

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Univ.-Prof. Dr. Joachim Windolf

**Die Vergleichbarkeit des akromiohumeralen
Abstands in MRT und Röntgen bei intakter
Rotatorenmanschette**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Christina Brusi

2022

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich Heine Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter/in: Prof. Dr. med. Thilo Patzer

Zweitgutachter/in: Priv.-Doz. Dr. med. Hug Aubin

Meiner Familie

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Hufeland, M., Brusis, C., Kubo, H. et al. The acromiohumeral distance in the MRI should not be used as a decision criterion to assess subacromial space width in shoulders with an intact rotator cuff.

Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy (2020)

Zusammenfassung

Ein wichtiger radiologischer Parameter zur Beurteilung des Schultergelenkes ist der akromiohumerale Abstand. Er ist definiert als kürzester Abstand zwischen der unteren Begrenzung des Akromions und dem höchsten Punktes des Humeruskopfes, gemessen an einer konventionellen true-anterior-posterior Röntgenaufnahme der Schulter im Stand oder im Sitzen. Der Normwert beträgt 7-14mm. Ein reduzierter AHA kann auf ein subakromiales Impingement oder eine Läsion der Rotatorenmanschette hinweisen.

Andere Studien beschreiben auch eine Messung des AHA im MRT, CT oder Ultraschall. Hier jedoch konnte für Patienten mit Ruptur der Rotatorenmanschette gezeigt werden, dass der AHA in MRT signifikant kleiner ist als im Röntgen.

Im Rahmen dieser Dissertation soll der akromiohumeralen Abstand bei intakter Rotatorenmanschette in MRT und Röntgen verglichen werden.

Eingeschlossen werden Patienten älter als 20 und jünger als 80 Jahre mit vorhandener anterior-posterior Röntgenaufnahme im Stand sowie einem MRT der Schulter.

Patienten mit Ruptur der Rotatorenmanschette und Bildgebung bei akutem Trauma wurden ausgeschlossen. Der AHA wurde gemäß der Methode von Werner et. al. gemessen. Um Projektionsfaktoren zu eliminieren und einen direkten Vergleich beider Modalitäten zu ermöglichen, wurde die maximale kranio-kaudale Größe des Glenoids als Referenzgröße eingerechnet.

Eingeschlossen wurden 234 Patienten (Durchschnittsalter $45,8 \pm 14,3$ Jahre) mit vollständiger Bildgebung und intakter Rotatorenmanschette.

Es zeigte sich im Röntgen ein signifikant ($P < 0,0001$) größerer AHA von $10,4 \pm 2,4$ mm im Vergleich zu $9,2 \pm 1,8$ mm im MRT. Der AHA im Röntgen ist also im Durchschnitt 1,2mm signifikant größer als im MRT ($P < 0,0001$).

Die im MRT gemessenen akromiohumeralen Abstände sollten somit im klinischen Alltag kein Entscheidungskriterium darstellen.

Summary

An important radiological parameter for assessing the shoulder joint is the acromiohumeral distance. It is defined as the shortest distance between the lower limit of the acromion and the highest point of the humeral head, measured on a conventional true-anterior-posterior X-ray of the shoulder while standing or sitting. The standard value is 7-14mm. Reduced AHA may indicate subacromial impingement or a rotator cuff lesion.

Other studies also describe a measurement of the AHA on an MRI, CT, or ultrasound. Here, however, it could be shown for patients with a ruptured rotator cuff that the AHA in MRI is significantly smaller than in X-rays.

This dissertation aims to compare the acromiohumeral distance with an intact rotator cuff in MRI and X-ray.

Patients older than 20 and younger than 80 years with an anterior-posterior standing X-ray and an MRI of the shoulder are included. Patients with rotator cuff rupture and imaging with acute trauma were excluded. The AHA was determined according to the method of Werner et. al.. In order to eliminate projection factors and to enable a direct comparison of both modalities, the maximum cranio-caudal size of the glenoid was included as a reference size.

234 patients (mean age 45.8 ± 14.3 years) with complete imaging and intact rotator cuff were included.

The X-ray showed a significantly ($P < 0.0001$) larger AHA of 10.4 ± 2.4 mm compared to 9.2 ± 1.8 mm on the MRI. The AHA in the X-ray is therefore significantly larger on average 1.2 mm than in the MRI ($P < 0.0001$).

The acromiohumeral distances measured in the MRI should therefore not represent a decision-making criterion in everyday clinical practice.

Abkürzungsverzeichnis

AHA	akromiohumeraler Abstand
ap	anterior-posterior
CT	Computertomographie
ICC	Intraklassen-Korrelation
IR	Interrater-Reliabilität
ISP	Infraspinatussehne
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
M.	Musculus
mm	Millimeter
Mm.	Musculi
MRT	Magnetresonanztomographie
NSAR	Nichtsteroidale Antirheumatika
RM	Rotatorenmanschette
SSP	Supraspinatussehne

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Grundlagen.....	1
1.1	Anatomie.....	1
1.1.1	Anatomie des Schultergelenkes	1
1.1.2	Anatomie des Schultergürtels	6
1.1.3	Anatomie des subakromialen Raumes	9
1.1.4	Biomechanik des Schultergelenks	10
1.2	Bildgebung der Schulter	13
1.3	Pathologien des Schultergelenks	16
1.3.1	Impingementsyndrom	16
1.3.2	Rotatorenmanschettenrupturen	19
1.4	Der akromiohumereale Abstand.....	22
1.5	Zielsetzung.....	25
2	Material und Methoden	26
2.1	Verwendete Programme	26
2.2	Patientenkollektiv	26
2.3	Messmethode	28
2.4	Elimination der Projektionsfaktoren.....	30
2.5	Statistische Auswertung.....	34
2.6	Ethikvotum.....	34
3	Ergebnisse	35
3.1	Relative Größendifferenz der akromiohumeralen Abstände	37
3.2	Absolute Größendifferenz der akromiohumeralen Abstände	38

3.3	Interrater-Reliabilität	44
4	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	45
4.1	Vergleichbarkeit der akromiohumeralen Abstände	45
4.2	Elimination der Projektionsfaktoren	49
4.3	Klinische Relevanz	50
4.4	Stärken und Limitation der Studie	52
4.5	Schlussfolgerung.....	54
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	56

1 Einleitung und Grundlagen

1.1 Anatomie

Schultergelenk und Schultergürtel stellen eine funktionelle Einheit dar. Der Schultergürtel besteht aus Clavicula und Scapula. Ein Teil der Scapula bildet mit dem Humeruskopf das Schultergelenk.

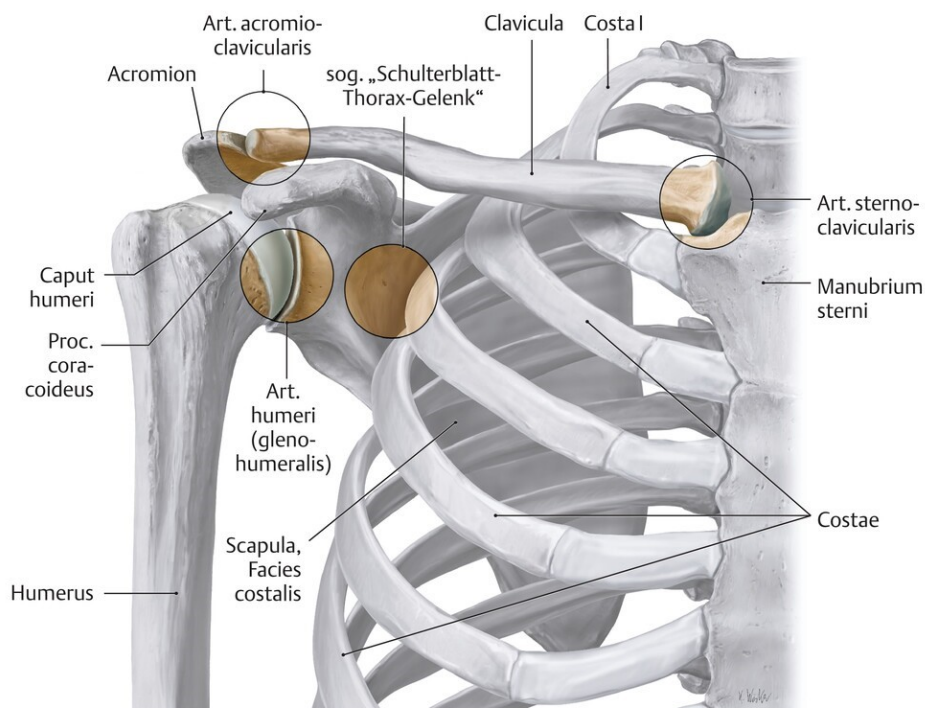


Abb. 1: **Knöcherne Anatomie der Schulter.** Darstellung des Schultergelenkes und der Gelenke des Schultergürtels mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

1.1.1 Anatomie des Schultergelenkes

Die *Articulatio glenohumeralis* ist das Schultergelenk zwischen Humerus und Scapula. In diesem Gelenk artikuliert der Humeruskopf mit der *Cavitas glenoidalis* der Scapula. Das Schultergelenk ist ein Kugelgelenk mit drei Freiheitsgraden: Ante- und Retroversion, Abduktion und Adduktion, Außen- und Innenrotation.

Einleitung und Grundlagen

Im Gegensatz zur unteren Extremität muss die obere Extremität keine statische Last tragen, sie muss aber in hohem Maße beweglich sein. Diesen Anforderungen trägt das Schultergelenk mit besonderen anatomischen Begebenheiten Rechnung: um ein hohes Bewegungsausmaß zu ermöglichen, hat das Schultergelenk nur eine geringe knöcherne Führung. Die Gelenkpfanne ist flach und die Gelenkfläche des Glenoids entspricht nur 1/3 bis 1/4 der Gelenkfläche des Humerus. Im Gegensatz zu einem Gelenk mit starker knöcherner Führung wie dem Hüftgelenk kommt zudem dem *Labrum glenoidale* der Schulter eine wichtige Stabilisierungsfunktion zu.

Auch die Kapsel-Band-Führung trägt den Anforderungen an das Schultergelenk Rechnung. Die Gelenkkapsel ist locker und elastisch und ermöglicht so dem Schultergelenk einen maximalen Bewegungsspielraum. Die Kapsel zieht von der Knorpel Knochen Grenze des Humerus zum *Labrum glenoidale*. Das *Tuberculum supraglenoidale* als Ursprung der langen Bizepssehne und die lange Bizepssehne liegen innerhalb der Gelenkkapsel.

Verstärkt wird die Gelenkkapsel durch einen ebenfalls locker ausgebildeten Bandapparat. Nach ventral unterstützen die *Ligg. Glenohumeralia superius, medius* und *inferius* die Gelenkkapsel. Sie verlaufen vom Glenoid zum *Tuberculum minus* und begrenzen die Außenrotation im Schultergelenk. Nach kranial unterstützt das *Ligamentum coracohumerale* die Gelenkkapsel. Dieses zieht von der Unterseite des *Processus coracoideus* in die kraniale Gelenkkapsel und begrenzt die Außenrotation im Schultergelenk bei abduziertem Arm.

Einleitung und Grundlagen

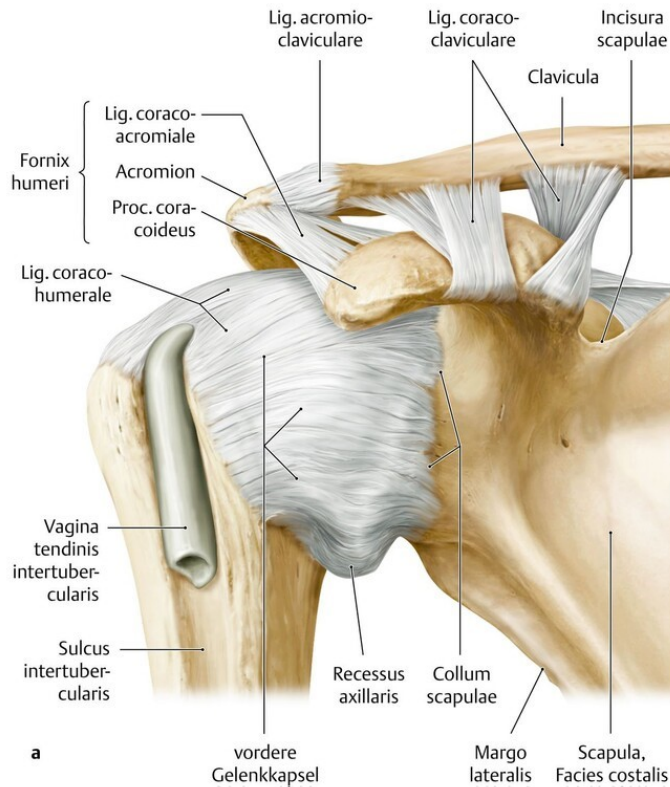


Abb. 2: **Bandapparat der Schulter.** Mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

Als Gleitlager dienen Schleimbeutel. Die *Bursa subacromialis* liegt zwischen Gelenkkapsel und *Fornix humeri*, bestehend aus *Processus coracoideus*, Akromion und *Ligamentum coracoacromiale*. Die Bursa subacromialis kommuniziert mit der Bursa subdeltoidea, welche unter dem M. deltoideus gelegen ist.

Eine stabile Führung erhält das Schultergelenk durch die Muskelführung. Bei nur geringer knöcherner Führung sowie einem elastischen Kapsel-Band-Apparat stellt die Muskulatur die Sicherung und die Zentrierung des Humeruskopfes im Glenoid sicher. Die funktionell wichtigste Muskelgruppe ist hier die Rotatorenmanschette (RM). Die Rotatorenmanschette umfasst das Glenohumeralgelenk von allen Seiten. Sie besteht aus den Muskeln *M. supraspinatus*, *M. infraspinatus*, *M. teres minor* und *M. subscapularis*.

Einleitung und Grundlagen

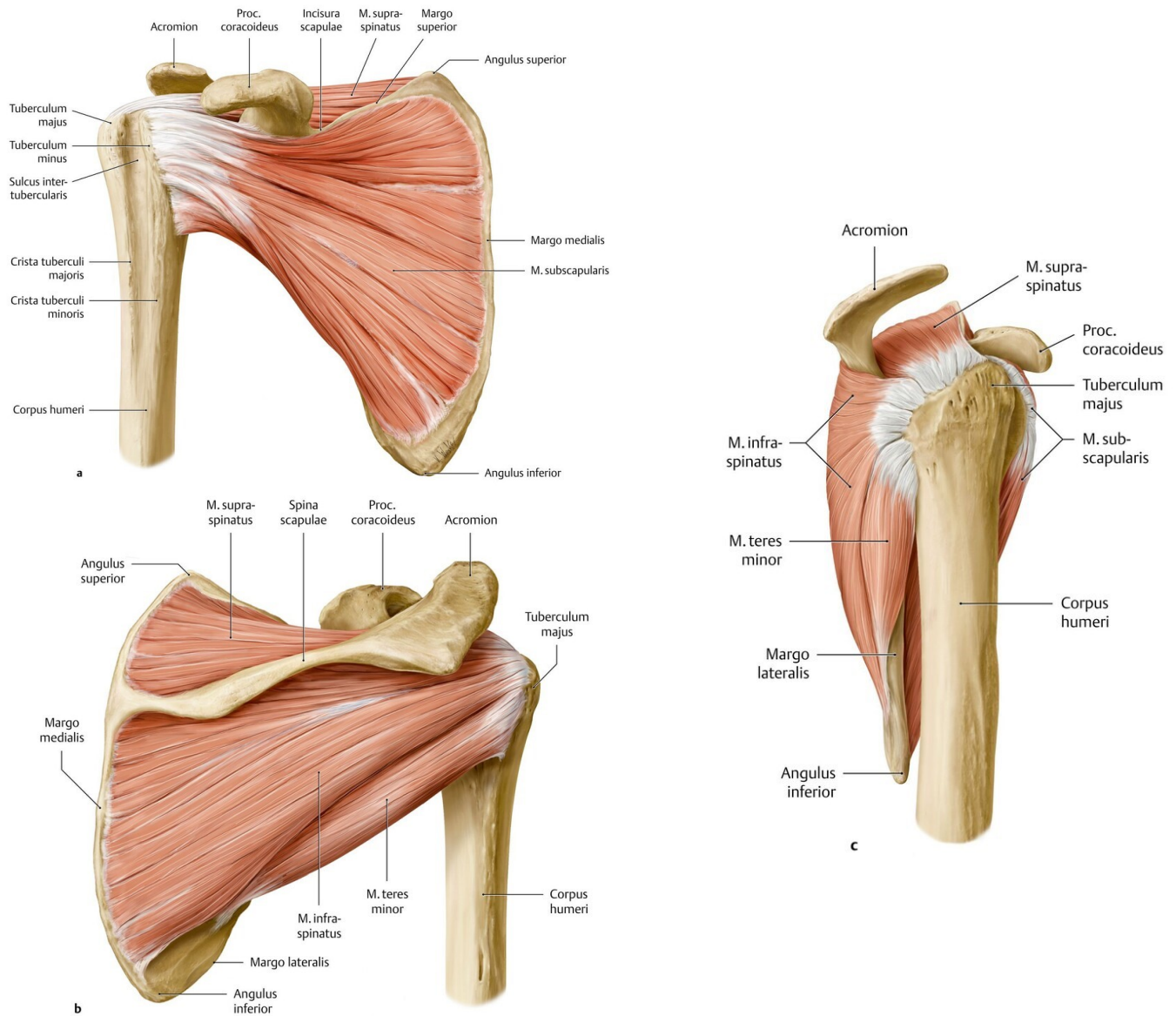


Abb. 3: Anatomie der Rotatorenmanschette a: von ventral, b: von dorsal, c: von lateral.

Die Rotatorenmanschette besteht aus den Muskeln M. supraspinatus, M. infraspinatus, M. teres minor und M. subscapularis. Mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

Einleitung und Grundlagen

Der *M. supraspinatus* ist an der Abduktion des Schultergelenks beteiligt, die *Mm. infraspinatus* und *teres minor* dienen der Außenrotation und Adduktion, der *M. subscapularis* dient vor allem der Innenrotation. (Aumüller et al., 2014)

In der Summation ihrer Kraftvektoren bewirkt eine intakte Rotatorenmanschette zudem eine Zentrierung und Kompression der *Caput humeri* in das Glenoid (Jn et al., 2010).

1.1.2 Anatomie des Schultergürtels

Zusätzlich zum Kugelgelenk des *Articulatio glenohumeralis* begünstigen die Gelenke des Schultergürtels die Bewegung der Schulter. Als Schultergürtel werden Clavicula und Scapula bezeichnet.

Die Scapula mit der Gelenkpfanne des Glenohumeralgelenkes ist über die Rumpfmuskulatur locker über dem dorsalen Thorax aufgehängt. Die an der Scapula ansetzenden Muskeln bilden funktionelle Muskelschlingen, die die Scapula in alle Richtungen über den Thorax bewegen und rotieren können. Die Scapula gleitet dabei über lockeres Bindegewebe. Die Verbindung der Scapula mit dem Rumpf wird auch als skapulothorakales Gelenk bezeichnet, obwohl es im anatomischen Sinne kein echtes Gelenk darstellt (Aumüller et al., 2014).

Die Bewegung der Scapula und damit auch die Bewegung der Schultergelenkspfanne ist erforderlich, um das große Bewegungsausmaß des Schultergelenks zu ermöglichen.

Weiterhin wird damit die optimale Stellung des Humeruskopfes in der *Cavitas glenoidalis* unterstützt.

Die Scapula kann über den Rumpf nach kranial und kaudal sowie ventral und dorsal verschoben und zudem rotiert werden. Die Kombination aus Akromioklavikulargelenk und skapulothorakalem Gelenk lässt Rotationsbewegungen der Scapula zu. Ausgehend von einer gedachten Rotationsachse, die in der Mitte der Scapula positioniert wird, sind Rotationsbewegungen um bis zu 50° nach kranial und 20° nach kaudal möglich.

Die Bewegungen der Scapula im skapulothorakalen Gelenk werden über verschiedenen Muskelschlingen erreicht. Die Muskelschlingen haben ihren Ursprung an knöchernen Strukturen des Rumpfes und setzen an verschiedenen Stellen der Scapula an.

Die horizontale Muskelschlinge initiiert die Bewegung der Scapula nach ventral und dorsal. Zur horizontalen Muskelschlinge gehört zum einen der *M. serratus anterior*. Er hat seinen Ursprung an der 1.-9. Rippe und setzt am *Margo medialis* der Scapula an. Er zieht die Scapula nach ventral. Weiterhin gehört zur horizontalen Muskelschlinge der *Pars transversa* des *M. trapezius*. Er hat seinen Ursprung an den *Processi spinosi* der HWK 7 bis BWK 3 und zieht zum lateralen Ende der Clavicula und zum Akromion. Er zieht die Scapula nach dorsal.

Einleitung und Grundlagen

Zwei vertikale Muskelschlingen, die vordere sowie die hintere Muskelschlinge, bewegen die Scapula nach kranial und kaudal.

Zur vorderen vertikalen Muskelschlinge gehört zum einen der *M. trapezius pars descendens*. Er hat seinen Ursprung an der *Protuberantia occipitalis externa* sowie an den *Processi spinosi* der HWK 2 bis 6 und setzt am lateralen Drittel der Clavicula an. Er zieht die Scapula über das Akromioklavikulargelenk nach kranial. Weiterhin gehört zur vorderen vertikalen Muskelschlinge der *M. pectoralis minor*. Er hat seinen Ursprung an der 3. bis 5. Rippe und hat seinen Ansatz am *Processus coracoideus*. Er zieht die Scapula nach kaudal.

Zur hinteren vertikalen Muskelschlinge gehört zum einen der *M. levator scapulae*. Er hat seinen Ursprung an den *Processi transversi* der HWK 1 bis 4, seinen Ansatz hat der Muskel am *Angulus superior* der Scapula. Er zieht die Scapula nach kranial.

Zur hinteren vertikalen Muskelschlinge gehört zum anderen *M. trapezius pars ascendens*. Er hat seinen Ursprung an den *Processi spinosi* der BWK 4 bis 12 und hat seinen Ansatz an der *Spina scapulae*. Er zieht die Scapula nach kaudal.

Die schräge Muskelschlinge initiiert Bewegungen der Scapula nach ventral und dorsal sowie kranial und kaudal. Des Weiteren initiiert sie Rotationsbewegungen.

Zur schrägen Muskelschlinge gehört zum einen der *M. serratus anterior*. Dieser Muskel ist ebenfalls Teil der horizontalen Muskelschlinge. Er zieht die Scapula nach ventral. Der *Pars inferior* des *M. serratus anterior* zieht die Scapula zudem nach kaudal und initiiert Rotationsbewegungen. Der *Angulus lateralis* rotiert nach kranial, somit wird auch die *Cavitas glenoidalis* nach kranial rotiert.

Ebenfalls Teil der schrägen Muskelschlinge sind die *Muskuli rhomboidei*. Der *M. rhomboideus major* hat seinen Ursprung an den *Processi spinosi* der BWK 1-4. Seinen Ansatzpunkt hat der Muskel an der *Margo medialis* der Scapula. Er zieht die Scapula nach dorsal und kranial. Zudem rotiert der kaudale Anteil des *M. rhomboideus major* den *Angulus lateralis* nach kaudal. Somit wird auch die *Cavitas glenoidalis* nach kaudal rotiert.

Der *M. rhomboideus minor* hat seinen Ursprung an den *Processi spinosi* der HWK 1-4. Seinen Ansatzpunkt hat der *M. rhomboideus minor* wie der *M. rhomboideus major* an der *Margo medialis* der Scapula. Er zieht die Scapula nach dorsal und kranial.

Einleitung und Grundlagen

Das *Articulatio sternoclavicularis* ist das Gelenk zwischen Sternum und medialer Clavicula. Es bildet die einzige knöcherne Verbindung von Schultergürtel und Rumpf. Dieses Gelenk ermöglicht ein Heben und Senken der Clavicula um 40° nach kranial und 10° nach kaudal sowie eine Bewegung nach ventral um 30° und eine Bewegung nach dorsal um 25°. Diesen Bewegungen folgt die Scapula, die über das Akromioklavikulargelenk mit der Clavicula verbunden ist.

Stabilisiert wird die Gelenkkapsel des Sternoklavikulargelenkes durch mehrere Bänder, nach ventral beziehungsweise dorsal durch die *Ligg. sternoclavicularia anterior* und *posterior* sowie nach kranial durch das *Ligamentum interclaviculare*, welches beide Claviculae miteinander verbindet. Zudem zieht das *Ligamentum costoclaviculare* von der Clavicula zur ersten Rippe.

In der *Articulatio acromioclavicularis* kommunizieren laterale Clavicula und Scapula miteinander. Im Zusammenspiel mit dem skapulothorakalen Gelenk ermöglicht die *Articulatio acromioclavicularis* eine Rotation des Schulterblattes. Verbunden werden die beiden planen Gelenkflächen durch das *Ligamentum acromioclaviculare*, dieses verstärkt die Gelenkpfanne von kranial. Nicht an der Gelenkkapsel beteiligt verbindet das *Ligamentum coracoclaviculare* mit seinen beiden Anteilen *Ligamentum trapezoideum* und *Ligamentum conoideum* zusätzlich Clavicula und Scapula. Nicht in Beziehung zum Akromioklavikulargelenk liegt das *Ligamentum coracoacromiale*. Dieses verläuft vom *Processus coracoideus* der Scapula zur Akromionunterseite und überdacht so das Glenohumeralgelenk. *Processus coracoideus*, Akromion und *Ligamentum coracoacromiale* werden auch als *Fornix humeri* bezeichnet. Es dient dem Schutz des Glenohumeralgelenkes vor einer Luxation.

1.1.3 Anatomie des subakromialen Raumes

Der Raum zwischen Humeruskopf und Unterseite des Akromions wird als subakromialer Raum bezeichnet. In ihm verlaufen die Sehnen des *M. supraspinatus* und des *M. infraspinatus*. Die im Subakromialraum liegende *Bursa subacromialis* bildet das Gleitlager. Die kraniale Begrenzung bildet der *Fornix humeri*, bestehend aus *Processus coracoideus*, Akromion und *Ligamentum coracoacromiale*. Kaudale Grenze stellt der Humeruskopf mit seiner Gelenkkapsel dar.

Bei einer Abduktion des Armes zwischen 60 und 120° verengt sich der subakromiale Raum und das Tuberculum majus nähert sich der Akromionunterseite an (Giphart et al., 2012).

Im Hinblick auf die vorliegende Arbeit reduziert sich hierbei der akromiohumereale Abstand (AHA).

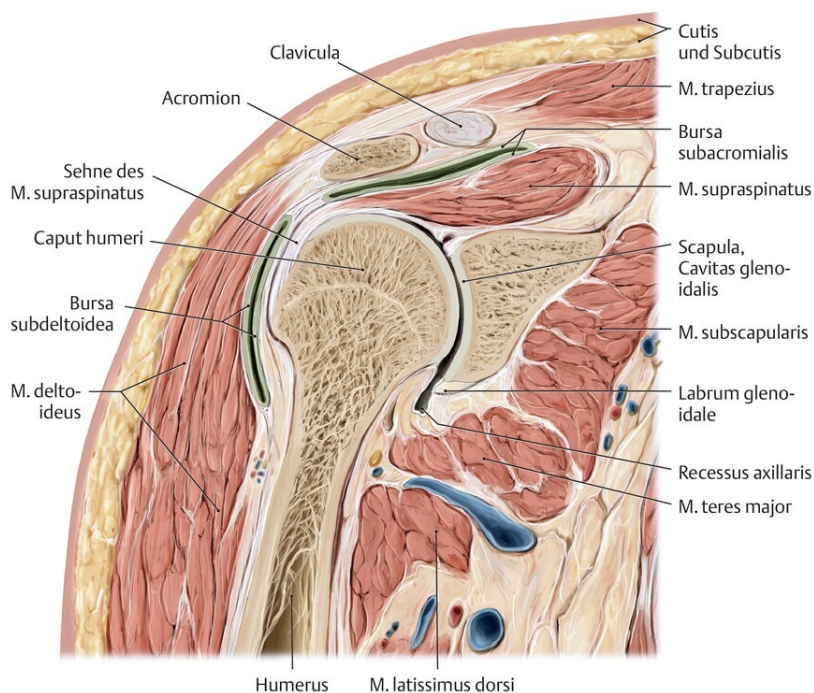


Abb. 4: **Anatomie des subakromialen Raumes.** Mit freundlicher Genehmigung des Thieme Verlags.

1.1.4 Biomechanik des Schultergelenks

Das Schultergelenk ist ein Kugelgelenk mit drei Freiheitsgraden: Ante- und Retroversion, Abduktion und Adduktion, Außen- und Innenrotation.

Gemessen nach der Neutral Null Methode ergeben sich im *Artikulation glenohumeralis* folgende physiologische Bewegungsausmaße: Ante-/ Retroversion: 90/0/30°, Adduktion/Abduktion: 30/0/90°, Innen-/ Außenrotation: 70/0/60°.

Die alleinigen Bewegungsausmaße im Schultergelenk werden durch die Bewegungsausmaße des Schultergürtels ergänzt. Dadurch kommt es zu einer Erweiterung des Bewegungsausmaßes: Ante-/ Retroversion: 170/0/40°, Adduktion/Abduktion: 40/0/160°, Innen-/ Außenrotation: 100/0/80°.

An der Bewegung des Schultergelenkes ist eine Vielzahl von Muskeln beteiligt.

Die Abduktion des Armes wird von den Muskeln *M. supraspinatus* und *M. deltoideus pars acromialis* ausgeführt.

Der *M. supraspinatus* hat seinen Ursprung in der *Fossa supraspinata* der Scapula, der Ansatz befindet sich am *Tuberculum majus humeri*. Die Sehne des Muskels verläuft unter dem Akromion und dem *Lig. coracoakromiale* im subakromialen Raum.

Oberhalb des *M. supraspinatus* umfasst der *M. deltoideus* das Schultergelenk. Dieser Muskel verleiht der Schulter die typische Silhouette. Er wird in drei Teile unterteilt. Ihren gemeinsamen Ansatzpunkt haben alle drei Anteile an der *Tuberositas deltoidea* des Humerus. Ihren Ursprung hat der *M. deltoideus Pars clavicularis* an der Clavicula, der *Pars acromialis* am Akromion und der *Pars spinalis* an der *Spina scapulae*.

Der *M. deltoideus* zieht den Humeruskopf nach kranial. Eine Dezentrierung des Humeruskopfes wird durch die Sehne des *M. supraspinatus* sowie das Kräftezusammenspiel der anderen Muskel der Rotatorenmanschette verhindert (Jn et al., 2010).

Bei vollständiger Ruptur der Supraspinatussehne mit Retraktion der Sehne und funktioneller Dekompression der verbleibenden Rotatorenmanschette kann es zu einem Humeruskopfhochstand und somit zu einer Reduktion des akromiohumeralen Abstandes kommen (Inman et al., 1996), (Poppen and Walker, 1976), (Weiner and Macnab, 1970).

Einleitung und Grundlagen

Der *M. infraspinatus* und der *M. teres minor* dienen vor allem der Außenrotation im Schultergelenk. Der *M. infraspinatus* hat seinen Ursprung an der *Fossa infraspinata* und zieht zum *Tuberculum majus humeri*. Der *M. teres minor* zieht von der *Margo lateralis* der Scapula zum *Tuberculum majus humeri*.

Für die Innenrotation verantwortlich ist der *M. subscapularis*. Dieser zieht von der *Facies costalis scapulae* zum *Tuberculum minus humeri*.

Der Adduktion im Schultergelenk dienen vor allem *Mm. pectoralis major, latissimus dorsi* sowie *teres major*.

Der *M. pectoralis major* besteht aus drei Anteilen. Alle Anteile inserieren an der *Crista tuberculi majoris humeri*. Ihren Ursprungspunkt hat der *Pars claviculæ* an der medialen Hälfte der Clavicula, der *Pars sternocostalis* am Sternum sowie an der 1. -6. Rippe und der *Pars abdominalis* an dem vorderen Blatt der Rektusscheide.

Der *M. latissimus dorsi* hat seine Ursprungspunkte am *Angulus inferiores scapulae*, an der 10. -12. Rippe sowie an den *Processi spinosi* der BWK 7 bis LWK 5 und an der *Crista iliaca*. Der Ansatzpunkt des Muskels ist die *Crista tuberculi minoris humeri*. Der *M. teres major* hat seinen Ursprung am *Angulus inferior scapulae* und zieht zur *Crista tuberculi minoris humeri*.

Muskel	Ursprung	Ansatz	Funktion	Wirkung auf den Humeruskopf
<i>M. supraspinatus</i>	<i>Fossa supraspinata</i>	<i>Tuberculum majus humeri</i>	Abduktion	• Zentrierung des Humeruskopfes als Teil der RM • Sehnenverlauf im Subakromialraum: Verhinderung einer Dezentrierung des Humeruskopfes nach kranial
<i>M. infraspinatus</i>	<i>Fossa infraspinata</i>	<i>Tuberculum majus humeri</i>	Außenrotation	• Zentrierung des Humeruskopfes als Teil der RM • Sehnenverlauf im Subakromialraum: Verhinderung einer Dezentrierung des Humeruskopfes nach kranial
<i>M. subscapularis</i>	<i>Facies costalis scapulae</i>	<i>Tuberculum minus humeri</i>	Innenrotation	• Zentrierung des Humeruskopfes als Teil der RM
<i>M. teres minor</i>	<i>Margo lateralis der Scapula</i>	<i>Tuberculum majus humeri</i>	Außenrotation	• Zentrierung des Humeruskopfes als Teil der RM
<i>M. deltoideus</i>	<i>Pars clavicularis:</i> Clavicula <i>Pars acromialis:</i> Akromion <i>Pars spinalis:</i> <i>Spina scapulae</i>	<i>Tuberositas deltoidea humeri</i>	Abduktion	• Zieht den Humeruskopf nach kranial

Tabelle 1: Tabellarische Übersicht der Muskeln der Rotatorenmanschette sowie des *M. deltoideus* mit Darstellung der biomechanischen Wirkung auf den Humeruskopf

1.2 Bildgebung der Schulter

Die bildgebenden Verfahren in der apparativen Diagnostik des Schultergelenkes sind vielfältig. So kommen Röntgenaufnahmen, MRT und CT-Bildgebungen sowie die Sonografie zum Einsatz.

Alle Verfahren bieten Vor- und Nachteile.

Die Röntgenaufnahme der Schulter ist schnell verfügbar, die knöchernen Strukturen können gut beurteilt werden. Eine Aussage über das Weichteilgewebe der Schulter ist hingegen nur begrenzt möglich.

Die CT des Schultergelenkes ermöglicht eine noch feinere Darstellung der knöchernen Strukturen. Die Beurteilbarkeit des Weichteilgewebes ist eingeschränkt. Ein CT ist relativ schnell verfügbar, die Untersuchungszeit ist kurz. Allerdings entsteht eine hohe Strahlenbelastung.

Hervorragende Aussagen über das Weichteilgewebe sind mittels MRT-Aufnahme möglich. Bei diesem Verfahren besteht keine Strahlenbelastung. Jedoch ist dieses Verfahren nicht immer schnell verfügbar.

Die Sonografie stellt das Weichteilgewebe der Schulter gut dar und ist schnell verfügbar. Zudem ist eine dynamische Untersuchung möglich. Jedoch hängt die Qualität der Untersuchung stark von der Erfahrung des Untersuchers ab.

In dieser Dissertation werden Ergebnisse aus Röntgen- und MRT-Untersuchungen verglichen.

Zur Standarddiagnostik des Schultergelenkes gehört die konventionelle Röntgenaufnahme der Schulter.

Standardaufnahme dabei ist die so genannte *true anterior-posterior (true-ap)* Aufnahme der Schulter im Stand, auch genannt Grashey-Aufnahme.

Hierbei handelt es sich um eine anterior-posterior Aufnahme des Schultergelenkes, bei der das *Caput humeri* überlagerungsfrei dargestellt wird. Die *Cavitas glenoidalis* stellt sich strichförmig bis oval dar. Der Subakromilaraum ist frei einsehbar.

Die true anterior-posterior Aufnahme ermöglicht die Beurteilung der Zentrierung des Humeruskopfes (Ahovuo et al., 1984). Der in der ap Röntgenaufnahme gemessene akromiohumerale Abstand kann bereits Hinweise auf eine mögliche Läsion der Rotatorenmanschette geben (Goutallier et al., 2011). Weiterhin können Tuberculum

Einleitung und Grundlagen

majus, Akromion und das Akromioklavikulargelenk mit möglichen osteophytären Anbauten beurteilt werden.

Dafür steht der Patient mit hängendem Arm in Supination. Die gesunde Schulter des Patienten ist um 45° angehoben. Der Kopf des Patienten ist zur Gegenseite gedreht.

Die *outlet view* der Y-Aufnahme der Schulter ermöglicht die Darstellung des Akromions.

Hierbei ist der Subakromialraum frei einsehbar und nicht von anderen Strukturen überlagert. Das Schulterblatt stellt sich Y-förmig dar, die kurzen Schenkel werden von Akromion und *Processus coracoideus* gebildet, der lange Schenkel entspricht dem Schulterblatt. Humeruskopf und Gelenkpfanne projizieren sich auf das Y-förmige Schulterblatt.

Anhand dieser Aufnahme lassen sie die Akromionformen nach Bigliani bestimmen (Bigliani et al., 1991). Weiterhin lassen sich osteophytäre Anbauten subakromial oder im Bereich des Akromioklavikulargelenkes darstellen (Duralde and Gauntt, 1999).

Bei dieser Aufnahme steht der Patient aufrecht, der Oberkörper ist mit 60° zur Röntgenkassette gedreht (Deutsche Vereinigung für Schulter- und Ellenbogenchirurgie (DVSE) e.V., 2017).

Die axiale Aufnahme der Schulter stellt das Schultergelenk überlagerungsfrei von oben dar. Somit ermöglicht es die Beurteilung einer möglichen Dezentrierung des Humeruskopfes nach ventral oder dorsal. Des Weiteren stellt diese Aufnahme mögliche Defekte des Tuberculum minors oder der ventralen oder dorsalen Gelenkpfanne dar.

Bei dieser Aufnahme sitzt der Patient, der Arm ist abduziert und liegt flach der Röntgenkassette auf.

Aufnahme	Dargestellte Strukturen	Indikation
<i>true ap</i>	• Überlagerungsfreie Darstellung des <i>Caput humeri</i> • Frei einsehbarer Subakromialraum • Strich- bis ovalförmiges Glenoid	• Beurteilung der Zentrierung des Humeruskopfes • Bestimmung des AHAs • Beurteilung von <i>Tuberculum majus</i>, Akromion, Akromioklavikulargelenk mit möglichen osteophytären Anbauten
<i>outlet view</i>	• Darstellung des Akromions • Frei einsehbarer Subakromialraum • Y-förmige Darstellung von Akromion, <i>Processus coracoideus</i> und Schulterblatt	• Bestimmung der Akromionformen nach Bigliani • Beurteilung osteophytärer Anbauten subakromial sowie im Bereich des Akromioklavikulargelenkes
<i>axial</i>	• Überlagerungsfreie Darstellung des Schultergelenkes von oben	• Beurteilung einer Dezentrierung des Humeruskopfes nach ventral oder dorsal • Beurteilung des <i>Tuberculum minus</i> sowie der ventralen und dorsalen Gelenkpfanne

Tabelle 1: **Tabellarische Übersicht über die verschiedenen Aufnahmeebenen im konventionellen Röntgen.** Optimal dargestellte Strukturen in der jeweiligen Aufnahme und Indikationen zur Durchführung der Aufnahme.

Die MRT-Aufnahmen ermöglichen eine Darstellung der knöchernen Strukturen und Gelenkflächen sowie eine detaillierte Darstellung des Weichteilgewebes der Schulter. So können mögliche Läsionen der Sehnen der Rotatorenmanschette, degenerative Veränderungen oder Verfettungen der Muskulatur festgestellt werden.

Die Schichtaufnahmen werden in sagittaler, transversaler und coronarer Ebene in verschiedenen Wichtungen angefertigt.

1.3 Pathologien des Schultergelenks

Ein häufiges Beschwerdebild in der Orthopädie sind Schmerzen und Bewegungseinschränkungen in der Schulter. Eine Studie von Urwin et al. zeigte, dass Schulterschmerzen 16% der Beschwerden des Bewegungsapparates ausmachen (Urwin et al., 1998).

Ursache für diese Beschwerden können sowohl akute Verletzungen als auch chronisch degenerative Veränderungen des Schultergelenkes sein.

1.3.1 Impingementsyndrom

Das Impingementsyndrom ist definiert als pathologische Einengung des Subakromialraums. Charles Neer definiert das Impingementsyndrom als mechanische Einengung der Sehne des *M. supraspinatus* durch das Akromion und das *Lig. coracoacromiale* (Neer, 2005).

Durch den Impingementkonflikt kommt es zu einer schmerzhaften *Bursitis subacromialis*. Weiterhin kann einer Tendinitis der Sehne des *M. supraspinatus* unterhalten werden und der fortgesetzte mechanische Konflikt schlussendlich zu einer degenerativen Ruptur der Supraspinatussehne führen.

Unterschieden werden muss zwischen einem strukturellen und einem funktionellen Impingement.

Zu einem strukturellen Impingement können osteophytäre Anbauten subakromial oder im Bereich des Akromioklavikulargelenks sowie Varianten des Akromion nach Bigliani (Bigliani et al., 1991) führen.

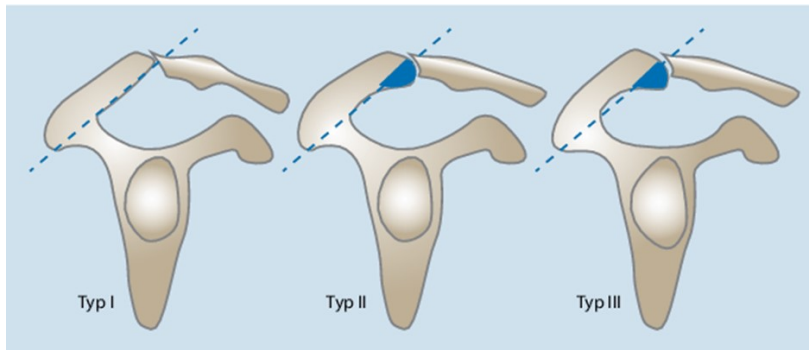


Abb. 5: **Schematische Darstellung des Normvarianten des Akromions nach Bigliani.** Aus (Beirer et al., 2017) mit freundlicher Genehmigung des Springer Nature Verlags

Bigliani I	Idealform: das Akromion steigt schräg nach oben an
Bigliani II	Bogenförmiges Akromion: leichte Kompression der darunter liegenden Strukturen
Bigliani III	Hakenförmiges Akromion: starke Kompression der darunter liegenden Strukturen

Tabelle 2 **Normvarianten des Akromions nach Bigliani** (Bigliani et al., 1991)

Nach Untersuchungen von Bigliani et al entsprechen 17% der Akromiontypen Typ I , 40% Typ II und 43% Typ III nach Bigliani (Bigliani et al., 1991).

1996 wurde diese Häufigkeitsverteilung von Getz et al. überarbeitet. Bei der Untersuchung von 394 Körperspendern zeigte sich, dass 22,8% Typ I, 68,5% Typ II und nur 8,7% Typ III entsprechen.(Getz et al., 1996)

Es zeigte sich zudem, dass der Akromiontyp III häufiger bei Männern, Typ I hingegen häufiger bei Frauen auftritt. Eine Beziehung von Akromiontyp und Alter ließ sich nicht feststellen. In 70,3% der Fälle wies ein Akromionpaar jeweils dieselbe Morphologie auf (Getz et al., 1996).

Ein funktionelles Impingement wird durch eine muskuläre Dysbalance zwischen einem zu starken *M. deltoideus* oder einer zu schwachen Rotatorenmanschette hervorgerufen, welches eine geringgradige Dezentrierung des Humeruskopfes bei Abduktion begünstigt.

Klassifiziert werden die Impingementformen nach Neer: Nach Grad der Degeneration wird der Schweregrad des Impingements in drei Stufen unterteilt. Neer I beschreibt ein Ödem oder Hämatom in der betroffenen Sehne der Rotatorenmanschette. Neer II beschreibt die Fibrose und Tendinitis der betroffenen Sehne der Rotatorenmanschette. Zu der Klassifikation Neer III gehört die (Partial-) Ruptur der Sehne der Rotatorenmanschette sowie ossäre Veränderungen.

Neer I	Ödem und Hämatom in der Sehne der Rotatorenmanschette
Neer II	Fibrose und Tendinose in der Sehne der Rotatorenmanschette
Neer III	Sehnenruptur oder ossäre Veränderungen

Tabelle 3 **Klassifikation des Impingementsyndroms nach Neer** (Neer, 2005)

Klinisch auffällig wird das Impingement Syndrom durch Schmerzen und Bewegungseinschränkungen. Typisch sind Schmerzen bei der Abduktion des Armes zwischen 60° bis 120°. Dieser Bereich wird auch als „*Painful arc*“ beschrieben. Weiterhin treten Schmerzen bei Innenrotation, Außenrotation und Abduktion gegen einen Widerstand auf. Nachtschmerzen und Schmerzen beim Liegen auf der betroffenen Seite können auftreten.

Grundsätzlich ist das mechanische outlet-Impingement deutlich seltener als in der Allgemeinheit angenommen und oftmals klinisch gar nicht symptomatisch. Die Häufigkeit der stark gebogenen oder gar hakenförmigen Akromion-Typen sind seltener (1996) als früher (1986) angenommen.

Die Möglichkeiten der Bildgebung bei einem Impingementsyndrom sind vielfältig. Als obligat gilt die konventionelle Röntgenaufnahme in zwei Ebenen, in der true ap Einstellung und in der *outlet view*.

Die true anterior posterior Aufnahme dient der Beurteilung des Akromioklavikulargelenk mit möglichen osteophytären Anbauten und der Darstellung des Tuberculum majus. Weiterhin dient sie dem Ausschluss einer Kalkablagerung in der

Rotatorenmanschette, welche ebenfalls zu der Symptomatik eines Impingements führen können.

Die *outlet view* der Y-Aufnahme der Schulter ermöglicht ebenfalls die Darstellung osteophytärer Anbauten subakromial oder im Bereich des AC-Gelenkes (Duralde and Gauntt, 1999). Zudem lassen sich in dieser Aufnahme die Akromionformen nach Bigliani bestimmen (Bigliani et al., 1991).

Liegt dem Impingement Syndrom eine funktionellen Ursache zugrunde, steht die konservative Therapie im Vordergrund. Hier wird Wert auf eine gute analgetische Einstellung mittels nichtsteroidaler Antirheumatica (NSARs) sowie auf Physiotherapie nach Abklingen der akuten Phase gelegt. Hierbei sollte die muskuläre Balance durch gezielte Muskelkräftigung wiederhergestellt werden. Bei strukturellen Veränderungen und nicht erfolgreicher konservativer Therapie kann eine arthroskopische operative Therapie indiziert sein.

Eine aktuelle Studie Beard et al. hat drei verschiedene Therapieformen eines fraglichen Outlet-Impingements verglichen und konnte dabei keinen signifikanten Unterschied des Outcomes einer konservativen Therapie versus einer arthroskopischen Bursektomie versus einer arthroskopischen Akromioplastik evaluieren (Beard et al., 2018).

1.3.2 Rotatorenmanschettenrupturen

Läsionen der Rotatorenmanschette zählen zu den häufigeren Ursachen bei Schmerzen im Bereich der Schulter. Sie sind zu 95% degenerativen Ursprungs, nur 5% sind traumatischer Genese. Betroffen ist vor allem die Sehne des *M. supraspinatus* mit über 90% (Ruchholtz and Wirtz, 2019).

Die Ursachen einer Rotatorenmanschettenruptur sind vielfältig.

Eine Ruptur kann zum einen extrinsisch durch die mechanische Belastung bei einem Impingementsyndrom verursacht werden. Bei einem Impingementsyndrom werden die im Subakromialraum liegenden Strukturen, wie die Sehne des *M. supraspinatus*,

Einleitung und Grundlagen

komprimiert. Die Kompression führt zu einer verminderten Durchblutung mit folgender Degeneration der Strukturen. Bei einem Bagatelltrauma kann es dann zur vollständigen Ruptur der Sehne kommen.

Zum anderen kann es intrinsisch aufgrund von Durchblutungsstörungen zur Degeneration und folgend Läsionen der Sehne kommen.

Traumatische Rupturen der Rotatorenmanschette ohne degenerative Vorschädigung können auch bei jungen Patienten durch eine ausreichend stark einwirkende Kraft, zum Beispiel im Rahmen eines Unfalls, verursacht werden.

Transmurale Rupturen der Rotatorenmanschette bezeichnen die vollständige Kontinuitätsunterbrechung der Sehnenfasern. Bei Partialrupturen ist die Kontinuität der Sehnenfasern der Rotatorenmanschette teilweise unterbrochen. Das Ausmaß des Defektes wird nach Ellmann in drei Typen unterteilt:

Typ I beschreibt ein Partialruptur $< 3\text{mm}$ oder $< 1/4$ der Sehnendicke. Typ II beschreibt ein Partialruptur von 3mm bis 6mm oder $< 1/2$ der Sehnendicke. Bei Typ III liegt eine Partialruptur $> 6\text{mm}$ oder $> 1/2$ der Sehnendicke vor (Ellman et al., 1986).

Typ I	Partialruptur $< 3\text{mm}$ oder $< 1/4$ der Sehnendicke
Typ II	Partialruptur von 3mm bis 6mm oder $< 1/2$ der Sehnendicke
Typ III	Partialruptur $> 6\text{mm}$ oder $> 1/2$ der Sehnendicke

Tabelle 4 **Einteilung der Partialrupturen nach Ellmann** (Ellman et al., 1986)

Klinisch zeigt sich zumeist zunächst eine schmerzhafteste Bewegungseinschränkung im Sinne einer Impingementsymptomatik: Bei Sehnenläsion des *M. supraspinatus* zeigen sich Schmerzen und bei größeren Rupturen auch eine Kraftminderung bei der Abduktion, Außenrotation sowie Elevation.

Wie bei der Bildgebung des Impingementsyndroms sind die konventionellen Röntgenaufnahmen obligat. Der akromiohumerale Abstand in der true anterior posterior Röntgenaufnahme gibt bereits Hinweise auf eine mögliche Ruptur der Rotatorenmanschette (Goutallier et al., 2011).

Einleitung und Grundlagen

Weiterhin soll die Schulter in axialer Ebene dargestellt werden. Diese Aufnahme ermöglicht die Darstellung einer möglichen Dezentrierung des Humeruskopfes nach ventral oder dorsal aufgrund einer muskulären Dysbalance.

Standarddiagnostik ist die MRT Aufnahme der Schulter. Hierbei lassen sich Aussagen zum Grad der Sehnenläsion, Retraktion der Sehne bei vollständiger Ruptur und Zustand der Muskulatur treffen.

Der Grad der Sehnenretraktion der Sehne des *M. supraspinatus* wird nach Patte klassifiziert. Es werden drei Grade unterschieden.

Grad I entspricht einer Retraktion des proximalen Sehnenstumpfes bis zum Apex humeri. Grad II beschreibt eine Retraktion des proximalen Sehnenstumpfes bis zum Glenoidrand. Grad III beschreibt die Retraktion des proximalen Sehnenstumpfes über den Glenoidrand hinaus (Patte, 1990).

Eine Rekonstruktion der Sehne ist nur bei maximal zweitgradiger Retraktion der Sehne möglich.

Grad I	Retraktion des proximalen Sehnenstumpfes bis zum Apex humeri
Grad II	Retraktion des proximalen Sehnenstumpfes bis zum Glenoidrand
Grad III	Retraktion des proximalen Sehnenstumpfes über den Glenoidrand hinaus

Tabelle 5 **Grad der Supraspinatus Sehnenretraktion nach Patte** (Patte, 1990)

1.4 Der akromiohumerale Abstand

Ein wichtiger radiologischer Parameter zur Beurteilung des Schultergelenkes ist der akromiohumerale Abstand (AHA). Er ist definiert als kürzester Abstand zwischen der Akromionunterkante und dem höchsten Punkte des Humeruskopfes in der Frontalebene.

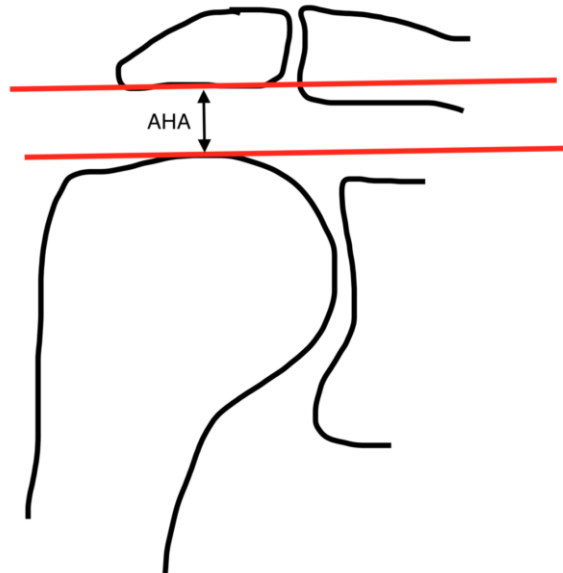


Abb. 6: Schematische Darstellung des akromiohumeralen Abstandes

Definitionsgemäß wird der akromiohumerale Abstand mittels einer konventionellen *true* anterior posterior Röntgenaufnahme der Schulter im Stehen bestimmt. (Fehringer et al., 2008), (Gruber et al., 2010).

Der akromiohumerale Abstand ist ein Maß für die Intaktheit der Rotatorenmanschette. Es kann ein Zusammenhang zwischen akromiohumeralem Abstand und einer Läsionen der Rotatorenmanschette hergeleitet werden.

Der gemessene Normwert in der Röntgenaufnahme bei intakter Rotatorenmanschette beträgt 7-14mm (Cotton and Rideout, 1964), (Weiner and Macnab, 1970).

Ein AHA unter 7mm zeigt dabei eine Läsion der Rotatorenmanschette an, ein AHA unter 6mm spricht für eine transmurale Ruptur der Supraspinatussehne (Goutallier et al., 2011).

Einleitung und Grundlagen

Der verringerte akromiohumerale Abstand entsteht durch einen Humeruskopfhochstand. Als Mechanismus der Dezentrierung des Humeruskopfes nach kranial wird der Einfluss der Kräfteverhältnisse der Muskulatur vermutet. Die Rotatorenmanschette zentriert den Humeruskopf in der Gelenkpfanne. Die Sehne des *M. supraspinatus* verläuft im Subakromialraum zwischen Akromion und Humeruskopf. Bei einer Ruptur der Sehne des *M. supraspinatus* retrahiert diese und gibt den subakromialen Raum frei. Gleichzeitig wirkt der *M. deltoideus pars acromialis* auf den Humerus und zieht ihn nach kranial. Durch das Fehlen der Supraspinatussehne kommt es nun zum Hochstand des Humeruskopfes und der AHA wird verschmälert. (Saupe et al., 2006)

Nicht nur Rotatorenmanschettenrupturen können zu einem reduzierten AHA führen.

Bei der Abduktion des Armes zwischen 60 und 120° verengt sich physiologischerweise der subakromiale Raum und das Tuberculum majus nähert sich dem Akromion an (Giphart et al., 2012).

Auch Muskelkontraktionen oder Muskelermüdungen können den AHA beeinflussen (Jn et al., 2010), (Graichen et al., 2001), (Navarro-Ledesma and Luque-Suarez, 2018).

Jn et al. untersuchten den Einfluss der Muskelermüdung auf den AHA. Die akromiohumeralen Abstände wurden bei Patienten ohne Läsion der Rotatorenmanschette vor und nach Muskelarbeit der Rotatorenmanschette bestimmt. Dabei war der AHA nach Belastung signifikant verringert. Die Autoren schlossen daraus, dass die ermüdete Muskulatur der Rotatorenmanschette in ihrer zentrierenden Funktion nachlässt und die kraniale Dezentrierung des Humeruskopfes durch den Deltamuskel erleichtert wird (Jn et al., 2010).

Der akromiohumerale Abstand stellt nicht nur einen Marker für die Läsion der Rotatorenmanschette dar, sondern dient auch als prognostischer Marker für das Gelingen einer chirurgischen Intervention bei Läsion der Rotatorenmanschette. Hierbei stellt ein verkleinerter AHA eine schlechtere Prognose dar (Kim et al., 2018), (Goutallier et al., 2011).

Zur Diagnostik und Therapieplanung ist der AHA daher von unmittelbarer Relevanz.

Einleitung und Grundlagen

Um den AHA zu bestimmen, wird der kürzeste Abstand zwischen Akromionunterkante und Humeruskopf in der *true* anterior-posterior Röntgenaufnahme gemessen. „Jedoch wurden auch Messungen beschrieben, für die MRT Aufnahmen der Schulter in der Frontalebene, CTs (Saupe et al., 2006), (Werner et al., 2008) und auch Ultraschall-Untersuchungen (Kumar et al., 2011), (Pijls et al., 2010) verwendet werden, um den AHA zu bestimmen.“ (Hufeland et al., 2020)

Gleichzeitig liefern aber Röntgen und MRT-Messungen deutlich unterschiedliche Ergebnisse.

So zeigten Werner et al. bereits in einer Studie mit 100 Patienten mit Rotatorenmanschettenruptur, dass der akromiohumereale Abstand in Röntgenbild und MRT des jeweiligen Patienten nicht identisch sind. Im Durchschnitt war der akromiohumereale Abstand im *true* anterior-posterior Röntgen 0,6mm größer als in der vergleichbare MRT Aufnahme des entsprechenden Patienten. (Werner et al., 2008)

Für eine korrekte Bestimmung des AHA ist die Positionierung des Patienten entscheidend.

Während der Patient bei Röntgenaufnahmen aufrecht steht und somit die Schwerkraft den Arm des Patienten herunterzieht, liegt der Patient bei einer MRT-Aufnahme, wobei durch die fixierte Scapula im Liegen der Humerus nach oben gedrückt werden kann. Dies kann zu einer Reduktion des AHA führen.

Die Messung des AHA ausschließlich am MRT ohne Vergleich zum Röntgen ist daher unserer Ansicht nach zur Beurteilung von relevanten Fragestellungen nicht ausreichend, besonders im Hinblick auf die Indikationsstellung zur subakromialen Dekompression bei Impingement.

1.5 Zielsetzung

Zielsetzung dieser Dissertationsarbeit ist es, die Vergleichbarkeit von Röntgen und MRT im Hinblick auf den akromiohumeralen Abstand bei Schultern mit intakter Rotatorenmanschette zu analysieren.

Hierzu werden bei Patienten mit intakter Rotatorenmanschette, von denen eine standardisierte anterior-posterior Röntgenaufnahme der Schulter im Stehen und ein MRT der gleichen Schulter vorliegt, der AHA in beiden Modalitäten nach der von Werner et al validierten Methode gemessen und verglichen.

Unsere Hypothese ist, dass der AHA auch bei intakter Rotatorenmanschette im Röntgen signifikant größer ist als im MRT (Hufeland et al., 2020).

2 Material und Methoden

2.1 Verwendete Programme

PACS IDS7 System	Version 19.3.6.3510, Sectra, Linköping, Schweden
Microsoft Excel	Version 15.33, Microsoft, Redmond, Washington, USA
SPSS	Version 25, IBM, Armonk, New York, USA

2.2 Patientenkollektiv

„Eingeschlossen werden Patienten älter als 20 und jünger als 80 Jahre mit einer *true* anterior posterior Röntgenaufnahme im Stand sowie eines MRT der Schulter, welche im PACS System der Universitätsklinik Düsseldorf gespeichert sind.“ (Hufeland et al., 2020)

Um Störfaktoren auszuschließen, werden nur Patienten mit intakter Rotatorenmanschette und altersentsprechend unauffälliger Schulter ausgewertet. Dadurch werden mögliche Einflüsse einer Sehnenläsion auf den AHA ausgeschlossen.

Patienten mit „inkompletten Bilddatensätzen oder nicht korrekt aufgenommenen Röntgen oder MRT Bildern“ (Hufeland et al., 2020) werden ausgeschlossen, weiterhin Patienten mit einem „zeitlichen Abstand von über 3 Monaten zwischen Röntgen und MRT“ (Hufeland et al., 2020).

Auch Patienten mit anderen Erkrankungen, die einen Humeruskopfhochstand verursachen könnten, werden eliminiert. Deshalb werden Patienten mit „transmuraler Rotatorenmanschettenruptur sowie Partialrupturen > Grad I nach Ellmann“ (Hufeland et al., 2020) nicht berücksichtigt (Ellman, 1990).

„Patienten mit Schädigungen nach akutem Trauma, Luxation, Infekt oder Tumor“ (Hufeland et al., 2020) werden ebenfalls ausgeschlossen.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
Patienten mit intakter Rotatorenmanschette und altersentsprechend unauffälliger Schulter	Diagnostik bei akutem Trauma, Infektion oder Tumor
Patienten älter als 20 und jünger als 80 Jahre	Inkomplette MRT-Bilddatensätze
MRT und Röntgen innerhalb eines zeitlichen Abstandes von drei Monaten	nicht korrekt aufgenommene MRT- und Röntgenbilder

Tabelle 6 **Tabellarische Darstellung der Ein- und Ausschlusskriterien**

2.3 Messmethode

Der AHA im konventionellen Röntgen ist definiert als kürzester Abstand zwischen der Akromionunterkante und dem höchsten Punktes des Humeruskopfes in der Frontalebene (Fehringer et al., 2008), (Gruber et al., 2010).

Die Messung des akromiohumeralen Abstandes erfolgte im *true* anterior posterior Röntgen im Stehen und in parakoronaren MRT Schichten anhand der Methode nach Werner et al. (Werner et al., 2008).

„Zur Messung werden zwei parallele Hilfslinien gezogen. Im Röntgenbild wird die obere Hilfslinie in die Skleroselinie der Akromionunterkante gelegt. Die parallele Hilfslinie dazu wird tangential an den Humeruskopf gelegt“ (Hufeland et al., 2020). Der gemessene Abstand der beiden Parallelen entspricht dem AHA in mm.



Abb. 7: *true ap* Röntgenaufnahme der rechten Schulter im Stand: Messung des akromiohumeralen Abstandes nach der Methode von Werner et. al. mittels der eingezeichneten Hilfslinien. Es erfolgte zudem die Messung der maximalen Glenoidhöhe.

Material und Methoden

Im MRT werden beide Hilfslinien genauso gelegt: Es werden zwei parallele Hilfslinien gezogen. „Die obere Hilfslinie wird an die Unterkante des Akromions gelegt. Die parallele Hilfslinie dazu wird tangential an den Humeruskopf gelegt“ (Hufeland et al., 2020). Der gemessene Abstand der beiden Parallelen entspricht dem AHA in mm. „Aus den Schichten wird das mittlere Bild von allen Bildern, die das Glenoid abbilden, ausgewählt“ (Hufeland et al., 2020). Ist die Anzahl dieser Bilder gerade, wird das Bild der beiden mittleren ausgewählt, auf dem das Glenoid größer abgebildet ist.



Abb. 8: **coronare MRT Aufnahme der rechten Schulter:** Messung des akromiohumeralen Abstandes nach der Methode von Werner et. al. mittels der eingezeichneten Hilfslinien.

2.4 Elimination der Projektionsfaktoren

Bei der Abbildung von Röntgenbildern und MRT-Bildern kommen unterschiedliche Projektionsfaktoren zum Tragen. Projektionsfehler entstehen durch unterschiedliche Abstände bei Fokus, Objekt und Bild. Die gemessenen akromiohumeralen Abstände von Röntgen und MRT sind somit nicht direkt vergleichbar.

„Um die Messwerte von MRT und Röntgen vergleichbar zu machen, müssen die unterschiedlichen Projektionsfaktoren der beiden Modalitäten eliminiert werden“ (Hufeland et al., 2020).

Hierzu werden jeweils die Quotienten aus Glenoidhöhe und AHA für beide Verfahren bestimmt:

$$\frac{\text{Maximale Glenoidhöhe im Röntgen}}{\text{AHA im Röntgen}}$$

$$\frac{\text{Maximale Glenoidhöhe im MRT}}{\text{AHA im MRT}}$$

Die Projektionsfaktoren bei der Abbildung kürzen sich beim Quotienten heraus. Diese Quotienten der beiden Verfahren sind dann direkt vergleichbar.

„Dazu wird die maximale kranio-kaudale Glenoidhöhe in beiden Modalitäten gemessen“ (Hufeland et al., 2020).

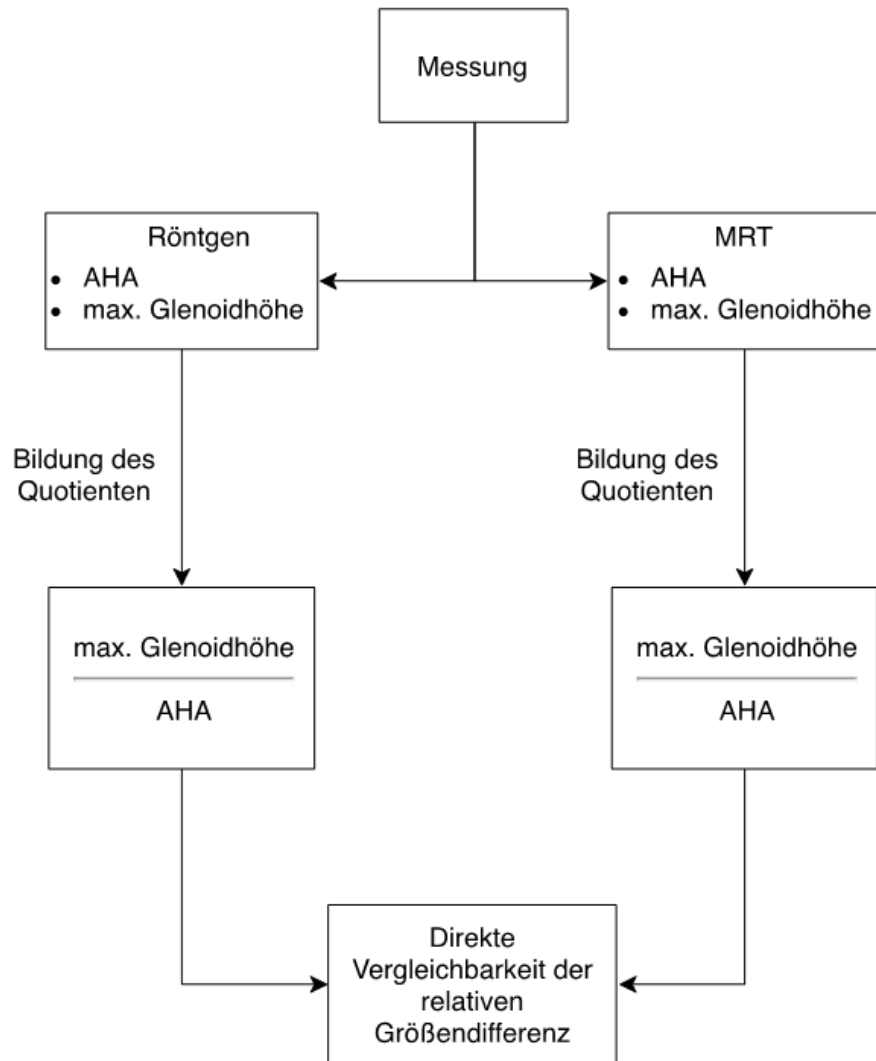


Abb. 9: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Vergleichbarkeit beider Verfahren

Material und Methoden

In einem zweiten Auswertungsschritt wurde die absolute Größendifferenz des AHAs in Röntgen und MRT bestimmt.

Annahme ist, dass das Röntgen die reellen Größenverhältnisse abbildet. Daher wurde der Quotient aus *Höhe Glenoid Röntgen / Höhe Glenoid MRT* gebildet. Das Ergebnis wurde mit dem im MRT gemessenen akromiohumeralen Abstand multipliziert. Ergebnis war ein an die reellen Größenverhältnisse angepasster MRT Abstand. (Hufeland et al., 2020)

$$\frac{\text{Höhe Glenoid Röntgen}}{\text{Höhe Glenoid MRT}} * AHA \text{ MRT} = \text{Neuer AHA MRT}$$

Nach Bildung der Differenz aus *AHA Abstand Röntgen - neuer AHA Abstand MRT* erhielt man die Differenz des AHAs in Röntgen und MRT in mm-Angaben. Der errechnete Wert bildet die reellen Größenverhältnisse ab.

$$AHA \text{ Abstand Röntgen} - \text{Neuer AHA Abstand MRT} = \Delta AHA \text{ in mm}$$

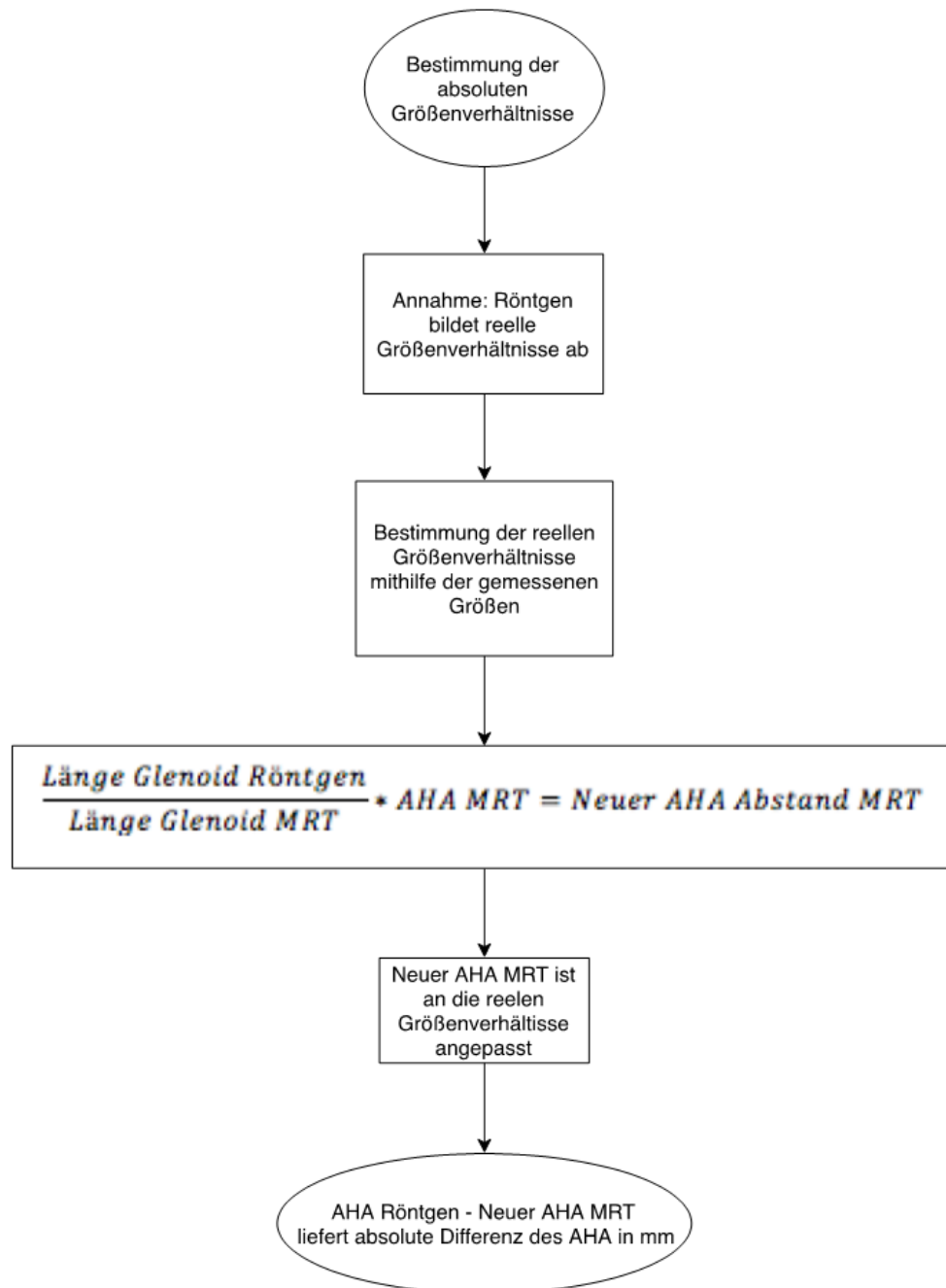


Abb. 10: Schematische Darstellung des Vorgehens zur Bestimmung der absoluten Größenverhältnisse

2.5 Statistische Auswertung

Verglichen werden die Quotienten *Maximale Glenoidhöhe / AHA* in Röntgen und MRT. In einem weiteren Auswertungsschritt werden die absolute Größendifferenz des AHAs in Röntgen und MRT bestimmt. Dafür werden die gemessenen der akromiohumeralen Abstände im MRT nach der oben genannten Formel in die reellen Größen umgerechnet und mit den gemessenen Werten der akromiohumeralen Abstände im Röntgen verglichen.

Die eingeschlossenen Patienten werden zudem in drei Gruppen unterteilt: 20-40 jährige, 41-60 jährige und 61-80 jährige. Somit können auch mögliche Alterseinflüsse analysiert werden.

Die statistische Auswertung der Quotienten sowie der absoluten Abstände erfolgt mittels SPSS. Durchgeführt wird eine Analyse mittels T-Test. Der T-Test prüft, ob sich die Mittelwerte beider Gruppen unterscheiden. Des Weiteren wird die Standardabweichung der Mittelwerte bestimmt.

Die grafischen Auswertungen werden mithilfe von Microsoft Excel erstellt.

Um die Qualität der Messungen beurteilen zu können, werden 25 zufällig ausgewählte Röntgen-MRT Datensätze durch einen zweiten Untersucher erneut gemessen. Sowohl die Einzelwerte als auch die Mittelwerte beider Untersucher werden miteinander verglichen. Dazu wird mittels SPSS die Intraklassen-Korrelation (ICC) bestimmt. (Hufeland et al., 2020)

Angewendet wird das Modell mit gemischten Zwei-Weg-Effekten. „Der Wertebereich des ICC liegt zwischen -1,0 und +1,0“ (Hufeland et al., 2020). Ähneln sich die Ergebnisse beider Untersucher und zeigen nur eine geringe Varianz, so ist der ICC hoch.

2.6 Ethikvotum

Die Ethikkommission der Universitätsklinik Düsseldorf hat festgestellt, dass keine Bedenken gegen die Durchführung der retrospektiven anonymisierten Datenanalyse bestehen. Studien.Nr.: 2019-563.

3 Ergebnisse

Die nachfolgenden Ergebnisse dieser Disseratation wurden bereits in einem Paper veröffentlicht:

Hufeland, M., Brusis, C., Kubo, H. et al. The acromiohumeral distance in the MRI should not be used as a decision criterion to assess subacromial space width in shoulders with an intact rotator cuff.

Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy (2020)

„560 Röntgen- und MRT Datensätze, erstellt in den Jahren 2007 bis 2019, wurden gemäß der Ein- und Ausschlusskriterien überprüft. Entsprechend dieser Ein- und Ausschlusskriterien verblieben 376 Patienten.

Von diesen Patienten wurden Fälle mit nicht korrekt durchgeführten MRT (n=24) oder Röntgenbildern (n=36) ausgeschlossen. Zu den nicht korrekt aufgenommenen MRT Bildern zählen abgebrochene Aufnahmen sowie Aufnahmen mit Bewegungsartefakten. Zu den nicht korrekt aufgenommene Röntgenbildern zählen Aufnahmen, die nicht den oben genannten Kriterien der true anterior posterior Aufnahme entsprechen.

Des Weiteren wurden Patienten mit transmuraler Rotatorenmanschettenruptur respektive Partialruptur > Grad I nach Ellmann im MRT ausgeschlossen (n=73).

Von insgesamt 367 konsekutiven Patienten wurden also 234 Patienten mit intakter Rotatorenmanschette eingeschlossen und gemäß der oben genannten Methodik untersucht. Das Durchschnittsalter der Patienten betrug $45,8 \pm 14,3$ Jahre. Davon sind 59,8% männlich, 40,2% sind weiblich.“ (Hufeland et al., 2020)

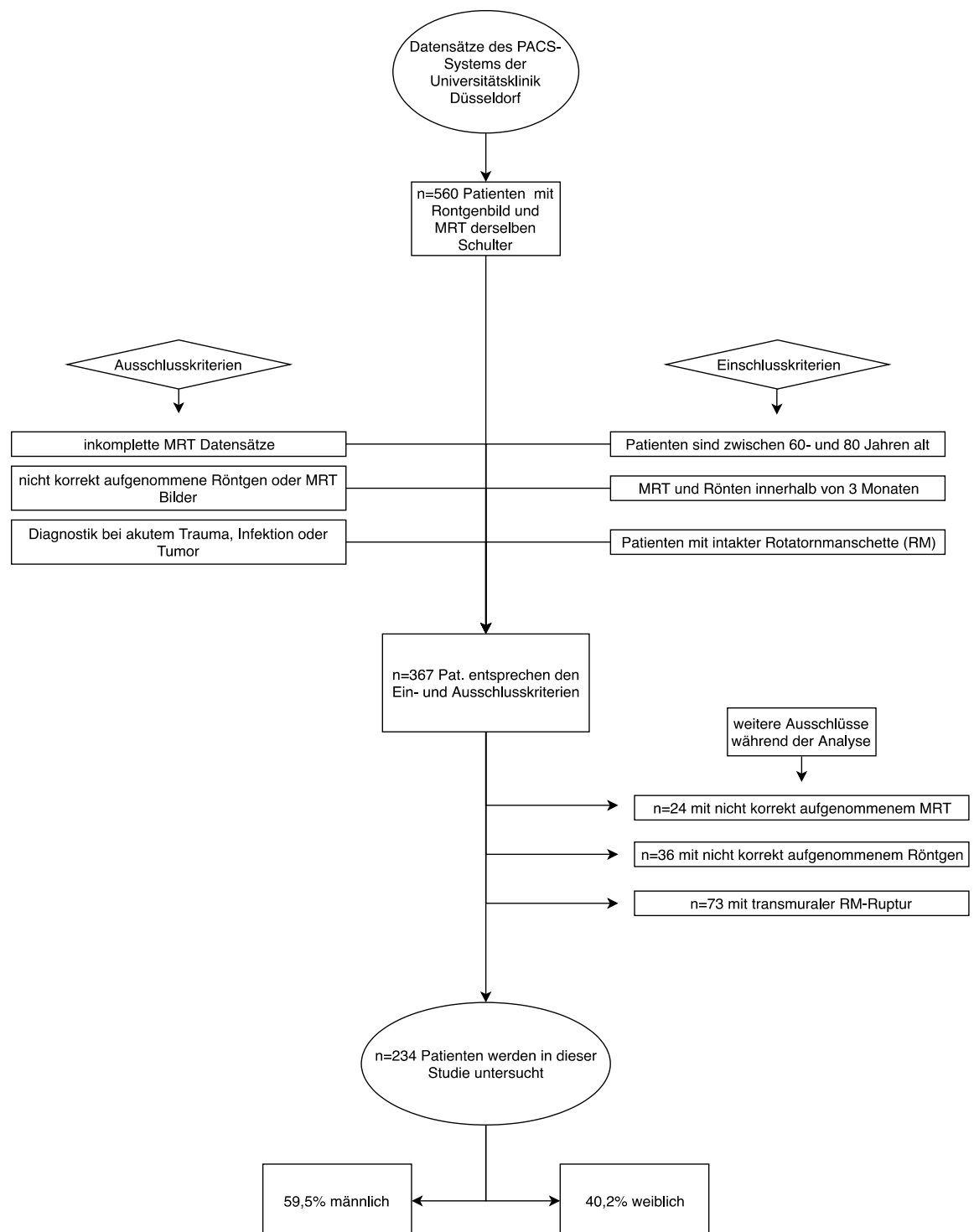


Abb. 11: Darstellung der Patientenselektion mit Ein- und Ausschlusskriterien

3.1 Relative Größendifferenz der akromiohumeralen Abstände

Verglichen wurden die Quotienten Maximale Glenoidhöhe / AHA in Röntgen und MRT.

Der durchgeführte T-Test mittels SPSS ergab folgende Ergebnisse:

Der mittlere Quotient aller durchgeführten Messungen war im MRT mit $4,62 \pm 1,03$ signifikant ($P < 0.0001$) größer als im Röntgen mit $4,13 \pm 0,93$.

Gruppe	Anzahl Patienten	Mittelwert Quotient AHA im Röntgen	Mittelwert Quotient AHA im MRT	Signifikanz
gesamt	234	$4,13 \pm 0,93$	$4,62 \pm 1,03$	<0.0001

Tabelle 7: Der Mittelwert der Quotienten aller durchgeführten Messungen über alle Altersgruppen

Um mögliche Alterseinflüsse zu analysieren, wurden die eingeschlossenen Patienten in drei Gruppen (21-40; 41-60 und 61-80 Jahre) aufgeteilt.

89 Patienten gehörten der Altersgruppe 21 - 40 Jahre an, das Durchschnittsalter betrug hier $30,4 \pm 5,8$ Jahre. Der Quotient $4,60 \pm 1,1$ im MRT war signifikant größer als der Quotient $4,09 \pm 0,95$ im Röntgen ($P < 0.0001$).

In der Altersgruppe 41 - 60 Jahre ($n = 110$) betrug das durchschnittliche Alter $50.84 \pm 4,9$ Jahre. Der Quotient war im MRT mit $4,65 \pm 1,0$ signifikant größer als im Röntgen mit $4,18 \pm 0,85$ ($P < 0.0001$).

In der Altersgruppe 61 - 80 Jahre ($n = 35$) betrug das durchschnittliche Alter $67,91 \pm 5,3$ Jahre. Der Quotient war im MRT mit $4,68 \pm 0,96$ signifikant größer als im Röntgen mit $4,02 \pm 1,16$ ($P < 0.0001$).

Alle Ergebnisse sind hoch signifikant ($P < 0.0001$) (Hufeland et al., 2020).

Gruppe	Anzahl Patienten	Mittelwert Quotient AHA im Röntgen	Mittelwert Quotient AHA im MRT	Signifikanz
21-40 Jahre	89	4,09 ± 0,95	4,60 ± 1,1	<0.0001
41-60 Jahre	110	4,02 ± 1,16	4,68 ± 0,96	<0.0001
61-80 Jahre	35	4,02 ± 1,16	4,68 ± 0,96	<0.0001

Tabelle 8: Der Mittelwert der Quotienten nach Altersgruppen

Eine Abhängigkeit der akromiohumeralen Abstände zum Alter und Geschlecht lässt sich nicht feststellen (Hufeland et al., 2020).

3.2 Absolute Größendifferenz der akromiohumeralen Abstände

In einem weiteren Auswertungsschritt wurde die absolute Größendifferenz des AHAs in Röntgen und MRT bestimmt.

„Hier zeigte sich über alle durchgeführten Messungen ein durchschnittlicher AHA von $10.4 \pm 2.4\text{mm}$ im Röntgen sowie $9,2 \pm 1,8\text{mm}$ im MRT. Der AHA im Röntgen ist also im Durchschnitt 1,2mm oder 13% größer als im MRT ($P < 0,0001$).“ (Hufeland et al., 2020)

Gruppe	Anzahl Patienten	Mittelwert absoluter AHA im Röntgen	Mittelwert absoluter AHA im MRT	Prozentuale Größenzunahme	Signifikanz
gesamt	234	10.4 ± 2.4mm	9,2 ± 1,8mm	13%	<0.0001

Tabelle 9: Mittelwert des absoluten akromiohumeralen Abstandes in MRT und Röntgen über alle Altersgruppen

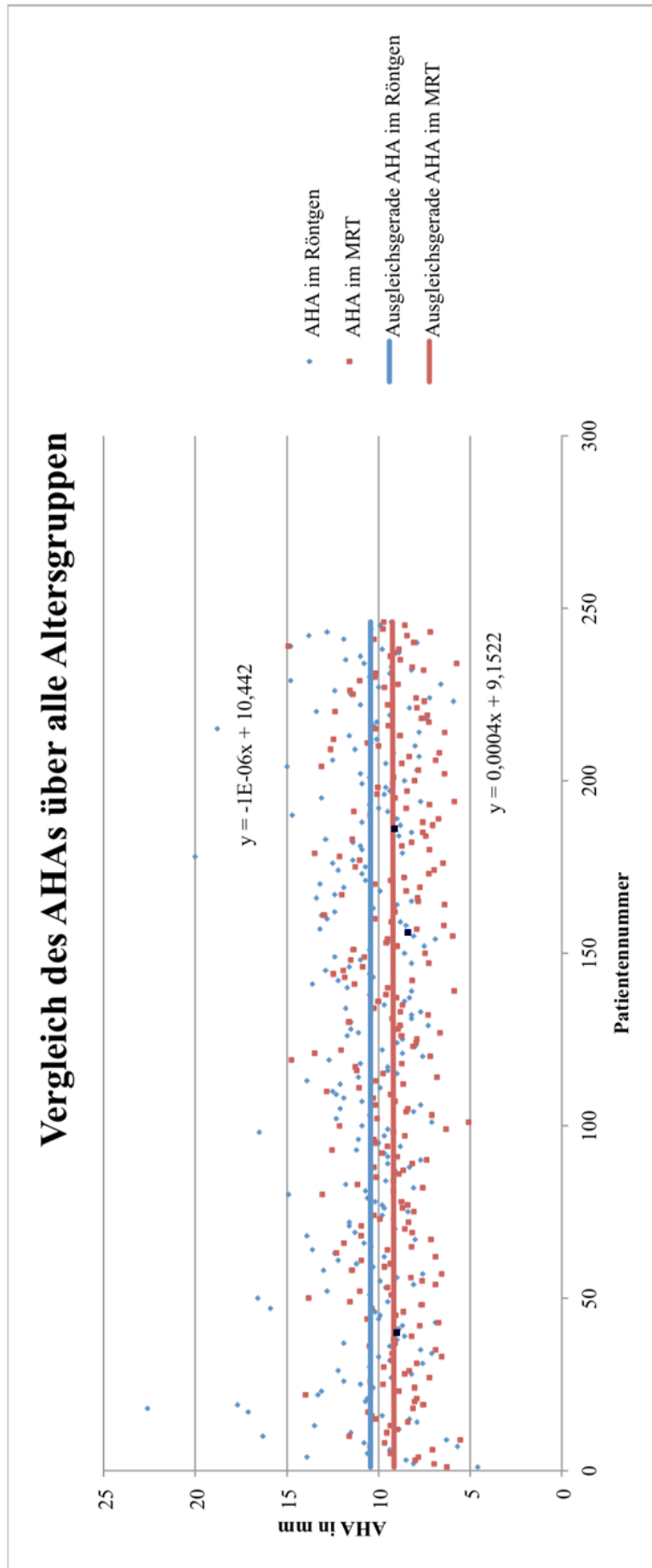


Abb.12: **Vergleich des AHAs über alle Altersgruppen.** Für jede Patientennummer auf der x-Achse werden die dazugehörigen AHA-Werte von MRT und Röntgen auf der y-Achse abgetragen. Die Ausgleichsgeraden bestätigen, dass der AHA im Röntgen stets größer ist als im MRT.

Ergebnisse

„In der Altersgruppe 21-40 Jahre beträgt der durchschnittliche AHA $10,5 \pm 2,5\text{mm}$ im Röntgen sowie $9,1 \pm 1,9\text{mm}$ im MRT. Der AHA im Röntgen ist also im Durchschnitt $1,4\text{mm}$ signifikant größer als im MRT ($P < 0,0001$). Die Größenzunahme beträgt $15,4\%$.“ (Hufeland et al., 2020)

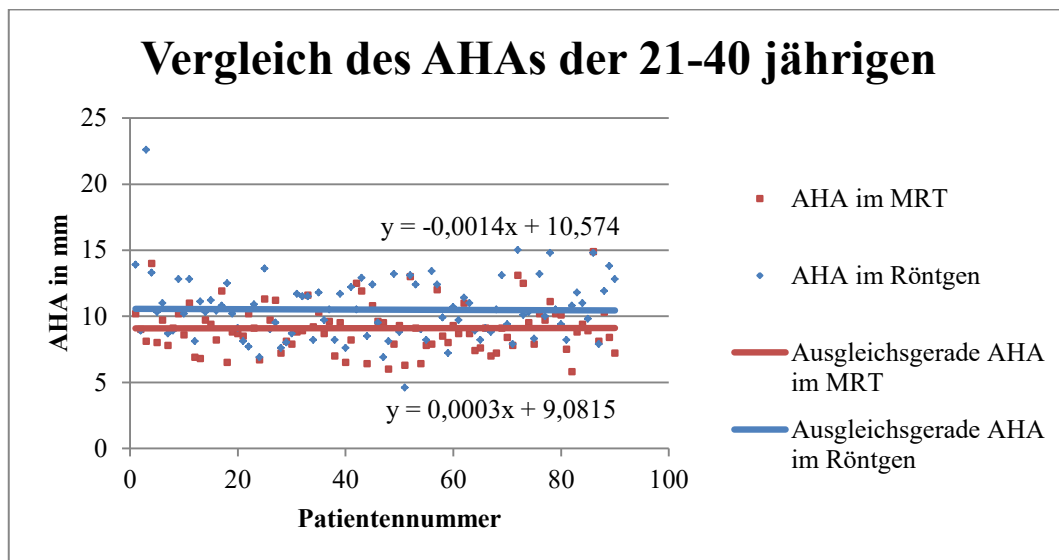


Abb13: **Grafische Darstellung der AHAs der 21 – 40-jährigen.** Für jede Patientennummer auf der x-Achse werden die dazugehörigen AHA-Werte von MRT und Röntgen auf der y-Achse abgetragen. Die Ausgleichsgeraden bestätigen, dass der AHA im Röntgen stets größer ist als im MRT.

„In der Altersgruppe 41-60 Jahre beträgt der durchschnittliche AHA $10,3 \pm 2,3\text{mm}$ im Röntgen sowie $9,2 \pm 1,8\text{mm}$ im MRT. Der AHA im Röntgen ist also im Durchschnitt $1,1\text{mm}$ signifikant größer als im MRT ($P < 0,0001$). Die Größenzunahme beträgt 12% .“ (Hufeland et al., 2020)

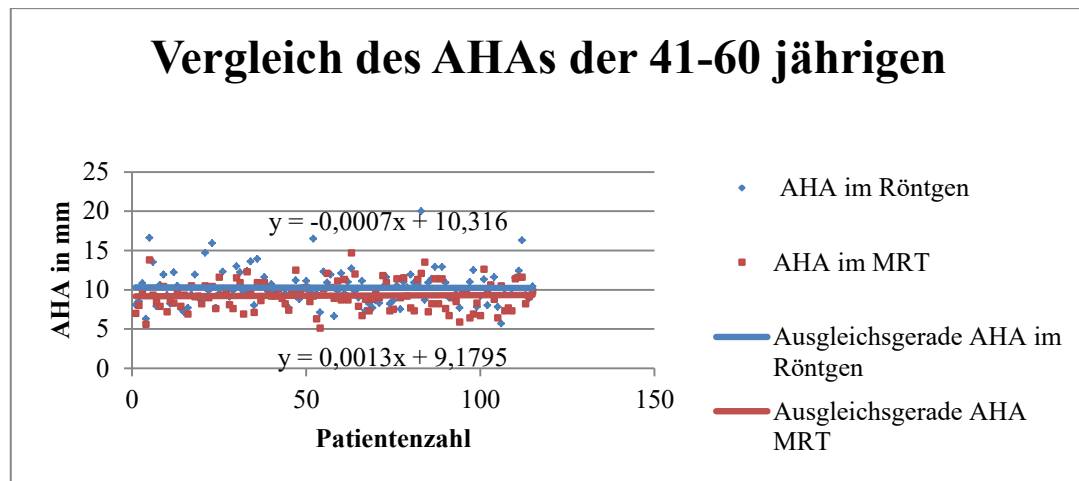


Abb. 14: **Grafische Darstellung der AHAs der 41 – 60-jährigen.** Für jede Patientennummer auf der x-Achse werden die dazugehörigen AHA-Werte von MRT und Röntgen auf der y-Achse abgetragen. Die Ausgleichsgeraden bestätigen, dass der AHA im Röntgen stets größer ist als im MRT.

„In der Altersgruppe 61-80 Jahre beträgt der durchschnittliche AHA $11,1 \pm 2,8\text{mm}$ im Röntgen sowie $9,3 \pm 1,8\text{mm}$ im MRT. Der AHA im Röntgen ist also im Durchschnitt 1,8mm signifikant größer als im MRT ($P < 0,0001$). Die Größenzunahme beträgt 19,4%.“ (Hufeland et al., 2020)

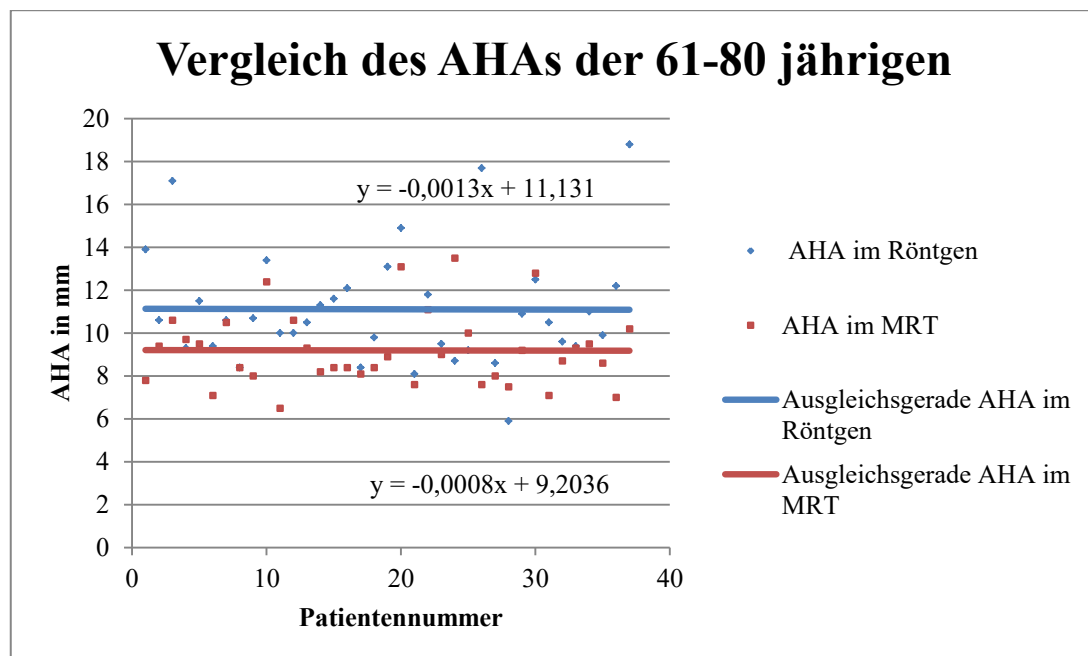


Abb. 15: **Grafische Darstellung der AHAs der 61 – 80-jährigen.** Für jede Patientennummer auf der x-Achse werden die dazugehörigen AHA-Werte von MRT und Röntgen auf der y-Achse abgetragen. Die Ausgleichsgeraden bestätigen, dass der AHA im Röntgen stets größer ist als im MRT.

Ergebnisse

Die Werte für die akromiohumeralen Abstände, die in den grafischen Darstellungen anhand einer Ausgleichsgeraden für jede Altersgruppe ermittelt wurden, entsprechen den tabellarisch zusammengefassten errechneten Durchschnittswerten.

Gruppe	Anzahl Patienten	Mittelwert absoluter AHA im Röntgen	Mittelwert absoluter AHA im MRT	Prozentuale Größenzunahme	Signifikanz
21-40 Jahre	89	10,5 ± 2,5mm	9,1 ± 1,9mm	15,4%	<0.0001
41-60 Jahre	110	10,3 ± 2,3mm	9,2 ± 1,8mm	12%	<0.0001
61-80 Jahre	35	11,1 ± 2,8mm	9,3 ± 1,8mm	19,4%	<0.0001

Tabelle 10: Zusammenstellung der errechneten Mittelwerte des AHA für die altersabhängigen Patientengruppen

Bei allen Auswertungsverfahren zeigt sich über alle Altersgruppen sowie im Einzelnen, dass der akromiohumerale Abstand im Röntgen signifikant größer ist als im MRT.,

Ergebnisse

Auch die Darstellung der ermittelten Werte mittels Boxplot zeigt die signifikanten Unterschiede des akromiohumeralen Abstandes in MRT und Röntgen.

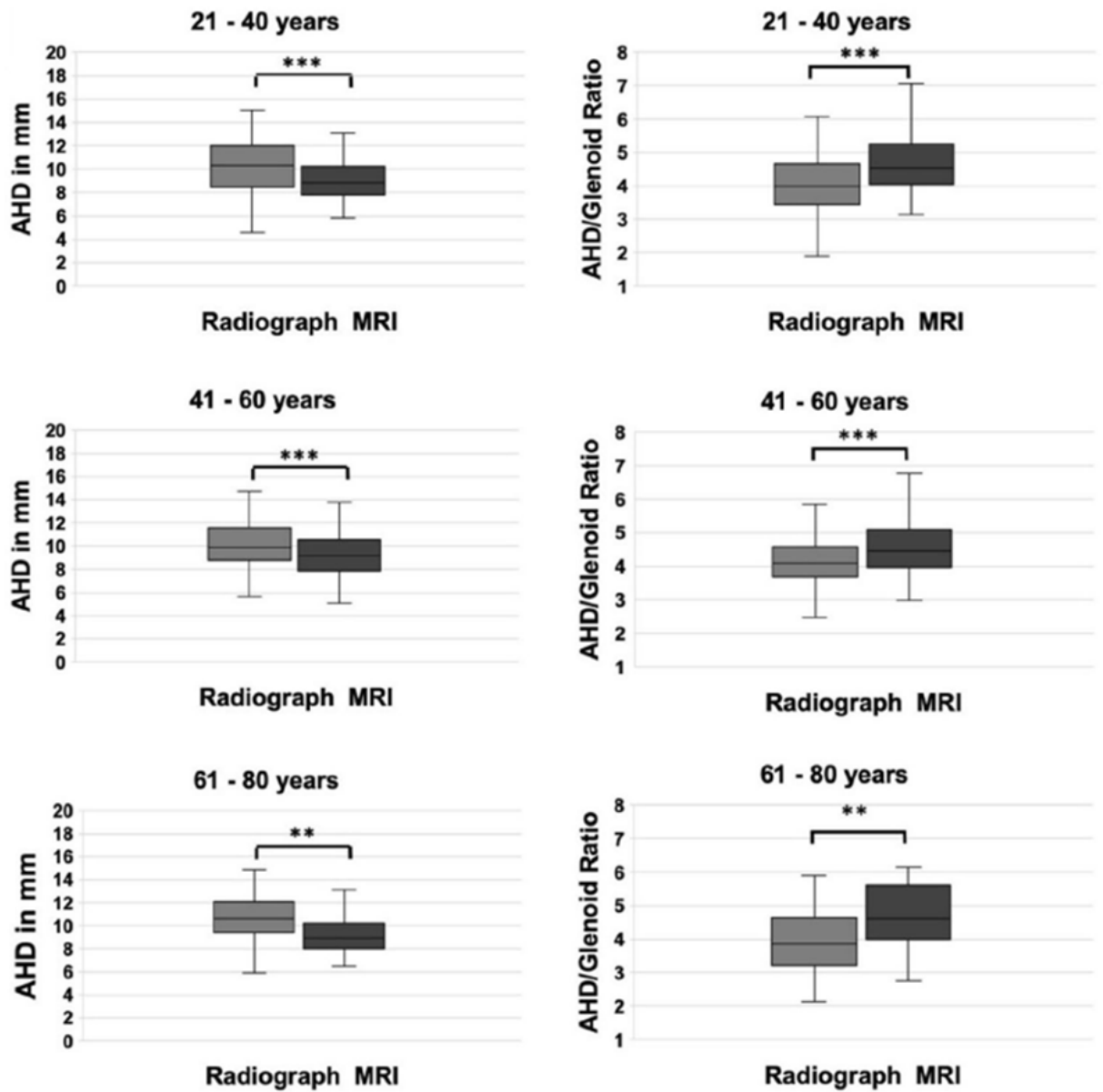


Abb. 16: **Darstellung der Ergebnisse beider Modalitäten mittels Boxplot.** Darstellung des AHAs in mm sowie des Quotienten AHA / Glenoidhöhe in Röntgen und MRT für alle Altersgruppen. **= $P < 0.001$; ***= $P < 0.0001$. Aus (Hufeland et al., 2020) mit freundlicher Genehmigung des Springer Nature Verlags.

3.3 Interrater-Reliabilität

Zur Quantifizierung der Übereinstimmung (*Interrater*-Reliabilität) wurden 25 zufällig ausgewählte Röntgen-MRT Datensätze durch einen zweiten Untersucher verblindet nach der Methode von Werner et al. gemessen und die Intraklassen-Korrelation (ICC) bestimmt:

„Der ICC der einzelnen Maße betrug 0,779, das 95%-Konfidenz Intervall betrug hierbei [0,539; 0,902]. Der ICC der durchschnittlichen Maße betrug 0,876, das 95%-Konfidenz Intervall betrug hierbei [0,701; 0,948].“ (Hufeland et al., 2020)

Der ICC Wert ist also sehr hoch und spricht für eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse zwischen beiden Untersuchern (Hufeland et al., 2020).

ICC der einzelnen Maße	0,779 [0,539; 0,902].
ICC der durchschnittlichen Maße	0,876 [0,701; 0,948]

Tabelle 11: **Tabellarische Darstellung der Interrater-Reliabilität.** ICCs der einzelnen Maße sowie der durchschnittlichen Maße mit den entsprechenden 95%-Konfidenz Intervallen.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Diese Dissertation untersucht die Vergleichbarkeit des akromiohumeralen Abstandes bei Messungen in MRT und true-ap Röntgenaufnahmen der Schulter bei intakter Rotatorenmanschette.

Das entscheidende Ergebnis dieser Dissertation ist, dass der AHA im Röntgen signifikant größer ist als im MRT (Hufeland et al., 2020).

Dieser Größenunterschied ist in jeder Altersgruppe nachweisbar. Über alle Altersgruppen gemessen fanden wir eine mittlere Größendifferenz von 1,2mm. Auf die einzelnen Altersgruppen bezogen zeigte sich bei den 21 bis 40 jährigen eine mittlere Größendifferenz von 1,4mm.

Bei den 41 bis 60 jährigen zeigte sich eine mittlere Größendifferenz von 1,1mm zwischen den Messungen des AHAs in Röntgen und MRT.

In der Altersgruppe 61 bis 80 Jahre lag die mittlere Größendifferenz bei 1,8mm.

Eine Abhängigkeit von Alter und Größendifferenz ließ sich nicht feststellen (Hufeland et al., 2020).

4.1 Vergleichbarkeit der akromiohumeralen Abstände

Die Vergleichbarkeit von Röntgen und MRT wurde schon in der Vergangenheit in mehreren Studien untersucht.

Bereits Saupe et al. verglichen den AHA in MRT und konventionellem Röntgen, um eine Verbindung zwischen reduziertem akromiohumeralen Abstand und einer Läsion der Rotatorenmanschette feststellen zu können.

Die Autoren stellten fest, dass der gemessene akromiohumerale Abstand im MRT kleiner war als der korrespondierende Wert im konventionellen Röntgen. Im Mittel betrug der AHA im konventionellen Röntgen 8,7mm und im MRT 5,9mm. Somit sei der AHA im MRT im Mittel 2,8mm kleiner als im konventionellen Röntgen (Saupe et al., 2006).

Diskussion und Schlussfolgerungen

Auch Werner et al. zeigten in einer Studie mit 100 Patienten mit Rotatorenmanschettenruptur, dass der akromiohumerale Abstand in Röntgenbild und MRT des jeweiligen Patienten vergleichbar gemessen werden kann, der AHA im Röntgen jedoch größer ist als im MRT (Werner et al., 2008).

Im Durchschnitt war der akromiohumerale Abstand im true anterior-posterior Röntgen 0,6mm größer ist als in der vergleichbare MRT Aufnahme des entsprechenden Patienten (Werner et al., 2008).

Beide Arbeiten beschreiben, dass die Positionierung des Patienten einen Einfluss auf die Größe des AHA hat.

Im klinischen Alltag finden jedoch bei der Bestimmung des AHA die verschiedenen bildgebenden Verfahren Anwendung, ohne dass die Rückenlage des Patienten kritisch hinterfragt wird (Saupe et al., 2006), (Werner et al., 2008).

Auch unserer Meinung nach spielt die Positionierung des Patienten bei der Bildgebung eine entscheidende Rolle.

Während der Aufnahme des konventionellen Röntgens steht der Patient. Die Schwerkraft wirkt auf den herabhängenden Arm und zieht den herabhängenden Arm nach kaudal.

Während der Aufnahme des MRTs hingegen liegt der Patient. Die Scapula wird in Rückenlage fixiert und der Humeruskopf kann nach oben gedrückt werden. Zudem wirkt die Schwerkraft in Rückenlage auf den Humeruskopf in Richtung dorsal und hat somit keinen Einfluss auf den AHA.

Unsere Ansicht wird in der Arbeit von McCreesh et al. bestätigt.

McCreesh et. al. arbeiteten bereits die besonderen Bedingungen der AHA Messung bei Patienten in Rückenlage heraus, wonach die Schwerkraft auf den Arm in Rückenlage anders wirkt als im Stehen. Weiterhin fehlt die aktive Muskelkraft (McCreesh et al., 2015). So erklärten sie, dass der AHA im Liegen kleiner ist als im Stehen.

Die Auswirkung der Lagerung des Patienten auf den akromiohumeralen Abstand wurde ebenfalls von Yoshida et al. in einer aktuellen Studie untersucht.

83 Patienten mit intakter Rotatorenmanschette und altersentsprechender Schulter wurden in dieser Studie untersucht. Gemessen wurde der AHA zum einen in der

Diskussion und Schlussfolgerungen

Standard CT-Aufnahme im Liegen und zum anderen in einem neu entwickelten CT-Gerät, bei dem der Patient während der Aufnahme steht. Ermittelt wurde der AHA im zweidimensionalen Bild sowie in der dreidimensionalen Rekonstruktion. Beide Aufnahmen wurden am selben Tag angefertigt.

Die Auswertung ergab, dass der akromiohumerale Abstand im Stehen signifikant größer war als in der liegenden Position.

In der zweidimensionalen Messung war der AHA im Stehen Mittel 0,7mm größer als im Liegen, in der Dreidimensionalen Aufnahme war der AHA im Stehen im Mittel ebenfalls 0,7 mm größer als im Liegen.

Somit bestätigen die Autoren den Einfluss der Schwerkraft auf den Arm mit den damit verbundenen Auswirkungen auf den akromiohumeralen Abstand (Yoshida et al., 2020).

In einer aktuellen Studie verglichen Mirzayan et al. bei Patienten mit vollständiger Ruptur der Rotatorenmanschette den akromiohumeralen Abstand in beiden Methoden. Die Untersucher stellten fest, dass der akromiohumerale Abstand im MRT hier im Mittel 3,4 mm kleiner war als in der konventionellen Röntgenaufnahme. Die Autoren schließen daraus, dass die gemessenen Abstände in MRT und Röntgen nicht direkt vergleichbar und austauschbar sind (Mirzayan et al., 2020).

Auch Mirzayan et al bestätigten damit, dass der Effekt der Rückenlage in der MRT-Untersuchung zu einem kleineren AHA führt als die entsprechende Messung in der *true* ap Röntgenaufnahme.

In den genannten Studien zum Vergleich von Röntgen und MRT wurden Patienten mit einem Defekt der Rotatorenmanschette untersucht. Dass ein Defekt der Rotatorenmanschette Einfluss auf den akromiohumeralen Abstand hat, wurde bereits von Goutallier et al. beschrieben. Ein AHA kleiner als 7mm spreche für eine Läsion der Rotatorenmanschette (Goutallier et al., 2011), der Normbereich des AHA liegt hingegen bei 7 – 14mm (Cotton and Rideout, 1964), (Weiner and Macnab, 1970).

In unserer Studie wurde der AHA nun erstmals bei Patienten mit intakter Rotatorenmanschette in den verschiedenen Modalitäten gemessen und verglichen.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Auch in unserer Studie lässt sich bestätigen, dass der AHA im Röntgen signifikant größer ist als im MRT.

Hierbei war der AHA über alle Altersgruppen hinweg im Mittel im MRT 13% kleiner als im Röntgen (Hufeland et al., 2020).

Vergleicht man unsere Ergebnisse mit denen der Studie von Mirzayan et al., ist unsere ermittelte Differenz der AHA-Werte jedoch deutlich geringer.

Dieses ist vorrangig dadurch begründet, dass „die intakte Rotatorenmanschette die passive Dezentrierung des Humeruskopfes nach kranial im Liegen limitiert“ (Hufeland et al., 2020).

Die defekte Sehne der Rotatorenmanschette hingegen kann retrahieren und so den subakromialen Raum freigeben (Patte, 1990). Eine Dezentrierung des Humeruskopfes, gerade im Liegen, wird dadurch leichter möglich.

Zusammenfassend hat also die Positionierung des Patienten Einfluss auf den akromiohumeralen Abstand. Im Stehen und Liegen wirkt die Schwerkraft jeweils anders auf den Arm und hat somit einen anderen Einfluss auf den AHA.

Verstärkt wird dieser Effekt durch eine Ruptur der Rotatorenmanschette. Diese hat die Aufgabe, den Humeruskopf zu zentrieren und den Zug des *M. deltoideus* auszugleichen (Jn et al., 2010). Ist die Rotatorenmanschette ermüdet oder defekt, kann sie dem Zug des *M. deltoideus* nicht mehr entgegenwirken und es kommt zu einem Humeruskopfhochstand. Dieser wird auch dadurch verursacht, dass die Supraspinatussehne bei vollständiger Ruptur retrahiert und so den subakromialen Raum freigibt (Saupe et al., 2006), (Inman et al., 1996), (Poppen and Walker, 1976), (Weiner and Macnab, 1970). Eine passive Dezentrierung nach kranial wird vermehrt möglich.

In der klinischen Praxis sollte die Größendifferenz des AHAs in den verschiedenen bildgebenden Verfahren beachtet werden. Eine Messung des AHAs anhand eines Standard MRTs im Liegen führt zu einem verringerten AHA. Verglichen mit den Normwerten im konventionellen Röntgen kann dies zu einer Fehldiagnose von subakromialem Impingement oder einer Dezentrierung des Humeruskopfes führen.

4.2 Elimination der Projektionsfaktoren

Bei den genannten Studien wurden die verschiedenen Projektionsfaktoren von MRT und konventionellem Röntgen nicht berücksichtigt.

Zwar wurden die akromiohumeralen Abstände standardisiert in Röntgen und MRT gemessen, jedoch wurden die gemessenen Werte direkt verglichen, ohne Rücksichtnahme auf die unterschiedliche Projektion beider Modalitäten. Dies macht die akromiohumeralen Abstände unserer Meinung nach nur bedingt vergleichbar.

Eine direkte Vergleichbarkeit ist in dieser Dissertation erstmals der Fall.

Durch Messung des AHAs und zusätzlich der Höhe des Glenoids können wir eine Vergleichbarkeit schaffen und die realen Größenverhältnisse ermitteln. Dazu wird der Quotient *AHA Röntgen / Glenoidhöhe Röntgen* mit dem Quotienten *AHA MRT / Glenoidhöhe MRT* verglichen.

4.3 Klinische Relevanz

Der akromiohumerale Abstand gilt als wichtiger radiologische Marker im klinischen Alltag.

Zum einen weist ein verminderter akromiohumeraler Abstand auf eine Läsion der Rotatorenmanschette hin (Goutallier et al., 2011), (Werner et al., 2008).

Auch ist der verminderte AHA ein Marker für die Größe der Läsion in der Sehne der Rotatorenmanschette sowie für den Grad der Verfettung der Muskulatur der Rotatorenmanschette. Je kleiner der AHA; desto größer die Läsion der Rotatorenmanschette und desto größer der Grad der Verfettung (Saupe et al., 2006).

Des Weiteren dient der AHA als prognostischer Marker für die kurzfristige (Hébert et al., 2003) sowie für die langfristige Funktionseinschränkung bei Läsion der Rotatorenmanschette (Mayerhoefer et al., 2009).

Zum anderen gilt der AHA als prognostischer Marker für die Intervention bei vorliegendem Defekt der Rotatorenmanschette.

Schon Ellmann et al. untersuchten 1986 den akromiohumeralen Abstand, gemessen im anterior-posterioren Röntgenbild hinsichtlich seiner Voraussagekraft bei chirurgischen Interventionen.

Sie stellten fest, dass ein AHA von weniger als 7mm für eine größere Läsion der Rotatorenmanschette spricht und mit einer negativen Prognose bei chirurgischer Intervention einhergeht. Nach Refixation einer höhergradig vorgeschädigten Rotatorenmanschette ist der Patient in seiner Beweglichkeit eingeschränkt (Ellman et al., 1986).

Zu ähnlichen Ergebnissen kamen Goutallier et al.. Sie arbeiteten heraus, dass ein verminderter akromiohumeraler Abstand von weniger als 6mm nicht geeignet für eine chirurgische Therapie ist (Goutallier et al., 2011).

Auch Kim et al. untersuchten den AHA hinsichtlich seiner Voraussagekraft über die Prognose einer chirurgischen Intervention bei Rotatorenmanschettenruptur.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Hierbei stellte der AHA, gemessen in MRT-Aufnahmen, einen guten prognostischen Faktor dar. Reparable Rotatorenmanschettenrupturen wiesen im MRT einen AHA von 9mm +/- 1,7mm auf, irreparable Rupturen einen Abstand von 5,8mm +/- 1,6mm.

Je kleiner der akromiohumale Abstand, desto schlechter sei die Prognose bei einem chirurgischen Therapieversuch (Kim et al., 2018).

Der akromiohumale Abstand stellt somit in vielerlei Hinsicht einen wichtigen radiologischen Marker dar.

Umso wichtiger ist es nun, sich die Vergleichbarkeit der akromiohumeralen Abstände in MRT und Röntgen bewusst zu werden.

Hinsichtlich der klinischen Relevanz des AHAs sollte in der klinischen Praxis die Größendifferenz des AHAs in den verschiedenen bildgebenden Verfahren beachtet werden.

Eine alleinige Messung des AHAs anhand eines Standard MRTs im Liegen führt zu einem verringerten AHA.

Die alleinige Betrachtung des MRT-Befundes kann zu den Fehldiagnosen eines Rotatorenmanschettenschadens, eines subakromialen Impingements oder einer Dezentrierung des Humeruskopfes und letztendlich zu einer nicht indizierten Therapie führen.

4.4 Stärken und Limitation der Studie

Ein Qualitätsmerkmal unserer Studie liegt in der validierten Messmethode des akromiohumeralen Abstandes. Die von Werner et al. beschriebene Messmethode misst den AHA zuverlässig und ist gut anwendbar.

Dies zeigt sich auch an dem von uns bestimmten ICC-Wert von 0,876 (Hufeland et al., 2020). Der Wertebereich des ICC liegt zwischen -1,0 und +1,0. Ein hoher ICC-Wert gibt an, dass sich die Ergebnisse beider Untersucher ähneln und nur eine geringe Varianz zeigen. Der von uns bestimmte ICC Wert ist als sehr hoch einzuschätzen und zeigt somit eine gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Messungen an. Dies lässt auf eine hohe Qualität des Messverfahrens schließen.

Auch die hohe Fallzahl von 560 untersuchten Datensätzen stellt eine Stärke dieser Arbeit dar, vergleichbar hohe Fallzahlen in der entsprechenden Literatur lassen sich nicht finden.

Eine weitere Stärke dieser Arbeit liegt in den strikten Ein- und Ausschlusskriterien. Durch die strikte Selektion der Patienten wurden pathologische veränderte Schultergelenke und Bildgebung bei Tumor, Infekt oder Trauma der Schulter ausgeschlossen, die einen Humeruskopfhochstand verursachen und die Messergebnisse verfälschen könnten.

Durch Ausschluss nicht korrekt aufgenommener Röntgen- und MRT-Bilder konnte die Gültigkeit der Messungen weiter verbessert werden.

Als Schwäche dieser Studie kann angesehen werden, dass die MRT- und Röntgen-Bilddatensätze nicht bei allen Patienten an den gleichen Geräten aufgenommen wurden.

Um einer möglichen Verfälschung der Messergebnisse, und dieses stellt wieder eine Stärke der Arbeit dar, durch die unterschiedlichen Projektionsfaktoren der verschiedenen Geräte entgegenzuwirken, wurden diese Projektionsfaktoren in unserer Arbeit durch geeignete Rechenschritte eliminiert.

So sind zum einen die Röntgenbilder direkt vergleichbar, auch wenn sie an verschiedenen Geräten aufgenommen wurden.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Weiterhin schafft die Elimination der Projektionsfaktoren auch eine direkte Vergleichbarkeit zwischen MRT und Röntgen, da auch die verschiedenen Faktoren beider Modalitäten eliminiert wurden und die gemessenen und umgerechneten akromiohumeralen Abstände nun direkt vergleichbar sind.

Ein Nachteil unserer Arbeit ist, dass die tatsächlichen Symptome der Patienten bei unserer Auswertung nicht berücksichtigt wurden. Es kann somit keine genaue Assoziation zwischen klinischen Symptomen und dem akromiohumeralen Abstand getroffen werden.

Zwar ist der AHA ein wichtiger radiologischer Parameter hinsichtlich der Beurteilbarkeit einer möglichen Läsion der Rotatorenmanschette und eines Humeruskopfhochstandes und dient zudem als prognostischer Marker für den Erfolg einer chirurgischen Intervention bei Läsion der Rotatorenmanschette, jedoch muss letztlich immer die Klinik und die Symptomatik bei Diagnose und Therapieplanung mit berücksichtigt werden.

Weiterhin ist der gemessene Unterschied von 1,2 mm im klinischen Alltag zwar klein, der gemessene signifikante Unterschied unterstreicht aber doch die Unvergleichbarkeit der akromiohumeralen Abstände in Röntgen und MRT. Die Zielsetzung unserer Arbeit konnte folglich erfüllt werden.

4.5 Schlussfolgerung

Ein wichtiger radiologischer Parameter zur Beurteilung des Schultergelenkes ist der akromiohumerale Abstand. Definiert ist der AHA als kürzester Abstand zwischen der unteren Begrenzung des Akromions und dem höchsten Punktes des Humeruskopfes, gemessen an einer konventionellen *true*-anterior-posterior Röntgenaufnahme der Schulter im Stand oder im Sitzen. Der Normwert beträgt 7-14mm (Cotton and Rideout, 1964), (Weiner and Macnab, 1970).

Die Bestimmung des AHAs ist Teil der Standarddiagnostik der Schulter. Ein reduzierter akromiohumerale Abstand gibt Hinweise auf eine mögliche Läsion der Rotatorenmanschette (Goutallier et al., 2011). Zudem gilt der AHA als guter prognostischer Marker für die chirurgische Intervention bei vorliegender Läsion der Rotatorenmanschette (Goutallier et al., 2011; Kim et al., 2018).

In der Literatur finden sich einige Studien zur Vergleichbarkeit des akromiohumeralen Abstandes bei MRT und Röntgen. Dabei wurden jeweils Patienten mit Läsion der Rotatorenmanschette untersucht. Hier konnte für Patienten mit Ruptur der Rotatorenmanschette gezeigt werden, dass der AHA in MRT signifikant kleiner ist als im Röntgen (Mirzayan et al., 2020; Saupe et al., 2006; Werner et al., 2008).

Bisher noch nicht untersucht wurde die Vergleichbarkeit beider Modalitäten bei Patienten mit intakter Rotatorenmanschette. Ebenso wurden bisher nie die unterschiedlichen Projektionsfaktoren von Röntgen und MRT berücksichtigt. Dies ist in dieser Dissertation erstmals der Fall.

Hypothese dieser Arbeit war, dass der AHA auch bei Patienten mit intakter Rotatorenmanschette im Röntgen signifikant größer ist als im MRT. Sie ließ sich durch diese Arbeit bestätigen.

Es zeigte sich im Röntgen ein signifikant größerer AHA von $10.4 \pm 2.4\text{mm}$ im Vergleich zu $9,2 \pm 1,8\text{mm}$ im MRT. Der AHA im Röntgen war also im Durchschnitt 1,2mm signifikant größer als im MRT (Hufeland et al., 2020).

Diskussion und Schlussfolgerungen

Wird der AHA in einer Standard MRT-Aufnahme gemessen, so ist der gemessene Wert kleiner als in der vergleichbaren Aufnahme im konventionellen Röntgen.

Der vermeintlich verminderte akromiohumerale Abstand kann so mit einem Humeruskopfhochstand und einer möglichen Läsion der Rotatorenmanschette assoziiert werden.

Um im klinischen Alltag eine mögliche Fehlinterpretation zu vermeiden, muss sich der Unterschied zwischen Röntgen und MRT ins Bewusstsein gerufen werden:

„Der AHA gemessen im MRT ist bei einem Schultergelenk mit intakter Rotatorenmanschette signifikant kleiner als in der konventionellen Röntgenaufnahme. Die im MRT gemessenen AHA Werte sollten also im klinischen Alltag kein Entscheidungskriterium darstellen.“ (Hufeland et al., 2020)

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

- Ahovuo, J., Paavolainen, P., Slätis, P., 1984. The diagnostic value of arthrography and plain radiography in rotator cuff tears. *Acta Orthop Scand* 55, 220–223.
<https://doi.org/10.3109/17453678408992341>
- Aumüller, G., Aust, G., Conrad, A., Engele, J., Kirsch, J., 2014. *Duale Reihe Anatomie*, 3rd ed. Thieme, Stuttgart.
- Beard, D.J., Rees, J.L., Cook, J.A., Rombach, I., Cooper, C., Merritt, N., Shirkey, B.A., Donovan, J.L., Gwilym, S., Savulescu, J., Moser, J., Gray, A., Jepson, M., Tracey, I., Judge, A., Wartolowska, K., Carr, A.J., CSAW Study Group, 2018. Arthroscopic subacromial decompression for subacromial shoulder pain (CSAW): a multicentre, pragmatic, parallel group, placebo-controlled, three-group, randomised surgical trial. *Lancet* 391, 329–338.
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32457-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32457-1)
- Beirer, M., Imhoff, A.B., Braun, S., 2017. Impingement-Syndrome der Schulter. *Orthopäde* 46, 373–386. <https://doi.org/10.1007/s00132-017-3402-x>
- Bigliani, L.U., Ticker, J.B., Flatow, E.L., Soslowsky, L.J., Mow, V.C., 1991. The relationship of acromial architecture to rotator cuff disease. *Clin Sports Med* 10, 823–838.
- Cotton, R.E., Rideout, D.F., 1964. TEARS OF THE HUMERAL ROTATOR CUFF; A RADIOLOGICAL AND PATHOLOGICAL NECROPSY SURVEY. *J Bone Joint Surg Br* 46, 314–328.
- Deutsche Vereinigung für Schulter- und Ellenbogenchirurgie (DVSE) e.V., 2017. *Bildgebung in der Schulter- und Ellenbogenchirurgie*.
- Duralde, X.A., Gauntt, S.J., 1999. Troubleshooting the supraspinatus outlet view. *J Shoulder Elbow Surg* 8, 314–319. [https://doi.org/10.1016/s1058-2746\(99\)90152-0](https://doi.org/10.1016/s1058-2746(99)90152-0)
- Ellman, H., 1990. Diagnosis and treatment of incomplete rotator cuff tears. *Clin. Orthop. Relat. Res.* 64–74.
- Ellman, H., Hanks, G., Bayer, M., 1986. Repair of the rotator cuff. End-result study of factors influencing reconstruction. *J Bone Joint Surg Am* 68, 1136–1144.
- Fehring, E.V., Rosipal, C.E., Rhodes, D.A., Lauder, A.J., Puumala, S.E., Feschuk, C.A., Mormino, M.A., Hartigan, D.E., 2008. The radiographic acromiohumeral interval is affected by arm and radiographic beam position. *Skeletal Radiol* 37, 535–539. <https://doi.org/10.1007/s00256-008-0467-y>
- Getz, J.D., Recht, M.P., Piraino, D.W., Schils, J.P., Latimer, B.M., Jellema, L.M., Obuchowski, N.A., 1996. Acromial morphology: relation to sex, age, symmetry, and subacromial enthesophytes. *Radiology* 199, 737–742.
<https://doi.org/10.1148/radiology.199.3.8637998>
- Giphart, J.E., van der Meijden, O.A.J., Millett, P.J., 2012. The effects of arm elevation on the 3-dimensional acromiohumeral distance: a biplane fluoroscopy study with normative data. *J Shoulder Elbow Surg* 21, 1593–1600.
<https://doi.org/10.1016/j.jse.2011.11.023>
- Goutallier, D., Le Guilloux, P., Postel, J.-M., Radier, C., Bernageau, J., Zilber, S., 2011. Acromio humeral distance less than six millimeter: Its meaning in full-thickness rotator cuff tear. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research* 97, 246–251. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2011.01.010>
- Graichen, H., Bonél, H., Stammberger, T., Englmeier, K.H., Reiser, M., Eckstein, F., 2001. Sex-specific differences of subacromial space width during abduction,

- with and without muscular activity, and correlation with anthropometric variables. *J Shoulder Elbow Surg* 10, 129–135.
<https://doi.org/10.1067/mse.2001.112056>
- Gruber, G., Bernhardt, G.A., Clar, H., Zacherl, M., Glehr, M., Wurnig, C., 2010. Measurement of the acromiohumeral interval on standardized anteroposterior radiographs: a prospective study of observer variability. *J Shoulder Elbow Surg* 19, 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2009.04.010>
- Hébert, L.J., Moffet, H., Dufour, M., Moisan, C., 2003. Acromiohumeral distance in a seated position in persons with impingement syndrome. *J Magn Reson Imaging* 18, 72–79. <https://doi.org/10.1002/jmri.10327>
- Hufeland, M., Brusis, C., Kubo, H., Grassmann, J., Latz, D., Patzer, T., 2020. The acromiohumeral distance in the MRI should not be used as a decision criterion to assess subacromial space width in shoulders with an intact rotator cuff. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* <https://doi.org/10.1007/s00167-020-06090-6>
- Inman, V.T., Saunders, J.B., Abbott, L.C., 1996. Observations of the function of the shoulder joint. 1944. *Clin Orthop Relat Res* 3–12.
<https://doi.org/10.1097/00003086-199609000-00002>
- Jn, C., Jm, O., K, H., Cr, D., 2010. Superior Humeral Head Migration Occurs After a Protocol Designed to Fatigue the Rotator Cuff: A Radiographic Analysis [WWW Document]. *Journal of shoulder and elbow surgery.*
<https://doi.org/10.1016/j.jse.2010.03.017>
- Kim, I.-B., Jung, D.W., Suh, K.T., 2018. Prediction of the Irreparability of Rotator Cuff Tears. *Arthroscopy* 34, 2076–2084. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2018.02.033>
- Kumar, P., Chetwynd, J., Evans, A., Wardle, G., Crick, C., Richardson, B., 2011. Interrater and intrarater reliability of ultrasonographic measurements of acromion-greater tuberosity distance in healthy people. *Physiother Theory Pract* 27, 172–175. <https://doi.org/10.3109/09593985.2010.481012>
- Mayerhoefer, M.E., Breitenseher, M.J., Wurnig, C., Roposch, A., 2009. Shoulder impingement: relationship of clinical symptoms and imaging criteria. *Clin J Sport Med* 19, 83–89. <https://doi.org/10.1097/JSM.0b013e318198e2e3>
- McCreesh, K.M., Crotty, J.M., Lewis, J.S., 2015. Acromiohumeral distance measurement in rotator cuff tendinopathy: is there a reliable, clinically applicable method? A systematic review. *Br J Sports Med* 49, 298–305.
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2012-092063>
- Mirzayan, R., Donohoe, S., Batech, M., Suh, B.D., Acevedo, D.C., Singh, A., 2020. Is there a difference in the acromiohumeral distances measured on radiographic and magnetic resonance images of the same shoulder with a massive rotator cuff tear? *J Shoulder Elbow Surg.* <https://doi.org/10.1016/j.jse.2019.10.020>
- Navarro-Ledesma, S., Luque-Suarez, A., 2018. Comparison of acromiohumeral distance in symptomatic and asymptomatic patient shoulders and those of healthy controls. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 53, 101–106.
<https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.02.013>
- Neer, C.S., 2005. Anterior acromioplasty for the chronic impingement syndrome in the shoulder. 1972. *J Bone Joint Surg Am* 87, 1399.
<https://doi.org/10.2106/JBJS.8706.cl>
- Patte, D., 1990. Classification of rotator cuff lesions. *Clin Orthop Relat Res* 81–86.
- Pijls, B.G., Kok, F.P., Penning, L.I.F., Guldemon, N.A., Arens, H.J., 2010. Reliability study of the sonographic measurement of the acromiohumeral distance in symptomatic patients. *J Clin Ultrasound* 38, 128–134.
<https://doi.org/10.1002/jcu.20674>

- Poppen, N.K., Walker, P.S., 1976. Normal and abnormal motion of the shoulder. *J Bone Joint Surg Am* 58, 195–201.
- Ruchholtz, S., Wirtz, D.C., 2019. Orthopädie und Unfallchirurgie essentials: Intensivkurs zur Weiterbildung, 3., vollständig überarbeitete und erweiterte. ed. Thieme.
- Saupe, N., Pfirrmann, C.W.A., Schmid, M.R., Jost, B., Werner, C.M.L., Zanetti, M., 2006. Association Between Rotator Cuff Abnormalities and Reduced Acromiohumeral Distance. *American Journal of Roentgenology* 187, 376–382. <https://doi.org/10.2214/AJR.05.0435>
- Urwin, M., Symmons, D., Allison, T., Brammah, T., Busby, H., Roxby, M., Simmons, A., Williams, G., 1998. Estimating the burden of musculoskeletal disorders in the community: the comparative prevalence of symptoms at different anatomical sites, and the relation to social deprivation. *Ann Rheum Dis* 57, 649–655. <https://doi.org/10.1136/ard.57.11.649>
- Weiner, D.S., Macnab, I., 1970. Superior migration of the humeral head. A radiological aid in the diagnosis of tears of the rotator cuff. *J Bone Joint Surg Br* 52, 524–527.
- Werner, C.M.L., Conrad, S.J., Meyer, D.C., Keller, A., Hodler, J., Gerber, C., 2008. Intermethod agreement and interobserver correlation of radiologic acromiohumeral distance measurements. *J Shoulder Elbow Surg* 17, 237–240. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2007.06.002>
- Yoshida, Y., Matsumura, N., Yamada, Y., Yamada, M., Yokoyama, Y., Matsumoto, M., Nakamura, M., Nagura, T., Jinzaki, M., 2020. Evaluation of three-dimensional acromiohumeral distance in the standing position and comparison with its conventional measuring methods. *J Orthop Surg Res* 15. <https://doi.org/10.1186/s13018-020-01935-9>

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. Thilo Patzer danke ich für die interessante Aufgabenstellung dieser Dissertation und die Betreuung meiner Arbeit.

Herrn Privatdozent Dr. med. Hug Aubin möchte ich meinen Dank für seine Mitbetreuung und Unterstützung ausdrücken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Privatdozent Dr. med. Martin Hufeland. Stets ein zuverlässiger Ansprechpartner hat er mich mit Engagement bei der Entstehung meiner Arbeit begleitet.

Herrn Dr. med. Hannes Kubo danke ich für seine tatkräftige Unterstützung bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse dieser Arbeit.

Ich danke meiner Familie für ihre unermüdliche Unterstützung und wertvollen Ratschläge.