darüber, ob es in Folge einer plötzlichen Perturbation des Schultergelenks zu einer kurzlatenten, reflektorischen Reaktion der umliegenden Muskulatur kommt, kann auf Grundlage der bisherigen Untersuchungsergebnisse nicht getroffen werden. Über den Grad eines potenziellen Beitrages einer reflektorischen Muskelreaktion an der Generierung mechanischer Leistung bei Bewegungen der oberen Extremitäten kann auf Grundlage der bekannten Evidenz ebenfalls keinerlei Aussage getroffen werden. Eine solche reflektorische Reaktion der internalen und externalen Schulterrotatoren sowie die variable Verfügbarkeit dieser bilden allerdings, wie für die untere Extremität dargestellt (vgl. Komi & Nicol, 2010; Nicol & Komi, 1998), eine wesentliche Voraussetzung für die Ausnutzung des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus bei Bewegungen der oberen Extremitäten. Daher verfolgt diese Thesis zwei übergeordnete Zielstellungen. Das erste Ziel ist es zu untersuchen, ob es innerhalb einer, der Ausholphase des Überkopfwurfes unter standardisierten Laborbedingungen bestmöglich angenäherten Bewegung, zu einer reflektorischen, kurzlatenten Aktivierung der primären internalen Rotatoren des Schultergelenkes kommt. Das zweite Ziel der Thesis ist es, die entwickelte Evokationsmethodik zu optimieren und deren Reliabilität zu überprüfen. Um die Ausprägung einer reflektorischen Muskelreaktion in Folge einer Perturbation des Schultergelenkes zu evaluieren, werden die im Rahmen des bisherigen Forschungsstandes dargestellten Parameter: Reflexlatenz, Reflexamplitude und der „reflex gain“ betrachtet.

Die Studie, welche im ersten Manuskript dieser Thesis vorgestellt wird, betrachtet die SLR Reaktion der internalen Rotatoren des Schultergelenks bei trainierten männlichen Sportlern. Das Probandenkollektiv setzt sich aus Athleten, die Sportarten mit einer Vielzahl von Überkopfwurfbewegungen ausführen, zusammen. Wie in der Mehrzahl der zuvor dargestellten Studien wird die reflektorische Reaktion der untersuchten Muskulatur in sitzender

Position evoziert. Die Perturbation des Arms der Probanden erfolgt mittels eines isokinetischen Dynamometers. Im zweiten Manuskript dieser Thesis wird die gewählte Evokationsmethode modifiziert. Die Reflexevokation in sitzender Position, unter Zuhilfenahme eines speziell angefertigten Schulterpolsters, wird mit der Evokation in liegender Positionierung der Probanden verglichen. Die liegende Position resultiert in einer deutlich stabileren Ausgangsstellung unmittelbar vor dem Einsetzen der Perturbation des Arms der Probanden, ist allerdings mit Blick auf die möglichst exakte Simulation einer Überkopfwurfbewegung der zuvor gewählten sitzenden Positionierung unterlegen. 13 der bereits im Rahmen des ersten Manuskripts untersuchten Probanden haben an dieser Untersuchung teilgenommen. Zur Quantifizierung der Reflexausprägung werden innerhalb dieses Manuskripts die Reflexlatenz, der „reflex gain“ sowie die Reflexauslösungsrate betrachtet. Im Rahmen des dritten Manuskripts wird die Reliabilität der entwickelten Messmethodik im Vergleich zweier voneinander getrennter Messtage untersucht. Das Probandenkollektiv der trainierten Athleten wurde um 10 nicht spezifisch trainierte Sportstudierende ergänzt.

Abschließend erfolgt eine kurze Darstellung der Hauptergebnisse der einzelnen Manuskripte. Die Thesis endet mit einem Ausblick auf mögliche weitere Modifikation des entwickelten Messverfahrens sowie den Transfer in sportpraktische Anwendungsfelder. Hierbei ist vor allem die Einschätzung der sportpraktischen Relevanz der SLR Reaktion in der schulterumspannenden Muskulatur von besonderem Interesse.

2. Evaluation of passively induced shoulder stretch reflex

Evaluation of passively induced shoulder stretch reflex using an isokinetic dynamometer in male overhead athletes

Lars N. Heinke^a, Axel J. Knicker^{a,b} and Kirsten Albracht^{c,d}

^aInstitute of Movement and Neuroscience, German Sports University, Cologne, Germany;
^bSports Performance Research Institute of New Zealand, Auckland University of Technology,
Auckland, New Zealand; ^cInstitute of Biomechanics and Orthopaedics, German Sports
University, Cologne, Germany, ^dFaculty of Medical Engineering and Technomathematics,
Aachen University of Applied Science, Jülich, Germany

Published in:

Isokinetics and Exercise Science, 2018, 26(4): 265-274.

doi: 10.3233/IES-184111

Submitted: 22 January 2018 Accepted: 11 May 2018

Published: 6 Dezember 2018

Abstract

BACKGROUND: Muscle stretch reflexes are widely considered to beneficially influence joint stability and power generation in the lower limbs. While in the upper limbs and especially in the muscles surrounding the shoulder joint such evidence is lacking.

OBJECTIVE: To quantify the electromyographical response in the muscles crossing the shoulder of specifically trained overhead athletes to an anterior perturbation force.

METHODS: Twenty healthy male participants performed six sets of different external shoulder rotation stretches on an isokinetic dynamometer over a range of amplitudes and muscle pre-activation moment levels. All stretches were applied with a dynamometer acceleration of 10^4 $^{\circ}/s^2$ and a velocity of $150^{\circ}/s$. Electromyographical response was measured via sEMG.

RESULTS: Consistent reflexes were not observed in all experimental conditions. The reflex latencies revealed a significant muscle main effect ($F(2,228) = 99.31$, $p < 0.001$; $\eta^2 = .466$; $f = 0.934$) and a pre-activation main effect ($F(1,228) = 142.21$, $p < 0.001$; $\eta^2 = .384$; $f = 1.418$). The stretch reflex amplitude yielded a significant pre-activation main effect ($F(1,222) = 470.373$, $p < 0.001$; $\eta^2 = .679$; $f = 1.454$).

CONCLUSION: Short latency muscle reflexes showed a tendency to an anterior to posterior muscle recruitment whereby the main internal rotator muscles of the shoulder revealed the most consistent results.

3. Influence of subject posture on stretch reflex response

Increased shoulder muscle stretch reflex elicibility in supine subject posture

Lars N. Heinke^a, Axel J. Knicker^a and Kirsten Albracht^{b,c}

^aInstitute of Movement and Neuroscience, German Sports University, Cologne, Germany;

^bInstitute of Biomechanics and Orthopaedics, German Sports University, Cologne, Germany,

^cFaculty of Medical Engineering and Technomathematics, Aachen University of Applied Science, Jülich, Germany

Published in:

Isokinetics and Exercise Science, 2020, 28(2): 139-146.

doi: 10.3233/IES-192219

Submitted: 16 October 2019 Accepted: 28 November 2019

Published: 20 May 2020

Abstract

BACKGROUND: Muscle stretch reflexes are widely used to examine neural muscle function. The knowledge of reflex response in muscles crossing the shoulder is limited.

OBJECTIVE: To quantify reflex modulation according to various subject postures and different procedures of muscle pre-activation steering.

METHODS: Thirteen healthy male participants performed two sets of external shoulder rotation stretches in various positions and with different procedures of muscle pre-activation steering on an isokinetic dynamometer over a range of two different pre-activation levels. All stretches were applied with a dynamometer acceleration of $10^{4^{\circ}}/s^2$ and a velocity of $150^{\circ}/s$. Electromyographical response was measured via sEMG.

RESULTS: Consistent reflexive response was observed in all tested muscles in all experimental conditions. The reflex elicitation rate revealed a significant muscle main effect ($F(5,288) = 2.358$, $p = .040$; $\eta^2 = .039$; $f = .637$) and a significant test condition main effect ($F(1,288) = 5.884$, $p = .016$; $\eta^2 = .020$; $f = .143$). Reflex latency revealed a significant muscle pre-activation level main effect ($F(1,274) = 5.008$, $p = .026$; $\eta^2 = .018$; $f = .469$).

CONCLUSION: Muscular reflexive response was more consistent in the primary internal rotators of the shoulder. Supine posture in combination with visual feedback of muscle pre-activation level enhanced the reflex elicitation rate.

4. Reliability of internal shoulder muscle stretch reflexes

Test-Retest Reliability of the Internal Shoulder Rotator Muscles' Stretch Reflex in Healthy Men

Lars N. Heinke^a, Axel J. Knicker^a and Kirsten Albracht^{a,b}

^aInstitute of Movement and Neuroscience, German Sports University, Cologne, Germany;

^bFaculty of Medical Engineering and Technomathematics, Aachen University of Applied Science, Aachen, Germany

Published in:

Journal of Electromyography and Kinesiology, 2022, 62, February 2022: 102611.

doi.org/10.1016/j.jelekin.2021.102611

Submitted: 02 July 2021

Revised: 7 October 2021

Accepted: 29 October 2021

Available online: 4 November 2021

Abstract

Until now the reproducibility of the short latency stretch reflex of the internal rotator muscles of the glenohumeral joint has not been identified. Twenty-three healthy male participants performed three sets of external shoulder rotation stretches with various pre-activation levels on two different dates of measurement to assess test-retest reliability. All stretches were applied with a dynamometer acceleration of $10^{40}/s^2$ and a velocity of $150^\circ/s$. Electromyographical response was measured via surface EMG. Reflex latencies showed a pre-activation effect ($\eta^2 = 0,355$). ICC ranged from 0,735 to 0,909 indicating an overall "good" relative reliability. SRD 95% lay between $\pm 7,0$ to $\pm 12,3$ ms. The reflex gain showed overall poor test-retest reproducibility. The chosen methodological approach presented a suitable test protocol for shoulder muscles stretch reflex latency evaluation. A proof-of-concept study to validate the presented methodical approach in shoulder involvement including subjects with clinically relevant conditions is recommended.

5. Hauptergebnisse und Ausblick

Der Dehnungsreflex mit kurzer Latenz stellt einen wesentlichen „Feedback“-Mechanismus des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus dar (Taubе et al., 2012). Zur Quantifizierung der Reflexparameter wurden bisher vor allem Untersuchungen an den unteren Extremitäten, der Ellenbogengelenkmuskulatur sowie der extrinsischen Handmuskulatur durchgeführt. Der exakte Beitrag der SLR Reaktion an der Generierung mechanischer Leistung konnte bisher nur näherungsweise bestimmt werden. Vor allem die variable Natur menschlicher Bewegungen, beeinflusst durch eine Vielzahl von Einflussfaktoren, erschwert die Quantifizierung der Reflexkomponente unter standardisierten Laborbedingungen. Nicol & Komi (1998) konnten näherungsweise bestimmen, wie hoch der Anteil der Reflexkomponente an der Kraftpotenzierung während submaximalen Hüpfens ist. Die Autoren gehen allerdings, auf Grundlage verschiedener Faktoren davon aus, dass sie den tatsächlichen Beitrag der reflektorischen Muskelreaktion im Rahmen ihrer Untersuchungen um ein Vielfaches unterschätzen. Bei Untersuchungen der oberen Extremität konnten bisweilen noch keine vergleichbaren Messergebnisse dargestellt werden. Während Nicol & Komi (1998) den von ihnen untersuchten Probanden einen schnallenförmigen Kraftsensor unter lokaler Betäubung an der Achillessehne implantiert haben, ist ein vergleichbares methodisches Vorgehen aufgrund der Anatomie des Schultergelenks nicht auf die obere Extremität übertragbar.

Die Studienlage zum Dehnungsreflex mit kurzer Latenz in der schulterumspannenden Muskulatur weist eine heterogene Evidenzlage auf. Die publizierten Forschungsergebnisse weisen zum Teil keine SLR-Reaktion in Folge einer Perturbation der Schultermuskulatur auf (Allum, 1975; Crevecoeur et al., 2012; Hernandez-Castillo et al., 2020; Latimer et al., 1998; Myers et al., 2003). In weiteren Publikationen wird von inkonsistenten reflektorischen Reaktionen der Muskulatur berichtet, oder aber eine untersuchte Probandengruppe weist adaptionsbedingte Modulationen des SLR auf (Brindle et al., 1999; Koshland & Hasan, 2000). Zudem kann auf Grund der Diversität des methodischen Vorgehens der bisherig publizierten Untersuchungen keine Methodik für den Übertrag der Problemstellung in den Kontext hochdynamischer Überkopfbewegungen, wie sie in vielen Sportarten

zu finden sind, abgeleitet werden. Die vorliegende Arbeit liefert neue Erkenntnisse zur reflektorischen Reaktion der internalen Rotatoren des Schultergelenks während der Simulation einer hochdynamischen Überkopfbewegung. Die Hauptergebnisse der jeweiligen Manuskripte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Im Rahmen der für das erste Manuskript dieser Thesis durchgeführten Studie wurden 20 trainierte männliche Athleten untersucht. Die Perturbation der schulterumspannenden Muskulatur erfolgte in sitzender Position mittels eines isokinetischen Dynamometers. Die Ausgangsposition für die Evokation einer reflektorischen Muskelreaktion wurde im Rahmen der Untersuchung so gewählt, dass diese die muskulären Voraussetzungen zum Ende der Ausholbewegung bei einem Überkopfwurf bestmöglich, unter standardisierten Laborbedingungen, imitiert. Die resultierende Ausgangsposition des dominanten Arms der Probanden wurde als 90/90/90-Position definiert (90° Abduktion, 90° Außenrotation, 90° Flexion im Ellenbogengelenk). Die Perturbation der internalen Rotatoren des Schultergelenks erfolgt mittels einer, durch ein isokinetisches Dynamometer applizierten, externalen Rotation des Schultergelenks. Es wurde eine Kombination aus 3 unterschiedlichen Graden der Voraktivierung der Muskulatur und 2 unterschiedlichen Dehnungsamplituden der evozierten externalen Schulterrotation untersucht. Die Ergebnisse der ersten Studie schwankten je nach untersuchtem Muskel für den Messparameter Latenz der reflektorischen Muskelreaktion zwischen $55,3 \pm 4,5$ ms und $67,4 \pm 2,7$ ms. Ein signifikanter Effekt der Voraktivierung der perturbierten Muskulatur konnte sowohl für die Reflexlatenz als auch für die Reflexamplitude dargestellt werden. Gemäß der Definition des SLR von Lee et al. (1983) lag die gemessene Latenz außerhalb des zu erwartenden Zeitintervalls. Dies war im Rahmen der Studie, welche innerhalb des zweiten Manuskripts vorgestellt wird, bei methodisch identischer Applikation der Perturbation in sitzender Position der Probanden sowie bei der Applikation in liegender Position, bei einer Übereinstimmung des Probandenkollektivs, nicht der Fall. Die gemessene Latenz lag innerhalb dieser Untersuchung gemittelt über alle Messbedingungen bei $29,0 \pm 1,8$ ms. Die Ursache für die großen Unterschiede der Reflexlatenz könnte in der wiederholt sehr starken Dehnung der schulterumspannenden Strukturen innerhalb des Testprotokolls der ersten

Studie begründet liegen. Auch wenn im Rahmen einer Pre-Post-MVC Messung kein signifikanter Hinweis einer Ermüdung, anhand des maximal generierten internalen Drehmoments nachgewiesen werden konnte, muss in Anbetracht der weiteren Messergebnisse davon ausgegangen werden, dass die SLR Reaktion innerhalb der ersten Studie durch die „muscle history“ beeinflusst wurde. Avela et al. (1999) haben dargestellt, dass eine prolongierte Dehnung der Wadenmuskulatur zu einer Abnahme der Reflexsensitivität im Musculus gastrocnemius und Musculus soleus führt und sich diese negativ auf die Ausprägung der reflektorischen Muskelreaktion in Folge einer schnellen Dehnung des Muskels auswirkt. Die Autoren führen diese Beobachtung auf eine verminderte Empfindlichkeit der Muskelspindel sowie eine reduzierte Rekrutierung von afferenten Nervenfasern mit großem Faserdurchmesser zurück. Innerhalb der ersten Studie wurde für jeden Probanden das Ausmaß der individuellen maximalen externalen Schulterrotation quantifiziert. Die resultierende Position wurde anschließend innerhalb des Testprotokolls in randomisierter Abfolge insgesamt 30-mal mit unterschiedlicher Voraktivierung der gedehnten Muskulatur eingenommen. Des Weiteren haben Guissard & Duchateau (2006) ein thixotropes Verhalten der Muskelspindel in Folge einer statischen Dehnung nachgewiesen. Zudem werden weitere Mechanismen wie eine präsynaptische Hemmung von Ia-Afferenzen, eine homosynaptische Depression oder eine verringerte Erregbarkeit von α -Motoneuronen aufgrund einer Dehnung mit mäßiger oder großer Amplitude als weitere Einflussfaktoren auf die Reflexausprägung genannt. Wie von Nicol et al. (1996) dargestellt, kann eine signifikante Modulation der Reflexausprägung, hervorgerufen durch eine ermüdungsbedingte Abnahme der Empfindlichkeit der Muskelspindel mit einer Residualzeit von bis zu zwei Tagen nach der akuten Ermüdungsintervention nachgewiesen werden. Diese Beobachtung unterstützt die Annahme, dass die SLR Reaktion innerhalb der ersten Studie in Folge wiederkehrender starker Dehnungen moduliert wurde. Da im Rahmen der ersten Studie, anders als in den Ergebnissen von Stein & Kearney (1995) kein substanzieller Effekt einer größeren Dehnungsamplitude auf die Reflexparameter nachgewiesen werden konnte, wurde innerhalb der zweiten und dritten Studie zugunsten einer verminderten Beanspruchung der

schulterumspannenden Strukturen auf eine maximale externale Rotation des Schultergelenks verzichtet.

Ziel der zweiten Studie war eine Optimierung der eingesetzten Evokationsmethode. 13 Probanden der ersten Studie nahmen ebenfalls an dieser Untersuchung teil. Die Evokation der reflektorischen Muskelreaktion in liegender Positionierung der Probanden resultierte im Rahmen dieser Untersuchung in einer erhöhten Reflexauslösungsrate. In Rahmen von 14 der 15 in der weiteren Literatur publizierten Studien zum SLR in der schulterumspannenden Muskulatur erfolgte die Perturbation der untersuchten Muskulatur in sitzender Position der Probanden. Lediglich die Untersuchung von Latimer et al. (1998) bediente sich einer liegenden Positionierung der Probanden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen allerdings eine deutlich verzögerte Latenz der muskulären Reaktion in liegender Position, welche eindeutig außerhalb des zu erwartenden Zeitintervalls einer monosynaptischen Signaltransduktion liegt. Auf Grundlage der Ergebnisse der zweiten Studie dieser Thesis ist aus Sicht der Autoren eine Evokation des Dehnungsreflexes in den internalen Rotatoren der Schulter im Rahmen zukünftiger Untersuchung in liegender Positionierung der Probanden zu präferieren. Neuromechanisch wird diese Empfehlung durch die Ergebnisse von Klein et al. (2018) gestützt. Die Autoren haben dargestellt, dass die Sensitivität der Propriozeptoren durch die Ausrichtung des Kraftvektors der Gravitationskraft relativiert zur Bewegungsrichtung des Arms moduliert werden kann. Des Weiteren haben Suprak et al. (2016) beschrieben, dass die Positionierung des menschlichen Körpers im Raum Einfluss auf die Kinästhesie des Schultergelenks haben kann. Eine allgemeine von Auge & Morrison (2000) sowie von Goode & Van Hoven (1982) beschriebene, auf trainingsinduzierte Adaptionen zentralnervöser Kontrollmechanismen zurückzuführende, Verminderung der Reflexauslösungsrate konnte im Rahmen der zweiten Studie dieser Thesis nicht dargestellt werden. Lediglich der *Musculus deltoideus pars acromialis* wies eine teilweise reduzierte Reflexauslösungsrate auf. Die Hauptfunktion dieses Anteils des *Musculus deltoideus* liegt in der Abduktion im Schultergelenk. Es ist davon auszugehen, dass die Reflexschwelle des Muskels aufgrund verschiedener Einflussfaktoren bei der externalen Rotation des Schultergelenks teilweise nicht erreicht wurde.

Die visuelle Kontrolle der Voraktivierung der Muskulatur durch die Probanden hat sich im Rahmen der zweiten Untersuchung, neben der Evokation in liegender Position, als vorteilhaft erwiesen. Obwohl davon auszugehen ist, dass durch die visuelle Kontrolle eine gewisse Möglichkeit der Antizipation der plötzlichen Perturbation der Schulter durch die Probanden ermöglicht wird, ist durch diese keine negative Beeinflussung der Messergebnisse zu erwarten. Wie von Yamamoto & Ohtsuki (1989) dargestellt, ist eine solche Beeinflussung vor allem für die MLR- und LLR- Komponenten des Dehnungsreflexes zu erwarten. Diese werden mittels transkortikaler Signalwege induziert (Rothwell et al., 1983), beziehungsweise erfolgen durch eine polysynaptische Transduktion auf spinaler Ebene (Hultborn & Wigstrom, 1980), welche gegenüber der monosynaptischen Signaltransduktion der SLR-Komponente anfälliger für eine Beeinflussung durch Antizipationseffekte zu sein scheint.

Ziel der dritten Studie war die Überprüfung der Reliabilität der entwickelten Messmethodik. 23 Probanden nahmen an dieser Untersuchung teil. Der Intraklassen-Korrelationskoeffizient als Maß der relativen Reliabilität im Vergleich zweier Messungen an verschiedenen Tagen wies gemäß der Definition von Koo & Li (2016) eine „moderat“ bis „exzellente“ Reliabilität der Reflexlatenz nach. Für den Untersuchungsparameter „reflex gain“ lag die Reliabilität der Messung allerdings nur im Bereich von „schlecht“ bis „moderat“. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Studie kann die entwickelte Messmethodik als reliables Verfahren eingeschätzt werden. Die geringe Reproduzierbarkeit des „reflex gain“ kann auf eine Vielzahl möglicher Faktoren zurückzuführen sein. Gegebenenfalls liegt diese in Lerneffekten der applizierten Rotationsbewegung und einer zentralnervös gesteuerten Konditionierung der Propriozeptoren begründet. Mit Blick auf den Übertrag der entwickelten Messmethodik hin zu sportpraktisch orientierten Frage- und Problemstellungen spielt diese Beobachtung allerdings eine untergeordnete Rolle, da die verschiedensten hochdynamischen Bewegungen der oberen Extremität gemäß ihren mechanischen Invarianten ohnehin situative Rekrutierungsschemata der schulterumspannenden Muskulatur erfordern, welche unter standardisierten Laborbedingungen schwerlich reproduzierbar sind.

Zusammengefasst stellt diese Thesis dar, dass eine reflektorische Muskelkontraktion mit kurzer Latenz, als wichtige Voraussetzung für die Ausnutzung des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus und die Generierung mechanischer Leistung, bei der Perturbation der schulterumspannenden Muskulatur zu beobachten ist. Die reflektorische Reaktion der perturbierten Muskulatur wird dabei, wie in der Literatur bereits für die unteren Extremitäten sowie die Ellenbogenmuskulatur und die extrinsische Handmuskulatur dargestellt, in ihrer Ausprägung durch die Voraktivierung des gedehnten Muskels moduliert. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sollte zukünftig überprüft werden, ob vergleichbare Aktivierungsschemata der schulterumspannenden Muskulatur innerhalb variabler Ausgangsbedingungen, wie sie bei Bewegungen im Feld zu finden sind, nachweisbar sind. Im Rahmen einer ersten Studie, mit dem Ziel der problembasierten Anwendung sowie bedarfsgerechten Anpassung der entwickelten Messmethodik, wurde die Aufrollbewegung beim Stabhochsprung hinsichtlich einer reflektorischen Aktivierung der Extensoren des Schultergelenks zu Beginn der Bewegung untersucht (Heinke et al., 2021; in Vorbereitung). Unter Zuhilfenahme eines isokinetischen Dynamometers wurde im Rahmen dieser Untersuchung die arthromuskuläre Funktion der Schulterextensoren, bei einer den mechanobiologischen Gegebenheiten während der Einstichbewegung des Stabhochspringens angenäherten Bewegung, hinsichtlich einer reflektorischen Aktivierung der Muskulatur analysiert. Um die im Labor dargestellten Aktivierungsschemata der Schulterextensoren hinsichtlich eines Übertrags zu den sportartbezogenen, neuomechanischen Gegebenheiten der Zielbewegung zu untersuchen, wurden die gemessenen kurzlatenten Reaktionen der perturbierten Muskulatur in einem weiteren Schritt mit dem Aktivierungsschemata der Aufrollbewegung am Hochreck, einer häufig im Training von Stabhochspringern durchgeführten Übung zur Schulung der Bewegungskoordination während der Stabphase der Gesamtbewegung, verglichen. Dieser Vergleich resultierte in einem substanziellen Analogismus der reflektorischen Reaktionen der Schulterextensoren der untersuchten Probanden. Vorrausgegangene Untersuchungen zur Muskelaktivität während des Stabhochsprungs konnten bisher keine validen Messwerte für die

Einstichbewegung und den Beginn der Stabphase erheben, da es bei der Bewegung zu einem zu starken Crosstalk zwischen den subkutan angeordneten Muskeln oder aber zu Verschiebung der Muskulatur gegen die Hautoberfläche gekommen ist (vgl. Frère et al., 2012). Darüber hinaus unterliegen Messungen im Feld generell einer hohen intra- und interindividuellen Variabilität bei gleichzeitig variierenden externen Einflussgrößen, sodass sich selten standardisierte und reproduzierbare Bedingungen herstellen lassen, wie sie für die Aufzeichnung von Reflexcharakteristika notwendig sind.

6. Literaturverzeichnis

1. Allum, J. H. (1975). Responses to load disturbances in human shoulder muscles: the hypothesis that one component is a pulse test information signal. *Experimental Brain Research*, 22(3), 307–326. <https://doi.org/10.1007/bf00234772>
2. Auge, W. K. & Morrison, D. S. (2000). Assessment of the infraspinatus spinal stretch reflex in the normal, athletic, and multidirectionally unstable shoulder. *American Journal of Sports Medicine*, 28(2), 206–213. <https://doi.org/10.1177/03635465000280021101>
3. Avela, J., Kyröläinen, H. & Komi, P. V. (1999). Altered reflex sensitivity after repeated and prolonged passive muscle stretching. *J Appl Physiol* (1985), 86(4), 1283-1291. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.4.1283>
4. Belli, A. & Bosco, C. (1992). Influence of stretch-shortening cycle on mechanical behaviour of triceps surae during hopping. *Acta Physiol Scand*, 144(4), 401-408. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1992.tb09313.x>
5. Berardelli, A., Sabra, A. F., Hallett, M., Berenberg, W. & Simon, S. R. (1983). Stretch reflexes of triceps surae in patients with upper motor neuron syndromes. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 46(1), 54-60. <https://doi.org/10.1136/jnnp.46.1.54>
6. Brindle, T. J., Nyland, J., Shapiro, R., Caborn, D. N. & Stine, R. (1999). Shoulder proprioception: latent muscle reaction times. *Med Sci Sports Exerc*, 31(10), 1394-1398. <https://doi.org/10.1097/00005768-199910000-00006>

-
7. Brown, L. P., Niehues, S. L., Harrah, A., Yavorsky, P. & Hirshman, H. P. (1988). Upper extremity range of motion and isokinetic strength of the internal and external shoulder rotators in major league baseball players. *Am J Sports Med*, 16(6), 577-585. <https://doi.org/10.1177/036354658801600604>
 8. Cavagna, G. A., Komarek, L. & Mazzoleni, S. (1971). The mechanics of sprint running. *J Physiol*, 217(3), 709-721. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1971.sp009595>
 9. Cavagna, G. A., Saibene, F. P. & Margaria, R. (1965). Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle. *J Appl Physiol*, 20, 157-158. <https://doi.org/10.1152/jappl.1965.20.1.157>
 10. Čoh, M., Hébert-Losier, K., Štuhec, S., Babić, V. & Supej, M. (2018). Kinematics of Usain Bolt's maximal sprint velocity. *Kinesiology*, 50, 100-101. <https://doi.org/10.26582/k.50.2.10>
 11. Crevecoeur, F., Kurtzer, I. & Scott, S. H. (2012). Fast corrective responses are evoked by perturbations approaching the natural variability of posture and movement tasks. *Journal of Neurophysiology*, 107(10), 2821–2832. <https://doi.org/10.1152/jn.00849.2011>
 12. Cronin, N. J., Peltonen, J., Ishikawa, M., Komi, P. V., Avela, J., Sinkjaer, T. & Voigt, M. (2008). Effects of contraction intensity on muscle fascicle and stretch reflex behavior in the human triceps surae. *J Appl Physiol* (1985), 105(1), 226-232. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90432.2008>

-
13. Dietz, V., Schmidtbleicher, D. & Noth, J. (1979). Neuronal mechanisms of human locomotion. *J Neurophysiol*, 42(5), 1212-1222. <https://doi.org/10.1152/jn.1979.42.5.1212>

 14. Dimitriou, M., Franklin, D. W. & Wolpert, D. M. (2012). Task-dependent coordination of rapid bimanual motor responses. *J Neurophysiol*, 107(3), 890-901. <https://doi.org/10.1152/jn.00787.2011>

 15. DuVall, M. M., Jinha, A., Schappacher-Tilp, G., Leonard, T. R. & Herzog, W. (2017). Differences in titin segmental elongation between passive and active stretch in skeletal muscle. *The Journal of experimental biology*, 220(Pt 23), 4418-4425. <https://doi.org/10.1242/jeb.160762>

 16. Edin, B. B. & Vallbo, A. B. (1990). Muscle afferent responses to isometric contractions and relaxations in humans. *J Neurophysiol*, 63(6), 1307-1313. <https://doi.org/10.1152/jn.1990.63.6.1307>

 17. Fellows, S. J., Dömges, F., Töpfer, R., Thilmann, A. F. & Noth, J. (1993). Changes in the short- and long-latency stretch reflex components of the triceps surae muscle during ischaemia in man. *J Physiol*, 472, 737-748. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1993.sp019970>

 18. Fellows, S. J. & Thilmann, A. F. (1989). The role of joint biomechanics in determining stretch reflex latency at the normal human ankle. *Exp Brain Res*, 77(1), 135-139. <https://doi.org/10.1007/bf00250575>

 19. Finley, J. M., Dhaher, Y. Y. & Perreault, E. J. (2013). Acceleration dependence and task-specific modulation of short- and medium-latency reflexes in the ankle extensors. *Physiol Rep*, 1(3), e00051. <https://doi.org/10.1002/phy2.51>

-
20. Frère, J., Göpfert, B., Slawinski, J. & Tourny-chollet, C. (2012). Effect of the upper limbs muscles activity on the mechanical energy gain in pole vaulting. *J Electromyogr Kinesiol*, 22(2), 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2011.11.007>
21. Gervasio, S., Farina, D., Sinkjær, T. & Mrachacz-Kersting, N. (2013). Crossed reflex reversal during human locomotion. *Journal of Neurophysiology*, 109(9), 2335-2344. <https://doi.org/10.1152/jn.01086.2012>
22. Gillies, A. R. & Lieber, R. L. (2011). Structure and function of the skeletal muscle extracellular matrix. *Muscle Nerve*, 44(3), 318-331. <https://doi.org/10.1002/mus.22094>
23. Goode, D. J. & Van Hoven, J. (1982). Loss of patellar and Achilles tendon reflexes in classical ballet dancers. *Arch Neurol*, 39(5), 323. <https://doi.org/10.1001/archneur.1982.00510170065030>
24. Griffiths, R. I. (1991). Shortening of muscle fibres during stretch of the active cat medial gastrocnemius muscle: the role of tendon compliance. *J Physiol*, 436, 219-236. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1991.sp018547>
25. Guissard, N. & Duchateau, J. (2006). Neural aspects of muscle stretching. *Exerc Sport Sci Rev*, 34(4), 154-158. <https://doi.org/10.1249/01.jes.0000240023.30373.eb>
26. Haftel, V. K., Bichler, E. K., Nichols, T. R., Pinter, M. J. & Cope, T. C. (2004). Movement reduces the dynamic response of muscle spindle afferents and motoneuron synaptic potentials in rat. *J Neurophysiol*, 91(5), 2164-2171. <https://doi.org/10.1152/jn.01147.2003>

27. Hagbarth, K. E., Hägglund, J. V., Wallin, E. U. & Young, R. R. (1981). Grouped spindle and electromyographic responses to abrupt wrist extension movements in man. *J Physiol*, 312, 81-96. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1981.sp013617>
28. Heinke, L. N., Knicker, A. J. & Albracht, K. (2018). Evaluation of passively induced shoulder stretch reflex using an isokinetic dynamometer in male overhead athletes. *Isokinetics and Exercise Science*, 26(4), 265-274. <https://doi.org/10.3233/ies-184111>
29. Heinke, L. N., Knicker, A. J. & Albracht, K. (2020). Increased shoulder muscle stretch reflex elicibility in supine subject posture. *Isokinetics and Exercise Science*, 28(2), 139-146. <https://doi.org/10.3233/IES-192219>
30. Heinke, L. N., Knicker, A. J. & Albracht, K. (2022). Test-Retest reliability of the internal shoulder rotator muscles' stretch reflex in healthy men. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 62, 102611. <https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2021.102611>
31. Heinke, L. N., Pieper, R., Knicker, A. J. & Albracht, K. (2021). Examination of the monosynaptic muscle stretch reflex in the shoulder extensors during pole vault-specific movements. *unpublished results*.
32. Henneman, E., Somjen, G. & Carpenter, D. O. (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol*, 28, 560-580. <https://doi.org/10.1152/jn.1965.28.3.560>
33. Hernandez-Castillo, C. R., Maeda, R. S., Pruszynski, J. A. & Diedrichsen, J. (2020). Sensory information from a slipping object elicits a rapid and

-
- automatic shoulder response. *Journal of Neurophysiology*, 123(3), 1103–1112. <https://doi.org/10.1152/jn.00672.2019>
34. Herzog, W. (2018). The multiple roles of titin in muscle contraction and force production. *Biophys Rev*, 10(4), 1187-1199. <https://doi.org/10.1007/s12551-017-0395-y>
35. Herzog, W., Leonard, T., Joumaa, V., DuVall, M. & Panchangam, A. (2012). The three filament model of skeletal muscle stability and force production. *Mol Cell Biomech*, 9(3), 175-191.
36. Hoffer, J. A. & Andreassen, S. (1981). Regulation of soleus muscle stiffness in premammillary cats: intrinsic and reflex components. *J Neurophysiol*, 45(2), 267-285. <http://jn.physiology.org/content/jn/45/2/267.full.pdf>
37. Hultborn, H. & Wigstrom, H. (1980). Motor response with long latency and maintained duration evoked by activity in Ia afferents *Progress in Clinical Neurophysiology*, 8, 99-116.
38. Hwang, I. S., Abraham, L. D. & Chou, S. W. (2000). The effect of ankle joint position and effort on quadriceps reflex sensitivity. *Clin Neurophysiol*, 111(7), 1175-1183. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(00\)00296-0](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(00)00296-0)
39. Ishikawa, M. & Komi, P. V. (2007). The role of the stretch reflex in the gastrocnemius muscle during human locomotion at various speeds. *J Appl Physiol* (1985), 103(3), 1030-1036. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00277.2007>

-
40. Ishikawa, M., Pakaslahti, J. & Komi, P. V. (2007). Medial gastrocnemius muscle behavior during human running and walking. *Gait & posture*, 25(3), 380-384. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.05.002>
41. Jobin, A. & Levin, M. F. (2000). Regulation of stretch reflex threshold in elbow flexors in children with cerebral palsy: a new measure of spasticity. *Dev Med Child Neurol*, 42(8), 531-540. <https://doi.org/10.1017/s0012162200001018>
42. Kimura, T. & Gomi, H. (2009). Temporal Development of Anticipatory Reflex Modulation to Dynamical Interactions During Arm Movement. *Journal of Neurophysiology*, 102(4), 2220–2231. <https://doi.org/10.1152/jn.90907.2008>
43. Klein, J., Whitsell, B., Artemiadis, P. K. & Buneo, C. A. (2018). Perception of Arm Position in Three-Dimensional Space. *Front Hum Neurosci*, 12, 331. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00331>
44. Komi, P. V. (2000). Stretch-shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *J Biomech*, 33(10), 1197-1206. [https://doi.org/10.1016/s0021-9290\(00\)00064-6](https://doi.org/10.1016/s0021-9290(00)00064-6)
45. Komi, P. V. & Bosco, C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med Sci Sports*, 10(4), 261-265.
46. Komi, P. V. & Nicol, C. (2010). Stretch-Shortening Cycle of Muscle Function. In *Neuromuscular Aspects of Sport Performance* (pp. 15-31). <https://doi.org/10.1002/9781444324822.ch2>
47. Konow, N. & Roberts, T. J. (2015). The series elastic shock absorber: tendon elasticity modulates energy dissipation by muscle during burst

-
- deceleration. *Proc Biol Sci*, 282(1804), 20142800.
<https://doi.org/10.1098/rspb.2014.2800>
48. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jcm.2016.02.012>
49. Koshland, G. F. & Hasan, Z. (2000). Electromyographic responses to a mechanical perturbation applied during impending arm movements in different directions: one-joint and two-joint conditions. *Experimental Brain Research*, 132(4), 485–499.
<https://doi.org/10.1007/s002210000356>
50. Kurtzer, I., Pruszynski, J. A. & Scott, S. H. (2009). Long-latency responses during reaching account for the mechanical interaction between the shoulder and elbow joints. *J Neurophysiol*, 102(5), 3004-3015.
<https://doi.org/10.1152/jn.00453.2009>
51. Latash, M. L. (2008). *Neurophysiological basis of movement* (2. Aufl.). Human Kinetics.
52. Latimer, H. A., Tibone, J. E., Pink, M. M., Mohr, K. J. & Perry, J. (1998). Shoulder reaction time and muscle-firing patterns in response to an anterior translation force. *J Shoulder Elbow Surg*, 7(6), 610-615.
53. Lee, R. G., Murphy, J. T. & Tatton, W. G. (1983). Long-latency myotatic reflexes in man: mechanisms, functional significance, and changes in patients with Parkinson's disease or hemiplegia. *Adv Neurol*, 39, 489-508.

-
54. Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N. & Duchateau, J. (2016). Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol*, 116(6), 1091-1116. <https://doi.org/10.1007/s00421-016-3346-6>
55. Matthews, P. B. (1986). Observations on the automatic compensation of reflex gain on varying the pre-existing level of motor discharge in man. *J Physiol*, 374, 73-90. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1986.sp016066>
56. McDonagh, M. J. & Duncan, A. (2002). Interaction of pre-programmed control and natural stretch reflexes in human landing movements. *J Physiol*, 544(3), 985-994. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2002.024844>
57. Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J. & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, 339, b2535. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
58. Muraoka, T. & Kurtzer, I. (2020). Spinal Circuits Mediate a Stretch Reflex Between the Upper Limbs in Humans. *Neuroscience*, 431, 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.02.007>
59. Musampa, N. K., Mathieu, P. A. & Levin, M. F. (2007). Relationship between stretch reflex thresholds and voluntary arm muscle activation in patients with spasticity. *Exp Brain Res*, 181(4), 579-593. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-0956-6>
60. Myers, J. B., Riemann, B. L., Ju, Y.-Y., Hwang, J.-H., McMahon, P. J. & Lephart, S. M. (2003). Shoulder Muscle Reflex Latencies Under Various Levels of Muscle Contraction. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 407, 92-101. <https://doi.org/10.1097/00003086-200302000-00017>

61. Nicol, C. & Komi, P. V. (1998). Significance of passively induced stretch reflexes on achilles tendon force enhancement. *Muscle Nerve*, 21(11), 1546-1548.
62. Nicol, C. & Komi, P. V. (1999). Quantification of Achilles Tendon Force Enhancement by Passively Induced Dorsiflexion Stretches. *Journal of Applied Biomechanics*, 15(3), 221. <https://doi.org/10.1123/jab.15.3.221>
63. Nicol, C., Komi, P. V., Horita, T., Kyröläinen, H. & Takala, T. E. (1996). Reduced stretch-reflex sensitivity after exhausting stretch-shortening cycle exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 72(5-6), 401-409. <https://doi.org/10.1007/bf00242268>
64. Niu, C. M., Corcos, D. M. & Shapiro, M. B. (2010). Temporal Shift From Velocity to Position Proprioceptive Feedback Control During Reaching Movements. *Journal of Neurophysiology*, 104(5), 2512–2522. <https://doi.org/10.1152/jn.00302.2010>
65. Noth, J., Schwarz, M., Podoll, K. & Motamedi, F. (1991). Evidence that low-threshold muscle afferents evoke long-latency stretch reflexes in human hand muscles. *J Neurophysiol*, 65(5), 1089-1097. <https://doi.org/10.1152/jn.1991.65.5.1089>
66. Ogiso, K., McBride, J. M., Finni, T. & Komi, P. V. (2002). Short-latency stretch reflex modulation in response to varying soleus muscle activities. *J Electromyogr Kinesiol*, 12(1), 17-26. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(01\)00030-x](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(01)00030-x)
67. Perreault, E. J., Chen, K., Trumbower, R. D. & Lewis, G. (2008). Interactions with compliant loads alter stretch reflex gains but not

-
- intermuscular coordination. *Journal of Neurophysiology*, 99(5), 2101–2113. <https://doi.org/10.1152/jn.01094.2007>
68. Powers, K., Schappacher-Tilp, G., Jinha, A., Leonard, T., Nishikawa, K. & Herzog, W. (2014). Titin force is enhanced in actively stretched skeletal muscle. *The Journal of experimental biology*, 217(Pt 20), 3629-3636. <https://doi.org/10.1242/jeb.105361>
69. Pruszynski, J. A., Kurtzer, I. & Scott, S. H. (2008). Rapid motor responses are appropriately tuned to the metrics of a visuospatial task. *Journal of Neurophysiology*, 100(1), 224–238. <https://doi.org/10.1152/jn.90262.2008>
70. Roach, N. T., Venkadesan, M., Rainbow, M. J. & Lieberman, D. E. (2013). Elastic energy storage in the shoulder and the evolution of high-speed throwing in Homo. *Nature*, 498(7455), 483-486. <https://doi.org/10.1038/nature12267>
71. Roberts, T. J. (2016). Contribution of elastic tissues to the mechanics and energetics of muscle function during movement. *The Journal of experimental biology*, 219(Pt 2), 266-275. <https://doi.org/10.1242/jeb.124446>
72. Rothwell, J., Obeso, J., Traub, M. & Marsden, C. (1983). The behaviour of the long-latency stretch reflex in patients with Parkinson's disease. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 46(1), 35-44.
73. Rothwell, J. C., Day, B. L., Berardelli, A. & Marsden, C. D. (1986). Habituation and conditioning of the human long latency stretch reflex. *Exp Brain Res*, 63(1), 197-204.

-
74. Schappacher-Tilp, G., Leonard, T., Desch, G. & Herzog, W. (2015). A novel three-filament model of force generation in eccentric contraction of skeletal muscles. *PLoS One*, 10(3), e0117634. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117634>
75. Schenau, G. J. v. I., Bobbert, M. F. & Haan, A. d. (1997). Does Elastic Energy Enhance Work and Efficiency in the Stretch-Shortening Cycle? *Journal of Applied Biomechanics*, 13(4), 389. <https://doi.org/10.1123/jab.13.4.389>
76. Schieppati, M. & Nardone, A. (1997). Medium-latency stretch reflexes of foot and leg muscles analysed by cooling the lower limb in standing humans. *J Physiol*, 503 (3), 691-698. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1997.691bg.x>
77. Schmidtbleicher, D. (1987). Motorische Beanspruchungsform Kraft. Struktur und Einflussgrößen, Adaptationen, Trainingsmethoden, Diagnose und Trainingsansteuerung. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 38(9), 356-377.
78. Scott, S. H. (2016). A Functional Taxonomy of Bottom-Up Sensory Feedback Processing for Motor Actions. *Trends Neurosci*, 39(8), 512-526. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.06.001>
79. Shemmell, J., Krutky, M. A. & Perreault, E. J. (2010). Stretch sensitive reflexes as an adaptive mechanism for maintaining limb stability. *Clin Neurophysiol*, 121(10), 1680-1689. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.02.166>
80. Signorile, J. F., Kacsik, D., Perry, A., Robertson, B., Williams, R., Lowensteyn, I., Digel, S., Caruso, J. & LeBlanc, W. G. (1995). The effect of knee and foot position on the electromyographical activity of the

-
- superficial quadriceps. *J Orthop Sports Phys Ther*, 22(1), 2-9.
<https://doi.org/10.2519/jospt.1995.22.1.2>
81. Sinkjaer, T., Toft, E., Andreassen, S. & Hornemann, B. C. (1988). Muscle stiffness in human ankle dorsiflexors: intrinsic and reflex components. *J Neurophysiol*, 60(3), 1110-1121.
<http://jn.physiology.org/content/jn/60/3/1110.full.pdf>
82. Smeets, J. B. & Erkelens, C. J. (1991). Dependence of autogenic and heterogenic stretch reflexes on pre-load activity in the human arm. *The Journal of physiology*, 440, 455–465.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1991.sp018718>
83. Stein, R. B. & Kearney, R. E. (1995). Nonlinear behavior of muscle reflexes at the human ankle joint. *J Neurophysiol*, 73(1), 65-72.
<https://doi.org/10.1152/jn.1995.73.1.65>
84. Stevenson, A. J., Kamavuako, E. N., Geertsen, S. S., Farina, D. & Mrachacz-Kersting, N. (2015). Short-latency crossed responses in the human biceps femoris muscle. *J Physiol*, 593(16), 3657-3671.
<https://doi.org/10.1113/jp270422>
85. Suprak, D. N., Sahlberg, J. D., Chalmers, G. R. & Cunningham, W. (2016). Shoulder elevation affects joint position sense and muscle activation differently in upright and supine body orientations. *Hum Mov Sci*, 46, 148-158. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.01.008>
86. Taube, W., Leukel, C. & Gollhofer, A. (2012). How neurons make us jump: the neural control of stretch-shortening cycle movements. *Exerc Sport Sci Rev*, 40(2), 106-115.
<https://doi.org/10.1097/JES.0b013e31824138da>

87. Taube, W., Leukel, C., Schubert, M., Gruber, M., Rantalainen, T. & Gollhofer, A. (2008). Differential modulation of spinal and corticospinal excitability during drop jumps. *J Neurophysiol*, 99(3), 1243-1252. <https://doi.org/10.1152/jn.01118.2007>
88. Toft, E., Sinkjaer, T., Andreassen, S. & Hansen, H. J. (1993). Stretch responses to ankle rotation in multiple sclerosis patients with spasticity. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 89(5), 311-318. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(93\)90070-6](https://doi.org/10.1016/0168-5597(93)90070-6)
89. Toft, E., Sinkjaer, T. & Espersen, G. T. (1989). Quantitation of the stretch reflex. Technical procedures and clinical applications. *Acta Neurol Scand*, 79(5), 384-390.
90. Van Cutsem, M., Duchateau, J. & Hainaut, K. (1998). Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *J Physiol*, 513 (Pt 1)(Pt 1), 295-305. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7793.1998.295by.x>
91. Voerman, G. E., Gregoric, M. & Hermens, H. J. (2005). Neurophysiological methods for the assessment of spasticity: the Hoffmann reflex, the tendon reflex, and the stretch reflex. *Disabil Rehabil*, 27(1-2), 33-68. <https://doi.org/10.1080/09638280400014600>
92. Wilson, G. J., Newton, R. U., Murphy, A. J. & Humphries, B. J. (1993). The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Med Sci Sports Exerc*, 25(11), 1279-1286.
93. Wyrick, W. & Duncan, A. (1974). Electromyographical study of reflex, premotor, and simple reaction time of relaxed muscle to joint

displacement *Journal of Motor Behavior*, 6(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1080/00222895.1974.10734973>

94. Yamamoto, C. & Ohtsuki, T. (1989). Modulation of stretch reflex by anticipation of the stimulus through visual information. *Experimental brain research*, 77(1), 12-22. <https://doi.org/10.1007/bf00250562>
95. Yeo, W., Ada, L., O'Dwyer, N. J. & Neilson, P. D. (1998). Tonic stretch reflexes in older able-bodied people. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 38(5), 273-278.

7. Zusammenfassung

Der Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus beschreibt das natürliche Zusammenspiel isometrischer, exzentrischer und konzentrischer Muskelkontraktionen im Rahmen verschiedener Phasen einer Bewegung. Dieser ermöglicht die effiziente Ausführung alltäglicher Bewegungen sowie die Maximierung der Leistung bei hochdynamischen Bewegungen. Die Ausnutzung des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus wird durch die neuronale Steuerung komplexer hierarchischer Kopplungen verschiedener kortikaler sowie spinaler Mechanismen reguliert. Auf spinaler Ebene wird vor allem dem Muskeldehnreflex ein signifikanter Einfluss auf die Kraftpotenzierung zugeschrieben. Für den Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus ist vor allem die kurzlatente reflektorische Muskelreaktion (short latency stretch reflex, SLR) von besonderer Bedeutung. Diese wird von einer Vielzahl von Faktoren in ihrer Ausprägung beeinflusst. Allerdings beruht der Großteil der bekannten Evidenz auf Ergebnissen von Untersuchungen, die vorrangig die hintere Kette der Sprunggelenkmuskulatur, die knieumspannende Muskulatur sowie die Ellenbogengelenkmuskulatur und die extrinsische Handmuskulatur betrachtet haben. Eine systematische Analyse der Literatur offenbart einen heterogenen Kenntnisstand der reflektorischen Aktivierung der schulterumspannenden Muskulatur. Daher widmet sich die vorgelegte Arbeit der Untersuchung des Muskeldehnreflexes der internalen Rotatoren der Schulter mit dem Ziel eine Messmethodik zu entwickeln, die eine Quantifizierung dieser wichtigen Voraussetzung eines Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus ermöglicht.

Im Rahmen der für das erste Manuskript dieser Thesis durchgeführten Studie wurden 20 trainierte männliche Athleten untersucht. Die Perturbation der schulterumspannenden Muskulatur erfolgte in sitzender Position mittels eines isokinetischen Dynamometers. Der dominante Arm der Probanden wurde in der 90/90/90-Position positioniert (90° Abduktion, 90° Außenrotation, 90° Flexion im Ellenbogengelenk) um die muskulären Voraussetzungen zum Ende der Ausholbewegung bei einem Überkopfwurf bestmöglich, unter standardisierten Laborbedingungen, zu imitiert. Die Perturbation der internalen Rotatoren des Schultergelenks erfolgte ausgehend von dieser

Position mittels einer, durch das Dynamometer applizierten, externalen Rotation des Schultergelenks. Die reflektorische Aktivität der internalen Rotatoren der Schulter wurde über eine kabelgebundene Oberflächenelktromyografie mit einer Aufnahme Frequenz von 2000Hz ermittelt. Die gemessene muskuläre Aktivität wurde hinsichtlich der Parameter Latenz der reflektorischen Muskelreaktion, Amplitude der reflektorischen Reaktion sowie Dauer der Aktivierung analysiert.

Ziel der zweiten Studie war eine Optimierung der eingesetzten Evokationsmethode. 13 Probanden der ersten Studie nahmen ebenfalls an dieser Untersuchung teil. Verglichen wurde die Evokation reflektorischer Muskelreaktionen in sitzender und liegender Positionierung der Probanden. Die Evokation der reflektorischen Muskelreaktion in liegender Positionierung der Probanden resultierte im Rahmen dieser Untersuchung in einer erhöhten Reflexauslösungsrate. Die dritte Studie befasst sich mit der Reliabilität der entwickelten Reflexevokationsmethodik. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Studie kann die entwickelte Messmethodik als reliables Verfahren eingeschätzt werden.

Zukünftige Untersuchungen sollten die vorgestellte Methodik replizieren und je nach Fragestellung auf spezifische, arthromuskuläre Gegebenheiten adaptieren. Messungen im Feld unterliegen generell einer hohen intra- und interindividuellen Variabilität bei gleichzeitig variierenden externen Einflussgrößen. Ein besseres Verständnis der neuromechanischen Steuerung von Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus Bewegungen der oberen Extremität ermöglicht eine Optimierung trainingswissenschaftlicher Empfehlungen und somit einen Wissenschafts-Praxis Transfer.

8. Abstract

The stretch-shortening cycle describes the natural interaction of isometric, eccentric and concentric muscle contractions during different movement phases. This interaction enables the efficient execution of everyday movements as well as maximizing the power-output within highly dynamic movements. The utilization of the stretch-shortening cycle is regulated by the neuronal control of complex hierarchical couplings of various cortical and spinal mechanisms. At the spinal level, the muscle stretch reflex is ascribed a significant contribution to power enhancement within stretch-shortening cycle movements. The short latency stretch reflex (SLR) is of particular importance for the stretching-shortening cycle. The reflexive muscle response is influenced by many factors. However, most of the known evidence is based on the results of studies that have primarily examined the posterior chain of the ankle muscles, the muscles surrounding the knee, as well as the elbow muscles and the extrinsic hand muscles. A systematic analysis of the literature reveals a heterogeneous state of knowledge of the reflex activation of the muscles surrounding the shoulder. Therefore, the presented work is dedicated to the investigation of the muscle stretch reflex of the internal rotators of the shoulder with the aim of developing a measurement method that enables a quantification of this important prerequisite for a stretch-shortening cycle.

In the study carried out for the first manuscript of this thesis, 20 trained male athletes were examined. The internal rotator muscles of the shoulder were perturbed in a sitting position using an isokinetic dynamometer. The dominant arm of the subjects was positioned in the 90/90/90-position (90° abduction, 90° external rotation, 90° flexion in the elbow joint) to imitate the functional position during the late cocking phase in an overhead throw under standardized laboratory conditions. To trigger a reflexive response of the internal shoulder rotator muscles, external shoulder rotation stretches were carried out from this start position. The reflex activity of the internal rotators of the shoulder was determined via a wired surface electromyography with a recording frequency of 2000 Hz. The recorded muscular activity was analyzed with regard to the parameters: latency of the reflexive muscular response, amplitude of the reflexive response and duration of muscle activation.

The aim of the second study was to optimize the reflex evocation method. 13 subjects from the first study also took part in this study. The reflexive muscular response in sitting and supine positions of the subjects was compared to each other. The evocation of the reflex in the supine position of the subjects resulted in an increased reflex elicitation rate.

The third study investigated the reliability of the developed reflex evocation method. Based on the results of this study, the developed measurement method can be assessed as a reliable procedure.

Future studies should replicate the presented methodology and depending on the question adapt it to specific arthromuscular conditions. Measurements in the field are generally subject to high intra- and inter-individual variability with simultaneously varying external influencing variables. A better understanding of the neuromechanical control of stretching-shortening cycle movements of the upper extremity enables an optimization of training science recommendations and thus a science-practice transfer.

Danksagung

Besonders bedanken möchte ich mich bei:

- Jun.-Prof. Dr. Kirsten Albracht für die wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit und die fachliche Betreuung in den vergangenen Jahren. Kirsten dir gebührt mein besonderer Dank für die Möglichkeit mich unter deiner Leitung in meinen Fähigkeiten weiterzuentwickeln. Stets standest du mir mit Rat und Tat zur Seite, vielen Dank!
- Des Weiteren gebührt mein besonderer Dank Dr. Axel Knicker. Axel es ist schwer in Wort zu fassen, wie dankbar ich dir für deine Unterstützung in den zurückliegenden Jahren bin! Du hast mich in die isokinetische Dynamometrie und die Elektromyografie eingeführt. Dabei hast du mir stets dein Vertrauen geschenkt und mir die Freiheit gewährt meine Kompetenzen zu erproben und weiterzuentwickeln.
- Univ.-Prof. Thomas Abel und Dr. Wolfgang Ritzdorf sowie allen weiteren Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Bewegungs- und Neurowissenschaft für fünf wunderbare Jahre als Teil des Instituts.
- Florian Weiser für die zahllosen Stunden Nachhilfe in Matlab. Ohne deine Unterstützung hätten unzählige EMG-Aufzeichnungen von Hand ausgewertet werden müssen.
- Bei meiner Familie für ihr Geduld und ihre bedingungslose Unterstützung.