

Beurteilung des Pulley-Systems in der nativen Schulter-MRT im Vergleich mit der Arthroskopie

Saba Ebrahimi Ardjomand

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Medicine and Health der Technischen Universität München zur Erlangung einer Doktorin der Medizin genehmigten Dissertation.

Vorsitz: apl. Prof. Dr. Thorsten Kessler

Prüfende der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. Klaus Wörtler
2. Priv.-Doz. Dr. Jonas Pogorzelski

Die Dissertation wurde am 11.10.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Medicine and Health am 05.02.2025 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis..... | 3 |
| 1 Einleitung | 4 |
| 1.1 <i>Anatomie und Biomechanik des Schultergelenks</i> | 6 |
| 1.1.1 Knöchernen Strukturen | 7 |
| 1.1.2 Kapsel und Bänder des Schultergelenks | 9 |
| 1.1.3 Rotatorenmanschette | 10 |
| 1.2 <i>Rotatorenintervall</i> | 11 |
| 1.2.1 Anatomie | 11 |
| 1.2.2 Funktion | 14 |
| 1.3 <i>Klassifikation von Pulley-Läsionen</i> | 15 |
| 1.4 <i>Inzidenz und Ätiologie</i> | 17 |
| 1.5 <i>Pathophysiologie der Pulley-Läsion</i> | 18 |
| 1.6 <i>Diagnostik</i> | 19 |
| 1.6.1 Klinik..... | 19 |
| 1.6.2 Konventionelle Radiographie..... | 19 |
| 1.6.3 Sonographie..... | 20 |
| 1.6.4 MRT | 20 |
| 1.6.5 MR-Arthrographie..... | 23 |
| 1.6.6 Arthroskopie..... | 25 |
| 1.7 <i>Therapie</i> | 26 |
| 1.8 <i>Fragestellung</i> | 27 |
| 2 Materialien und Methoden | 28 |
| 2.1 <i>Studiendesign</i> | 28 |
| 2.2 <i>Patientenrekrutierung</i> | 28 |
| 2.3 <i>Präoperative MRT</i> | 30 |
| 2.4 <i>Diagnostische Kriterien zur Bewertung des Pulley-Systems in der nativen MRT</i> 32 | |
| 2.5 <i>Evaluationsbogen zur Beurteilung des Pulley-Systems</i> | 37 |
| 2.6 <i>Intraoperative arthroskopische Untersuchung:</i> | 38 |
| 2.7 <i>Datenerhebung</i> | 39 |
| 2.7.1 Präoperativ | 39 |
| 2.7.2 Intraoperativ | 39 |
| 2.8 <i>Statistische Auswertung</i> | 40 |
| 3 Ergebnisse | 41 |
| 3.1 <i>Studienpopulation</i> | 41 |
| 3.2 <i>Arthroskopie</i> | 43 |
| 3.3 <i>Beurteilung des Pulley-Systems in der nativen MRT</i> | 44 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Diskussion | 53 |
| 5 | Schlussfolgerung und Ausblick | 58 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 59 |
| 7 | Abbildungsverzeichnis | 64 |
| 8 | Tabellenverzeichnis | 65 |
| 9 | Danksagung | 66 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------|--|
| Art. | Articulatio |
| ASI | Anterosuperiores Impingement |
| CHL | Ligamentum coracohumerale |
| FOV | field of view |
| FS | Fat saturation |
| HF | head-foot |
| IM | Intermediär |
| lat. | lateinisch |
| LBS | Lange Bizepssehne |
| Lig. | Ligamentum |
| Ligg. | Ligamenta |
| MGHL | Ligamentum glenohumerale mediale |
| OP | Operation |
| RI | Rotatorenintervall |
| RL | right-left |
| RM | Rotatorenmanschette |
| SGHL | Ligamentum glenohumerale superius |
| SLAP | superiores Labrum von anterior nach posterior |
| SSC | M. subscapularis |
| SSP | M. supraspinatus |
| T | Tesla |

1 Einleitung

Schulterpathologien gehören zu den häufigsten Läsionen des Bewegungsapparates und nehmen in sozioökonomischer Hinsicht einen Spitzenplatz unter den Erkrankungen des Bewegungsapparates ein [1]. Neben häufigen Erkrankungen wie Schulterinstabilitäten, Rotatorenmanschettenrupturen und Omarthrosen, stellen Läsionen des Halteapparats zur Führung der langen Bizepssehne (LBS) im Rotatorenintervall eine weitere bedeutende Pathologie der Schulter dar. Im Jahre 1994 definierten Walch et al. für die intraartikuläre Führung der LBS den Begriff des „stabilizing pulley“ oder „Bizeps-Pulley“ (pulley = engl. für Flaschenzug) [2, 3]. Diese Struktur, die als stabilisierende Schlinge fungiert, besteht aus vier Komponenten: dem Lig. coracohumerale (CHL), dem Lig. glenohumerale superius (SGHL) und den an das Rotatorenintervall (RI) angrenzenden Sehnen des M. subscapularis (SSC) und M. supraspinatus (SSP) [4]. Mit einer Prävalenz von ca. 7 % sind Pulley-Läsionen bei arthroskopischen Untersuchungen keine Seltenheit und stellen somit eine relevante Morbiditätsquelle für anteriore Schulterschmerzen und Instabilitäten der LBS dar [3, 5-7]. Pulley-Läsionen können durch degenerative Veränderungen, akute Verletzungen, repetitive Mikrotraumata oder als Folge von Läsionen der Rotatorenmanschette (RM) auftreten [8-10]. Üblicherweise führen Defekte des Pulley-Systems zu einer Instabilität und einer konsekutiven Tendinopathie der LBS mit Funktionseinschränkung und Schmerzen in der vorderen Schulter [5, 11]. Da klinische Untersuchungen der Pulley-Schlinge mitunter nur begrenzt aussagefähig sind [12-14], müssen in der Regel weitere diagnostische Maßnahmen für die Diagnosestellung herangezogen werden.

Die Magnetresonanztomographie (MRT) bietet einen sehr hohen Weichteilkontrast, der es ermöglicht, Gewebe im Körper detailliert darzustellen [15-17]. Bei anhaltenden Schulterbeschwerden ist die MRT neben der konventionellen Radiographie die bevorzugte Bildgebungsmethode, um Anatomie und Pathologie präzise darzustellen [15, 18]. Durch den Einsatz geeigneter MRT-Protokolle kann die im Rotatorenintervall gelegene Pulley-Schlinge abgebildet werden [19]. Auch bei hochauflösender Darstellung kann es aufgrund der engen räumlichen Anatomie des Rotatorenintervalls herausfordernd sein, eine genaue Beurteilung dieser anatomischen Region mittels konventioneller MRT vorzunehmen. Zusätzlich zu den engen Lagebeziehungen der anatomischen Strukturen im Rotatorenintervall stellt die anatomische Variabilität des CHL als Bestandteil der Pulley-Schlinge eine weitere Herausforderung für die radiologische Beurteilung dar.

Zuletzt hat sich die MR-Arthrographie als beste bildgebende Modalität zur Darstellung der Anatomie des Pulley-Systems und zur Identifizierung von Läsionen der LBS erwiesen [19-23]. Die MR-Arthrographie, als invasive Methode mit gegenüber der konventionellen MRT höherem apparativem und zeitlichem Aufwand, ist jedoch nicht an jedem Standort verfügbar oder adäquat durchführbar. Die finale Diagnose einer Pulley-Läsion erfolgt trotz der Fortschritte in der MR-Bildgebung weiterhin mittels Arthroskopie, welche eine dynamische Untersuchung der Bizepssehne ermöglicht [13] und als Goldstandard gilt [16].

Der Großteil der bisher durchgeführten Studien zum radiologischen Nachweis von Pulley-Läsionen konzentrierte sich in erster Linie auf die MR-Arthrographie und konnte dieser dabei eine hohe diagnostische Genauigkeit bescheinigen [19, 21-23]. Nur wenige Studien haben sich bislang mit der diagnostischen Genauigkeit der konventionellen MR-Bildgebung zur Erkennung von Pulley-Läsionen befasst [24, 25]. Frühere Studien, wie die von Chung et al., zeigen, dass in der konventionellen MRT lediglich die extraartikuläre LBS sowie einige Anteile ihres intraartikulären Abschnittes präzise abgebildet werden können [19]. Daneben hängt die Gelenkdistension und damit die Separation und Sichtbarkeit der intraartikulären Strukturen in der konventionellen MRT maßgeblich vom Vorhandensein und der Menge der Gelenkflüssigkeit, z.B. im Rahmen eines Gelenksergusses, ab [26]. Die diagnostische Genauigkeit der konventionellen MRT bei der Erkennung von Pulley-Läsionen ist jedoch noch nicht vollständig geklärt, sodass ihre Rolle bei der präzisen präoperativen Beurteilung der vorderen Schulter unklar bleibt.

Ziel dieser Studie war es daher, die diagnostische Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der konventionellen MR-Bildgebung der Schulter bei der Beurteilung von Läsionen der Bizeps-Pulley unter Verwendung der Arthroskopie als Referenzstandard zu bestimmen. Das Pulley-System wird unter Anwendung spezifischer diagnostischer Kriterien in der konventionellen MRT durch drei erfahrene Radiologen mit Schwerpunkt in der muskuloskelettalen Bildgebung beurteilt und mit der arthroskopisch gesicherten Diagnose verglichen.

Im Folgenden werden neben der Anatomie und Biomechanik des Schultergelenks die detaillierte Anatomie, Funktion und Pathologie des Pulley-Systems erläutert und insbesondere auf den diagnostischen Aspekt eingegangen.

1.1 Anatomie und Biomechanik des Schultergelenks

Das Schultergelenk nimmt eine zentrale Rolle bei vielen Bewegungen des menschlichen Körpers ein und verbindet die obere Extremität mit dem Rumpf. Im weiteren Sinn stellt es einen Zusammenschluss von fünf einzelnen Gelenken dar, die anatomisch und funktionell zusammenwirken. Zu diesen zählen drei Hauptgelenke, bestehend aus dem Glenohumeralgelenk (Art. glenohumerale; eigentliches Schultergelenk), dem Sternoklavikulargelenk (Art. sternoclaviculare) sowie dem Akromioklavikulargelenk (Art. acromioclaviculare), sowie zwei unterstützende Nebengelenke, das subacromiale Nebengelenk sowie das Schulterblatt-Thorax-Gelenk, welche als Gleitlager fungieren [27]. Das bedeutendste Gelenk aus dem Schulter-Gelenkkomplex stellt das Glenohumeralgelenk in Form eines Kugelgelenks mit drei Freiheitsgraden und sechs Hauptbewegungsrichtungen dar. Das Missverhältnis (4:1) zwischen dem großen Humeruskopf und der kleinen artikulierenden Gelenkpfanne der Scapula führt zu einem hohen Bewegungsumfang im Schultergelenk, wodurch es als das beweglichste Gelenk des menschlichen Körpers gilt. Die transversale Achse ermöglicht Anteversion (Flexion) und Retroversion (Extension). Die sagittale Achse lässt Abduktion und Adduktion zu. Die vertikale Achse erlaubt bei 90° abduziertem Arm eine Vor- und Rückführung des Armes. Zusätzlich ist in jeder dieser Achsen eine Außen- bzw. Innenrotation möglich [27, 28]. Eine Besonderheit ist, dass die Stabilisierung des Schultergelenks vorrangig nicht von einer starren Gelenkführung, sondern von der Muskulatur, und dabei insbesondere von der Rotatorenmanschette, gewährleistet wird. Neben der Schultergürtelmuskulatur spielt der Labrum-Kapsel-Band-Komplex eine weitere wichtige Rolle bei der Stabilisierung des Schultergelenks [27, 29]. Die umfassende Beweglichkeit und die Stabilisierung durch die flexible Muskulatur können jedoch auch zu einer potenziellen Instabilität des Gelenks führen, resultierend aus vorangegangenen traumatischen, degenerativen oder anlagebedingten Veränderungen [28, 30].

1.1.1 Knöchernen Strukturen

Die Schulter wird von drei Knochen gebildet: dem proximalen Humerus, der Skapula und der Klavikula. Im Folgenden wird diese Anatomie ausführlich erläutert.

1.1.1.1 Humerus

Der proximale Humerus besteht aus einem Kopf, dem *Caput humeri*, sowie zwei Knochenvorsprüngen, dem *Tuberculum majus* (lateral) und dem *Tuberculum minus* (anterior), welche durch eine leichte Einschnürung, dem *Collum anatomicum*, gegen die erstgenannte Struktur abgegrenzt werden. Von proximal nach distal setzen am *Tuberculum majus* folgende Muskeln der Rotatorenmanschette an: *M. supraspinatus*, *M. infraspinatus* und *M. teres minor*. Das *Tuberculum minus* ist zwar kleiner, springt jedoch stärker frontal hervor und weist in die Zugrichtung des *M. subscapularis*, welcher dort ansetzt und als letzter der vier Muskeln die Rotatorenmanschette komplettiert. Das *Collum anatomicum* dient als Ansatz für die Gelenkkapsel. Sowohl *Tuberculum majus* als auch *Tuberculum minus* verlaufen jeweils in eine Knochenleiste aus: *Crista tuberculi majoris* und *minoris*. Zwischen den Tubercula verläuft der *Sulcus intertubercularis humeri*, in dem die Ursprungssehne des langen Bizepskopfes, bedeckt durch das *Lig. transversum humeri*, liegt. Das *Collum chirurgicum* wird durch eine leichte Einschnürung unterhalb der beiden Tubercula gebildet und ist häufig in Frakturen dieser Region involviert. Der Schaft trägt an der Außenfläche fast auf der Mitte seiner Länge die *Tuberositas deltoidea*, den Ansatzbereich des *M. deltoideus* [27, 28].

1.1.1.2 Scapula

Die Scapula formt den dorsalen Teil des Schultergürtels und bildet eine dreieckige Platte mit drei Kanten: *Margo medialis*, *Margo superior* und *Margo lateralis* sowie drei Winkeln: *Angulus superior*, *Angulus lateralis* und *Angulus inferior*. Die Rückfläche, *Facies posterior*, wird durch eine knöchernen Leiste, die *Spina scapulae*, in eine *Fossa supra-* und *infraspinata* geteilt. In die *Fossa supraspinata* ist der *M. supraspinatus* eingebettet; die *Fossa infraspinata* wiederum beinhaltet den *M. infraspinatus*. Sowohl *M. supraspinatus* als auch *M. infraspinatus* haben ihren

Ursprung in der jeweiligen Fossa und setzen am Humeruskopf an. Nach lateral endet die Spina mit einem platten Fortsatz, dem Acromion. Dieses liegt unmittelbar unter der Haut und kann daher leicht als anatomischer Bezugspunkt palpirt werden. Die Facies costalis bildet die Vorderfläche der Scapula, die Fossa subscapularis. Das Halsstück wird als Collum scapulae bezeichnet, welches die mit dem Humeruskopf artikulierende Gelenkpfanne (Cavitas glenoidalis) trägt. An deren Oberrand liegt das Tuberculum supraglenoidale, an dem die Sehne des langen Bizepskopfes entspringt. Unterhalb der Pfanne liegt das Tuberculum infraglenoidale. Hier entspringt ein Teil der Sehne des langen Trizepskopfes. Medial vom Collum und kranial der Cavitas glenoidalis liegt am Margo superior der hakenförmig nach ventral gekrümmte Processus coracoideus (Rabenschnabelfortsatz). Das Lig. coracoacromiale verbindet das Acromion mit dem Korakoid und bildet einen Teil des Schulterdachs. Das Lig. transversum scapulae superius spannt sich über die Inscisura scapulae aus, welche an der Wurzel des Processus coracoideus liegt [27, 28].

1.1.1.3 Clavicula

Als Clavicula (Schlüsselbein) wird ein S-förmig gebogener Knochen, der mit seinen endständigen Gelenkflächen nach medial mit dem Sternum und nach lateral mit der Scapula in Verbindung steht, bezeichnet. Entsprechend gibt es zwei Gelenkstrukturen: die Facies articularis sternalis (Sternoklavikulargelenk) und die Facies articularis acromialis (Akromioklavikulargelenk). Sternal ist die Clavicula nach ventral gebogen, während sie acromial nach dorsal gebogen ist. Auf der Unterseite des sternalen Endes, der Extremitas sternalis, liegt die Impressio ligamenti costoclavicularis. Das Mittelstück wird als Corpus claviculae bezeichnet und geht in die Extremitas acromialis über [27, 28].

1.1.2 Kapsel und Bänder des Schultergelenks

Um den extremen Bewegungsspielraum der Schulter zu ermöglichen, ist die Gelenkkapsel des Glenohumeralgelenks elastisch, dünn und schlaff. Sie ist am Humerus an der Knorpel-Knochen-Grenze und an der Scapula unmittelbar an der Außenseite des Labrum glenoidale angeheftet. Das faserknorpelige Labrum glenoidale stellt eine ringförmige Erweiterung der Gelenkfläche dar und sorgt für eine bessere Zentrierung des Humeruskopfes in der Cavitas glenoidalis. Es dient außerdem als Ursprung der glenohumeralen Bänder. Die Gelenkkapsel (Capsula articularis) bildet unten eine Kapselfalte, den Recessus axillaris [28]. Unterstützend zur muskulären und kapsulären Gelenkstabilisierung dienen die glenohumeralen Bänder, die der Kapsel unmittelbar anliegen bzw. deren Verstärkung bilden. Im Vergleich zu anderen großen Gelenken, wie z.B. dem Hüftgelenk, und im Verhältnis zu seiner Beanspruchung hat das Schultergelenk jedoch einen relativ schwach ausgebildeten Bandapparat. Die wichtigsten Bänder sind das Lig. coracohumerale und die Ligg. glenohumeralia, bestehend aus Lig. glenohumerale superius, Lig. glenohumerale mediale und Lig. glenohumerale inferius. Diese bilden überwiegend ventral eine Kapselverstärkung der relativ schlaffen Capsula articularis des Schultergelenks. Die Spannung aller Bandanteile limitiert die Außenrotation und verhindert eine antero-inferiore Subluxation oder Dislokation. Bei der Innenrotation sind alle Bandanteile entspannt [28]. Das Lig. coracoacromiale verläuft vom Processus coracoideus bis zum ventralen Akromionneck und bildet, wie oben bereits erwähnt, einen Teil des Schulterdachs. Es trägt weniger zur glenohumeralen Stabilisierung bei, sondern verhindert vielmehr durch die faserige Verbindung zum Lig. coracohumerale eine inferiore Subluxation [31-33]. Eine detaillierte Beschreibung der Anatomie und Funktion des Lig. coracohumerale und Lig. glenohumerale superius (als zentraler Bestandteil des Rotatorenintervalls) findet sich in Kapitel 1.2.

1.1.3 Rotatorenmanschette

Die Stabilisatoren des Glenohumeralgelenks lassen sich vereinfacht in statische und dynamische Komponenten unterteilen [33]. Statische Strukturen umfassen knöchernen und ligamentäre Elemente, während die dynamische Komponente vorwiegend muskulär gebildet wird. Dabei nimmt insbesondere die Muskelgruppe der Rotatorenmanschette eine zentrale Rolle in der Stabilisierung und Zentrierung des Glenohumeralgelenks ein. Die Sehnen der Muskeln der Rotatorenmanschette umfassen den Humeruskopf von allen Seiten und ziehen ihn an die Gelenkfläche der Skapula [28]. Diese Muskelgruppe, welche unmittelbar der Gelenkkapsel anliegt, setzt sich aus vier Muskeln zusammen: dem M. supraspinatus (superior), dem M. infraspinatus, dem M. teres minor (posterior) und dem M. subscapularis (anterior). Der M. subscapularis hat seinen Ursprung in der Fossa subscapularis an der ventralen Seite des Schulterblattes und inseriert am Tuberculum minus. Er dient der Innenrotation. Seine Innervation erfolgt durch den N. subscapularis (Segmente: C5-C8), einen der Äste des Plexus brachialis. Der M. supraspinatus entspringt in der Fossa supraspinata sowie an der Spina scapulae und inseriert an der superioren und mittleren Facette des Tuberculum majus. Er unterstützt den M. deltoideus bei der Abduktion und Außenrotation des Oberarmes. Der M. infraspinatus setzt ebenfalls an der mittleren Facette des Tuberculum majus an, sein Ursprung ist die Fossa infraspinata. Neben dem M. deltoideus und dem M. supraspinatus ist er für die Außenrotation des Oberarms, an der er den stärksten Anteil hat, verantwortlich. Zusätzlich dient er mit seinem kranialen Anteil der Abduktion. Die Innervation des M. supraspinatus und des M. infraspinatus erfolgt über den N. suprascapularis (Segmente: C4-C6) aus dem Plexus brachialis. Der Muskelursprung des M. teres minor befindet sich am Margo lateralis der Scapula, seine Insertion an der inferioren Facette des Tuberculum majus. Zusammen mit dem M. infraspinatus dient er der Außenrotation und der Adduktion. Der M. teres minor wird, wie der M. deltoideus, durch den N. axillaris (Segmente: C5-C6) aus dem Plexus brachialis innerviert [34].

1.2 Rotatorenintervall

1.2.1 Anatomie

Die Rotatorenmanschette weist zwei Sehnenlücken auf, die ausschließlich von Kapselgewebe bedeckt sind: eine anteriore Sehnenlücke zwischen der Subscapularissehne (SSC) und der Supraspinatussehne (SSP), das sogenannte anteriore Rotatorenintervall, und eine posteriore Sehnenlücke zwischen der Supraspinatussehne und der Infraspinatussehne, das sogenannte posteriore Rotatorenintervall. Der Begriff „Rotatorenintervall“ bezieht sich in der klinischen Orthopädie aber in der Regel auf das anteriore Rotatorenintervall [5].

Das Rotatorenintervall ist ein triangulärer Raum, der vom anterioren freien Rand der SSP-Sehne superior, vom superioren freien Rand der SSC-Sehne inferior und medialseitig vom Processus coracoideus begrenzt wird. Der Sulcus intertubercularis humeri und das Ligamentum transversum stellen die laterale Spitze dieses Dreiecks dar, der Processus coracoideus seine Basis. Das Rotatorenintervall beinhaltet den intraartikulären Anteil der langen Bizepssehne. Es ist von einer fibrösen Kapsel bedeckt, einer Erweiterung der vorderen Gelenkkapsel, welche als „Rotatorenintervall-Kapsel“ bezeichnet wird. Bursaseitig wird diese Kapsel durch das Ligamentum coracohumerale (CHL) verstärkt, artikularseitig durch das Ligamentum glenohumerale superius (SGHL). Die RI-Kapsel formt somit das Dach des RI, dessen Boden wird von der Gelenkknorpeloberfläche des Humerus gebildet [5, 6, 16, 20].

Das CHL hat seinen Ursprung am lateralen Aspekt der Basis des Processus coracoideus und unterteilt sich in zwei Bandstränge. Das größere (laterale) Band setzt am Tuberculum majus an, wo es in die Fasern der Supraspinatussehne übergeht. Das kleinere (mediale) Band überkreuzt die lange Bizepssehne, setzt am proximalen Aspekt des Tuberculum minus an und bildet eine anteriore Hülle um die Bizepssehne, wo es mit den Fasern der Subscapularissehne verschmilzt [5, 6, 20, 26, 35, 36]. Variable Insertionen werden in der Literatur beschrieben, darunter (a) Insertion in das Rotatorenintervall, (b) Insertion entweder an der Supraspinatus- oder der Subscapularissehne oder (c) Insertion sowohl an der Supraspinatus- als auch an der Subscapularissehne [37]. Das CHL stellt eine relativ konstante anatomische Struktur dar, in lediglich 6 % der Fälle ist es hypoplastisch oder aplastisch [38].

Das SGHL hat in der Regel seinen Ursprung am Tuberculum supraglenoidale, anterior des Ursprungs der LBS. Ein Ursprung am Labrum glenoidale superior, an der LBS selbst, am mittleren glenohumeralen Ligament (MGHL) oder eine Kombination aus diesen stellt weitere

mögliche anatomische Varianten dar [5]. Das SGHL verläuft nach Unterkreuzung der LBS zur Fovea capitis, einer kleinen Grube am Humeruskopf direkt oberhalb der Insertion der SSC-Sehne am Tuberculum minus, wo es mit den Fasern der SSC-Sehne verschmilzt [5, 6, 20, 26, 39]. Das SGHL kommt in 97 % der Fälle arthroskopisch regelhaft zur Darstellung und stellt ebenfalls eine relativ konstante Struktur dar [40].

In der Mitte und am Scheitelpunkt des RI bildet das SGHL zusammen mit dem CHL eine U-förmige Schlinge um die LBS, welche die Sehne stabilisiert, während sie ihren Verlauf von einer horizontalen zu einer vertikalen Ausrichtung ändert. Diese ligamentäre Struktur, welche sich aus den kombinierten Fasern des CHL und SGHL zusammensetzt, wird als Biceps-Pulley bzw. „Biceps reflection pulley“ bezeichnet [2, 16, 41, 42]. Fasern der Supraspinatussehne verstärken das Dach der Schlinge, Faserzüge der Subscapularissehne den Boden der Schlinge [41].

Die LBS entspringt am Tuberculum supraglenoidale und/oder dem Labrum glenoidale superius und verläuft intraartikulär horizontal über den Humeruskopf, durchquert das RI und tritt schließlich in den Sulcus intertubercularis ein. Hier liegt sie unter dem Ligamentum transversum und ist von einer Sehnenscheide umgeben, welche eine einfache Erweiterung der Gelenkkapsel darstellt. Schließlich verlässt sie die Gelenkkapsel und nimmt einen extraartikulären, vertikal-orientierten Verlauf an [13, 20, 26]. Die komplexe Anatomie des RI ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

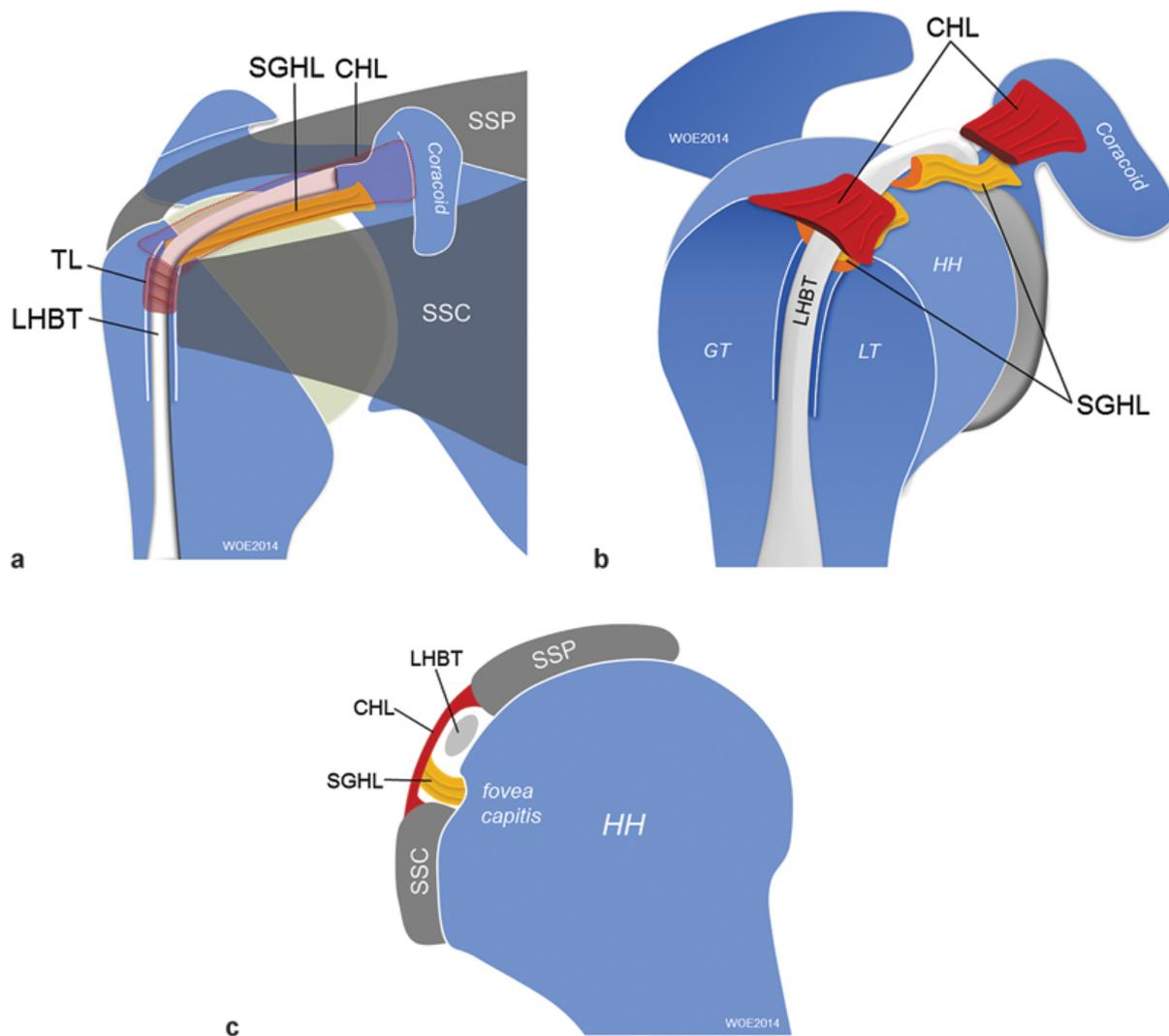


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anatomie des Rotatorenintervalls

(a) Anteriore Ansicht des Rotatorenintervalls. (b) Anatomie des Biceps-Pulley-Systems (c) Sagittaler Mittelschnitt durch das Rotatorenintervall. HH, Humeruskopf; LHBT, lange Bizepssehne; TL, Lig. transversum; SGHL, Lig. glenohumerale superius; CHL, Lig. coracohumerale; SSP, Supraspinatus; SSC, Subscapularis; GT, Tuberculum majus; LT, Tuberculum minus

(Quelle: Woertler, K., Rotator interval. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2015. **19**(3): p. 243-53; mit Genehmigung)

1.2.2 Funktion

Das Pulley-System und der obere Rand der SSC-Sehne werden als Hauptstabilisatoren der LBS betrachtet und verhindern, dass der horizontale Anteil der Sehne nach inferior und der vertikale Anteil nach innen subluxiert bzw. luxiert. Der obere Rand der SSC-Sehne wird hierbei als die wichtigste Struktur für die mediale Stabilität der LBS angesehen [22, 36, 39, 43]. Dem CHL kommt die Schlüsselrolle bei der Sicherung der langen Bizepssehne im Sulcus intertubercularis humeri zu [44, 45]. Die Ausrichtung der Fasern des SGHL auf die LBS, welche erheblichen anterioren Scherkräften im lateralen Rotatorenintervall zu widerstehen scheinen, deutet darauf hin, dass die wichtigste Funktion des SGHL die Stabilisierung der LBS in ihrem intraartikulären Verlauf ist [41, 46]. Die Rolle des Ligamentum transversum als Stabilisator der LBS, wengleich umstritten, ist wahrscheinlich vernachlässigbar [13, 20, 36, 39, 43]. Eine weitere Funktion des Pulley-Systems besteht darin, die LBS bei Armbewegungen optimal auszurichten und das Schultergelenk bei Extreimbewegungen zu unterstützen. In Adduktion und Neutralstellung ist die intraartikuläre Ausdehnung der LBS erhöht. Bei übermäßiger Abduktion und Außenrotation rotiert die Pulley-Schlinge in den proximalen Anteil der LBS, was zu einer Verkürzung ihrer intraartikulären Ausdehnung führt. Das Pulley-System mit seiner straffen kapsuloligamentären Struktur stabilisiert das Schultergelenk und wirkt einer übermäßigen Belastung der LBS entgegen, wenn das Gelenk nahe seiner Bewegungsgrenze ist [8].

Eine bedeutende Funktion der langen Bizepssehne ist die Stabilisierung des Oberarmkopfes innerhalb der Gelenkpfanne während der Ellenbogenbeugung und der Supination des Unterarmes [47]. Darüber hinaus fungiert die LBS als Stabilisator des Oberarmkopfes in der Gelenkpfanne während der Schulterabduktion auf Schulterebene [48]. Insbesondere in der Abduktion und Außenrotation trägt die LBS zur vorderen Stabilität der Schulter bei, indem sie den Widerstand gegen Torsionskräfte erhöht [49]. Zudem spielt sie eine Rolle bei der vorderen Stabilisierungsfunktion des Glenohumeralgelenks und trägt dazu bei, einer anterioren Verschiebung des Humeruskopfes entgegenzuwirken [50].

1.3 Klassifikation von Pulley-Läsionen

Pathologische Veränderungen eines oder mehrerer Teile der oben definierten Bizeps-Pulley-Schlinge werden als Pulley-Läsionen definiert. Die Einteilung der Pulley-Läsionen kann nach der Klassifikation von Habermeyer et al. erfolgen [4], welche abhängig von den geschädigten Strukturen vier Läsionstypen unterscheidet.

Typ 1: Isolierte Läsion des SGHL

Typ 2: SGHL-Läsion und artikulareseitige, (partielle) Läsion der Supraspinatussehne

Typ 3: SGHL-Läsion und artikulareseitige, (partielle) Läsion der Subscapularissehne

Typ 4: SGHL-Läsion mit artikulareseitigen, (partiellen) Läsionen der Supraspinatus- und Subscapularissehne

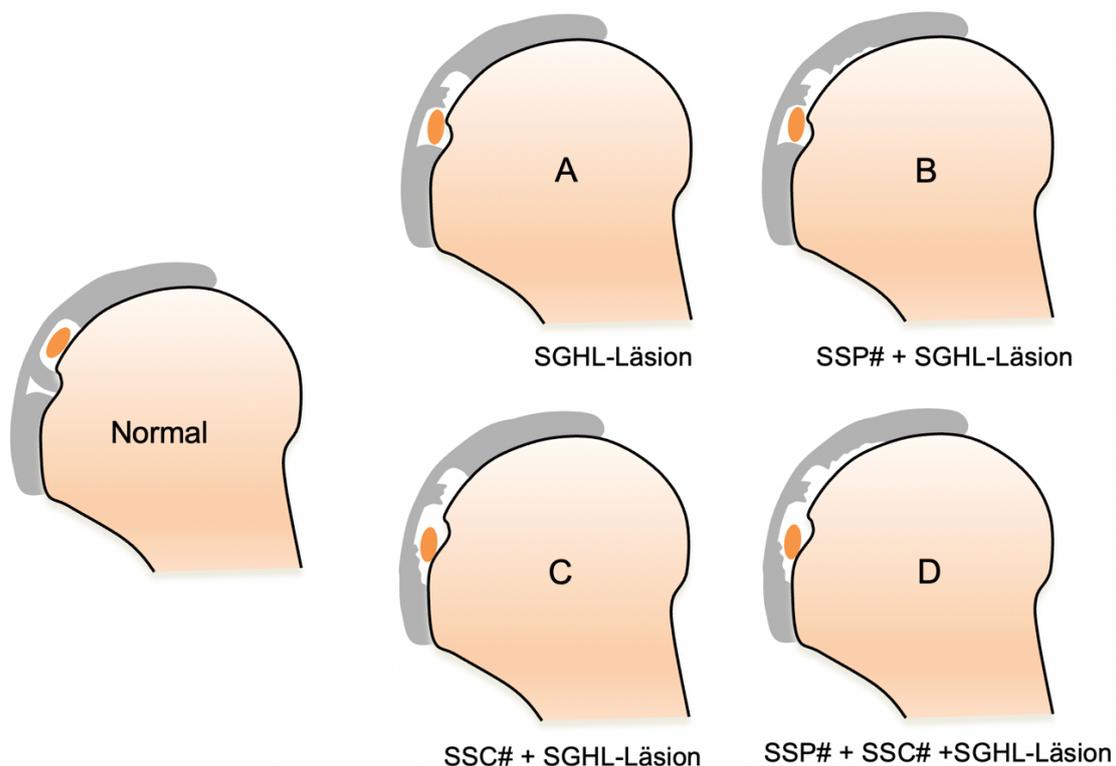


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Klassifikation nach Habermeyer

(A) Typ I mit isolierter SGHL-Läsion, (B) Typ II mit SGHL- und dem Rotatorenintervall angrenzender SSP-Läsion, (C) Typ III mit SGHL- und dem Rotatorenintervall angrenzender SSC-Läsion, (D) Typ IV mit SGHL- und dem Rotatorenintervall angrenzenden SSP- und SSC-Läsionen.

(Quelle: modifiziert nach Woertler, K., Rotator interval. *Semin Musculoskelet Radiol*, 2015. **19**(3): p. 243-53.)

Neben dieser im klinischen Alltag weit verbreiteten Einteilung der Pulley-Läsionen existieren weitere Klassifikationssysteme. Nach Bennett et al. [51] wird die Bizepssubluxation/Bizepsinstabilität in fünf Formen unterteilt, ebenfalls abhängig von der Schädigung der einzelnen Strukturen:

- Typ 1: Isolierte Läsion der intraartikulären Subscapularissehne ohne Beteiligung des medialen CHL
- Typ 2: Läsion der medialen Sehnenscheide (SGHL und mediales CHL) ohne Beteiligung der Subscapularissehne
- Typ 3: Läsion der medialen Sehnenscheide (SGHL und mediales CHL) und der Subscapularissehne
- Typ 4: Läsion der Supraspinatussehne mit Beteiligung des lateralen CHL
- Typ 5: Läsionen der Subscapularissehne, der anterioren Supraspinatussehne sowie des medialen und lateralen CHL

In einer kürzlich neu definierten Klassifikation von Martetschlager et al. [7] erfolgt die Unterscheidung in mediale und laterale Pulley-Läsionen:

- Typ 1: Läsionen der medialen Pulley-Schlinge (medialer Bandanteil des CHL und/oder SGHL)
- Typ 2: Läsionen der lateralen Pulley-Schlinge (lateralen Bandanteil des CHL)
- Typ 3: Läsionen der medialen und lateralen Pulley-Schlinge

Die wichtigen Ergebnisse der Studie zeigten, dass die laterale Pulley-Schlinge häufiger betroffen ist als die mediale Schlinge und dass das SGHL nicht in allen Fällen von Pulley-Läsionen betroffen ist [7]. Da die Klassifikation jedoch keine Begleitverletzungen der an das Rotatorenintervall grenzenden Sehnen berücksichtigt, wird vielfach weiterhin die Klassifikation nach Habermeyer verwendet.

1.4 Inzidenz und Ätiologie

Mit einer Inzidenz von 7,1 % unter Patienten, die sich wegen unklarer Schulterschmerzen einer Schulterarthroskopie unterziehen, sind Pulley-Läsionen keine Seltenheit und stellen daher eine nennenswerte Morbiditätsquelle dar [3]. In der prospektiven Studie von Braun et al. lag die Prävalenz von Läsionen des Pulley-Systems sogar bei 32 % [52]. In einem Patientenkollektiv mit vorliegender Rotatorenmanschettenschädigung erhöhte sich diese auf 90,3 % [53]. Der Anteil von isolierten Läsionen der Pulley-Schlinge weist eine Spanne von 29 bis 74 % auf [3, 4].

Die Ätiologie kann dabei variabel sein; Verletzungen können durch akute Traumata, rezidivierende Mikrotraumata, Impingement, degenerative Veränderungen oder Schädigungen im Zusammenhang mit Läsionen der Rotatorenmanschette entstehen. Nach Baumann et al. sind 43 % der Pulley-Läsionen traumatisch bedingt, während weitere 57 % einer atraumatischen Genese zuzuordnen sind [3].

Für die Entstehung einer Pulley-Läsion typische Unfallmechanismen sind ein Sturz auf den ausgestreckten Arm in voller Außen- oder Innenrotation, ein Sturz nach hinten auf die Hand oder den Ellenbogen oder ein direkter Anprall von vorne. Hierbei kann sich der Kapsel-Band-Komplex lösen, was zu einer anteromedialen Subluxation der langen Bizepssehne und mit der Zeit zur Verletzung dieser selbst führen kann. Auch ein Riss der Subscapularissehne kann Folge dieser Verletzungen sein [3, 10, 14, 54].

Ein weiterer klassischer Traumamechanismus stellt die wiederholte, kraftvolle Innenrotation oberhalb der Horizontalebene dar, welche typischerweise bei Tennisspielern, aber auch als sich wiederholende Bewegung bei Überkopfarbeiten anzutreffen ist. Dabei kommt es zu chronischen Reibungsschäden zwischen dem Pulley-System und der Subscapularissehne einerseits und dem vorderen oberen Glenoidrand andererseits (anterosuperiores (Glenoid)-Impingement = ASI) [55]. Darüber hinaus kann eine kraftvoll gestoppte Überkopf-Wurfbewegung zu einer Schädigung des Pulley-Systems führen. Hierbei wird während der Dezelerationsphase eine maximale Kontraktion des langen Bizepsmuskels provoziert, welche zur Subluxation der LBS im Sulcus intertubercularis humeri und in der Folge zu Rissen in der Kapsel des Rotatorenintervalls führen kann. Typischerweise sind hiervon Speerwerfer, Tennis-, Kricket-, Baseball- oder Footballspieler betroffen [4].

Infolge intrinsischer degenerativer Veränderungen kann es im Rotatorenintervall zu Partiaalläsionen des SGHL und der artikularseitigen Supraspinatussehne kommen. Partielle Läsionen der Supraspinatussehne beginnen hierbei häufig an der lateralen Seite des Sulcus

intertubercularis humeri und verursachen daher auch Läsionen der Pulley-Schlinge [4]. Ebenso können Risse am weit anterioren Footprint der Supraspinatussehne und am superioren Footprint der Subscapularissehne (sog. anterosuperiore Rotatorenmanschettenrisse) sich aufgrund der engen Nachbarschaft so weit ausdehnen, dass sekundär auch das CHL bzw. SGHL in Mitleidenschaft gezogen wird [26].

Ein angeborener Defekt des Rotatorenintervalls [56], eine sogenannte „knöcherne supratuberkuläre Leiste“ des Tuberculum minus [57] oder eine flache Konfiguration der Bizepsrinne [58] können weitere, sehr seltene Ursachen einer Pulley-Läsion darstellen.

1.5 Pathophysiologie der Pulley-Läsion

Läsionen des Pulley-Systems sind häufig mit Verletzungen der LBS, der Supraspinatussehne sowie der Subscapularissehne assoziiert [3, 4, 52, 53, 59]. Nach Habermeyer et al. und Baumann et al. haben sie einen progressiven Verlauf und setzen eine Kaskade von aufeinander folgenden Ereignissen in Gang, an deren Anfang oft eine isolierte Schädigung des SGHL steht [3, 4]. Die Folge ist eine Instabilität der LBS in ihrem intraartikulären Verlauf, was zu einer Subluxation und zu einer Veränderung der Sehne selbst führen kann. Das Gleiten des LBS entlang des Oberarmknochens, je nach Bewegungsmechanismus nach medial oder lateral, führt zu Abscherungen und Rissen der tiefen Sehnenanteile der angrenzenden Rotatorenmuskulatur. Nach medial kommt es in den meisten Fällen zu partiellen, artikulareseitigen Rissen der Subscapularissehne. Eine laterale Subluxation kann zu artikulareseitigen Läsionen der Supraspinatussehne führen. Die zunehmende Instabilität der LBS begünstigt ein ungehindertes Scheren der Sehne über den Humeruskopf mit entsprechenden Knorpelschäden (sog. „Scheibenwischereffekt“) [4]. Zudem verliert die LBS ihre stabilisierende Wirkung auf das Glenohumeralgelenk und ermöglicht eine anterosuperiore Translation, welche durch begleitende artikulareseitige Einrisse der Subscapularissehne sowie der Supraspinatussehne verstärkt wird. Die Folge ist eine Dezentrierung des Humeruskopfes. Dieser wandert bei Innenrotation und horizontaler Adduktion nach anterosuperior und schert gegen das Glenoid. Hierbei kann es zu einer Einklemmung der langen Bizepssehne, des Lig. glenohumerale superius und des M. subscapularis zwischen Tuberculum minus und Glenoid kommen. Dieser Pathomechanismus wird, wie bereits erwähnt, auch als anterosuperiores (Glenoid)-Impingement (ASI) bezeichnet [4, 55].

1.6 Diagnostik

1.6.1 Klinik

Die klinische Diagnose einer Pulley-Läsion stellt eine Herausforderung dar, da die Patienten kein einheitliches Beschwerdebild aufweisen, keine signifikante Korrelation zu klinischen Symptomen besteht und diese Läsionen häufig mit einer Pathologie des umgebenden Gewebes, insbesondere der Sehnen der Rotatorenmanschette (insbesondere des M. supraspinatus und M. subscapularis), einhergehen [12, 59-61]. Neben einer Pulley-Läsion gehen eine Vielzahl von Erkrankungen der Schulter, wie beispielsweise Verletzungen der Rotatorenmanschette, Labrumläsionen, Schulterinstabilitäten und das Schulter-Impingement-Syndrom, mit vorderen Schulterschmerzen einher [62]. Klinische Tests zum Nachweis einer Pulley-Läsion sind aufgrund ihrer geringen Sensitivität und Spezifität von begrenztem Wert. „Klassische“ Bizepsehnenentests, wie der O'Brien-Test, Palm-Up-Test oder Hawkins-Test, können zwar auf eine Pulley-Läsion hindeuten, sind jedoch auch bei einer Vielzahl anderer Pathologien positiv und somit wenig spezifisch [3].

1.6.2 Konventionelle Radiographie

Konventionelle Röntgenaufnahmen werden in der Regel als die initiale bildgebende Methode zur Beurteilung der Schulter durchgeführt und stellen ein nützliches diagnostisches Verfahren zur Abklärung von akuten sowie chronischen Schulterschmerzen dar [63, 64]. Insbesondere eignen sie sich als eine hilfreiche Screening-Untersuchung zur Erkennung von Frakturen, Luxationen und Weichteilverkalkungen [64]. Zur Beurteilung der Weichteilstrukturen der Schulter, einschließlich Sehnen, Bänder, Muskeln und kapsulolabralen Strukturen, ist die MRT methodisch bedingt jedoch dem konventionellen Röntgenbild überlegen und gilt hier als Verfahren der Wahl [65]. Pathologien des Rotatorenintervalls, u.a. Pulley-Läsionen, zeigen daher keine typischen Röntgenbefunde [43].

1.6.3 Sonographie

Zu den Vorteilen der Sonographie zählen ihre niedrigen Kosten, die hohe räumliche Auflösung, die Möglichkeit einer dynamischen Untersuchung der Instabilität der langen Bizepssehne, die Interaktion mit dem Patienten während des Scannens sowie die Möglichkeit eines einfachen Vergleichs mit der kontralateralen Seite [66]. Im Rahmen einer umfassenden Beurteilung der LBS und des Pulley-Systems sollte ein linearer Hochfrequenz-Schallkopf (vorzugsweise > 12 MHz) zur Anwendung kommen [67]. Bestimmte bildgebende Befunde können hinweisend auf mögliche Läsionen des Pulley-Systems sein. Hierzu zählen eine dislozierte Bizepssehne, Anomalien am oberen Rand der SSC-Sehne sowie das sogenannte „Chondral print“-Zeichen am Humeruskopf [67, 68]. Das ursprünglich arthroskopische Zeichen am Humeruskopf unterhalb der LBS deutet auf eine mögliche Instabilität der LBS hin und kann auch in der Sonographie verwendet werden [68, 69]. Ein direkter Nachweis von Veränderungen des Pulley-Systems ist sonographisch jedoch oft nicht möglich [68, 70]. Zudem ist die Sonographie des Bewegungsapparats in hohem Maße untersucherabhängig und erfordert ein entsprechend hohes Maß an Expertise [67].

1.6.4 MRT

Die MRT stellt aufgrund ihres hohen Weichteilkontrasts und ihrer multiplanaren Bildgebungsmöglichkeiten das optimale bildgebende Verfahren zur Beurteilung von Pathologien des Schultergelenks dar [16].

Standardebenen für die MRT der Schulter sollten parakoronare, parasagittale und transversale Sequenzen umfassen [42]. Hierbei stellt die parasagittale Ebene, welche parallel zur Fossa glenoidalis und orthogonal zur Längsachse des Rotatorenmanschettenintervalls und der Rotatorenmanschette verläuft, die geeignetste Orientierung zur Beurteilung des Rotatorenintervalls und seines Inhaltes dar [54]. Transversale Aufnahmen sind ebenfalls für die Identifizierung des Bizeps-Pulley-Komplexes sowie der langen Bizepssehne im Sulcus intertubercularis humeri von Wert [20]. Empfehlenswert ist eine Kombination aus Protonendichte- und T2-gewichteten (T2W) Spinecho- oder Turbo-Spinechosequenzen mit hoher Auflösung (<3 mm) und hoher Bildmatrix [42]. Alternativ werden in der klinischen

Routine oftmals intermediär gewichtete (IM) Turbo-Spin-Echo-Sequenzen mit spektraler Fettsättigung verwendet [71]. Aufgrund ihres höheren intrinsischen Kontrasts sollten TSE-Sequenzen mit intermediärer Wichtung und Fettunterdrückung anstelle von T2-gewichteten oder STIR-Sequenzen bevorzugt zur Anwendung kommen [5]. Ein dediziertes Schulterprotokoll sollte somit eine intermediär gewichtete Sequenz mit frequenzselektiver Fettsignalunterdrückung und einer Echozeit von 35 bis 45 ms in allen drei Bildgebungsebenen zusammen mit einer zusätzlichen koronalen T1-gewichteten Spin-Echo-Sequenz umfassen. Alternativ kann diese durch eine T1-gewichtete TSE-Sequenz mit einem DRIVE (DRIVEN Equilibrium)-Impuls ersetzt werden, um einen nativen arthrographischen Kontrast zu erzielen. Optional kann eine zusätzliche T2-gewichtete TSE-Sequenz ohne Fettsaturation in parasagittaler Schichtung zur Beurteilung der Muskelqualität durchgeführt werden [72].

Auf parasagittalen MR-Bildern lässt sich der mediale Teil des CHL, unmittelbar lateral des Processus coracoideus, als eine breite, lineare Struktur mit geringer Signalintensität darstellen, wohingegen das Band weiter lateral nicht von der RI-Kapsel separiert werden kann [26, 73]. Zudem kann sich das Band nach inferior über den vorderen Aspekt der SSC-Sehne erstrecken [5]. Der mediale Anteil des SGHL ist auf sagittalen MR-Bildern als runde oder lineare, intraartikuläre Struktur mit geringer Signalintensität zu erkennen, welche dem Verlauf der LBS, anterior zu ihr liegend, folgt. Im mittleren RI-Abschnitt verschmilzt das SGHL mit dem CHL und bildet hierbei eine T-förmige Struktur. Hier liegt das SGHL zwischen der LBS und der SSC-Sehne, wo es in der Regel als gekrümmte Struktur mit einem gestreiften Aussehen und einer etwas höheren Signalintensität als die SSC-Sehne abzugrenzen ist. Häufig ist auch die Ansatzstelle an der Fovea capitis sichtbar [5]. In der transversalen Schnittebene ist das SGHL in der Regel als lineare Struktur von unterschiedlicher Form und Dicke zu erkennen, welche vom vorderen Aspekt des Tuberculum supraglenoidale ausgeht und anterior lateral zum Processus coracoideus verläuft [5]. Der intraartikuläre Anteil der langen Bizepssehne, welcher sich am besten in der parasagittalen Ebene beurteilen lässt, ist im Normalzustand im Querschnitt oval und homogen hypointens und weist einen Durchmesser von bis zu 9 mm auf. Die Sehne scheint sich häufig in Richtung des Scheitelpunkts des RI zu "verjüngen". Der im Sulcus intertubercularis humeri verlaufende Anteil der LBS, welcher am besten in transversale Schnittebene evaluiert werden kann, imponiert typischerweise runder und etwas kleiner als ihr horizontaler Anteil [6, 13, 74]. Flüssigkeit um diesen Anteil sollte nicht als Hinweis auf eine Sehnenpathologie gewertet werden, sondern als MR-Normalbefund, da die Sehnenscheide über das Rotatorenintervall mit der Gelenkhöhle in Verbindung steht [20].

Diagnostische Kriterien für eine Pulley-Läsion in der MRT umfassen als indirekte Zeichen eine mediale Subluxation oder Dislokation der LBS aus dem Sulcus intertubercularis humeri [2, 14, 23, 75], eine Tendinopathie der langen Bizepssehne [22], das „Displacement sign“ mit kaudaler Verlagerung der LBS auf die Subscapularis-Sehne innerhalb des Rotatorenintervalls in der parasagittalen Ebene [22], Risse der kranialen Fasern der Subscapularissehne und der vorderen Fasern der Supraspinatussehne angrenzend an das Rotatorenintervall [23] sowie - als direkte Zeichen - Diskontinuitäten des CHL und SGHL [23].

Die komplexe Anatomie des Rotatorenintervalls, bestehend aus mehreren kleinen Strukturen, die in ihrem distalen Ansatz ineinander übergehen und sich auf relativ kleinem Raum erstrecken, kann die Bewertung in der konventionellen MRT erschweren [6, 20]. Hierbei hängt die Sichtbarkeit der Strukturen im RI insbesondere stark vom Vorhandensein und der Menge von Gelenkflüssigkeit, z.B. im Rahmen eines Gelenksergusses, ab [5]. Diese trennt die Schulterbinnenstrukturen und führt durch Distension, insbesondere im RI, zu einer besseren Abgrenzung der einzelnen Strukturen voneinander [26].

Insbesondere die Abgrenzung des CHL und SGHL stellt eine Herausforderung für die konventionelle MRT dar. In den meisten Fällen bildet sich das CHL, das SGHL und die Kapsel des Rotatorenintervalls als Weichteilgewebe mit intermediärer Signalintensität ab, welches das Rotatorenintervall ausfüllt und die Bizepssehne umgibt [26]. In einer Studie von Chung et al. war das CHL nur in 60 % der Fälle abzugrenzen, das SGHL konnte in keinem Fall mittels konventioneller MRT-Bildgebung gut dargestellt werden [19]. In Innenrotationstellung der Schulter sind diese normalerweise eng verbundenen Strukturen zudem nicht gespannt und können daher fälschlicherweise verdickt erscheinen [26].

Eine kürzlich veröffentlichte Studie von Nada et al. konnte wertvolle Erkenntnisse zur diagnostischen Genauigkeit der konventionellen MRT bei der Detektion von Läsionen des Pulley-Systems liefern. Die Ergebnisse bestätigen insgesamt eine gute diagnostische Genauigkeit von 81% - 86,9% mit einer Sensitivität von 65,6% - 78,1% und einer Spezifität von 90,4% - 92,3% [24]. Angesichts dieser vielversprechenden Ergebnisse, die eine Verbesserung der diagnostischen Genauigkeit der konventionellen MRT im Vergleich zu früheren Arbeiten zeigen, wird die Notwendigkeit weiterer Studien deutlich, um den Stellenwert der konventionellen MRT bei der Beurteilung von Läsionen des Pulley-Systems abschließend zu klären.

1.6.5 MR-Arthrographie

Wie bereits erwähnt, ist die Visualisierung der Anatomie des RI mittels konventioneller MRT-Bildgebung mit diversen Herausforderungen verbunden. Dabei erfordert die detailreiche Anatomie eine hohe räumliche Auflösung der MRT, optimiert durch die Verwendung starker Gradienten, Oberflächenspulen und MR-Scanner mit hoher Feldstärke, die das Signal-Rausch-Verhältnis maximieren. Selbst bei optimierten Bildgebungsparametern kann die Bewertung der Strukturen des Rotatorenintervalls weiterhin schwierig sein. Durch eine vor der MRT durchgeführte, intraartikuläre Injektion von gadoliniumhaltigem Kontrastmittel (MR-Arthrographie) kann eine verbesserte Abgrenzung der verschiedenen Gewebestrukturen erreicht werden, indem das Flüssigkeitsvolumen innerhalb der Gelenkkapsel erhöht wird [26]. In der Arbeit von Chung et al. konnten nach MR-Arthrographie in allen Fällen (n = 32) die gesamte intra- und extraartikuläre Bizepssehne, das CHL und das SGHL identifiziert werden [19]. Daher stellt die direkte MR-Arthrographie die Methode der Wahl zur Beurteilung pathologischer Veränderungen des Rotatorenintervalls, insbesondere des Pulley-Systems, dar [5, 6, 16, 19, 20, 22, 23, 26, 36, 76].

Bei der direkten Arthrographie wird in einem ersten Schritt mit Kochsalzlösung verdünntes Kontrastmittel auf Gadoliniumbasis unter sonographischer oder fluoroskopischer Führung über einen anterioren oder posterioren Zugang in das Schultergelenk injiziert. In einem zweiten Schritt erfolgt die MRT-Bildgebung [77]. Hierbei sollten in erster Linie T1-gewichtete Arthrogramme mit und ohne Fettsättigung in allen drei Raumebenen akquiriert werden, um einen hohen Kontrast zwischen den kapsuloligamentären Strukturen und dem extrakapsulären Fett einerseits und den intraartikulären Kontrastmitteln andererseits zu erzielen. Des Weiteren sollte das MR-Protokoll intermediär gewichtete Turbo-Spin-Echo-Sequenzen (TSE) mit spektraler Fettsättigung beinhalten [5].

Weishaupt et al. konnten der MR-Arthrographie bei der Detektion von Läsionen des Pulley-Systems eine Sensitivität von 86 bis 93 %, eine Spezifität von 80 bis 100 % sowie eine diagnostische Genauigkeit von 87 bis 92 % bescheinigen. Eine Läsion am Oberrand der SSC-Sehne erwies sich hierbei als das genaueste indirekte Zeichen einer Pulley-Läsion [23]. Ähnlich gute Ergebnisse konnte die MR-Arthrographie in der Studie von Schaeffeler et al. erzielen mit einer berichteten Sensitivität von 82 bis 89 %, einer Spezifität von 87 bis 98 % und einer diagnostischen Genauigkeit von 85 bis 94 %. In ihrer Arbeit stellten sich das „Displacement sign“, die Nicht-Sichtbarkeit oder Diskontinuität des SGHL und die Tendinopathie der intraartikulären LBS als die genauesten Kriterien für eine Läsion des Pulley-Systems heraus

[22]. Chandnani et al. berichteten über eine Sensitivität von 100 % und eine Spezifität von 94 % bei der Detektion von Läsionen des SGHL in der MR-Arthrographie [78]. Als invasiv-diagnostisches Verfahren, mit entsprechenden, wenn auch geringen Risiken, größerem apparativen und zeitlichen Aufwand [77, 79], ist diese Methodik jedoch nicht an jedem Standort verfügbar bzw. suffizient durchführbar.

Eine gezielte Frage nach Läsionen des Pulley-Systems ist zudem in der alltäglichen Praxis selten. In den meisten Fällen werden routinemäßig MR-Untersuchungen zur Beurteilung der Rotatorenmanschette angefordert, wobei hier die konventionelle MR-Bildgebung die Standardmethode darstellt [80].

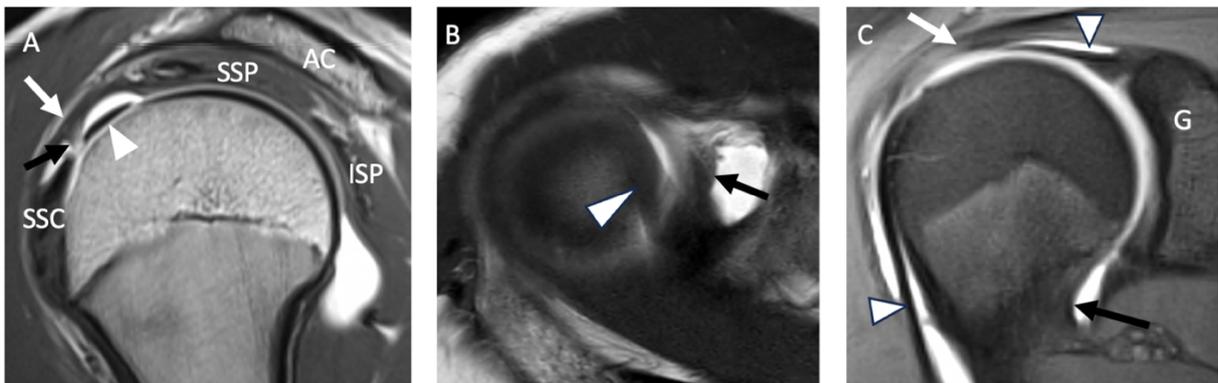


Abbildung 3: Anatomie des Rotatorenintervalls nach intraartikulärer Kontrastmittelgabe.

(A) Parasagittales, T1-gewichtetes MR-Arthrographiebild mit Darstellung der einzelnen Strukturen des Pulley-Systems. Das CHL (weißer Pfeil) und das SGHL (schwarzer Pfeil) bilden eine Schlinge um die LBS (Pfeilspitze). (B) Transversales, fettgesättigtes, T1-gewichtetes MR-Arthrographiebild mit Darstellung der intraartikulären LBS (Pfeilspitze) und des SGHL (schwarzer Pfeil) weiter medial. (C) Parakoronares, fettgesättigtes T1-gewichtetes MR-Arthrographiebild mit Darstellung des Ursprungs der LBS (weiße Pfeilspitzen) am Tuberculum supraglenoidale und am Labrum glenoidale superior. Die Supraspinatussehne (weißer Pfeil) verläuft oberhalb des Humeruskopfes. Der vordere Anteil des inferioren GHJ (schwarzer Pfeil) ist als Bandstruktur zu erkennen, die den vorderen Rand der Recessus axillaris bildet. AC, Acromion; SSP, Supraspinatus; ISP, Infraspinatus; SSC, Subscapularis; G, Glenoid

1.6.6 Arthroskopie

Den Goldstandard für die Beurteilung von Läsionen des Rotatorenintervalls stellt die Arthroskopie dar [16]. Bei diesem invasiven Verfahren wird der Patient entweder in der lateralen Decubitus-Position oder in der Beach-Chair-Position gelagert und die zu untersuchende Schulter standardmäßig frei beweglich positioniert, sodass der Arm während der Operation bewegt werden kann [81]. Üblicherweise wird die diagnostische Arthroskopie mit einem 30°-Endoskop durch das hintere Sichtportal durchgeführt. Unter Vorschub des Endoskops in das anteriore Kompartiment werden die Strukturen des Pulley-Systems unter direkter Sicht im Detail untersucht. Eine dynamische Bewegungsanalyse mit Innen- und Außenrotation des Arms kann helfen, eine Instabilität der langen Bizepssehne oder eine Lockerung des Pulley-Systems nachzuweisen. Um den proximalen Abschnitt des extraartikulären Anteils der LBS, der Anzeichen einer Peritendinitis aufweisen kann, zu untersuchen, wird die LBS mit einer Sonde in das Gelenk gezogen. Um ggf. versteckte Läsionen der Rotatorenmanschette nicht zu übersehen, sollte diese sorgfältig unter Bewegung der Schulter untersucht werden, die Sehne des M. subscapularis insbesondere in Innenrotation sowie die Sehne des M. supraspinatus in Außenrotation/Abduktion [12]. Ein intaktes Pulley-System sowie eine Läsion der Pulley-Schlinge sind in Abbildung 4 dargestellt.

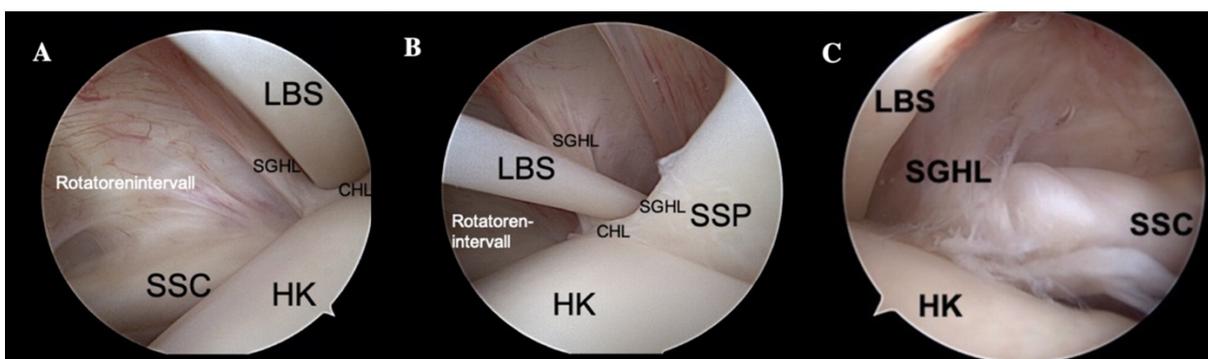


Abbildung 4: Arthroskopische Aufnahmen des Pulley-Systems

(A) Ansicht vom posterioren Portal über den Humeruskopf (HK) mit Darstellung des medialen Anteils des Pulley-Systems. (B) Seitliche Ansicht des intakten Pulley-Systems mit SGHL, welche die Pulley-Schlinge bildet und die lange Bizepssehne (LBS) stabilisiert. (C) Pulley-Läsion mit Ausfransung des SGHL (LBS, lange Bizepssehne; SSP, Sehne des Musculus supraspinatus; SSC, Sehne des Musculus suprascapularis; (Fotos: PD Dr. Jonas Pogorzelski, Sektion Sportorthopädie des Klinikums rechts der Isar; mit Genehmigung).

1.7 Therapie

Nach der Diagnose einer Pulley-Läsion folgt in den meisten Fällen eine konservative Behandlung mit entzündungshemmenden Medikamenten und Physiotherapie, die jedoch in der Mehrheit der Fälle erfolglos bleibt, weshalb ein chirurgisches Vorgehen erforderlich werden kann. Ursächlich ist mitunter eine anhaltende LBS-Instabilität mit konsekutiv-wiederkehrenden Schmerzen und Funktionseinschränkungen der Schulter. Insbesondere bei jüngeren Patienten mit höhergradigen Läsionen des Pulley-Systems mit Begleitverletzungen und Beteiligung der an das Rotatorenintervall angrenzenden Rotatorenmanschette sollte eine chirurgische Behandlung in Erwägung gezogen werden [12]. Eine mögliche Therapieoption für die Behandlung einer Pulley-Läsion stellt die offene oder die arthroskopische Rekonstruktion dar [2, 82]. Die Rekonstruktion der Pulley-Schlinge hat sich jedoch unter Schulterchirurgen nicht als wirksames Verfahren durchgesetzt [43, 52]. Als präferierte Methode gilt daher die Bizeps-Tenodese oder die Bizeps-Tenotomie [12, 43, 83, 84]. Beide Methoden konnten gute und zuverlässige Operationsergebnisse ohne einen signifikanten Unterschied hinsichtlich des funktionellen Outcomes erzielen [85, 86]. Ein Unterschied zwischen den beiden Operationsverfahren besteht darin, dass bei der Bizeps-Tenotomie das sog. „Popeye-Sign“ mit dem Absinken des M. biceps brachii nach distal und einer Deformierung im Oberarm auftritt [87, 88]. Bei jungen und aktiven Patienten, insbesondere bei Sportlern, empfiehlt sich die Durchführung einer Bizeps-Tenodese. Bei älteren Patienten, die keine größeren kosmetischen Bedenken („Popeye-Sign“) haben, stellt die Tenotomie als einfache Operationstechnik in der Regel eine adäquate Behandlung dar [12].

1.8 Fragestellung

Frühere Studien haben die Bedeutung der Pulley-Schlinge für die Stabilität der LBS hervorgehoben und sie als intraartikulären Aufhängeapparat der LBS definiert [14, 19, 22-24, 41]. Die Diagnostik von Läsionen des Pulley-Systems gestaltet sich schwierig, da betroffene Personen kein einheitliches Beschwerdebild aufweisen. Klinische Tests für eine Instabilität der LBS, die unter anderem durch eine Läsion der Pulley-Schlinge verursacht wird, sind bei einer Vielzahl von Pathologien positiv und somit wenig spezifisch [12]. Aus diesem Grund nimmt die bildgebende Diagnostik einen besonderen Stellenwert ein.

In der Literatur finden sich verschiedene Aussagen zum Einsatz der MRT zur Beurteilung des Pulley-Systems [16, 19, 22-24]. Während einige Studien die MR-Arthrographie als sensitives und spezifisches Verfahren zur Diagnostik von Pulley-Läsionen beschreiben [3, 19, 22, 89], gewinnt die Frage nach der konventionellen MRT und ihrer Bedeutung für die Untersuchung des Pulley-Systems zunehmend an Bedeutung. Im Vergleich zur MR-Arthrographie kann die konventionelle MRT als weit verbreitetes diagnostisches Verfahren und nicht-invasive Methode ohne größeren zeitlichen Aufwand eingesetzt werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fragestellung der suffizienten Anwendbarkeit und diagnostischen Genauigkeit der konventionellen MRT bei der Beurteilbarkeit des Pulley-Systems unter Berücksichtigung eines Klassifikationsschemas. Dabei werden die von uns definierten diagnostischen Zeichen zur Detektion einer Pulley-Läsion verwendet und das Pulley-System auf Defekt oder Intaktheit geprüft, wobei die Arthroskopie als Referenz dient.

Des Weiteren möchten wir anhand einer umfassenden Literaturrecherche einen übersichtlichen Vergleich zwischen der konventionellen MRT und den publizierten Daten der MR-Arthroskopie hinsichtlich der Beurteilung des Pulley-Systems vornehmen. Es soll abschließend die Frage geklärt werden, ob die konventionelle Schulter-MRT im Vergleich zu den publizierten Zahlen der MR-Arthroskopie eine vergleichbare diagnostische Genauigkeit hinsichtlich der Beurteilung des Pulley-Systems erlaubt.

2 Materialien und Methoden

2.1 Studiendesign

Im Rahmen einer retrospektiven Studie wurden 68 native MRT-Untersuchungen der Schulter bewertet, die am Institut für diagnostische und interventionelle Radiologie des Klinikums rechts der Isar von Januar 2012 bis September 2021 durchgeführt wurden. 42 Patienten, die eine arthroskopisch gesicherte Pulley-Läsion als Hauptpathologie aufwiesen, wurden als Studiengruppe definiert. Zusätzlich wurde eine Kontrollgruppe definiert, bestehend aus 26 Patienten mit arthroskopisch intaktem Pulley-System.

Ein positives Ethikvotum (Studennummer: 2023-229-S-KK) für die vorliegende Arbeit liegt von unserem Prüfungsausschuss (Ethikkommission der Technischen Universität München) vor.

2.2 Patientenrekrutierung

Bei der retrospektiven Studie erfolgte die Rekrutierung nach Einsicht in die elektronische Patientenakte. Es wurden native MRT-Untersuchungen der Schulter bewertet, die am Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität von Januar 2012 bis September 2021 nach rechtfertigender Indikation im Rahmen des klinischen Standardprotokolls durchgeführt wurden. Alle Studienteilnehmer erhielten zur Darstellung der Weichteile und der Schulterbinnenstrukturen eine präoperative native Schulter-MRT. Die anschließende Arthroskopie erfolgte im nahen zeitlichen Intervall, spätestens jedoch drei Monate nach vorangegangener MRT-Bildgebung ohne erneutes Traumaereignis der Schulter. Nach Durchführung eines ärztlichen Aufklärungsgespräches mit schriftlicher Einverständniserklärung des Untersuchenden wurde eine native Schulter-MRT nach standardisiertem Protokoll durchgeführt. Unter Anwendung von Ein- und Ausschlusskriterien (siehe Tabelle 1) wurden 68 Patienten mit arthroskopisch evaluiertem Pulley-System in die Studienpopulation eingeschlossen. Die Einschlusskriterien der Studienpopulation waren wie folgt: (a) native Schulter-MRT, die in unserer Einrichtung nach dem standardisierten Protokoll durchgeführt wurde, und (b) anschließende Arthroskopie spätestens drei Monate nach stattgehabter MRT-Schulter-Untersuchung, bei der ein detaillierter Bericht über das Pulley-

System vorlag. Ausschlusskriterien waren eine (a) vorangegangene Schulteroperation wie beispielsweise eine Rekonstruktion der Rotatorenmanschette, (b) ein Lebensalter unter 16 Jahren, (c) entzündliche Erkrankungen des Schultergelenks, z.B. im Rahmen einer rheumatischen Erkrankung und (d) klinische Zeichen einer adhäsiven Kapsulitis.

Während Patienten mit einer arthroskopisch nachgewiesenen Pulley-Läsion als Studiengruppe betrachtet wurden, bestand die Kontrollgruppe aus Patienten mit arthroskopisch intaktem Pulley-System.

Die der MRT anschließenden Arthroskopien wurden von einem von unseren Orthopäden mit durchschnittlich mehr als 15 Jahren Erfahrung in der Schulterchirurgie der Klinik für Orthopädie und Sportorthopädie durchgeführt. Die Orthopäden hatten über das interne Bildarchiv-System Zugriff auf den radiologischen Befund der vorhergegangenen nativen MRT-Untersuchung der Schulter. In den arthroskopischen Berichten nahmen die Chirurgen Stellung zum Pulley-System, welches hinsichtlich ihrer Unversehrtheit überprüft wurde.

Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Studienpopulation

| Einschlusskriterien | Ausschlusskriterien |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • In unserer Einrichtung nach standardisiertem Protokoll ausgeführte native Schulter-MRT • Anschließende Arthroskopie spätestens drei Monate nach stattgehabter MRT-Untersuchung mit einem detaillierten Bericht über das Pulley-System (Klassifikation nach Habermeyer) | <ul style="list-style-type: none"> • Bereits stattgehabte Schulteroperation • Entzündliche Schulterpathologie, bspw. rheumatische Erkrankung • Lebensalter < 16 Jahre • Klinische Zeichen einer adhaesiven Kapsulitis |

2.3 Präoperative MRT

Die MRT wurde mit einem 1,5 Tesla- (Avanto, Siemens Medical Solutions) oder einem 3 Tesla-System (Verio, Siemens Medical Solutions; Ingenia Elition, Philips Healthcare; Achieva, Philips Healthcare) unter Verwendung einer speziellen 16-Kanal-Schulterspule durchgeführt. Die MRT-Untersuchungen der eingeschlossenen Patienten wurden überwiegend bei 3-Tesla durchgeführt. Lediglich 10 aller 68 der zu untersuchenden Probanden (14,7 %) wurden an dem 1,5 T-System untersucht.

Um eine exakte Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu ermöglichen, wurden alle Patienten mit einem standardisierten Sequenzprotokoll in Nativtechnik mit konstanten Schnittebenen sowie konstanten geometrischen und zeitlichen Parametern untersucht.

Die Patienten unterzogen sich der Bildgebung in Neutralstellung des Armes, d.h. eine neutrale Position der Schulter mit nach oben zeigendem Daumen. Das field of view (FOV) wurde in Abhängigkeit von der Körpergröße möglichst klein gewählt und lag in der Regel bei 160 mm. Bei einer Schichtdicke von ≤ 3 mm war die in-plane-Auflösung bei diskreten Abweichungen an unterschiedlichen Scannern bei $\leq 0.35 \times 0.45$ mm. Das Standardprotokoll umfasste parakoronare, parasagittale und transversale Sequenzen.

Die parakoronaren Schichten wurden parallel zur Sehne des M. supraspinatus ausgerichtet. Die Parasagittalebene, welche sich besonders zur Darstellung des Rotatorenintervalls und des hier lokalisierten Pulley-Systems eignet, verläuft parallel zur Fossa glenoidea und orthogonal zur Längsachse des Rotatorenintervalls und der Rotatorenmanschette. Generiert wurden sowohl T2-TSE- (T2w) als auch T1-TSE-Sequenzen (T1w) mit hoher Auflösung (< 3 mm) und hoher Bildmatrix. Daneben gehörten zu unserem Protokoll triplanare intermediär (IM) gewichtete TSE-Sequenzen mit spektraler Fettsignalunterdrückung. Die exakten Parameter für alle Scanner und Sequenzen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Messparameter der MRT-Sequenzen

| MRT-Parameter | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|-----------|---|-----------|---|-----------|--|-----------|
| Parameter | Parasagittale T2-Wichtung | | Parakoronare T1-Wichtung | | Transversale IM-Wichtung mit frequenzselektiver Fettsignalunterdrückung | | Parakoronare IM-Wichtung mit frequenzselektiver Fettsignalunterdrückung | | Parasagittale IM-Wichtung mit frequenzselektiver Fettsignalunterdrückung | |
| | 1,5 T | 3 T | 1,5 T | 3T | 1,5T | 3T | 1,5T | 3T | 1,5T | 3T |
| Sequenz | TSE | TSE | TSE | TSE | TSE | TSE | TSE | TSE | TSE | TSE |
| Repetitionszeit (ms) | 4630 | 6520 | 488 | 509 | 4900 | 5000 | 3920 | 3300 | 3610 | 3700 |
| Echozeit (ms) | 92 | 91 | 16 | 13 | 45 | 43 | 47 | 46 | 47 | 42 |
| Field of view (mm) | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 | 160 |
| In-Plane-Auflösung (mm) | 0,2 x 0,2 | 0,5 x 0,4 | 0,2 x 0,2 | 0,5 x 0,4 | 0,3 x 0,3 | 0,5 x 0,4 | 0,2 x 0,2 | 0,5 x 0,4 | 0,2 x 0,2 | 0,5 x 0,4 |
| Schichtabstand (%) | 20 | 20 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 20 | 20 |
| Schichtdicke (mm) | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Anzahl der Akquisitionen | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| Durchschnittlicher Scan-Zeit (min) | 4:53 | 3:56 | 4:12 | 3:31 | 3:18 | 5:57 | 3:56 | 4:29 | 4:14 | 4:21 |
| Schichtanzahl | 26 | 32 | 20 | 22 | 28 | 25 | 20 | 20 | 20 | 28 |
| Phasenkodierungsrichtung | AP | HF | RL | AP | AP | AP | RL | AP | HF | AP |

T: Tesla; AP: anterior-posterior; FS: fat saturation; RL: right-left; HF: head-foot; TSE: turbo spin echo.; IM: intermediär

2.4 Diagnostische Kriterien zur Bewertung des Pulley-Systems in der nativen MRT

Die präoperative native Schulter-MRT wurde retrospektiv, verblindet und unabhängig voneinander von drei Fachärzten für Radiologie mit mehrjähriger Erfahrung und Schwerpunkt in der muskuloskelettalen Bildgebung (K.W. und A.H. mit mehr als 25 Jahren, J.N. mit mehr als zehn Jahren) bewertet.

Die Durchführbarkeit der Studie wurde im Voraus geprüft. Zu Beginn und im Rahmen der Studienplanung wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um herauszufinden, welche diagnostischen MR-Zeichen bereits bekannt waren. Es wurde ein Fragebogen erstellt, der unter anderem Zeichnungen zur Darstellung der Armposition der untersuchten Patienten während der MRT enthielt, die von den Readern angegeben wurden.

Der Fragebogen wurde in einer gemeinsamen Sitzung vorgestellt, um sicherzustellen, dass alle Reader auf dem gleichen Wissensstand waren; eine Art "Kalibrierung" der Reader anhand des Fragebogens. Erst im Anschluss wurden die Patienten von den Readern einzeln bewertet. Die Radiologen waren mit den jeweiligen Fällen nicht vertraut und kannten die arthroskopischen Berichte zu keiner Zeit. Das Bildmaterial wurde in zufälliger Reihenfolge präsentiert und enthielt keine Patienteninformationen.

Anhand unseres Klassifikationsschemas in der nativen Schulter-MRT wurde das Pulley-System auf einen Defekt bzw. seine Intaktheit überprüft. Mithilfe eines hierfür erstellten Evaluationsbogens (siehe Abbildung 7) beurteilten die Radiologen die Bilder auf (a) Diskontinuität des SGHL, (b) Diskontinuität des CHL, (c) Vorhandensein des „Displacement sign“ der LBS, (d) Bizeps-Tendinose und (e) mediale Subluxation/Dislokation der LBS. Darüber hinaus wurden die Bilder im Hinblick auf (f) Risse der angrenzenden Subscapularis- und (g) Supraspinatus-Sehnen sowie (h) eine subacromiale Bursitis analysiert. Abschließend wurden alle Leser gebeten, ihre endgültige Schlussfolgerung hinsichtlich des Vorliegens oder Nichtvorliegens einer Läsion des Pulley-Systems zu dokumentieren. Zusätzlich wurden sie aufgefordert, auf einer Likert-Skala von 1 bis 5 anzugeben, wie sicher sie sich in ihrer Entscheidung sind: 1) definitiv vorhanden; 2) wahrscheinlich vorhanden; 3) unsicher; 4) wahrscheinlich nicht vorhanden; 5) definitiv nicht vorhanden.

Die Bildqualität wurde von einem unserer Radiologen anhand einer vierstufigen Skala bewertet (1: ausgezeichnet; 2: gut; 3: mäßig; 4: schlecht).

Im Rahmen der Datenauswertung wurden die einzelnen Ergebnisse der Radiologen mit der jeweiligen arthroskopisch gesicherten Diagnose, welche den Referenzstandard für die

Beurteilung des Pulley-Systems darstellte, verglichen. Detaillierte Definitionen der vorgenannten Kriterien sind in Tabelle 3 aufgeführt sowie in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Abbildung 9 zeigt ein intaktes Pulley-System, Abbildung 10 und 11 illustrieren ein defektes Pulley-System.

Tabelle 3: Diagnostische Kriterien zur Bewertung des Pulley-Systems in der nativen MRT

| Diagnostische Zeichen für die Erkennung einer Pulley-Läsion in der nativen MRT |
|--|
| <p>Beurteilung der ligamentären Strukturen des Pulley-Systems mit Evaluation des</p> <p>(a) SGHL und (b) CHL:</p> <p>Diskontinuität von SGHL und/oder CHL in der parasagittalen Ebene.</p> |
| <p>(c) „Displacement sign“/Verlagerungszeichen der LBS:</p> <p>Beurteilung hinsichtlich einer Verlagerung der LBS nach kaudal und/oder anterior relativ zur SSC-Sehne auf einem Mittelschnitt durch das Tuberculum minus des Humerus in der parasagittalen Ebene. Dabei besteht ein direkter Kontakt der (sub-)luxierten LBS mit dem oberen Rand der SSC-Sehne.</p> |
| <p>(d) Tendinose der LBS:</p> <p>Veränderungen des Durchmessers, erhöhte Signalintensität oder Irregularität der Sehnenoberfläche in der parasagittalen und transversalen Ebene.</p> |
| <p>(e) Subluxation/Dislokation der LBS:</p> <p>Beurteilung der Position der LBS im gesamten Verlauf des Sulcus intertubercularis humeri auf paratransversalen Bildern.</p> <p>Eine Subluxation der LBS wird als Verlagerung über den inneren Rand des Sulcus intertubercularis humeri mit verbleibendem Teilkontakt zum Sulcus intertubercularis humeri definiert. Dagegen wird eine Dislokation der LBS als vollständiger Verlust des Kontaktes mit dem Sulcus intertubercularis humeri definiert.</p> |

(f) (Partial-)Läsion der SSP-Sehne:

Beurteilung der an das Rotatorenintervall angrenzenden Sehne des SSP auf eine (Partial-)Läsion.

(g) (Partial-)Läsion der SSC-Sehne:

Beurteilung der an das Rotatorenintervall angrenzenden Sehne des SSC auf eine (Partial-) Läsion.

(h) Vorhandensein einer Bursitis subacromialis



Abbildung 5 MR-diagnostische Zeichen für die Erkennung einer Pulley-Läsion

Parasagittale IM-gewichtete MR-Aufnahmen mit frequenzselektiver Fettunterdrückung: (A) SGHL-Diskontinuität, (B) CHL-Diskontinuität, (C) „Displacement sign“ der LBS mit kaudaler Verlagerung der LBS auf die SCC-Sehne innerhalb des Rotatorenintervalls, (D) LBS-Tendinose mit Verbreiterung des Sehnedurchmessers und erhöhter intratendinöser Signalintensität. Die weißen Pfeile demonstrieren die einzelnen Pathologien.



Abbildung 6 MR-diagnostische Zeichen für die Erkennung einer Pulley-Läsion

IM-gewichtete MR-Aufnahmen mit frequenzselektiver Fettunterdrückung: (E) Transversale Schnittebene mit Subluxation/Dislokation der LBS und Verlagerung über den inneren Rand des Sulcus intertubercularis humeri. (F) Parakoronare Schnittebene mit Läsion der SSP-Sehne. (G) Parasagittale Schnittebene mit Läsion der SSC-Sehne und kaudaler Verlagerung der LBS. (H) Parakoronare Schnittebene mit vermehrter Flüssigkeitskolektion, Bursitis subacromialis, als Begleitpathologie einer Pulley-Läsion. Die weißen Pfeile demonstrieren die einzelnen Pathologien.

2.5 Evaluationsbogen zur Beurteilung des Pulley-Systems

Evaluation sheet: Biceps pulley injury

Patient- ID: (initials + year of birth): _____

Location: right left

Most relevant plane and sequence:

Arm rotation with location of the Sulcus bicipitalis:

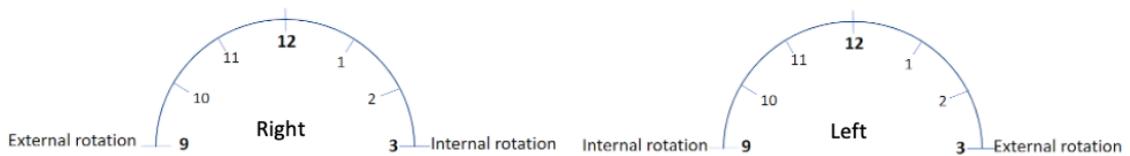


Image quality: poor moderate good excellent

Indirect signs:

| | | | |
|---|----------------------------------|---------------------------------|---|
| Pulley sling | | | |
| SGHL discontinuous: | <input type="checkbox"/> defect | <input type="checkbox"/> intact | <input type="checkbox"/> cannot be assessed |
| CHL discontinuous: | <input type="checkbox"/> defect | <input type="checkbox"/> intact | <input type="checkbox"/> cannot be assessed |
| Displacement sign of the LHBT: (sagittal) | <input type="checkbox"/> present | | <input type="checkbox"/> not present |
| Tendinopathy of LHBT: | <input type="checkbox"/> present | | <input type="checkbox"/> not present |
| Subluxation/Dislocation of LHBT: (axial) | <input type="checkbox"/> present | | <input type="checkbox"/> not present |
| SSP tendon lesion: | <input type="checkbox"/> present | | <input type="checkbox"/> not present |
| SSC tendon lesion: | <input type="checkbox"/> present | | <input type="checkbox"/> not present |
| Bursitis: | <input type="checkbox"/> present | | <input type="checkbox"/> not present |

None of the above

Certainty of conclusion: Biceps pulley injury

1

2

3

4

5

definitely

likely

uncertain

likely

definitely

present

present

not present

not present

Conclusion: Biceps pulley lesion? Yes No

Abbildung 7 Evaluationsbogen zur Beurteilung des Pulley-Systems

2.6 Intraoperative arthroskopische Untersuchung:

Das intraoperative Verfahren entsprach bei allen Patienten dem klinischen Standard und der klinischen Routine im Hinblick auf den OP-Ablauf. Alle Eingriffe wurden von einem in der Arthroskopie langjährig erfahrenen orthopädischen Chirurgen der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Sportorthopädie des Klinikums rechts der Isar durchgeführt. Die Patienten wurden für die Schulterarthroskopie in Beach-Chair-Position gelagert und in Allgemeinanästhesie untersucht. Über das dorsale Portal wurde eine 4 mm 30 °- Optik eingebracht und eine diagnostische Arthroskopie und Bursoskopie durchgeführt. Nach Anlegen der Zugänge wurde die standardisierte arthroskopische Untersuchung des Schultergelenks durchgeführt.

Als Orientierungspunkt diente hierbei die Insertion der LBS. Die glenohumerale Inspektion begann am Ansatz der LBS und wurde in ihrem Verlauf nach intraartikular und intertuberkular verfolgt. Mittels Testhaken wurde die LBS auf ihre Instabilität und Integrität im Sulcus intertubercularis humeri untersucht. Daneben wurde die Sehne hinsichtlich einer Tendinopathie inspiziert. Das Pulley-System wurde auf die Unversehrtheit des SGHL und CHL überprüft. Anschließend wurde die artikulareseitige Subscapularissehne, Supraspinatussehne und Infraspinatussehne im Einzelnen inspiziert. Das anterosuperiore Glenoid und Labrum glenoidale wurden begutachtet. Ein dynamischer Test der Subscapularissehne und des Tuberculum minus gegen das anterosuperiore Glenoid diente zum Ausschluss eines Impingements. Unter arthroskopischer Sicht wurden Flexion, horizontale Abduktion und Innenrotation provoziert. Der subacromiale Raum wurde durch das dorsale Portal beurteilt. Auf diese Weise konnte neben der Beurteilung einer Bursitis subacromialis die Oberfläche der Rotatorenmanschette hinsichtlich subacromialer Impingementzeichen und anderer Pathologien inspiziert werden. Alle arthroskopisch erhobenen Befunde wurden standardmäßig dokumentiert. Die Anfertigung einer Bild- bzw. Videodokumentation gehörte neben dem schriftlichen OP-Bericht zum standardisierten Prozedere. Bei einer Diagnose einer Pulley-Läsion wurde diese nach der Klassifikation nach Habermeyer et al. klassifiziert (siehe Abbildung 2) und im OP-Bericht festgehalten. Analog zu den erhobenen Befunden der entscheidenden Strukturen wurden die bei der Arthroskopie durchgeführten therapeutischen Maßnahmen, d.h. Bizepssehnenodese oder -tenotomie, dokumentiert.

2.7 Datenerhebung

2.7.1 Präoperativ

Bei der retrospektiven Studie wurde das präoperative Bildmaterial aus dem radiologischen Bildarchiv (Sectra Befundarbeitsplatz IDS 7) und durch die Analyse der elektronischen Patientenakte entnommen. Alle Patienten hatten präoperativ Schulterschmerzen, die häufig durch Impingementtests provoziert werden konnten. In der Regel erhielten alle Patienten präoperativ eine konventionelle Röntgenuntersuchung in drei Ebenen (standardisiert in a.p.-, Y- und transversaler Projektion).

2.7.2 Intraoperativ

Dem OP-Bericht wurden die Diagnosen mit Hauptpathologie, die OP-Art und die beteiligten Operateure entnommen. Die rechtfertigende Indikation wurde ausführlich beschrieben. Eine Dokumentation des Anästhesieverfahrens und der Lagerung lag vor. Die entscheidenden anatomischen Regionen hinsichtlich einer Pathologie wurden beschrieben. Dem OP-Bericht wurden die Diagnose und die durchgeführten Eingriffe, wie etwa eine LBS-Tenodese, eine Rotatorenintervall- oder RM-Rekonstruktion oder eine Akromioplastik entnommen. Das postoperative Prozedere wurde erläutert.

2.8 Statistische Auswertung

Die statistischen Analysen wurden mit der Statistik-Software SPSS (Version 28, IBM Corp., Armonk, NY, USA) unter Aufsicht einer Dipl. Statistikerin (B.W.) des Instituts für KI und Informatik der Technischen Universität München durchgeführt.

Die diagnostische Beurteilung der nativen MRT von arthroskopisch nachgewiesenen Läsionen des Pulley-Systems wurde durch die Sensitivität, Spezifität und diagnostische Genauigkeit dargestellt, wobei Konfidenzintervalle zur Einschätzung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse berücksichtigt wurden. Analog wurde für jedes diagnostische Kriterium die Sensitivität, Spezifität und diagnostische Genauigkeit berechnet. Für die Bewertung und Erkennung von Läsionen des Bizeps-Pulley wurden zudem prädiktive Werte (positiver und negativer prädiktiver Wert) angegeben. Das Fleiss' Kappa (k) wurde als Index für die Interrater-Übereinstimmung (Reproduzierbarkeit) verwendet. Für alle errechneten Werte wurde zusätzlich das jeweilige Konfidenzintervall bestimmt, hierbei wurde ein Konfidenzintervall von 95 % festgelegt.

Die Größenverteilung nach Geschlecht wurde mittels Chi-Quadrat-Test berechnet und in einem Balkendiagramm dargestellt. Mittels T-Test wurde das Durchschnittsalter beider Kohorten ermittelt, verglichen und graphisch gegenübergestellt.

3 Ergebnisse

3.1 Studienpopulation

Unter den eingeschlossenen 68 Patienten waren 19 Frauen (27,94 %) und 49 Männer (72,06 %). Die Altersspanne der Studienpopulation lag zwischen 16 und 78 Jahren, das Durchschnittsalter betrug 47 Jahre. Unter den 68 Patienten wurden 48 (70,59 %) rechte und 20 (29,41 %) linke Schultern bewertet.

Unter den 42 Patienten mit arthroskopisch gesicherter Pulley-Läsion (Altersspanne zwischen 20 und 78 Jahren, Durchschnittsalter 49 Jahre, 31 rechte [73,8 %] und 11 linke Schultern [26,2 %]) waren 12 Frauen ([28,57 %], 8 rechte [66,67 %] und 4 linke Schultern [33,33 %]) und 30 Männer ([71,43 %], 23 rechte [76,67 %] und 7 linke Schultern [23,33 %]). Die 26 Patienten in der Kontrollgruppe (Altersspanne zwischen 16 und 70 Jahren, Durchschnittsalter 34 Jahre, 17 rechte [65,4 %] und 9 linke Schultern [34,6 %]) mit 7 Frauen ([65,4 %], 4 rechte [57,14 %] und 3 linke Schultern [42,86 %]) und 19 Männern ([73,08 %], 13 rechte [68,42 %] und 6 linke Schultern [31,68 %]) wurden als jenes Patientenkollektiv mit arthroskopisch intaktem Pulley-System definiert (siehe Tabelle 4 und Abbildung 8). Die klinischen Indikationen für die MR-Bildgebung in der Studien- und Kontrollgruppe waren akute und chronische Schulterschmerzen mit und ohne Trauma, schmerzhafte Bewegungseinschränkungen des Schultergelenks (insbesondere Abduktion), Risse der Rotatorenmanschette, Instabilität der LBS, superiores Labrum von anterior nach posterior-Läsionen (SLAP) und der Verdacht auf Läsionen der Bizeps-Pulley-Schlinge.

Tabelle 4: Demographische Daten des Patientenkollektivs

| Gruppe | Studienpopulation | Intaktes Pulley-System | Defektes Pulley-System |
|---------------------------------------|-------------------|------------------------|------------------------|
| Anzahl der eingeschlossenen Patienten | 68 | 26 | 42 |
| Altersspanne | 16-78 Jahre | 16-70 Jahre | 20-78 Jahre |
| Durchschnittsalter | 47 Jahre | 34 Jahre | 49 Jahre |
| Geschlecht (männlich/weiblich) | 19/49 | 29/7 | 30/12 |

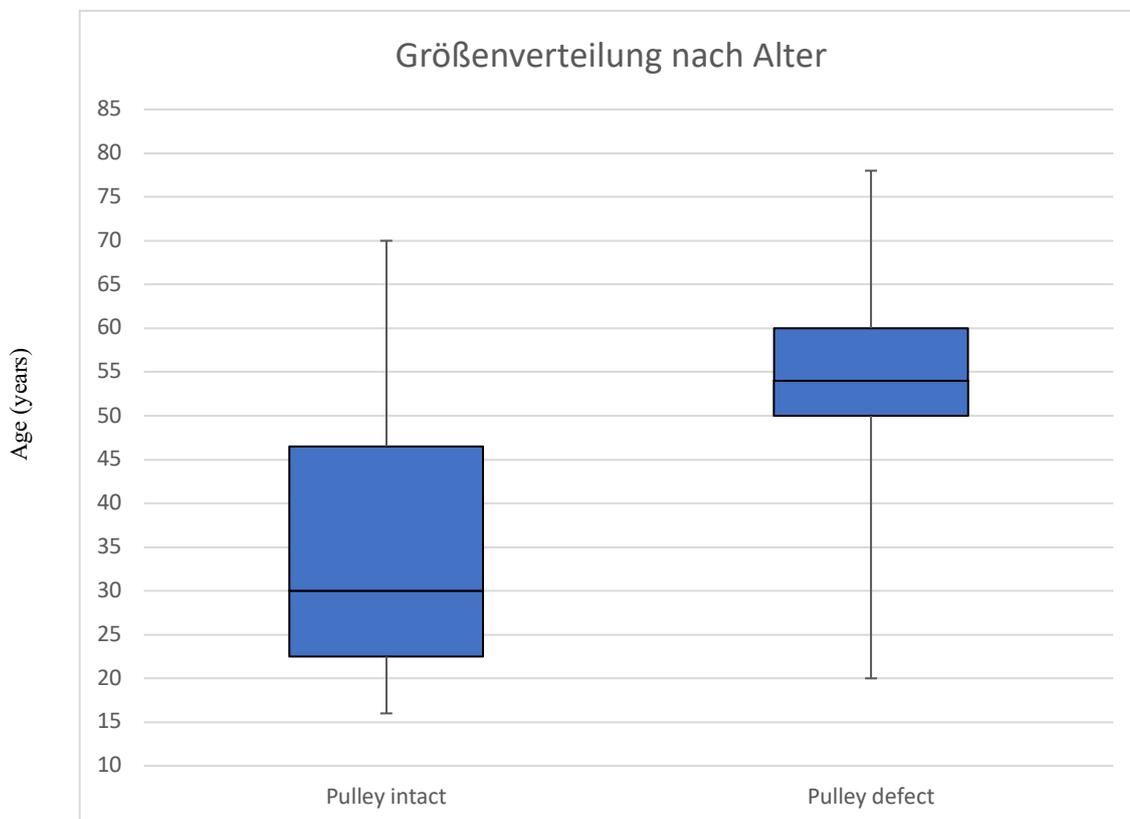


Abbildung 8 Boxplot zur Größenverteilung der Studien- und Kontrollgruppe nach Alter

3.2 Arthroskopie

Von den Patienten mit einer arthroskopisch nachgewiesenen Pulley-Läsion hatten 5 von 42 (11,9 %) isolierte Pulley-Läsionen (Habermeyer-Typ I), 12 von 42 (28,6 %) wurden als Typ II nach Habermeyer klassifiziert, 6 von 42 (14,3 %) als Typ III nach Habermeyer und 19 von 42 (45,2 %) wurden als Typ Habermeyer-IV-Läsionen diagnostiziert.

Therapeutisch wurde bei allen Patienten der Studiengruppe (100 %) eine Tenotomie oder Tenodese des LBS durchgeführt. In der Kontrollgruppe wurde das Pulley-System bei allen Probanden aus dieser Gruppe im Detail beurteilt, auf eine Intaktheit geprüft und letztlich als intakt gewertet. Zu den Hauptdiagnosen der Patienten aus der Kontrollgruppe gehörten bspw. Labrumläsionen, SLAP-Läsionen, Verletzungen der Rotatorenmanschette ohne Beteiligung des Pulley-Systems sowie ein posterosuperiores Glenoid-Impingement.

3.3 Beurteilung des Pulley-Systems in der nativen MRT

Die von einem unserer Reader evaluierte Bildqualität wurde in 19 von 68 Fällen (27,9 %) als ausgezeichnet, in 30 (44,1 %) als gut, in 17 (25 %) als mäßig und in zwei (2,9 %) als schlecht bewertet. Eine mäßige oder schlechte Bildqualität war entweder auf Bewegungsartefakte oder eine Innenrotation des Schultergelenks zurückzuführen. Dabei wurde eine Schulter (1 von 68 [1,5 %]) trotz des angestrebten einheitlichen Armlagerungsprotokolls in Innenrotation untersucht.

Die Ergebnisse der allgemeinen diagnostischen Effizienz der konventionellen MR-Bildgebung bei der Erkennung von Läsionen der Bizeps-Pulley basieren auf den endgültigen Schlussfolgerungen der Reader und sind in Tabelle 5 dargestellt.

Die Bewertung einer Pulley-Läsion in der nativen MRT zeigte bei allen drei Readern sowohl eine hohe Sensitivität (95,2 %, 88,1 %, 92,9 %) als auch hohe diagnostische Genauigkeit (82,4 %, 82,4 %, 88,2 %). Dabei lag die diagnostische Genauigkeit der drei Reader dicht beieinander. Im Vergleich zur hohen Sensitivität zeigte sich jedoch nur eine moderate Spezifität (61,5 %, 73,1 %, 80,8 %) in der Erkennung von Pulley-Läsionen in der nativen MRT. Die Übereinstimmung zwischen den Readern war substantiell (Multirater $k = 0,75$ [95 % Konfidenzintervall: 0,62; 0,90]). Hinsichtlich des Grades der Gewissheit waren alle unsere Reader weitgehend sicher in ihren Entscheidungen, mit nur 10 %, 3 % und 3 % "unsicherer" Entscheidungen (Likert-Skala 3) für Reader 1, 2 und 3.

Die Bewertung (Sensitivität, Spezifität, diagnostische Genauigkeit) der einzelnen Zeichen für eine Pulley-Läsion in der nativen MRT ist in Tabelle 6 dargestellt

In der Analyse der diagnostischen Zeichen, welche in der nativen MRT auf eine Pulley-Läsion hindeuten, stellte sich die Tendinose auf transversalen Bildern als hochsensitiv (97,6 %, 95,2 %, 97,6 %), jedoch unspezifisch (61,5 %, 57,7 %, 65,4 %) mit einer guten Interrater-Übereinstimmung (Multirater $k = 0,79$ [95 % Konfidenzintervall: 0,66; 0,93]) dar.

Das „Displacement sign“ der LBS wurde ähnlich bewertet; während die Sensitivität hoch war (88,1%, 81,0%, 85,7%), stellte sich die Spezifität (61,5 %, 73,1 %, 88,5 %) dieses Zeichens nur moderat dar. Die Interrater-Übereinstimmung war ebenfalls nur moderat (Multirater $k = 0,60$ [95 % Konfidenzintervall: 0,47; 0,74]). Eine Subluxation oder Dislokation der LBS relativ zum Sulcus intertubercularis humeri war spezifisch für die Diagnose einer Pulley-Läsion (69,2 %, 100,0 %, 96,2 %) und zeigten eine moderate Übereinstimmung zwischen den Readern (Multirater $k = 0,60$ [95 % Konfidenzintervall: 0,47; 0,74]), aber die Sensitivitäten erwiesen sich als recht niedrig (78,6 %, 42,9 %, 33,3 %).

Eine hohe Sensitivität (95,2 %, 88,1 %, 73,8 %) und eine moderate Übereinstimmung zwischen den Untersuchern (Multirater $k = 0,61$ [95 % Konfidenzintervall: 0,48; 0,75]) konnte bei der Detektion von SSP-Läsionen gezeigt werden. Das Vorhandensein von Läsionen der SSP-Sehne war jedoch bei allen drei Reader nicht spezifisch für die Diagnose einer Pulley-Läsion (57,7 %, 53,8 %, 65,4 %).

Es gab nur eine schlechte Interrater-Übereinstimmung bei der Diagnose von Läsionen der SSC-Sehne (Multirater $k = 0,41$ [95 % Konfidenzintervall: 0,35; 0,63]). Die Sensitivität bei der Erkennung von Läsionen der Bizeps-Pulley war für dieses Zeichen für Reader 1 hoch (92,9 %), für Reader 2 und 3 jedoch niedrig (64,3 % und 54,8 %). Andererseits war die Spezifität bei Reader 1 niedrig (65,4 %), bei Beobachter 2 und 3 jedoch hoch (88,5 % und 92,3 %).

Bei der Bewertung der ligamentären Strukturen wurden unterschiedliche Ergebnisse beobachtet. Die SGHL-Bewertung zeigte eine zufriedenstellende diagnostische Genauigkeit (70,6 %, 73,5 %, 83,4 %) mit moderater Übereinstimmung zwischen den Untersuchern (Multirater $k = 0,54$ [95 % Konfidenzintervall: 0,44; 0,65]). Im Gegensatz dazu war die diagnostische Genauigkeit (36,8 %, 58,8 %, 73,5 %) insgesamt gering und die Interrater-Übereinstimmung (multirater $k = 0,17$ [95 % Konfidenzintervall: 0,06; 0,27]) bei der Bewertung des CHL schwach. Alles in allem konnte das SGHL nur in 11,8 % der Fälle und das CHL in nur 12,3 % der Fälle nicht bewertet werden.

Das Vorhandensein einer Bursitis subacromialis war bei allen drei Readern weder sensitiv (45,2 %, 78,6 %, 95,2 %) noch spezifisch (73,1 %, 73,1 %, 53,8 %) für die Diagnose einer Pulley-Läsion mit einer schwachen Interrater-Übereinstimmung [95 %-Konfidenzintervall: 0,20; 0,47]).

Tabelle 5: Funktionalität der nativen MRT zur Diagnose von Pulley-Läsionen

| Diagnostische Leistung der nativen MRT in der Diagnose von Pulley-Läsionen | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | Beobachter 1 (%) | Beobachter 2 (%) | Beobachter 3 (%) |
| Sensitivität | 95,2 (40/42) [85.6; 99.0] | 88,1 (37/42) [75.9; 95.3] | 92,9 (39/42) [82.1; 97.9] |
| Spezifität | 61,5 (16/26) [42.4; 78.2] | 73,1 (19/26) [54.3; 87.1] | 80,8 (21/26) [62.9; 92.3] |
| PPV | 80,0 [70.6; 88.0] | 84,1 [72.8; 92.3] | 88,6 [78.1; 95.4] |
| NPV | 88,9 [64.6; 97.6] | 86,4 [58.2; 92.0] | 87,5 [68.5 ;96.5] |
| Accuracy | 82,4 (56/68) [72.0; 90.0] | 82,4 (56/68) [72.0; 90.0] | 88,2 (60/68) [79.0; 94.3] |

Daten in Klammern sind Rohzahlen, die zur Berechnung von Prozentsätzen verwendet werden, und Daten in eckigen Klammern sind 95 % Konfidenzintervalle. NPV = negativer Vorhersagewert, PPV = positiver Vorhersagewert.

Tabelle 6: Bewertung der diagnostischen Zeichen arthroskopisch nachgewiesener Pulley-Läsionen in der nativen MRT

| Bewertung der diagnostischen Zeichen in der Diagnose arthroskopisch nachgewiesener Läsionen des Pulley-Systems | | | | |
|---|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| | Sensitivität (%) | Spezifität (%) | Diagnostische Genauigkeit (%) | Multirater k |
| SGHL-Diskontinuität | | | | 0,54 [0,44; 0,65] |
| Beobachter 1 | 83,3 (35/42) [70.0; 92.2] | 46,2 (12/26) [28.2; 64.9] | 70,6 (47/68) [57.5; 79.1] | |
| Beobachter 2 | 81,0 (34/42) [67.3; 90.6] | 61,5 (16/26) [42.4; 78.2] | 73,5 (50/68) [62.2; 82.9] | |
| Beobachter 3 | 88,1 (37/42) [75.9; 95.3] | 76,9 (20/26) [58.5; 89.7] | 83,4 (57/68) [73.8; 91.0] | |

| | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| CHL-Diskontinuität | | | | 0,17 [0,06; 0,27] |
| Beobachter 1 | 4,8 (2/42) [1.0; 14.4] | 88,5 (23/26) [72.3; 96.6] | 36,8 (25/68) [26.0; 48.6] | |
| Beobachter 2 | 47,6 (20/42) [33.1; 62.5] | 76,9 (20/26) [58.5; 89.7] | 58,8 (40/58) [47.0; 70.0] | |
| Beobachter 3 | 69,0 (29/42) [54.2; 81.4] | 80,8 (21/26) [62.9; 92.3] | 73,5 (50/68) [62.2; 82.9] | |
| “Displacement sign” der LBS | | | | 0,60 [0,47; 0,74] |
| Beobachter 1 | 88,1 (37/42) [75.9; 95.3] | 61,5 (16/26) [42.4; 87.1] | 77,9 (53/68) [67.1; 86.5] | |
| Beobachter 2 | 81,0 (34/42) [67.3; 90.6] | 73,1 (19/26) [54.3; 87.1] | 77,9 (53/68) [67.1; 86.5] | |
| Beobachter 3 | 85,7 (36/42) [72.9; 93.8] | 88,5 (23/26) [72.3; 96.6] | 86,7 (59/68) [77.2; 93.2] | |
| Tendinopathie der LBS | | | | 0,79 [0,66; 0,93] |
| Beobachter 1 | 97,6 (41/42) [89.4; 99.7] | 61,5 (16/26) [42.4; 78.2] | 83,8 (57/68) [73.8; 91.1] | |
| Beobachter 2 | 95,2 (40/42) [85.6; 99.0] | 57,7 (15/26) [38.7; 75.0] | 80,9 (55/68) [70.4; 88.8] | |
| Beobachter 3 | 97,6 (41/42) [89.4; 99.7] | 65,4 (17/26) [46.3; 81.3] | 85,3 (58/68) [75.5; 92.2] | |
| Subluxation/Dislokation der LBS | | | | 0,36 [0,23; 0,50] |
| Beobachter 1 | 78,6 (33/42) [64.5; 88.8] | 69,2 (18/26) [50.2; 84.2] | 75,0 (51/68) [63.8; 84.1] | |
| Beobachter 2 | 42,9 (18/42) [28.8; 57.9] | 100,0 (26/26) | 64,7 (44/68) [52.9; 75.3] | |
| Beobachter 3 | 33,3 (14/42) [20.6; 48.3] | 96,2 (25/26) [83.4; 99.6] | 57,4 (39/68) [45.5; 68.6] | |

| | | | | |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Läsion der SSP-Sehne | | | | 0,61 [0,48; 0,75] |
| Beobachter 1 | 95,2 (40/42) [85.6; 99.0] | 57,7 (15/26) [38.7; 75.0] | 80,9 (55/68) [70.4; 88.8] | |
| Beobachter 2 | 88,1 (37/42) [75.9; 95.3] | 53,8 (14/26) [35.1; 71.8] | 75,0 (51/68) [63.8; 84.1] | |
| Beobachter 3 | 73,8 (31/42) [59.2; 85.2] | 65,4 (17/26) [46.3; 81.3] | 70,6 (48/68) [59.1; 80.4] | |
| Läsion der SSC-Sehne | | | | 0,41 [0,35; 0,63] |
| Beobachter 1 | 92,9 (39/42) [82.1; 97.9] | 65,4 (17/26) [46.3; 81.3] | 82,4 (56/68) [72.0; 90.0] | |
| Beobachter 2 | 64,3 (27/42) [49.2; 77.4] | 88,5 (23/26) [72.3; 96.6] | 73,5 (50/68) [62.2; 82.9] | |
| Beobachter 3 | 54,8 (23/42) [39.8; 69,1] | 92,3 (24/26) [77.5; 98.4] | 69,1 (47/68) [57.5; 79.1] | |
| Bursitis | | | | 0.34 [0,20; 0,47] |
| Beobachter 1 | 45,2 (19/42) [30.9; 60,2] | 73,1 (19/26) [54.3; 87.1] | 55,9 (38/68) [44.0; 67.2] | |
| Beobachter 2 | 78,6 (33/42) [64.5; 88.8] | 73,1 (19/26) [54.3; 87.1] | 55,9 (52/68) [65.4; 85.3] | |
| Beobachter 3 | 95,2 (40/42) [85.6; 99,0] | 53,8 (14/26) [35.1; 71,8] | 79,4 (54/68) [68.7; 87.7] | |

Daten in Klammern sind Rohzahlen, die zur Berechnung von Prozentsätzen verwendet werden, und Daten in eckigen Klammern sind 95 % Konfidenzintervall; Multirater k wird für alle drei Beobachter dargestellt.

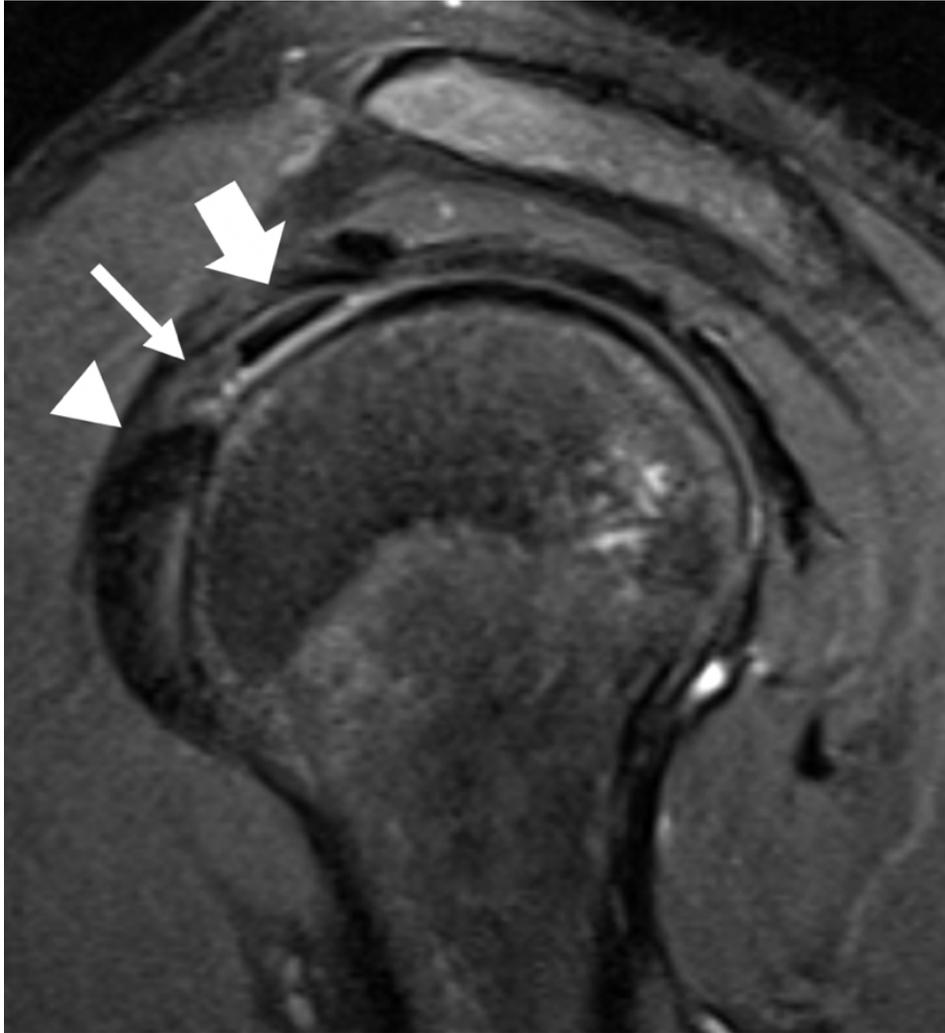


Abbildung 9 Intaktes Pulley-System

Parasagittales IM-gewichtete MR-Aufnahme mit frequenzselektiver Fettunterdrückung der rechten Schulter eines 19-jährigen Mannes mit Schulterinstabilität und anterioren Schulterschmerzen. Das Pulley-System wurde von allen drei Untersuchern als intakt gewertet. Die Arthroskopie bestätigte ein intaktes Pulley-System. Die MRT zeigt das physiologische anatomische Bild des SGHL (dünner Pfeil). Die LGS (dicker Pfeil) stellt sich in regelrechter Position mit normalem Durchmesser und Signalintensität dar. Die SSC-Sehne (Pfeilspitze) erscheint intakt.

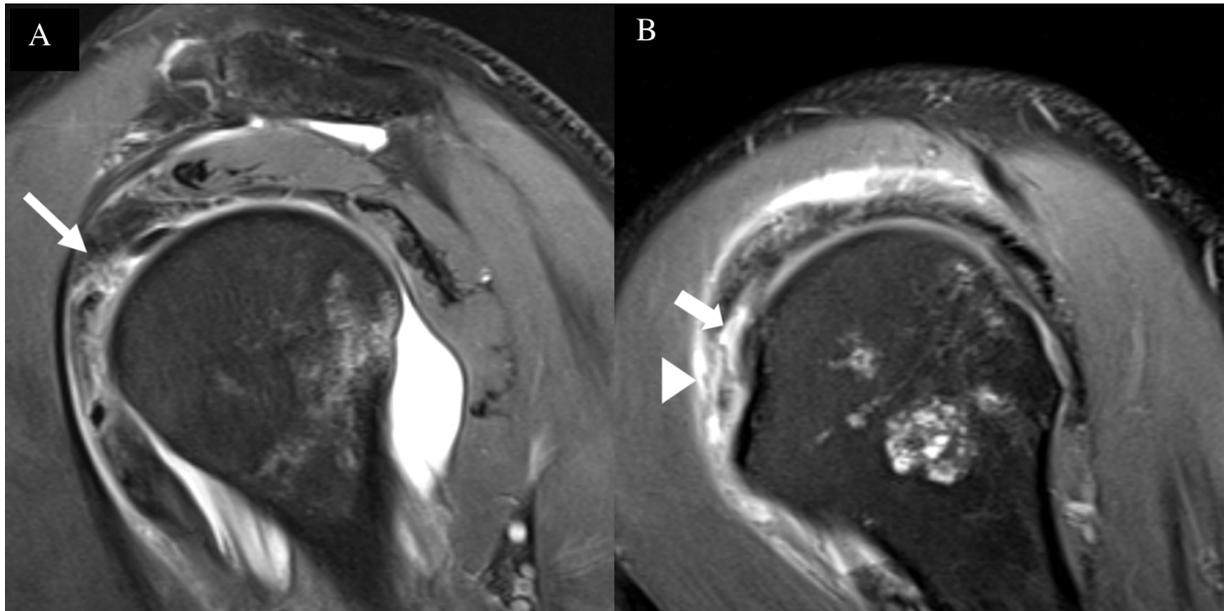


Abbildung 10 Pulley-Läsion Typ III nach Habermeyer

Arthroskopisch gesicherte Pulley-Läsion (Habermeyer-III-Läsion) der rechten Schulter eines 55-jährigen Mannes, der nach einem Fahrradunfall über chronische Schmerzen in der vorderen Schulter klagte. Alle drei Untersucher stellten die korrekte Diagnose einer Pulley-Läsion. (A) Parasagittales IM-gewichtete MR-Bild mit frequenzselektiver Fettsuppression durch das mediale Rotatorenintervall zeigt ein irreguläres, verdicktes und diskontinuierliches SGHL (dünner Pfeil). Begleitend ist ein Gelenkerguss zu erkennen. (B) Die weiter laterale Schicht zeigt ein „Displacement sign“ der LBS (dicker Pfeil) mit Verlagerung der LBS in den Defekt der SSC-Sehne (Pfeilspitze). Als Zufallsbefund stellt sich ein Enchondrom im proximalen Humerus dar.

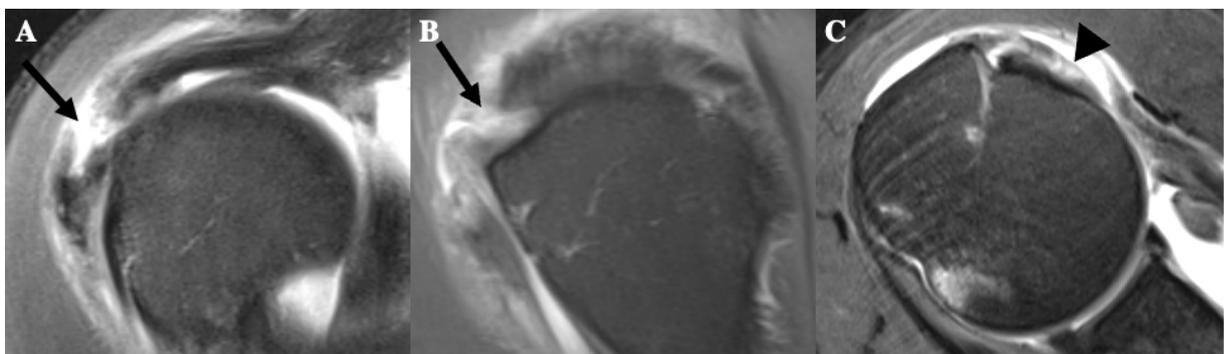


Abbildung 11 Pulley-Läsionen Typ IV nach Habermeyer

Arthroskopisch gesicherte Pulley-Läsion (Habermeyer-IV-Läsion) der rechten Schulter eines 54-jährigen Mannes, der über chronische Schmerzen in der vorderen Schulter klagte. Alle drei Untersucher stellten die korrekte Diagnose einer Pulley-Läsion. Die parakoronale (A) sowie die parasagittale (B) IM-gewichtete MR-Aufnahme zeigen eine komplette (transtendinöse) Ruptur des anterioren Anteils der Supraspinatussehne (schwarzer Pfeil). (C) In der transversalen Aufnahme ist eine Ruptur der kranialen Subscapularissehne (schwarze Pfeilspitze) zu erkennen.

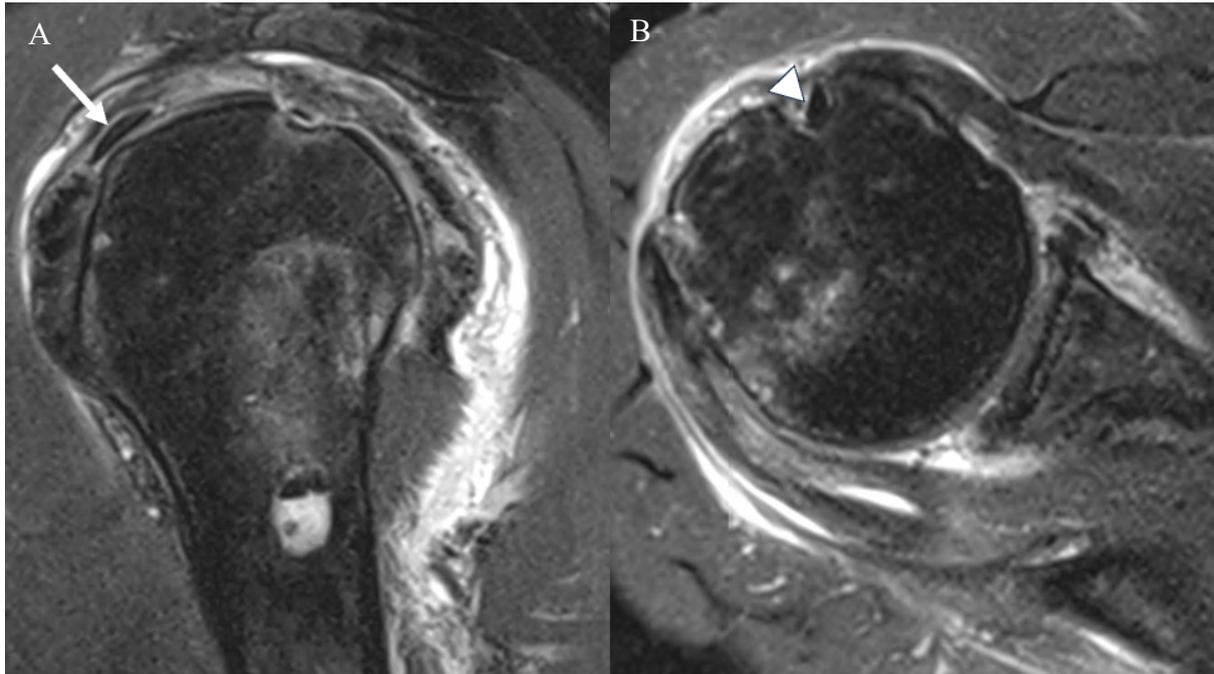


Abbildung 12 Intaktes Pulley-System

MRT der rechten Schulter einer 70-jährigen Frau, die bei Z.n. Sturz auf den ausgestreckten Arm und anteriorer Schulterluxation über Schmerzen in der vorderen Schulter klagte. Arthroskopisch wurde das Pulley-System als intakt gewertet. Zwei von drei Untersuchern stellten die korrekte Diagnose, die mit dem Arthroskopiebefund übereinstimmt. (A) Eine parasagittale IM-gewichtete MR-Aufnahme mit frequenzselektiver Fettsuppression zeigt eine moderate LBS-Tendinose (weißer Pfeil). Ein „Displacement sign“ liegt nicht vor. (B) In der transversalen Bildebene zeigt sich eine physiologische Positionierung der LBS (Pfeilspitze) im Sulcus intertubercularis humeri, was korrekterweise von allen Untersuchern erkannt wurde.

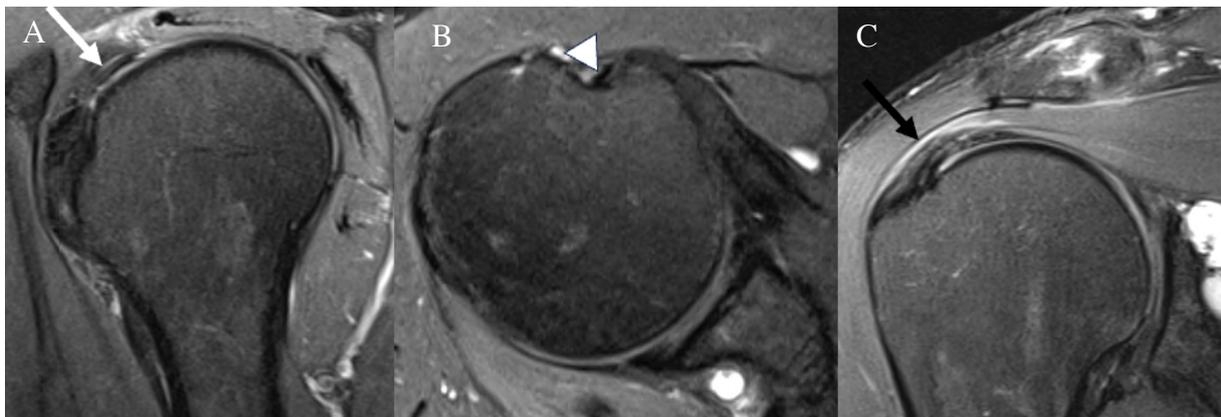


Abbildung 12 Falsch positiver Befund einer Pulley-Läsion

IM-gewichtete MR-Aufnahmen mit frequenzselektiver Fettunterdrückung eines arthroskopisch intakt gewerteten Pulley-Systems. Nach Bewertung der diagnostischen MR-Zeichen wurde das Pulley-System von zwei der drei Untersucher als defekt gewertet. (A) Zwei der Radiologen stellten das Vorhandensein eines „Displacement sign“ in der parasagittalen Bildebene fest. Nur ein Radiologe entschied sich gegen das Vorliegen eines „Displacement sign“, was in der Arthroskopie bestätigt werden konnte. Eine LBS-Tendinopathie (weißer Pfeil) wurde von allen Radiologen korrekterweise erkannt. (B) Die transversale Bildebene zeigt eine regelrechte Positionierung der LBS (Pfeilspitze) im Sulcus intertubercularis humeri. Eine Subluxation/Dislokation der LBS liegt nicht vor, was von den Untersuchern richtig erkannt wurde. (C) Die parakoronale Bildebene ist eine Bursitis acromialis (schwarzer Pfeil) zu sehen.

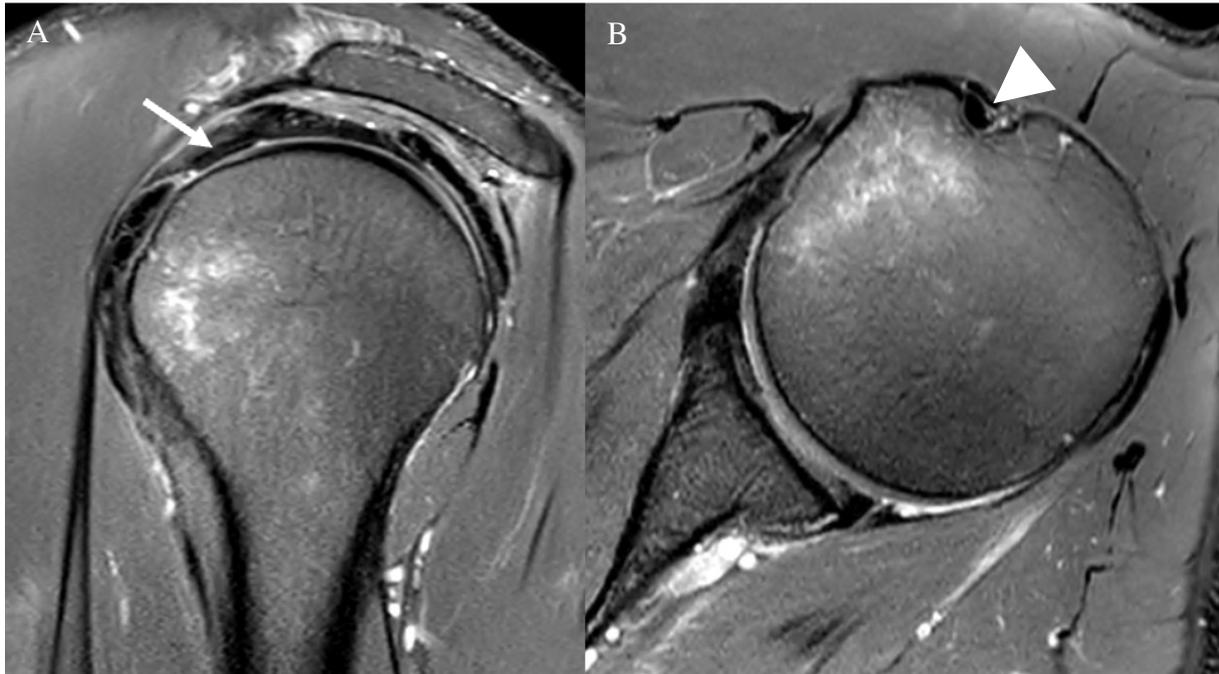


Abbildung 13 Falsch negativer Befund einer Pulley-Läsion

Parasagittale und transversale IM-gewichtete MR-Aufnahmen mit frequenzselektiver Fettunterdrückung der linken Schulter eines 58-jährigen Mannes mit Schulterinstabilität und anterioren Schulterschmerzen. (A) Die LBS (weiße Pfeilspitze) stellt sich regelrecht dar. Es findet sich kein „Displacement sign“, die SSC-Sehne imponiert intakt. (B) Die LBS (weiße Pfeilspitze) stellt sich in regelrechter Position im Sulcus intertubercularis humeri dar. Weitere MR-morphologische Zeichen in der nativen MRT konnten von allen drei Untersuchern nicht identifiziert werden, sodass das Pulley-System einheitlich von den Untersuchern als intakt gewertet wurde. In der Arthroskopie zeigte sich jedoch eine Pulley-I Läsion mit Riss im SGHL, somit ein falsch-negativer Befund in der nativen MRT.

4 Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde die diagnostische Wertigkeit und Zuverlässigkeit der konventionellen MR-Bildgebung zur Detektion von Läsionen des Pulley-Systems untersucht. Die von uns definierten Bildgebungsmerkmale wurden unabhängig voneinander von drei Fachärzten für Radiologie mit Schwerpunkt in der muskuloskelettalen Bildgebung beurteilt. Es zeigte sich eine zufriedenstellende diagnostische Genauigkeit und eine substantielle Übereinstimmung zwischen den Untersuchern.

Pulley-Läsionen stellen eine häufige Schulterpathologie dar, welche oftmals mit chronischer Instabilität der LBS und Schmerzen in der vorderen Schulter einhergehen [52]. Im Rahmen der Diagnosestellung einer Pulley-Läsion ist eine diagnostische Bildgebung unerlässlich, da klinische Tests oft nicht eindeutig sind [3, 19, 89].

Die diagnostische Genauigkeit der MR-Arthrographie wurde bereits ausführlich untersucht und hat sich als präzises Instrument zur Beurteilung des Pulley-Systems erwiesen [19, 20, 22, 23]. Als invasiv-diagnostisches Verfahren, mit entsprechenden, wenn auch geringen Risiken, größerem apparativen und zeitlichem Aufwand [79], ist diese Methodik nicht an jedem Standort verfügbar bzw. suffizient oder mit entsprechender Expertise durchführbar. Die konventionelle Schulter-MRT stellt dagegen ein weit verbreitetes klinisches Routineverfahren dar.

Wenn auch niedriger als in den Studien von Schaeffeler et al. [22] und Weishaupt et al. [23], welche die diagnostische Wertigkeit der MR-Arthrographie bei der Diagnose von Läsionen des Pulley-Systems untersuchten, zeigte unsere Studie eine substantielle Interrater-Reliabilität und eine adäquate diagnostische Genauigkeit bei der Beurteilung des Pulley-Systems mittels konventioneller MR-Bildgebung. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit der kürzlich veröffentlichten Studie von Nada et al., in der die diagnostische Genauigkeit der konventionellen MR-Bildgebung der Schulter bei der Diagnose von Läsionen des Pulley-Systems analysiert wurde [24]. Während sich die Spezifität der konventionellen MR-Bildgebung in unserer Studie als mäßig erwies, verzeichneten Nada et al. eine höhere Spezifität bei einer geringeren Sensitivität. Diese Diskrepanz könnte auf Unterschiede in der Zusammensetzung der jeweiligen Studienpopulation zurückzuführen sein. Der Anteil der Patienten mit Läsionen des Pulley-Systems war in unserer Studie relativ hoch, wohingegen der Anteil der Patienten mit intaktem Pulley-System deutlich geringer war. Im Gegensatz dazu setzt sich ein Großteil der Population in der Studie von Nada et al. [24] aus Patienten mit arthroskopisch gesichertem intaktem Pulley-System zusammen, was die höhere Spezifität in dieser Studie erklären könnte.

Es ist bekannt, dass eine chronische Instabilität der LBS typischerweise zu einer Tendinose führt [59]. In unserer Studie erwies sich der Befund einer Bizeps-Tendinose als das aussagekräftigste indirekte Zeichen mit der höchsten Sensitivität und der höchsten Interrater-Reliabilität unter den drei Readern. Diese Beobachtungen stimmen mit denen von Schaeffeler et al. [22] und Nada et al. [24] überein. Daher gehen wir davon aus, dass das Vorhandensein einer LBS-Tendinose auf konventionellen MR-Bildern den Radiologen dazu anregen sollte, das Pulley-System sorgfältig auf möglicherweise begleitende Pulley-Läsionen zu untersuchen.

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Ätiologie der Tendinopathie der LBS ein breites Spektrum an Pathologien umfasst, welches von tendinitischen Sehnenveränderungen bis hin zu tendinösen Sehnenalterationen reicht [90]. Darüber hinaus kann eine Bizeps-Tendinopathie auch isoliert auftreten und, wie beispielsweise im Rahmen einer Überlastung bei Überkopfsportlern, nicht zwangsläufig mit einer Instabilität einhergehen [91]. Anders als in der Studie von Schaeffeler et al. [22], aus der man aufgrund der hohen Spezifität der LBS-Tendinose ableiten kann, dass eine Pulley-Läsion ohne das Vorliegen einer LBS-Tendinose unwahrscheinlich ist, zeigen unsere Ergebnisse diesbezüglich eine vergleichsweise niedrigere Spezifität.

In unserer Studie erwies das „Displacement sign“, welches erstmals von Schaeffeler et al. als diagnostisches Zeichen beschrieben wurde [22], als zuverlässiges Zeichen für den Nachweis einer Läsion des Pulley-Systems in der konventionellen MRT. In unserer Studie zeigte das „Displacement sign“ eine hohe Sensitivität, die zweithöchste unter allen untersuchten bildgebenden Zeichen. In Studien anderer Autoren hingegen wurde besonders auf die hohe Spezifität dieses Zeichens hingewiesen. Sowohl Schaeffeler et al. als auch Nada et al. konnten diesem Zeichen die höchste Spezifität zuschreiben [22, 24]. Unsere Ergebnisse zur diagnostischen Genauigkeit sind übereinstimmend mit den Beobachtungen von Schaeffeler et al. sowie anderen früheren Studien, die dem „Displacement sign“ ebenfalls eine hohe diagnostische Genauigkeit zuschreiben konnten [22, 24, 92]. Das „Displacement sign“ kann besonders hilfreich sein, um Habermeyer-Typ-I-Läsionen (isolierte Läsion des SGHL) zu erkennen, da beim Vorliegen der anderen geprüften Zeichen bereits oft eine höhergradige Pulley-Läsion vorliegt [22].

Ein potenzieller Nachteil des „Displacement sign“ liegt in der in der von der Armposition abhängige Bewertung. Während es bei Untersuchungen mit neutraler Armstellung angewendet werden kann, ist eine zuverlässige Anwendung dieses Zeichens bei Untersuchungen mit Innenrotation des Armes nicht sinnvoll, da es zu Verschiebung anatomischer Landmarken

kommt [21]. Bei der MRT der Schulter sollte daher, insbesondere bei der Frage nach Läsionen des Pulley-Systems, immer auf eine korrekte Lagerung in Neutralposition geachtet werden. In früheren chirurgischen und arthroskopischen Untersuchungen wurden häufig Subluxations- und Dislokationsmuster der LBS im Zusammenhang mit einer Pulley-Läsion beschrieben, ursprünglich definiert von Walch et al. [14] und Bennett et al. [75]. Eine Dislokation der LBS kann isoliert ohne begleitende Läsion der angrenzenden Rotatorenmanschette auftreten, wenn die ligamentären Strukturen der Pulley-Schlinge vollständig gerissen sind und die LBS über eine intakte Subscapularissehne disloziert [14]. In der Regel tritt eine mediale Subluxation oder Dislokation der LBS jedoch in Verbindung mit Rotatorenmanschettenläsionen auf, insbesondere in Kombination mit SSC-Sehnenverletzungen [14, 93-95]. Diese Beobachtung wird durch unsere Ergebnisse bestätigt: Pulley-Läsionen mit medialer Subluxation/Dislokation der LBS traten in 96,8 % der Fälle zusammen mit begleitenden SSC-Läsionen auf. Die isolierte Bewertung des Zeichens einer Subluxation oder Dislokation der LBS zeigte bei zwei von drei Readern eine unzureichende Sensitivität. Selbst in der Arthroskopie erwiesen sich die oben genannten Zeichen als unzuverlässig. In der prospektiven arthroskopischen Studie von Braun et al. [52] wurden 229 Schultern von aufeinanderfolgenden Patienten untersucht, die sich einer Schulterarthroskopie unterzogen. Die Autoren stellten fest, dass bei 54 % der Patienten mit einer Pulley-Läsion die LBS in Neutralposition der Schulter innerhalb des Sulcus intertubercularis humeri zentriert war. Da die Schulter während der MR-Bildgebung in der Regel in neutraler Position untersucht wird, könnten viele Pulley-Läsionen übersehen werden, wenn die mediale Subluxation/Dislokation auf transversalen Bildern als einziges diagnostisches Kriterium herangezogen wird. Im Gegensatz zur niedrigen Sensitivität zeigte sich eine hohe Spezifität, was sich naturgemäß daraus erklärt, dass beim Vorliegen einer Subluxation oder Dislokation der LBS grundsätzlich ein Defekt der Pulley-Schlinge vorliegen muss.

Es ist bekannt, dass Pulley-Läsionen häufig mit Verletzungen der angrenzenden Rotatorenmanschette einhergehen, d.h. mit jeweils isolierten oder kombinierten Läsionen der SSP- und SSC-Sehnen [3, 4, 22, 23]. In der Studie von Weishaupt et al. [23] war das bildmorphologisch präziseste Kriterium zur Detektion einer Pulley-Läsion eine Verletzung des oberen Randes der SSC-Sehne. Im Gegensatz dazu zeigte unsere Studie nur eine moderate Korrelation zwischen Pulley-Läsionen und SSC-Sehnenverletzungen. Wir führen diese Diskrepanz auf unsere Studienpopulation zurück, welche einen hohen Anteil an Habermeyer-Typ-I- und II-Läsionen (45,24 %) aufweist, die wiederum als Läsionen mit intakter SSC-Sehne definiert sind [4].

Frühere Studien haben auf die Schwierigkeit bei der Beurteilung des Kapsel-Ligament-Komplexes des Pulley-Systems hingewiesen [19, 23, 96]. In der Studie von Chung et al. [19], die überwiegend 1,5 Tesla MR-Scanner verwendete, konnte das SGHL mittels konventioneller MR-Bildgebung nicht ausreichend abgegrenzt werden. Im Gegensatz dazu zeigten die Ergebnisse unserer aktuellen Studie, dass das SGHL auch in der konventionellen MR-Bildgebung relativ zuverlässig beurteilt werden kann. Die hohe Sensitivität und die moderate Interrater-Übereinstimmung zeigen, dass die direkte Bewertung des SGHL bei der Diagnose von Läsionen des Pulley-Systems durchaus berücksichtigt werden sollte. Diese Erkenntnis ist besonders wichtig für die Erkennung von Habermeyer-I-Läsionen, deren Prävalenz zwischen 29 und 74% liegt [3, 4, 52]. Die unterschiedlichen Beobachtungen in beiden Studien führen wir auf technologische Fortschritte, den Einsatz von MR-Scannern mit höherer Feldstärke und Mehrkanalspulen sowie auf ein verbessertes Verständnis der Anatomie des Rotatorenintervalls zurück.

Unsere Studie hat einige Einschränkungen. Erstens handelt es sich um ein retrospektives Studiendesign. Um jedoch die Genauigkeit und Vollständigkeit der Daten unserer retrospektiven Studie zu gewährleisten, wurden nur Untersuchungen mit standardisierten MR-Protokollen verwendet. Um eine Beeinflussung der Studienergebnisse zu minimieren, wurden alle Reader bezüglich der klinischen Informationen verblindet. Zweitens könnte die präoperative Kenntnis des radiologischen Befundes, welcher maßgebend für die Therapieplanung ist und dem üblichen Prozedere in der klinischen Praxis entspricht, das Vorgehen und die Bewertung der Chirurgen beeinflusst haben. Drittens muss die Limitation unserer Studie in Bezug auf die Stichprobengröße diskutiert werden. Obwohl die Stichprobengröße unserer Studie als klein angesehen werden kann, ist es wichtig anzumerken, dass diese unter Berücksichtigung des operativen Goldstandards als Vergleichsdiagnostik dennoch umfangreich war. Viertens wurden unsere Patienten mit MR-Scannern unterschiedlicher Feldstärke (1,5 T und 3 T) untersucht. Fünftens vergleichen wir unter anderem Daten aus der Literatur zur MR-Arthroscopie mit unseren gesammelten Daten zur konventionellen MR-Bildgebung. Ein direkter Vergleich mit den MR-arthroskopischen Daten unseres Institutes im gleichen Zeitraum wurde jedoch nicht durchgeführt.

Abschließend müssen wir anmerken, dass unsere drei Radiologen unterschiedliche Erfahrungen im Bereich der muskuloskelettalen Bildgebung mit einer Spanne von 10 bis über 25 Jahren hatten. Diese Schwäche lässt sich einerseits relativieren, da sowohl im klinischen Alltag als auch in der täglichen Praxis Radiologen mit unterschiedlicher Erfahrung und Expertise anzutreffen sind. Andererseits muss man wohl davon ausgehen, dass Befunder ohne spezifische

Ausbildung in der muskuloskelettalen Radiologie wahrscheinlich eine geringere diagnostische Genauigkeit erreichen werden als unsere auf diesem Gebiet, trotz unterschiedlicher Erfahrungslevel, allesamt speziell geschulten Untersucher.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die konventionelle MRT bei der Erkennung von Pulley-Läsionen eine hohe Sensitivität und diagnostische Genauigkeit aufweist, allerdings nur über eine mäßige Spezifität verfügt. Daher kommen wir zu der Schlussfolgerung, dass die konventionelle MR-Bildgebung als primäre Bildgebungsmodalität zur Untersuchung des Rotatorenintervalls und des Pulley-Systems geeignet ist, insbesondere wenn andere Pathologien im Vordergrund stehen (z.B. Läsionen der Rotatorenmanschette). Sollte eine spezifischere Beurteilung des Pulley-Systems erforderlich sein, bleibt die MR-Arthrographie wohl die Methode der Wahl.

Wir sind jedoch der Ansicht, dass eine zukünftige Studie mit einem direkten Vergleich zwischen konventioneller MR-Bildgebung und MR-Arthrographie ein höheres Maß an Evidenz liefern könnte und wünschenswert wäre, um die diagnostischen Möglichkeiten dieser Bildgebungsmodalitäten besser zu verstehen.

Zur weiteren Optimierung der Studienmethodik ist es sinnvoll, zukünftige Untersuchungen auf Feldstärken von 1,5 Tesla oder 3 Tesla zu beschränken. Vor einer solchen Studie sollte evaluiert werden, welche MR-Geräte mit welcher Feldstärke flächendeckend in radiologischen Zentren verfügbar sind. Es bedarf weiterer Studien an einer größeren Patientenpopulation, um die diagnostische Genauigkeit der konventionellen MRT in der Beurteilung von Pulley-Läsionen final zu klären. Daneben ist es für das therapeutische Vorgehen entscheidend, die Pulley-Läsion weiter zu klassifizieren [12]. Insbesondere sollte eine isolierte Pulley-Läsion (Habermeyer-Typ-I-Läsion) von einer höhergradigen Pulley-Läsion mit begleitendem Defekt der Rotatorenmanschette differenziert werden. Wenn isolierte Pulley-Läsionen zukünftig in der konventionellen MRT verlässlich beschrieben werden können, könnte die Notwendigkeit einer Arthroskopie, insbesondere wenn keine operative Behandlungsoption vorhanden ist, vermieden werden. Außerdem kann ein Ausschluss einer Pulley-Läsion in der konventionellen MRT eine unnötige diagnostische Arthroskopie verhindern.

6 Literaturverzeichnis

1. Gohlke, F., O. Rolf, and D. Bohm, [*Open reconstruction of the rotator cuff*]. Orthopade, 2007. **36**(9): p. 834-47.
2. Walch, G., et al., *Tears of the supraspinatus tendon associated with "hidden" lesions of the rotator interval*. J Shoulder Elbow Surg, 1994. **3**(6): p. 353-60.
3. Baumann, B., et al., *Arthroscopic prevalence of pulley lesions in 1007 consecutive patients*. J Shoulder Elbow Surg, 2008. **17**(1): p. 14-20.
4. Habermeyer, P., et al., *Anterosuperior impingement of the shoulder as a result of pulley lesions: a prospective arthroscopic study*. J Shoulder Elbow Surg, 2004. **13**(1): p. 5-12.
5. Woertler, K., *Rotator interval*. Semin Musculoskelet Radiol, 2015. **19**(3): p. 243-53.
6. Beltran, L.S. and J. Beltran, *Biceps and rotator interval: imaging update*. Semin Musculoskelet Radiol, 2014. **18**(4): p. 425-35.
7. Martetschlager, F., et al., *Lesions of the biceps pulley: a prospective study and classification update*. JSES Int, 2020. **4**(2): p. 318-323.
8. Choi, C.H., et al., *Biceps pulley impingement*. Arthroscopy, 2004. **20 Suppl 2**: p. 80-3.
9. Gerber, C., et al., *Latissimus dorsi tendon transfer for treatment of irreparable posterosuperior rotator cuff tears: long-term results at a minimum follow-up of ten years*. J Bone Joint Surg Am, 2013. **95**(21): p. 1920-6.
10. Le Huec, J.C., et al., *Traumatic tear of the rotator interval*. J Shoulder Elbow Surg, 1996. **5**(1): p. 41-6.
11. Bennett, W.F., *Visualization of the anatomy of the rotator interval and bicipital sheath*. Arthroscopy, 2001. **17**(1): p. 107-11.
12. Martetschlager, F., M. Tauber, and P. Habermeyer, *Injuries to the Biceps Pulley*. Clin Sports Med, 2016. **35**(1): p. 19-27.
13. Ahrens, P.M. and P. Boileau, *The long head of biceps and associated tendinopathy*. J Bone Joint Surg Br, 2007. **89**(8): p. 1001-9.
14. Walch, G., et al., *Subluxations and dislocations of the tendon of the long head of the biceps*. J Shoulder Elbow Surg, 1998. **7**(2): p. 100-8.
15. Chaipat, L. and W.E. Palmer, *Shoulder magnetic resonance imaging*. Clin Sports Med, 2006. **25**(3): p. 371-86, v.
16. Bigoni, B.J. and C.B. Chung, *MR imaging of the rotator cuff interval*. Radiol Clin North Am, 2006. **44**(4): p. 525-36, viii.
17. Alaia, E.F. and N. Subhas, *Shoulder MR Imaging and MR Arthrography Techniques: New Advances*. Magn Reson Imaging Clin N Am, 2020. **28**(2): p. 153-163.
18. Rudez, J. and M. Zanetti, *Normal anatomy, variants and pitfalls on shoulder MRI*. Eur J Radiol, 2008. **68**(1): p. 25-35.
19. Chung, C.B., et al., *Rotator cuff interval: evaluation with MR imaging and MR arthrography of the shoulder in 32 cadavers*. J Comput Assist Tomogr, 2000. **24**(5): p. 738-43.
20. Nakata, W., et al., *Biceps Pulley: Normal Anatomy and Associated Lesions at MR Arthrography*. Radiographics, 2020. **40**(4): p. 1200.
21. Kang, Y., et al., *Instability of the long head of the biceps tendon in patients with rotator cuff tear: evaluation on magnetic resonance arthrography of the shoulder with arthroscopic correlation*. Skeletal Radiol, 2017. **46**(10): p. 1335-1342.
22. Schaeffeler, C., et al., *Lesions of the biceps pulley: diagnostic accuracy of MR arthrography of the shoulder and evaluation of previously described and new diagnostic signs*. Radiology, 2012. **264**(2): p. 504-13.
23. Weishaupt, D., et al., *Lesions of the reflection pulley of the long biceps tendon. MR arthrographic findings*. Invest Radiol, 1999. **34**(7): p. 463-9.

24. Nada, M.G., et al., *Biceps Pulley Lesions: Diagnostic Accuracy of Nonarthrographic Shoulder MRI and the Value of Various Diagnostic Signs*. J Magn Reson Imaging, 2023.
25. Takeshima, M., et al., *Efficacy of biceps-radial-slice magnetic resonance images for the diagnosis of biceps and pulley lesions*. J Shoulder Elbow Surg, 2023.
26. Petchprapa, C.N., et al., *The rotator interval: a review of anatomy, function, and normal and abnormal MRI appearance*. AJR Am J Roentgenol, 2010. **195**(3): p. 567-76.
27. Schünke, M., et al., *Prometheus - Lernatlas der Anatomie*. Schultergelenke: Kapsel-Band-Apparat und Articulatio humeri. Vol. 2. 2007, Stuttgart Georg Thieme.
28. Benninghoff, A. and D. Drenckhahn, *Taschenbuch Anatomie*. Obere Extremität: Schultergürtel. 2008, München: Elsevier Urbahn & Fischer.
29. Loew, M., *AE-Manual der Endoprothetik Schulter*. Anatomie und Kinematik des Schultergelenks, ed. A. Halder. 2010, Heidelberg: Springer.
30. Platzer, W., *Taschenatlas Anatomie, Bewegungsapparat*. 1979, Stuttgart: Georg Thieme.
31. Hochschild, J., *Strukturen und Funktionen begreifen: Funktionelle Anatomie - Therapierelevante Details. Grundlagen zur Wirbelsäule, HWS und Schädel, BWS und Brustkorb, Obere Extremität*. Vol. 3. 2005, Stuttgart: Georg Thieme.
32. Kapandji, I.A., *Funktionelle Anatomie der Gelenke: Schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik. Bd. 1. Obere Extremität*. Vol. 3. 1999, Stuttgart: Enke.
33. Habermeyer, P., *Schulterchirurgie*. Pathophysiologie und Pathomechanik der Schulterinstabilität, ed. E. Wiedemann. 2002: Urban & Fischer.
34. Fitzpatrick, L.A., et al., *Rotator Cuff Injury and Repair*. Semin Musculoskelet Radiol, 2022. **26**(5): p. 585-596.
35. Jost, B., P.P. Koch, and C. Gerber, *Anatomy and functional aspects of the rotator interval*. J Shoulder Elbow Surg, 2000. **9**(4): p. 336-41.
36. Morag, Y., et al., *MR arthrography of rotator interval, long head of the biceps brachii, and biceps pulley of the shoulder*. Radiology, 2005. **235**(1): p. 21-30.
37. Yang, H.F., et al., *An anatomic and histologic study of the coracohumeral ligament*. J Shoulder Elbow Surg, 2009. **18**(2): p. 305-10.
38. Neer, C.S., 2nd, et al., *The anatomy and potential effects of contracture of the coracohumeral ligament*. Clin Orthop Relat Res, 1992(280): p. 182-5.
39. Arai, R., et al., *Functional anatomy of the superior glenohumeral and coracohumeral ligaments and the subscapularis tendon in view of stabilization of the long head of the biceps tendon*. J Shoulder Elbow Surg, 2010. **19**(1): p. 58-64.
40. Shankman, S., J. Bencardino, and J. Beltran, *Glenohumeral instability: evaluation using MR arthrography of the shoulder*. Skeletal Radiol, 1999. **28**(7): p. 365-82.
41. Werner, A., et al., *The stabilizing sling for the long head of the biceps tendon in the rotator cuff interval. A histoanatomic study*. Am J Sports Med, 2000. **28**(1): p. 28-31.
42. Lee, J.C., et al., *MRI of the rotator interval of the shoulder*. Clin Radiol, 2007. **62**(5): p. 416-23.
43. Gaskill, T.R., S. Braun, and P.J. Millett, *Multimedia article. The rotator interval: pathology and management*. Arthroscopy, 2011. **27**(4): p. 556-67.
44. Slatys, P. and K. Aalto, *Medial dislocation of the tendon of the long head of the biceps brachii*. Acta Orthop Scand, 1979. **50**(1): p. 73-7.
45. Ferrari, D.A., *Capsular ligaments of the shoulder. Anatomical and functional study of the anterior superior capsule*. Am J Sports Med, 1990. **18**(1): p. 20-4.
46. Gohlke, F., B. Essigkrug, and F. Schmitz, *The pattern of the collagen fiber bundles of the capsule of the glenohumeral joint*. J Shoulder Elbow Surg, 1994. **3**(3): p. 111-28.

47. Kumar, V.P., K. Satku, and P. Balasubramaniam, *The role of the long head of biceps brachii in the stabilization of the head of the humerus*. Clin Orthop Relat Res, 1989(244): p. 172-5.
48. Warner, J.J. and P.J. McMahon, *The role of the long head of the biceps brachii in superior stability of the glenohumeral joint*. J Bone Joint Surg Am, 1995. **77**(3): p. 366-72.
49. Rodosky, M.W., C.D. Harner, and F.H. Fu, *The role of the long head of the biceps muscle and superior glenoid labrum in anterior stability of the shoulder*. Am J Sports Med, 1994. **22**(1): p. 121-30.
50. Longo, U.G., et al., *Biomechanics of the rotator cuff: European perspective*. Med Sport Sci, 2012. **57**: p. 10-17.
51. Bennett, W.F., *Arthroscopic repair of anterosuperior (supraspinatus/subscapularis) rotator cuff tears: a prospective cohort with 2- to 4-year follow-up. Classification of biceps subluxation/instability*. Arthroscopy, 2003. **19**(1): p. 21-33.
52. Braun, S., et al., *Lesions of the biceps pulley*. Am J Sports Med, 2011. **39**(4): p. 790-5.
53. Hawi, N., et al., *Pulley lesions in rotator cuff tears: prevalence, etiology, and concomitant pathologies*. Arch Orthop Trauma Surg, 2017. **137**(8): p. 1097-1105.
54. Ho, C.P., *MR imaging of rotator interval, long biceps, and associated injuries in the overhead-throwing athlete*. Magn Reson Imaging Clin N Am, 1999. **7**(1): p. 23-37.
55. Gerber, C. and A. Sebesta, *Impingement of the deep surface of the subscapularis tendon and the reflection pulley on the anterosuperior glenoid rim: a preliminary report*. J Shoulder Elbow Surg, 2000. **9**(6): p. 483-90.
56. Field, L.D., et al., *Isolated closure of rotator interval defects for shoulder instability*. Am J Sports Med, 1995. **23**(5): p. 557-63.
57. Nidecker, A., C. Guckel, and A. von Hochstetter, *Imaging the long head of biceps tendon--a pictorial essay emphasizing magnetic resonance*. Eur J Radiol, 1997. **25**(3): p. 177-87.
58. Kleim, B.D., et al., *A shallow morphology of the intertubercular groove is associated with medial and bilateral but not lateral pulley lesions*. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2023. **31**(8): p. 3221-3229.
59. Werner, A., et al., *[Tendinitis of the long head of biceps tendon associated with lesions of the "biceps reflection pulley"]*. Sportverletz Sportschaden, 2003. **17**(2): p. 75-9.
60. Kim, T.K., P.B. Rauh, and E.G. McFarland, *Partial tears of the subscapularis tendon found during arthroscopic procedures on the shoulder: a statistical analysis of sixty cases*. Am J Sports Med, 2003. **31**(5): p. 744-50.
61. Lafosse, L., et al., *Anterior and posterior instability of the long head of the biceps tendon in rotator cuff tears: a new classification based on arthroscopic observations*. Arthroscopy, 2007. **23**(1): p. 73-80.
62. Glazebrook, H., B. Miller, and I. Wong, *Anterior Shoulder Instability: A Systematic Review of the Quality and Quantity of the Current Literature for Surgical Treatment*. Orthop J Sports Med, 2018. **6**(11): p. 2325967118805983.
63. Sanders, T.G. and S.L. Jersey, *Conventional radiography of the shoulder*. Semin Roentgenol, 2005. **40**(3): p. 207-22.
64. Parker, B.J., et al., *Imaging of shoulder injuries in sports medicine: current protocols and concepts*. Clin Sports Med, 2008. **27**(4): p. 579-606.
65. Shahabpour, M., et al., *The effectiveness of diagnostic imaging methods for the assessment of soft tissue and articular disorders of the shoulder and elbow*. Eur J Radiol, 2008. **65**(2): p. 194-200.

66. Nazarian, L.N., *The top 10 reasons musculoskeletal sonography is an important complementary or alternative technique to MRI*. AJR Am J Roentgenol, 2008. **190**(6): p. 1621-6.
67. Xue, H., et al., *Anchoring Apparatus of Long Head of the Biceps Tendon: Ultrasonographic Anatomy and Pathologic Conditions*. Diagnostics (Basel), 2022. **12**(3).
68. Zappia, M., et al., *Sonography of chondral print on humeral head*. Skeletal Radiol, 2016. **45**(1): p. 35-40.
69. Castagna, A., et al., *Chondral print on humeral head: an indirect sign of long head biceps tendon instability*. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2007. **15**(5): p. 645-8.
70. Martinoli, C., et al., *US of the shoulder: non-rotator cuff disorders*. Radiographics, 2003. **23**(2): p. 381-401; quiz 534.
71. Feuerriegel, G.C., et al., *Assessment of Acute Lesions of the Biceps Pulley in Patients with Traumatic Shoulder Dislocation Using MR Imaging*. Diagnostics (Basel), 2022. **12**(10).
72. Deutsche Gesellschaft für Muskuloskelettale Radiologie (DGMSR), *Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Muskuloskelettale Radiologie (DGMSR) zur muskuloskelettalen MRT-Diagnostik, Version 1, Juli 2019*.
73. Krief, O.P., *MRI of the rotator interval capsule*. AJR Am J Roentgenol, 2005. **184**(5): p. 1490-4.
74. Zanetti, M., et al., *Tendinopathy and rupture of the tendon of the long head of the biceps brachii muscle: evaluation with MR arthrography*. AJR Am J Roentgenol, 1998. **170**(6): p. 1557-61.
75. Bennett, W.F., *Subscapularis, medial, and lateral head coracohumeral ligament insertion anatomy. Arthroscopic appearance and incidence of "hidden" rotator interval lesions*. Arthroscopy, 2001. **17**(2): p. 173-80.
76. Barile, A., G. Lanni, and L. Conti, *Lesions of the biceps pulley as cause of anterosuperior impingement of the shoulder in the athlete: potentials and limits of MR arthrography compared with arthroscopy*. Radiol Med, 2013: p. 118:112–122.
77. Sahin, G. and M. Demirtas, *An overview of MR arthrography with emphasis on the current technique and applicational hints and tips*. Eur J Radiol, 2006. **58**(3): p. 416-30.
78. Chandnani, V.P., et al., *Glenohumeral ligaments and shoulder capsular mechanism: evaluation with MR arthrography*. Radiology, 1995. **196**(1): p. 27-32.
79. Newberg, A.H., C.S. Munn, and A.H. Robbins, *Complications of arthrography*. Radiology, 1985. **155**(3): p. 605-6.
80. Zoga, A.C., et al., *The Evolving Roles of MRI and Ultrasound in First-Line Imaging of Rotator Cuff Injuries*. AJR Am J Roentgenol, 2021. **217**(6): p. 1390-1400.
81. Peruto, C.M., M.G. Ciccotti, and S.B. Cohen, *Shoulder arthroscopy positioning: lateral decubitus versus beach chair*. Arthroscopy, 2009. **25**(8): p. 891-6.
82. Bennett, W.F., *Arthroscopic bicipital sheath repair: two-year follow-up with pulley lesions*. Arthroscopy, 2004. **20**(9): p. 964-73.
83. Maier, D., et al., *Stabilization of the long head of the biceps tendon in the context of early repair of traumatic subscapularis tendon tears*. J Bone Joint Surg Am, 2007. **89**(8): p. 1763-9.
84. Mazzocca, A.D., et al., *Subpectoral biceps tenodesis with interference screw fixation*. Arthroscopy, 2005. **21**(7): p. 896.
85. Delle Rose, G., et al., *The long head of biceps as a source of pain in active population: tenotomy or tenodesis? A comparison of 2 case series with isolated lesions*. Musculoskelet Surg, 2012. **96 Suppl 1**: p. S47-52.

86. Gurnani, N., et al., *Tenotomy or tenodesis for pathology of the long head of the biceps brachii: a systematic review and meta-analysis*. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2016. **24**(12): p. 3765-3771.
87. Slenker, N.R., et al., *Biceps tenotomy versus tenodesis: clinical outcomes*. Arthroscopy, 2012. **28**(4): p. 576-82.
88. Yamada, T., *Popeye's sign: A diagnostic clue*. Clin Case Rep, 2023. **11**(5): p. e7378.
89. Bennett, W.F., *Specificity of the Speed's test: arthroscopic technique for evaluating the biceps tendon at the level of the bicipital groove*. Arthroscopy, 1998. **14**(8): p. 789-96.
90. Nho, S.J., et al., *Long head of the biceps tendinopathy: diagnosis and management*. J Am Acad Orthop Surg, 2010. **18**(11): p. 645-56.
91. Chalmers, P.N. and N.N. Verma, *Proximal Biceps in Overhead Athletes*. Clin Sports Med, 2016. **35**(1): p. 163-79.
92. Zappia, M., et al., *Long head biceps tendon instability: diagnostic performance of known and new MRI diagnostic signs*. Skeletal Radiol, 2021. **50**(9): p. 1863-1871.
93. Gambill, M.L., T.S. Mologne, and M.T. Provencher, *Dislocation of the long head of the biceps tendon with intact subscapularis and supraspinatus tendons*. J Shoulder Elbow Surg, 2006. **15**(6): p. e20-2.
94. Shi, L.L., et al., *Accuracy of long head of the biceps subluxation as a predictor for subscapularis tears*. Arthroscopy, 2015. **31**(4): p. 615-9.
95. Vopat, M.L., et al., *Medial Dislocation of the Long Head of the Biceps without Concomitant Subscapularis Tear: A Case Report*. J Orthop Case Rep, 2020. **9**(6): p. 6-10.
96. Vinson, E.N., N.M. Major, and L.D. Higgins, *Magnetic resonance imaging findings associated with surgically proven rotator interval lesions*. Skeletal Radiol, 2007. **36**(5): p. 405-10.

7 Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Schematische Darstellung der Anatomie des Rotatorenintervalls | 13 |
| Abbildung 2: Schematische Darstellung der Klassifikation nach Habermeyer | 15 |
| Abbildung 3: Anatomie des Rotatorenintervalls nach intraartikulärer Kontrastmittelgabe. ... | 24 |
| Abbildung 4: Arthroskopische Aufnahmen des Pulley-Systems | 25 |
| Abbildung 5 MR-diagnostische Zeichen für die Erkennung einer Pulley-Läsion | 35 |
| Abbildung 6 MR-diagnostische Zeichen für die Erkennung einer Pulley-Läsion | 36 |
| Abbildung 7 Evaluationsbogen zur Beurteilung des Pulley-Systems | 37 |
| Abbildung 8 Boxplot zur Größenverteilung der Studien- und Kontrollgruppe nach Alter | 42 |
| Abbildung 9 Intaktes Pulley-System | 49 |
| Abbildung 10 Pulley-Läsion Typ III nach Habermeyer | 50 |
| Abbildung 11 Pulley-Läsionen Typ IV nach Habermeyer | 50 |
| Abbildung 12 Falsch positiver Befund einer Pulley-Läsion | 51 |
| Abbildung 13 Falsch negativer Befund einer Pulley-Läsion | 52 |

8 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Ein- und Ausschlusskriterien der Studienpopulation..... | 29 |
| Tabelle 2: Messparameter der MRT-Sequenzen..... | 31 |
| Tabelle 3: Diagnostische Kriterien zur Bewertung des Pulley-Systems in der nativen MRT . | 33 |
| Tabelle 4: Demographische Daten des Patientenkollektivs | 42 |
| Tabelle 5: Funktionalität der nativen MRT zur Diagnose von Pulley-Läsionen | 46 |
| Tabelle 6: Bewertung der diagnostischen Zeichen arthroskopisch nachgewiesener Pulley-Läsionen in der nativen MRT | 46 |

9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen aufrichtigen Dank all den Unterstützern aussprechen, die mich von den ersten Schritten bis zur Vollendung meiner wissenschaftlichen Veröffentlichungen und schließlich bei der Anfertigung meiner Dissertation begleitet und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Klaus Wörtler. Sein umfassendes fachliches Wissen und seine inspirierende Persönlichkeit waren während dieser Zeit von unschätzbarem Wert für mich. Die enge klinische und wissenschaftliche Zusammenarbeit mit ihm hat ihn zu einem Vorbild gemacht, dessen Einfluss weit über seine fachliche Expertise hinausreicht.

Ein herzlicher Dank geht auch an Herrn Dr. Neumann, meinen Betreuer, der mir jederzeit mit klarer Struktur und unermüdlicher Hilfsbereitschaft zur Seite stand. Seine kontinuierliche Betreuung und wertvollen Ratschläge haben entscheidend zur Vollendung meiner Dissertation beigetragen.

Herrn Dr. Pogorzelski, meinem Mentor, bin ich besonders dankbar für die Unterstützung in orthopädischen Fragestellungen und die Bereitstellung des arthroskopischen Bildmaterials.

Ich möchte Herrn Prof. Dr. Makowski, dem Klinikdirektor des Instituts für Diagnostische und Interventionelle Radiologie, meinen Dank aussprechen für die Möglichkeit, meine Dissertation an diesem Institut zu verfassen.

Abschließend möchte ich meinen Eltern danken, die mir stets zur Seite standen. In freudigen wie auch in herausfordernden Zeiten waren sie mit ihrer Lebenserfahrung als Ratgeber und ihrer Liebe als Rückhalt für mich da. Durch ihre Unterstützung und Aufmunterung haben sie wesentlich zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen.
