

Aus der Orthopädischen Klinik und Poliklinik Großhadern
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. Dipl. Ing. V. Jansson

**Die operative Behandlung der Tuberkulum majus Fraktur
des Humerus – Eine biomechanische Analyse**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Volker Alexander Braunstein
aus Offenburg
2006

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. habil. Dr. Ing. W. Plitz

Mitberichterstatter: Prof. Dr. H. Hertlein
Priv. Doz. Dr. P. Biberthaler

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. S. Hinterwimmer

Dekan: Prof. Dr. med. D. Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 16.11.2006

Für meine Eltern

Inhalt

1. Einleitung	5
2. Theoretische Grundlagen und Literaturübersicht	7
2.1 Anatomie des Schultergelenks	7
2.2 Biomechanik des Schultergelenks	12
2.3 Humeruskopffrakturen	14
2.4 Repositions- und Stabilisierungsverfahren bei Humeruskopffrakturen	20
3. Material und Methode	22
3.1 Präparate	22
3.2 Versuchsdurchführung	25
3.3 Versuchsauswertung	31
4. Ergebnisse	32
4.1 Mechanische Primärstabilität	32
4.2 Versagensmechanismen	37
5. Diskussion	39
5.1 Frischpräparate	39
5.2 Formalinfixierte Präparate	42
6. Zusammenfassung	44
7. Literaturverzeichnis	46
8. Danksagung	55
9. Lebenslauf	56

1. Einleitung

Frakturen des Tuberkulum majus humeri zählen zu den häufigen Schultergelenksverletzungen [Horak et al., 2001; Lind et al., 1975; Court-Brown et al.1989]. Bemerkenswert ist, dass die Inzidenz dieser Verletzung deutlich ansteigt. Dies geht vor allem auf alpines Skifahren und Snowboard-Fahren zurück [Kocher et al., 1996; Kocher et al., 1998].

Zur Diagnosestellung stehen die konventionelle Röntgenaufnahme sowie die CT-Untersuchung zur Verfügung. Besteht zusätzlich der klinische Verdacht einer Schädigung der Rotatorenmanschette, so kann eine Sonographie oder Kernspintomographie Aufschluss über das Ausmaß der Verletzung bringen [Reinus et al., 1998].

Ist eine Tuberkulum majus Fraktur um mehr als 1 cm disloziert oder um 45 Grad und mehr verkippt, so besteht nach der Klassifikation nach Neer eine Indikation zur osteosynthetischen Versorgung [Neer et al., 1970]. Mittlerweile wird vor allem bei jungen und sportlichen Patienten schon ab einer kranialen Fragmentdislokation von 0,1 – 0,5 cm [Norlin et al., 2003; Gerber et al., 1997; Park et al., 1997] die Notwendigkeit einer operativen Reposition und osteosynthetischen Stabilisierung empfohlen.

Nach einer Osteosynthese stellt das Tuberkulum majus die häufigste Pseudarthrose im Bereich des proximalen Humerus dar [Gerber et al., 1997]. Bei der akuten Frakturversorgung kann die Pseudarthrosenentstehung am effektivsten durch ein exaktes chirurgisches Vorgehen verhindert werden [Williams et al., 2000].

Somit spielt die mechanische Stabilität der Frakturversorgung im Bereich des Tuberkulum majus eine herausragende Rolle. Eine hohe Primärstabilität ermöglicht die frühfunktionelle physiotherapeutische Beübung und ist wichtig für ein gutes funktionelles Ergebnis [Kristiansen et al., 1989].

Dennoch gibt es bisher keine Untersuchungen zur Primärstabilität der Osteosynthesetechniken bei Frakturen des Tuberkulum majus humeri.

Da Frischpräparate nur sehr begrenzt verfügbar sind und von ihnen ein potentiell Infektionsrisiko ausgeht, werden im Rahmen von biomechanischen Untersuchungen häufig formalinfixierte Präparate verwendet [McAfee et al., 1985; Zou et al., 1991]. Formalinfixierte Präparate werden dabei als Korrelat für osteopenischen Knochen verwendet [Koval et al., 1996], obwohl deren histologische Struktur [Viidik et al., 1966] und die Knochendichte [Blanton et al., 1968] durch die Fixierung scheinbar nicht verändert werden. Am Tuberkulum majus sind bisher keine Untersuchungen durchgeführt worden, welche frische und formalinfixierte Präparate bei der biomechanischen Testung der Frakturversorgung vergleichen.

Ziel dieser Studie war es folglich, die Primärstabilität der drei gängigsten Osteosyntheseverfahren: 1. Transossäre Naht, 2. Spongiosaschrauben-Osteosynthese und 3. Zuggurtung mit Ankerschraube zur Versorgung einer Tuberkulum majus Fraktur an frischen und formalinfixierten Humeruspräparaten zu untersuchen.

Folgende spezifische Fragen sollten anhand dieser Studie geklärt werden:

1. Welche der drei untersuchten Osteosynthesemethoden bietet die höchste Primärstabilität zur Versorgung einer Tuberkulum majus Fraktur?
2. Wie groß sind die quantitativen Unterschiede zwischen den drei Operationstechniken?
3. Welche Art von Versagensmechanismen zeigen die jeweiligen Operationsverfahren?
4. Gibt es Unterschiede zwischen frischen und formalinfixierten Präparaten bezüglich der Primärstabilität?
5. Zeigen sich beim Vergleich von Osteosynthesen bei frischen und formalinfixierten Präparaten unterschiedliche Versagensmechanismen?

2. Theoretische Grundlagen und Literaturübersicht

2.1 Anatomie des Schultergelenks

Charakteristisch für die knöchernen Anteile des Glenohumeral-Gelenks ist neben dem Missverhältnis zwischen der Gelenkflächengröße von Humeruskopf (ca. 24 cm²) und der Cavitas glenoidalis (ca. 6 cm²), die flache Gelenkpfanne.

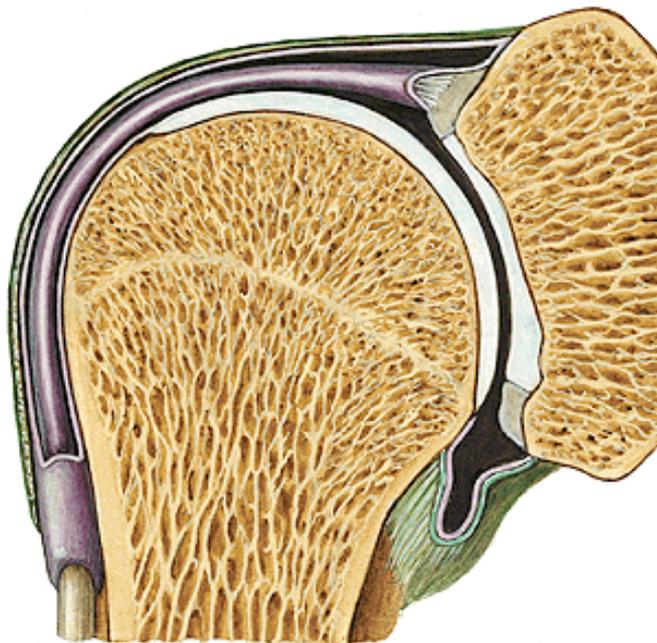


Abb. 1: Glenohumeralgelenk (aus Sobotta-Anatomieatlas – 20. Auflage 1993, Urban u. Fischer)

Aus beiden Faktoren resultiert zum einen ein hoher Grad an Bewegungsfreiheit, jedoch zum anderen die hohe Luxationsneigung des Glenohumeral-Gelenks.

Die Klavikula ist über das Sternoclaviculare-Gelenk die einzige knöchernen Verbindung des Schultergürtels mit dem Thorax. Die Scapula ist insgesamt als eine Art „T-Träger-Konstruktion“ zu verstehen, die Spina scapulae stellt dabei eine Art

Druckstrebe dar [Anetzberger et al., 1995]. Diese Konstruktion gewährleistet einen hohen Grad an Verwindungssteifigkeit. Die nach dorsal und ventral auslaufenden Fortsätze der Scapula, Acromion und Processus coracoideus, werden durch das Ligamentum coracoacromiale im Sinne einer Zuggurtung miteinander verbunden. Gemeinsam mit der schaufelförmigen Unterfläche des Acromions und dem Processus coracoideus bildet das Ligamentum coracoacromiale den Fornix humeri.

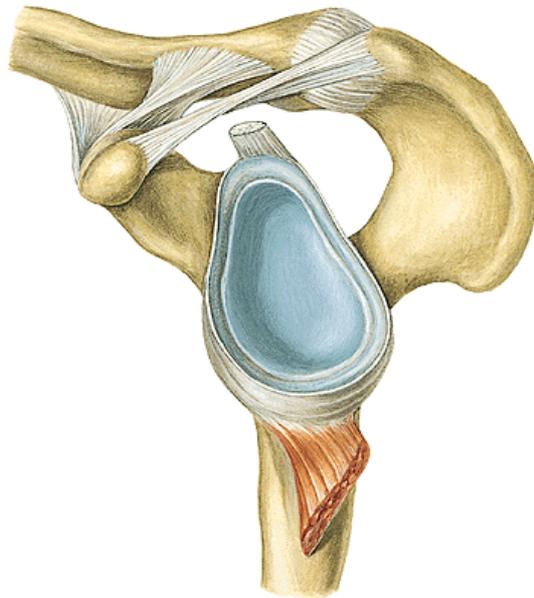


Abb. 2: Processus coracoideus, Ligamentum coracoacromiale und Acromion bilden gemeinsam den Fornix humeri (aus Sobotta-Anatomieatlas – 20. Auflage 1993, Urban u. Fischer)

Dieser bietet als Ansatz für einige Schultermuskeln, wie dem M. coracobrachialis, dem Caput breve des M. biceps brachii sowie dem M. deltoideus günstige Hebelarme.

Des Weiteren stellt der Fornix humeri eine kraniale Barriere gegen Verschiebungen des Humeruskopfes nach oben dar, welche besonders bei überraschenden Krafteinwirkungen, wie einem Sturz auf den ausgestreckten Arm, zur Wirkung kommt.

Bei lockerer aufrechter Körperhaltung liegt die Scapulafläche in einem Winkel von ca. 30° zur Frontalebene geneigt, der Angulus superior befindet sich auf Höhe der 2. Rippe, der Margo medialis ist zwei bis drei Querfinger lateral der Dornfortsatzreihe. Eine Verringerung der oben genannten Luxationsneigung wird durch das Labrum glenoidale hervorgerufen, welches die Cavitas glenoidalis ringförmig, randerhöhend und gelenkfächenvergrößernd umgibt.

Die lange Bizepssehne setzt am superioren Anteil der Glenoidgelenkfläche an und bildet gemeinsam mit dem Labrum glenoidale sowie der Sehne des Caput longum des M. triceps, welche am inferioren Anteil der Cavitas glenoidalis ansetzt, ein komplexes, periartikuläres Fasersystem. Neben der bereits erwähnten Verringerung der Luxationsneigung sorgt diese funktionelle Einheit für eine beträchtliche Verringerung der Querdehnung des Gelenkknorpels bei höheren Gelenkdrücken [Pauwels, 1965], des weiteren wird eine dynamische Zuggurtung des Glenoids erreicht [Huber et al., 1997]. Die lange Bizepssehne verläuft innerhalb der Gelenkkapsel über das Caput humeri hinweg und tritt zwischen Tuberkulum minus und Tuberkulum majus in den 2 bis 5 cm langen Sulcus intertubercularis.

Die Mm. supraspinatus, infraspinatus, teres minor und subscapularis bilden gemeinsam die funktionelle Einheit der Rotatorenmanschette (Abb. 3).

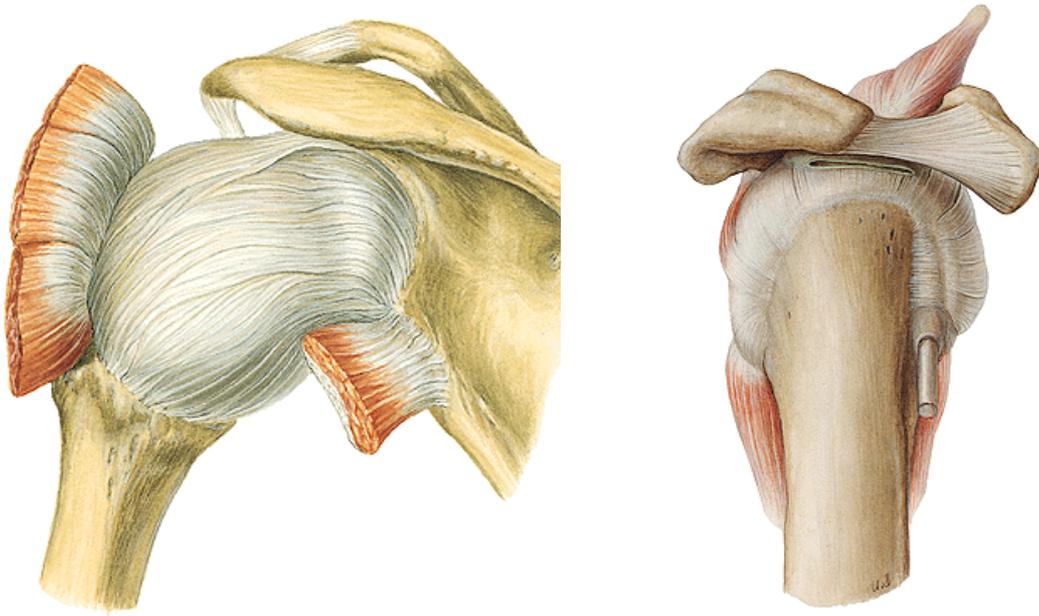


Abb. 3: Die Mm. supraspinatus, infraspinatus, teres minor und subscapularis bilden als funktionelle Einheit die Rotatorenmanschette. Diese umgibt den Humeruskopf kappenförmig (aus Sobotta-Anatomieatlas – 20. Auflage 1993, Urban u. Fischer)

Der M. supraspinatus entspringt der Fossa supraspinata und setzt am superioren Anteil des Tuberkulum majus an, die Hauptfunktion ist die Abduktion des Oberarmes. Die Mm. infraspinatus und teres minor haben ihren Ursprung in der Fossa infraspinata (M. infraspinatus) und an der Margo lateralis der Scapula (M. teres minor), der Ansatz befindet sich am dorsalen Anteil des Tuberkulum majus. Die Hauptfunktion beider Muskeln ist die Außenrotation des Oberarms. Der Ursprung des M. subscapularis befindet sich im Bereich der Fossa subscapularis, der Ansatz am Tuberkulum minus, die Hauptfunktion ist die Innenrotation des Oberarmes. Der Humeruskopf ist somit, mit Ausnahme des Recessus axillaris, zirkulär von der Rotatorenmanschette umgeben. Neben der Bewegung im Glenohumeral-Gelenk spielt die Rotatorenmanschette bei der Zentrierung des Humeruskopfes in die Cavitas glenoidalis eine wesentliche Rolle [Wülker et al., 1994; Sharkey et al., 1994]. Auch die lange Bizepssehne trägt bei Elevation des Armes zur Zentrierung des

Humeruskopfes bei [Rodowsky et al., 1995; Matsen et al., 1998] und muss somit als funktioneller Teil der Rotatorenmanschette gesehen werden.

Die A. suprascapularis, welche aus dem Truncus thyrocervicalis der A. subclavia entspringt, versorgt von oben her den dorsalen Schulterbereich. Sie tritt innerhalb der Fossa infraspinata in den oberen Teil des M. infraspinatus ein und anastomosiert am Unterrand des Collum scapulae mit der A. circumflexa scapulae, welche aus der A. subscapularis hervorgeht. Die A. circumflexa scapulae zieht über die Vorderfläche des Caput longum des M. triceps brachii zur medialen Achsellücke. Die A. circumflexa humeri posterior gibt Äste nach kranial, dorsal und auf die laterale Seite des Humeruskopfes ab. Der ventrale Schulterbereich wird oberflächlich vom R. deltoideus der A. thoracoacromialis versorgt, von caudal tritt die A. circumflexa humeri anterior an die Gelenkkapsel heran.

Der N. supraspinatus sorgt für die sensible Innervation der kranialen und dorsalen Anteile der Gelenkkapsel. Die Gelenkäste des N. supraspinatus verlaufen, anliegend an der Unterseite des Ligamentum coracoacromiale, im Verschieberaum zwischen der Oberfläche des M. supraspinatus und dem Fornix humeri. Nervenäste der Nn. subscapularis und musculocutaneus ziehen zur Vorderseite des Schultergelenks. An seiner Abgangsstelle aus dem Fasciculus dorsalis liegt der N. axillaris nur durch wenig lockeres Bindegewebe getrennt dem Übergang des M. subscapularis zu dessen Sehne auf. Der N. axillaris steht vor allem im Bereich seiner Ursprungsregion in enger Beziehung zur Gelenkkapsel des Glenohumeral-Gelenks.

Die meist sehr ausgedehnte Bursa subdeltoidea trennt den M. deltoideus vom Tuberkulum majus und vom Humeruskopf. Zwischen Bursa subacromialis, welche sich unterhalb des Acromions und des Fornix humeri befindet und sich bis in die Fossa supraspinata fortsetzen kann, und Bursa subdeltoidea besteht häufig eine enge Verbindung. Beide Bursae zusammen werden als subacromiales Nebengelenk bezeichnet [Pfuhl, 1934].

Die Gelenkkapsel, welche dorsal nur sehr dünn ausgeprägt ist, umschließt als weiter, schlaffer Sack mit einem Volumen von ca. 20 cm³ das Tuberkulum majus und minus und zieht bis zur Knochen-Knorpel-Grenze des Caput humeri. Außer den Ligg. glenohumeralia superius, medium und inferius besitzt die Gelenkkapsel, im

Gegensatz zu anderen großen Gelenken, keine weiteren wesentlichen Verstärkungszüge. Die Ligg. glenohumerale tragen zur Stabilisierung des Gelenks in der Endstellung der Abduktion und Außenrotation bei. Die in der Neutralstellung vorhandene Aussackung der Gelenkkapsel bildet den Recessus axillaris, welcher bei der Elevation des Armes angespannt wird. Da der Gelenkkapsel in der Endstellung der Abduktion keine unterstützende Muskelsehne anliegt, kommt in dieser Stellung dem Recessus axillaris eine entscheidende Bedeutung bezüglich der kaudalen Stabilisierung zu [Ovesen et al., 1986; Turkel et al., 1981].

2.2 Biomechanik des Schultergelenks

Der große Grad an Bewegungsfreiheit der oberen Extremität beruht zu großen Anteilen auf dem Schultergürtel, welcher neben dem Glenohumeral-Gelenk aus dem Acromioclavicular-Gelenk, dem Sternoclavicular-Gelenk und der Scapulothorakalen-Gleitschicht besteht. Das Glenohumeral-Gelenk alleine erlaubt lediglich eine Abduktion des Armes bis 120° . Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Anschlag des Tuberkulum majus am Glenoidrand die Abduktion aus der Neutral-0-Stellung bereits ab 75° limitiert. Erst die Außenrotation des Humerus ermöglicht eine weitere Abduktion im Glenohumeral-Gelenk bis 120° [Iannotti et al., 1992].

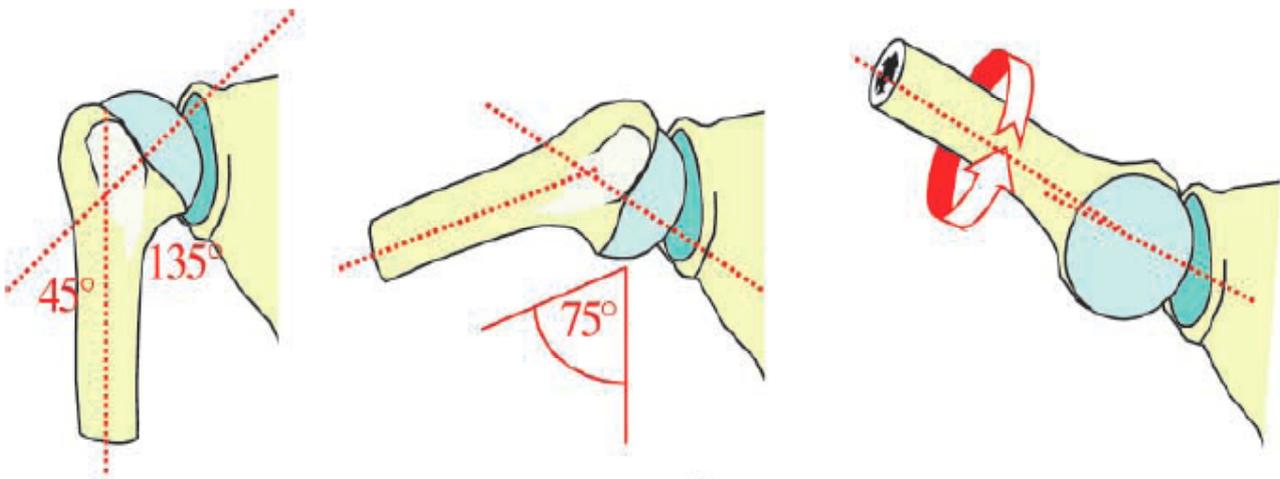


Abb. 4: Das Tuberkulum majus limitiert die Abduktion aufgrund des Anschlags am Glenoidrand. Die Außenrotation des Humerus ermöglicht die Erweiterung der Abduktion (aus Biomechanik der Schulter, F. Gohlke, Orthopäde 2000, 29:834-844)

Die Scapula mit dem Schultergürtel erweitert diesen Bewegungsumfang um weitere 60°. Das heißt, dass der Gesamtablauf der Elevation des Armes von Scapula und Glenohumeral-Gelenk gemeinsam ausgeführt wird. Das Zusammenspiel der Scapula und des Humerus bei der Elevation des Armes wird als scapulohumeraler Rhythmus bezeichnet. Zu Beginn eines Bewegungsablaufs (0-30°) steht das Glenohumeral-Gelenk im Vordergrund [Inman et al., 1948; Poppen et al., 1976]. Im weiteren Verlauf der Abduktion bzw. Elevation bewegen sich Humerus und Scapula im Verhältnis 2:1.

Neben der reinen Rotationsbewegung kann es im Glenohumeral-Gelenk auch zu einer kombinierten Abroll- und Gleitbewegung kommen, was als Translation bezeichnet wird. Bei der Elevation des Armes kommt es so zu einer Verschiebung des Kontaktpunktes des Glenoid nach dorsal, während im Bereich des Humeruskopfes eher die kranial-zentralen Areale belastet werden [Soslowsky et al., 1992]. Das Glenohumeral-Gelenk kann durch diese Verschiebung eine neue, stabile Gleichgewichtsposition einnehmen. Im Falle eines Rotatorenmanschetten-Defektes

oder einer Frozen shoulder kommt es bereits zu Beginn der Elevation zu einem pathologischen Gleiten nach kranial [Haza, 1988].

Die Stabilität des Glenohumeral-Gelenks wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Dabei werden aktive Stabilisatoren (Muskulatur) von passiven Stabilisatoren unterschieden. Zu den zuletzt genannten gehören neben der knöchernen Form des Gelenks, welche durch Humeruskopf, Glenoid und Fornix bestimmt wird, die Gelenkkapsel und das Labrum glenoidale, der negative intraartikuläre Druck, auch als intraartikuläres Vakuum bezeichnet [Hoffmeyer, 1992], sowie die Adhäsionskräfte der Gelenkanteile, welche durch die Gelenkflüssigkeit zustande kommen. Die Bedeutung der stabilisierenden Wirkung jedes einzelnen der genannten Faktoren hängt von der Stellung des Gelenks ab. Zudem besteht eine Rangordnung unter den stabilisierenden Faktoren [Gohlke, 2000]. Die Gelenkkapsel vermag einen um den Faktor 10 höheren Widerstand gegen eine Dezentrierung des Glenohumeral-Gelenks zu leisten als dies dem negativen intraartikulärem Druck [Gibb et al., 1991] oder dem Labrum glenoidale unter Gelenkkompression [Lippit et al., 1993] möglich ist. Bei geringer bis mittlerer Abduktion wird jedoch die Gelenkkapsel kaum unter Spannung gesetzt. So wird die kapsuloligamentäre Sicherung wohl erst dann in Anspruch genommen, wenn alle anderen Mechanismen zur Stabilisierung versagt haben.

2.3 Humeruskopffrakturen

Frakturen des Humeruskopfes sind häufige Verletzungen, sie machen 4-5% aller Frakturen [Laing, 1956], bzw. 45% der Humerusfrakturen [Rose et al., 1982] aus. Die im Verlauf der Jahre stetige Zunahme der Inzidenz [Bengner et al., 1988] beträgt in etwa 105 Frakturen des Humeruskopfes pro 100000 Personenjahre [Rose et al.; 1982; Horak et al., 1975]. Die Frakturhäufigkeit steigt mit Zunahme des Lebensalters [Rose et al., 1982], Frauen sind im Durchschnitt 2 – 3 mal häufiger betroffen als Männer [Nordquist et al., 1995]. Beide Faktoren weisen die Osteoporose als eindeutigen Risikofaktor aus [Horak et al., 1975].

Verschiedene Mechanismen können zu Humeruskopffrakturen führen. Neben direkten Anpralltraumen sowie der forcierten Rotation des Oberarms führt der Sturz auf die ausgestreckte Hand am häufigsten zu einer Humeruskopffraktur [Laing, 1956]. Eine Kombinationsbewegung aus forcierter Abduktion und Außenrotation kann zu einer Luxationsfraktur mit Absprengung des Tuberkulum majus führen. Hintere Luxationsfrakturen sind im Vergleich zu vorderen deutlich seltener und werden durch Stromunfälle und epileptischen Anfällen hervorgerufen [Wilson et al., 1949; Shaw, 1971; Salem, 1983; Din et al., 1983; Hawkins et al., 1987].

Dislokationen der bei Humeruskopffrakturen entstehenden Fragmente werden durch die Zugrichtung der mit ihnen in Verbindung stehenden Sehnen vorgegeben: Das Schafffragment wird von der Pectoralis-major-Sehne nach medial gezogen. Ein frakturiertes Tuberkulum majus kann durch Zug des M. supraspinatus nach kranial und insbesondere durch Zug von M. infraspinatus und M. teres minor nach dorsal dislozieren. Die Sehne des M. subscapularis zieht analog ein Tuberkulum-minus-Fragment nach medial und kaudal. Die Kopfkalotte rutscht bei Frakturen im anatomischen Hals meist nach (dorso-) kaudal in den Recessus axillaris ab [Melzer und Werner, 2002].

Entsprechend werden in der Einteilung nach Codman bei Humeruskopffrakturen 4 Hauptfragmente wie folgt unterschieden [Codman, 1934]. Die Kopfkalotte, das Tuberkulum majus und minus sowie der proximale Humerusschaft (Abb. 5).

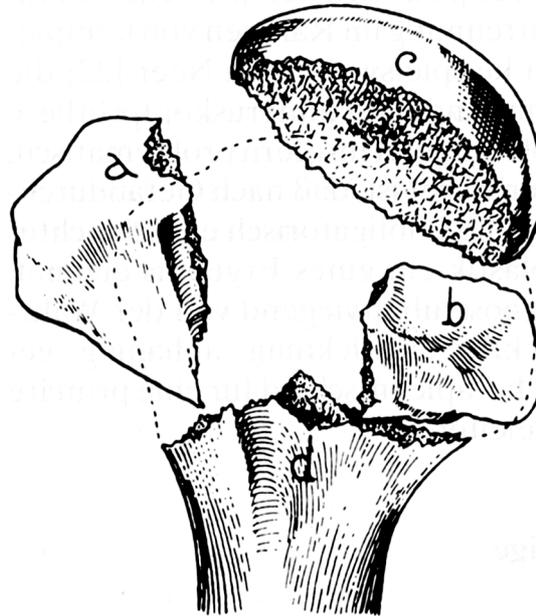


Abb. 5: Codman-Klassifikation (1934): a = Tuberkulum majus b = Tuberkulum minus
c = Kalotte d = Humerusschaft

Neer etablierte 1970 die auch heute noch weltweit gebräuchlichste Einteilung. Wie Codman beschreibt Neer 4 Hauptfragmente, zusätzlich nimmt er jedoch Rücksicht auf den Grad der Dislokation sowie auf Luxationsfrakturen. Eine Dislokation besteht laut dieser Klassifikation bei Fragmentverschiebungen um mehr als 1 cm oder bei Abkipfung eines oder mehrerer Fragmente um mehr als 45°. Head-Splitting-Frakturen, bei denen der gelenkbildende Anteil des Humeruskopfes in zwei oder mehrere Fragmente gebrochen ist, führt Neer in einer gesonderten Gruppe auf [Neer, 1970] (Abb. 6).

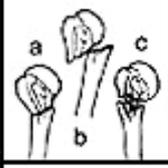
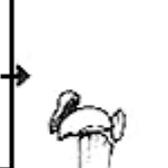
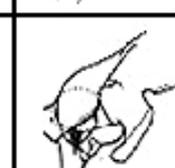
	2-part	3-part	4-part	Articular Surface
Anatomical Neck				
Surgical Neck				
Greater Tuberosity				
Lesser Tuberosity				
Fracture-Dislocation	Anterior 			
	Posterior 			
Head-Splitting				

Abb. 6: Neer-Klassifikation der Humeruskopffrakturen (aus Rockwood CA and Matsen FA. The Shoulder, Philadelphia, W.B. Saunders, 1990)

Bei 3- und 4-Fragmentfrakturen unterscheidet Neer nicht zwischen Brüchen auf Höhe des anatomischen Halses und des chirurgischen Halses, was jedoch bezüglich der Prognose von hoher Relevanz ist. Ebenso ist eine prognostisch durchaus

relevante Gliederung der 2-, 3- und 4-Fragmentfrakturen nicht möglich [Brunner, 2002]. Hier sind die isolierten Tuberkulum majus Frakturen nicht eigenständig bezeichnet. Die AO-Klassifikation, welche drei Gruppen (A - extrakapsulär, B – teilweise intrakapsulär, C - intrakapsulär) mit ansteigendem Schweregrad unterscheidet, wurde von Jakob und der AO-Gruppe beschrieben [Jakob et al., 1984]. Die Tuberkulum majus Fraktur firmiert als Typ A1. Die drei Hauptgruppen werden jeweils in neun weitere Untergruppen unterteilt, daraus ergeben sich insgesamt 27 Frakturtypen. Diese Einteilung berücksichtigt die vaskuläre Versorgung des proximalen Humerus und somit das Nekroserisiko. Die AO-Klassifikation erlaubt somit zwar eine genauere morphologische Beschreibung, ist aber aufgrund des Umfangs für die tägliche Therapieentscheidung problematisch [Brunner, 2002].

Habermayer berücksichtigt in seiner Klassifikation sowohl das Vierfragmentkonzept von Neer als auch die prognostisch wichtige Höhe des Frakturverlaufs [Brunner, 2002]. (Typ-O-Frakturen sind nicht dislozierte Zwei-Fragment-Frakturen. Typ-A-Frakturen beinhalten Zwei-Fragment-Frakturen mit Abriss des Tuberkulum majus oder minus (Typ A I oder Typ A II). Typ-B-Frakturen verlaufen auf Höhe des chirurgischen Halses und werden entsprechend der Fragmentanzahl in drei weitere Untergruppen eingeteilt werden (Typ B I bis Typ B III). Typ-C-Frakturen verlaufen im anatomischen Hals und werden wie Typ-B-Frakturen in weitere drei Untergruppen eingeteilt. Typ-X-Frakturen repräsentieren vordere und hintere Luxationsfrakturen (Typ X I und Typ X II). Hierbei wird die Tuberkulum-majus Fraktur als Typ A I klassifiziert).

Sowohl die intra- als auch die interobserver Reliabilität ist jedoch bezüglich der Einteilung der Fraktur, nach der Neer-Klassifikation und der AO-Klassifikation, in die jeweilige Gruppe und Untergruppe gering [Siebenrock et al., 1993].

Häufige Symptome einer Humeruskopffraktur sind neben Schwellung und Schmerzen deutliche Bewegungseinschränkungen. In den meisten Fällen ist eine Schonhaltung mit an den Oberkörper angelegtem Oberarm auffällig. Plexusschädigungen und Gefäßverletzungen sind nicht ungewöhnlich und kommen sogar bei nicht dislozierten Humeruskopffrakturen vor [Hayes et al., 1983; Smyth, 1969]. Druckschmerzen, vor allem in Bereich des Tuberkulum majus, sind sehr häufig und äußern sich oft bei Frakturen des Tuberkulum majus. Hämatome können

sich bis auf die Thoraxwand und den Unterarm erstrecken und treten in den meisten Fällen erst nach 24 – 48 Stunden auf.

Eine körperliche Untersuchung der Schulter ist normalerweise aufgrund der deutlichen Schmerzen nicht möglich, eine neurovaskuläre Beurteilung sollte jedoch immer erfolgen. Die Fraktur des Tuberkulum majus kann allein durch die körperliche Untersuchung nicht suffizient von komplexeren Frakturen des Humeruskopfes unterschieden werden, was die radiologische Bildgebung obligat macht.

Sowohl bei ventralen als auch bei dorsalen Luxationsfrakturen kann die Schulterkontur unterbrochen sein. Begleitverletzungen des Thorax müssen ebenso berücksichtigt werden, da es in seltenen Fällen sogar zu einer intrathorakalen Penetration des Humeruskopfes kommen kann [Hardcastle et al., 1981].

Im Rahmen der weiterführenden diagnostischen Maßnahmen sind die konventionellen Röntgenbilder mit einer True-ap-, einer Outlet-view sowie einer axialen Aufnahme (Traumaserie) führend. Die konventionelle röntgenologische Darstellung der Schulter in drei Ebenen ermöglicht die Beurteilung der Anzahl der Frakturfragmente, deren Dislokation und Rotationsfehlstellung. Im Falle von komplexen Frakturen kann eine Computertomographie hilfreich sein. Bei akuten Humeruskopffrakturen besteht in der Regel keine Indikation für eine Kernspintomographie. Im weiteren Verlauf kann diese jedoch, nach Ausschluss einer Fraktur, zur Klärung möglicher Weichteilschäden hilfreich sein.

Da mehr als 85% aller Humeruskopffrakturen nicht oder nur geringgradig disloziert sind, kann in diesen Fällen eine konservative Therapie durchgeführt werden. Nach einer primären Ruhigstellung der oberen Extremität für 7-14 Tage im Gilchrist-Verband erfolgt eine frühfunktionelle Beübung. Bertoft berichtet, dass der größte Zugewinn an Bewegungsumfang zwischen der dritten und achten Woche nach Trauma erfolgt [Bertoft et al., 1984]. Jedoch ist auch zu beachten, dass eine zu aggressive Beübung zu Frakturdislokationen und Pseudarthrosen führen kann [Szyzkowitz et al., 1993]. Röntgenkontrollen sollten nach Beendigung der Ruhigstellung, dann nach einer Woche und anschließend in zweiwöchigem Abstand erfolgen. Nach 6 bis 8 Wochen ist die Fraktur normalerweise durchbaut.

Eine operative Therapie hingegen wird bei einer Fragmentdislokation größer als 1 cm oder Verkipfung der Fragmente um mehr als 45° gefordert [Neer, 1990]. Brunner hält eine Verkipfung des Humeruskopfes um mehr als 30° bereits für therapiebedürftig [Brunner, 2002]. Geber sieht bei einer Dislokation des Tuberkulum majus von mehr als 0,5 cm Handlungsbedarf und empfiehlt die offene Reposition und Stabilisierung [Gerber et al., 1997]. Norlin beschreibt einen signifikanten Anstieg der Impingement-Symptomatik bei Dislokationen des Tuberkulum majus von mehr als 0,1 cm [Norlin et al., 2003].

2.4 Repositions- und Stabilisierungsverfahren bei Humeruskopffrakturen

Besteht die Indikation zur Reposition, so kann diese als geschlossenes Verfahren, als geschlossenes Verfahren in Kombination mit perkutaner Stabilisierung oder als offenes Verfahren mit interner Fixierung durchgeführt werden.

Bezüglich der rein geschlossenen Repositionsverfahren werden eine große Anzahl verschiedener Methoden beschrieben [Böhler, 1963; Milch, 1949; Waston-Jones, 1943; Gurd, 1940; Sever, 1937; Jones, 1906]. Im Falle von primär instabilen oder nach Reposition instabilen Frakturen kann unter Bildwandlerkontrolle eine perkutane Stabilisierung mit Kirschnerdrähten durchgeführt werden. Ist eine geschlossene Reposition nicht durchführbar, muss die offene Reposition mit interner Stabilisierung erfolgen. Dislozierte Mehrfragmentfrakturen sollten möglichst früh reponiert und stabilisiert werden, um das Nekroserisiko zu mindern [Brunner et al., 1995]. Der deltoideo-pectorale Zugang nach Kocher sowie der Delta-Split Zugang stellen die gebräuchlichsten operativen Zugangswege dar.

Dislozierte Tuberkulum minus Frakturen sind selten, zu finden sind sie z.B. nach dorsalen Luxationen des Glenohumeral-Gelenks. Häufig kann dann die lange Bizepssehne in den Frakturspalt dislozieren und eine Einheilung verhindern. Daraus resultiert häufig eine Pseudarthrose. Eine Osteosynthese kann am besten mit Corticalis-Kleinfragment-Schrauben und Beilagscheiben durchgeführt werden.

Zweifragmentfrakturen im Bereich des anatomischen Halses sind selten, müssen aber aufgrund der vaskulären Situation und der daraus resultierenden Nekrosegefahr als Notfall angesehen werden. Eine operative Stabilisierung wird in der Regel durch Kleinfragment-Spongiosa-Schrauben durchgeführt, vor allem bei älteren Patienten kann eine Kopfprothese indiziert sein. Transkutane Pins, welche zur Reposition und Stabilisierung eingebracht werden können, ergeben kein übungstabiles Ergebnis, eine frühfunktionelle Beübung ist somit nicht möglich.

Da bei isolierten Frakturen im chirurgischen Hals die Durchblutung des Humeruskopfes nicht gefährdet ist, besteht eine Indikation zur operativen Stabilisierung nur dann, wenn schon primär oder nach geschlossener Reposition eine metaphysäre Trümmerzone oder eine Weichteilinterposition besteht und dadurch keine ausreichende Stabilität erreicht werden kann.

Dreifragmentfrakturen am chirurgischen Hals sind meist durch Beteiligung des Tuberkulum majus gekennzeichnet. Eine Aussprengung des Tuberkulum minus tritt hingegen nur sehr selten auf. In den meisten Fällen besteht die Indikation zur Osteosynthese. Neben winkelstabilen Plattenosteosynthesen finden hier auch gekreuzte Kirschner Drähte oder Zuggurtungsosteosynthesen Anwendung.

Liegt bei einer Vierfragmentfraktur eine Verschiebung des metaphysären Endes gegen das Kopffragment um mehr als 5 mm vor, so ist die Prognose eher schlecht, da in solchen Fällen in der Regel keine Weichteilverbindung zwischen Kopfkalotte und metaphysärem Schaftende mehr besteht. Besteht die Indikation zur Operation, so sollte diese in den ersten 12 bis 24 Stunden durchgeführt werden, da die Ergebnisse einer frühen Osteosynthese günstiger sind [Brunner et al, 1995].

Besteht nach Zweifragmentfrakturen mit Abriss des Tuberkulum majus aufgrund der oben genannten Kriterien die Indikation zur Osteosynthese, so ist eine Vielzahl von verschiedenen Techniken beschrieben. Transossäre Nähte zur Refixation des Tuberkulum majus, wie von Post beschrieben [Post, 1967], sind neben der Schraubenosteosynthese mit Spongiosa-Grossfragment-Schrauben mit Beilagscheibe und der Zuggurtungsosteosynthese häufig angewendete Verfahren.

3. Material und Methode

3.1 Präparate

In dieser Studie wurden 21 frische (durchschnittliches Alter: 33.9 ± 5.8 Jahre, (Tab. 1)) und 21 formalinfixierte (durchschnittliches Alter: 77.2 ± 9.3 Jahre, (Tab. 2)) Humeruskopfpräparate verwendet. Alle Präparate wurden mit Scapula, Humerusschaft und sämtlichen angrenzenden Muskelstrukturen entnommen und bei allen Präparaten wurde sichergestellt, dass keine knöchernen Schäden und kein Schaden im Bereich der Rotatorenmanschette vorlagen. Die Frischpräparate wurden umgehend bei -30°C eingefroren. Die formalinfixierten Präparate wurden in formalingetränkten Tüchern luftdicht gelagert.

Naht			
Präparate-Nr.	Alter / y	Gewicht / kg	Körpergröße / cm
1 – 1	31	102	191
2 – 1	22	58	165
3 – 1	34	78	183
4 – 1	43	80	172
5 – 1	27	73	178
6 – 1	47	71	169
7 – 1	29	76	179

2 Schrauben			
Präparate-Nr.	Alter / y	Gewicht / kg	Körpergröße / cm
1 – 2	29	57	164
2 – 2	34	78	183
3 – 2	37	63	168
4 – 2	27	73	178
5 – 2	32	49	168
6 – 2	41	82	179
7 – 2	29	76	179

Draht			
Präparate-Nr.	Alter / y	Gewicht / kg	Körpergröße / cm
1 – 3	32	49	168
2 – 3	41	87	183
3 – 3	31	102	191
4 – 3	35	66	172
5 – 3	26	79	176
6 – 3	37	63	168
7 – 3	47	71	169

Tabelle 1: Auflistung der humanen Frischpräparaten

Naht			
Präparate-Nr.	Alter / y	Gewicht / kg	Körpergröße / cm
8 – 1	76	45	173
9 – 1	58	70	174
10 – 1	88	44	164
11 – 1	55	85	169
12 – 1	65	76	176
13 – 1	92	50	163
14 – 1	64	71	177

2 Schrauben			
Präparate-Nr.	Alter / y	Gewicht / kg	Körpergröße / cm
8 – 2	79	45	168
9 – 2	94	45	173
10 – 2	93	69	168
11 – 2	76	73	168
12 – 2	69	82	183
13 – 2	85	70	180
14 – 2	69	82	183

Draht			
Präparate-Nr.	Alter / y	Gewicht / kg	Körpergröße / cm
8 – 3	66	70	181
9 – 3	87	80	178
10 – 3	83	48	170
11 – 3	80	70	166
12 – 3	78	56	168
13 – 3	76	60	160
14 – 3	89	68	159

Tabelle 2: Auflistung der formalinfixierten Präparate

3.2 Versuchsdurchführung

Vor der Präparation und der Testdurchführung wurden die Frischpräparate in einem Wasserbad bei Raumtemperatur für zehn Stunden aufgetaut. Bei der Präparation wurde die Sehne des M. supraspinatus auf einer Länge von 3 cm erhalten. Ansonsten wurden sämtliche Weichteile im Bereich des Humerus und die gesamte Scapula entfernt. Der distale Anteil des Humerus wurde ebenfalls entfernt, so dass die Länge des proximalen Humerus 20 cm betrug. Anschließend wurden die Humerusschäfte mittels Methylmethacrylat-Zemet (Palacos, Merck KG, D-64271 Darmstadt) in Stahlhülsen einzementiert, so dass der distale Anteil des Humerus Kontakt mit dem Boden der Stahlhülse hatte. Die Länge der Stahlhülsen betrug 7 cm, der Durchmesser 6 cm.

Anschließend wurden mit einer oszillierenden Säge Tuberkulum majus Frakturen generiert. Ausgehend von der Basis des proximalen Bereichs des Tuberkulum majus wurde der Schnitt ausgehend von der Horizontalen in einem 60° Winkel nach distal, direkt in laterale und inferiore Richtung geführt (Abb. 7). Danach wurden die generierten Frakturen reponiert und provisorisch durch eine Spitz-Spitze Zange fixiert.

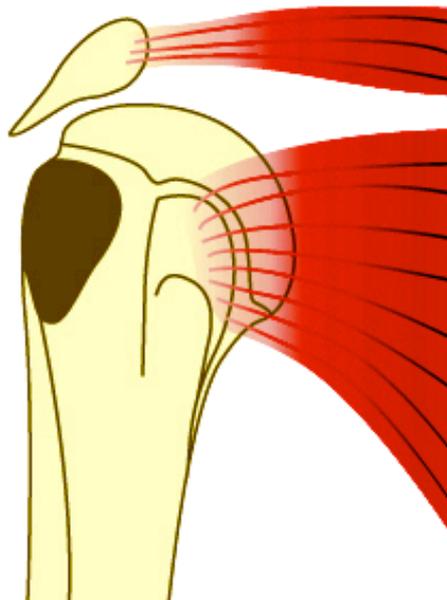


Abb. 7: Standardisiert generierte Tuberkulum majus Fraktur

Schließlich wurden sowohl die Frischpräparate als auch die formalinfixierten Präparate zufällig einer der drei folgenden Gruppen zugeteilt.

1. Osteosynthese durch transossäre Naht
2. Osteosynthese durch zwei Schrauben
3. Osteosynthese durch Drahtcerclage mit Ankerschraube

Die Osteosynthesen wurden folgendermaßen durchgeführt:

1. Transossäre Naht:

Im anterioren Bereich der Fraktur wurden drei gekreuzte, transossäre Nähte mittels Ethibond-Fäden Stärke 3 (Ethicon, Eppendorf, D-22339 Hamburg) angebracht (Abb. 8). Der posteriore Frakturbereich wurde bezüglich der osteosynthetischen Versorgung nicht berücksichtigt, da im Rahmen einer operativen Versorgung dieser aufgrund des operativen Zugangs nicht erreichbar ist.

2. Zwei Schrauben:

Zwei Spongiosa-Grossfragment-Stahl-Schrauben, Durchmesser 6,5 mm, (Synthes, D-79224 Umkirch) mit Beilagscheiben wurden von lateral nach medial durch die Frakturzone appliziert (Abb. 9a, Abb. 9b). Die Länge der Schrauben wurde dem entsprechenden Humeruskopf angepasst und so gewählt, dass die gegenüberliegende, subkortikale Zone erreicht, der angrenzende Knorpel aber nicht verletzt wurde.

3. Zuggurtungsosteosynthese mittels Drahtcerclage und Ankerschraube:

Ein 1,25 mm Osteosynthesedraht (Synthes, D-79224 Umkirch) wurde kranial und medial um die Sehne des M. supraspinatus geschlungen und in einem achterförmigen Verlauf über dem Tuberkulum majus distal an einer kortikalen Grossfragment-Stahl-Ankerschraube, Durchmesser 4,5 mm, (Synthes, D-79224 Umkirch) mit Beilagscheibe fixiert (Abb. 10a). Die Ankerschraube wurde lateral des Sulcus intertubercularis 1,5 cm kaudal des chirurgischen Halses von ventral nach dorsal platziert (Abb. 10b).

Alle Osteosynthesen wurden von einem einzigen erfahrenen Chirurgen durchgeführt.

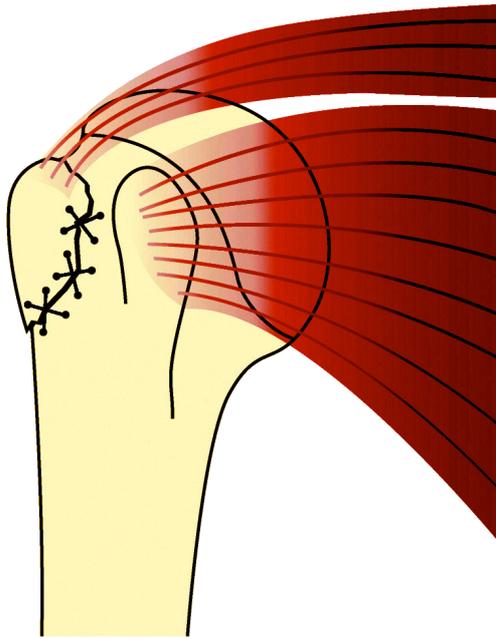


Abb. 8: Osteosynthese mittels 3 gekreuzten Nähten



Abb. 9a: Osteosynthese mittels 2 Schrauben (Ansicht von lateral)

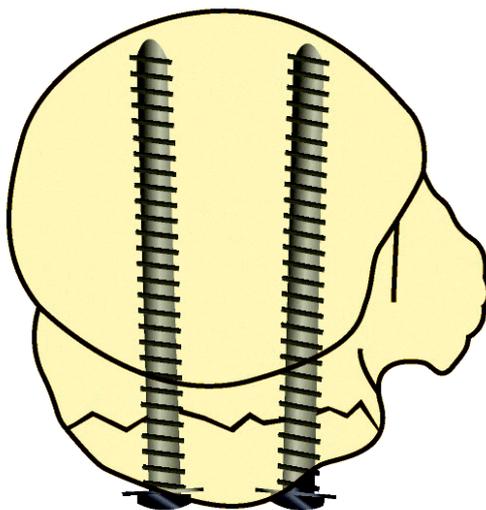


Abb. 9b: Osteosynthese mittels 2 Schrauben (Ansicht von cranial)

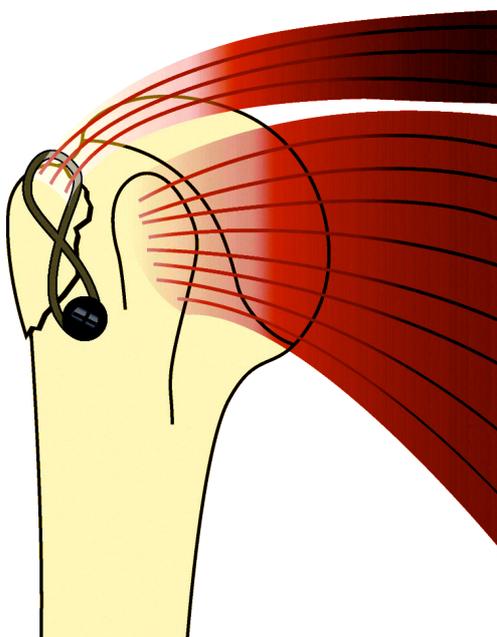


Abb. 10a: Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube (Ansicht von anterior)

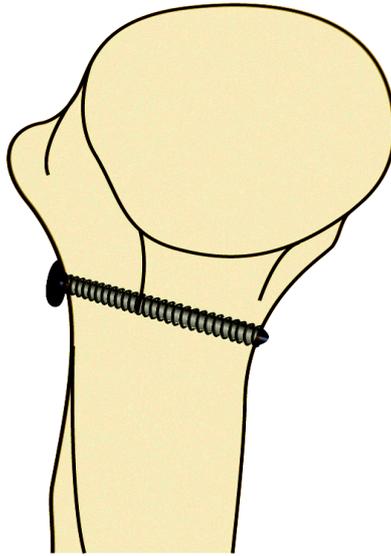


Abb. 10b: Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube (Ansicht von medial)

Zur Durchführung der biomechanischen Belastungstests wurden die in Stahlhülsen einzementierten Humeri in einer speziell angefertigten Testvorrichtung in 0 Grad Abduktionsstellung fixiert (Abb. 11). Um eine Abduktionsbewegung zu simulieren, wurde ein Mersilene-Band, Breite 4 mm, (Ethicon, Eppendorf, D 22339 Hamburg) an die Sehne des M. supraspinatus fixiert. Die Verbindung erfolgte durch vier Flaschenzugnähte am ventralen und dorsalen Anteil der Sehne mit Ethibond-Fäden, Stärke 3 (Ethicon, Eppendorf, D-22339 Hamburg). Durch eine Materialprüfmaschine ZWICK Z 010 (Zwick GmbH &Co KG, D-89079 Ulm/Einsingen) wurde über das Mersilene-Band ein konstanter horizontaler Zug mit 5 mm pro Sekunde durchgeführt (Abb. 11a u. 11b).

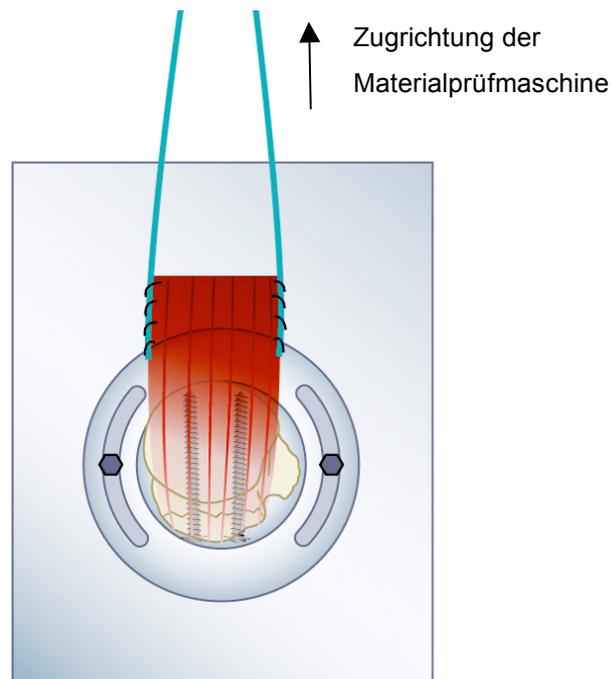


Abb. 11a: Nach Annaht eines Mersilenebandes an die Supraspinatussehne wurde eine Belastungssimulation in 0° Abduktion durchgeführt

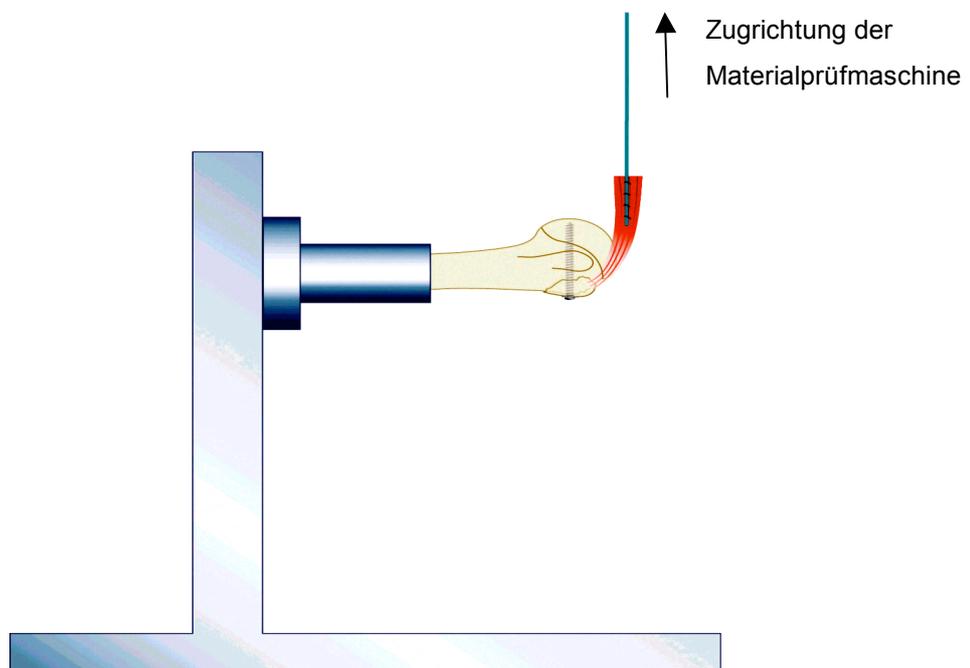


Abb. 11b: Seitenansicht des Versuchsaufbaus mit dem, in einer Stahlhülse einzementierten Humeruskopf

3.3 Versuchsauswertung

Die mechanische Stabilität wurde durch die maximale Zugkraft bestimmt, welche notwendig war, um einen plötzlichen Abfall der Ausrisskraftkurve hervorzurufen.

Die Ausrisskraft wurde für jedes Präparat in Newton (N) gemessen, für die jeweiligen Osteosynthesemethoden wurden die Durchschnittswerte errechnet.

Vorversuche, bei welchen nur das Mersilene-Band in gleicher Weise wie bei den weiteren Testdurchführungen belastet wurde, zeigten eine charakteristische Lastkurve, welche bei allen weiteren Tests in gleicher Weise erkannt werden konnten.

Zum Vergleich der Osteosyntheseverfahren wurde ein Anova on Ranks-Test angewandt. Entsprechend der Anpassung nach Bonferroni-Dunn wurde als Signifikanzniveau $p < 0.01$ gewählt.

4. Ergebnisse

4.1 Mechanische Primärstabilität

In der Gruppe der frischen Präparate zeigte sich, dass die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube die durchschnittlich größte mechanische Stabilität (GMS) aufwies. Hier wurde ein Durchschnittswert von 1054 N (± 125 N) erreicht. Die Spongiosaschrauben-Osteosynthese erzielte eine durchschnittliche GMS von 821 N (± 152 N) und mit transossären Nähten wurde durchschnittlich eine GMS von 488 N (± 106 N) bewerkstelligt. Es zeigten sich sowohl hoch signifikante Unterschiede zwischen der GMS der Gruppen Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube und Spongiosaschrauben-Osteosynthese ($p=0,01$) als auch zwischen den Gruppen Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube und transossäre Nähte ($p<0,001$). Und auch zwischen der GMS der Gruppen Spongiosaschrauben-Osteosynthese und transossäre Nähte waren die Unterschiede hoch signifikant ($p<0,001$) (Tab. 3 u. Abb. 12).

Präparate-Nr.	Transossäre Naht	2 Schrauben	Drahtcerclage
1 – 1 / 2 / 3	406,42	895,1	1140,85
2 – 1 / 2 / 3	441,61	867,19	989,56
3 – 1 / 2 / 3	437,02	634,02	1068,66
4 – 1 / 2 / 3	413,98	846,36	918,84
5 – 1 / 2 / 3	467,97	584,36	1016,37
6 – 1 / 2 / 3	549,78	949,49	959,09
7 – 1 / 2 / 3	704,26	975,38	1284,89
Mittelwert	488,7	821,7	1054,0
Stabwn.	98,5	141,2	115,8

Tab. 3: Auflistung der absoluten Testergebnisse der größten mechanischen Stabilität (GMS) der Frischpräparate [N]

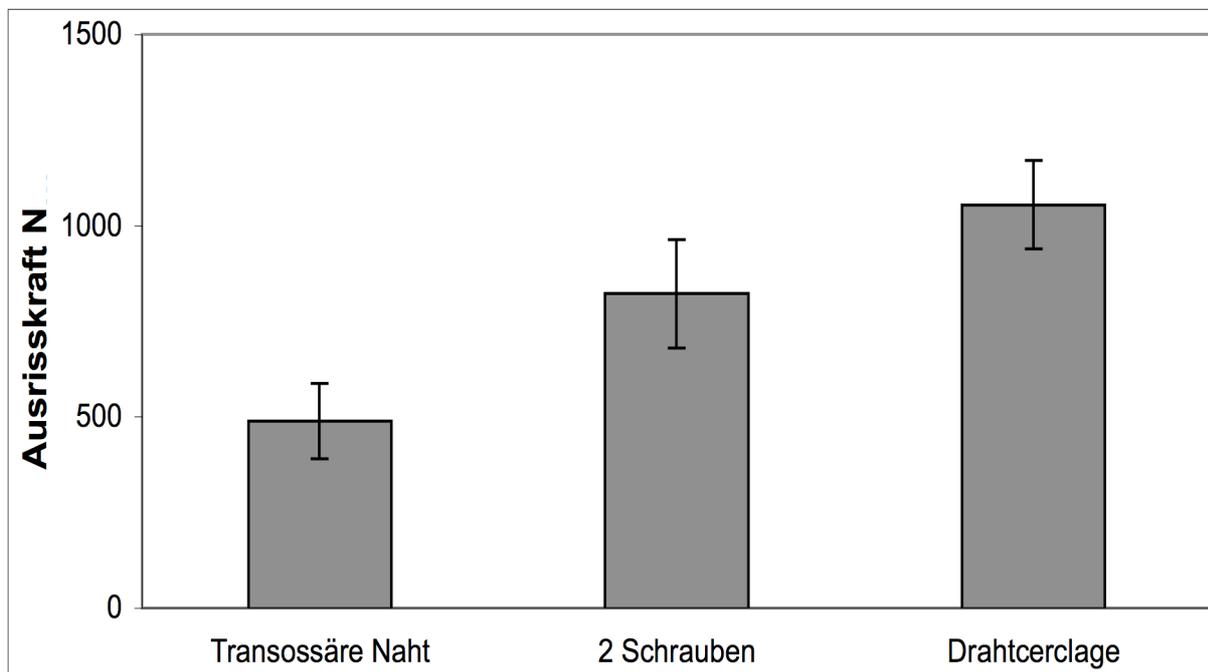


Abb. 12: Graphische Darstellung der Testergebnisse der größten mechanischen Stabilität (GMS) der Frischpräparate

In der Gruppe der formalinfixierten Präparate wies die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube, genau wie in der Gruppe der frischen Präparate, die höchste GMS auf. Hier lag der Durchschnittswert bei 806 N (± 79 N). Mit der Spongiosaschrauben-Osteosynthese konnte ein durchschnittlicher Wert von 563 N (± 49 N) erzielt werden. Die durchschnittliche GMS der transossären Nähte lag bei 263 N (± 46 N). Sowohl zwischen der GMS der Gruppen Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube und Spongiosaschrauben-Osteosynthese ($p < 0,001$), als auch der Gruppen Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube und transossären Nähten ($p < 0,001$) zeigte sich ein hoch signifikanter Unterschied. Und auch zwischen der GMS der Gruppen Spongiosaschrauben-Osteosynthese und transossäre Nähte ($p < 0,001$) war der Unterschied hoch signifikant (Tab. 4 u. Abb. 13).

Präparate-Nr.	Transossäre Naht	2 Schrauben	Drahtcerclage
8 – 1 / 2 / 3	246,68	571,75	902,86
9 – 1 / 2 / 3	359,54	544,69	886,89
10 – 1 / 2 / 3	260,24	563,07	858,2
11 – 1 / 2 / 3	247,06	471,98	807,35
12 – 1 / 2 / 3	222,17	555,43	704,36
13 – 1 / 2 / 3	233,11	622,53	735,90
14 – 1 / 2 / 3	270,37	610,25	746,45
Mittelwert	262,7	562,8	806,0
Stabwn.	42,2	45,6	73,1

Tab. 4: Auflistung der absoluten Testergebnisse der größten mechanischen Stabilität (GMS) der formalinfixierten Präparate [N]

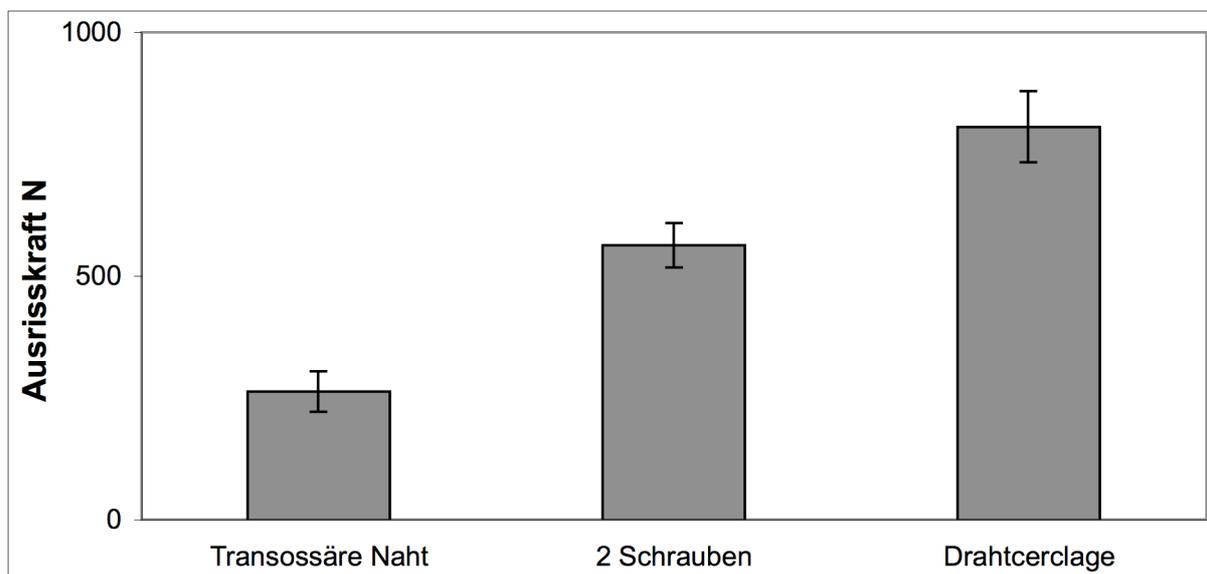


Abb. 13: Graphische Darstellung der Testergebnisse der größten mechanischen Stabilität (GMS) der formalinfixierten Präparate

Beim Vergleich der Ausrisskräfte der frischen Präparate mit den Ausrisskräften der formalinfixierten Präparate zeigten sich signifikante Unterschiede ($p < 0,01$) zwischen den jeweiligen Osteosyntheseverfahren.

Sowohl bei frischen als auch bei formalinfixierten Präparaten zeigte sich, dass durch die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube die höchste Primärstabilität erreicht werden konnte, gefolgt von der Schraubenosteosynthese und den transossären Nähten. Jedoch waren die durchschnittlichen Ausrisskräfte bei den formalinfixierten Präparaten signifikant niedriger (Abb. 14).

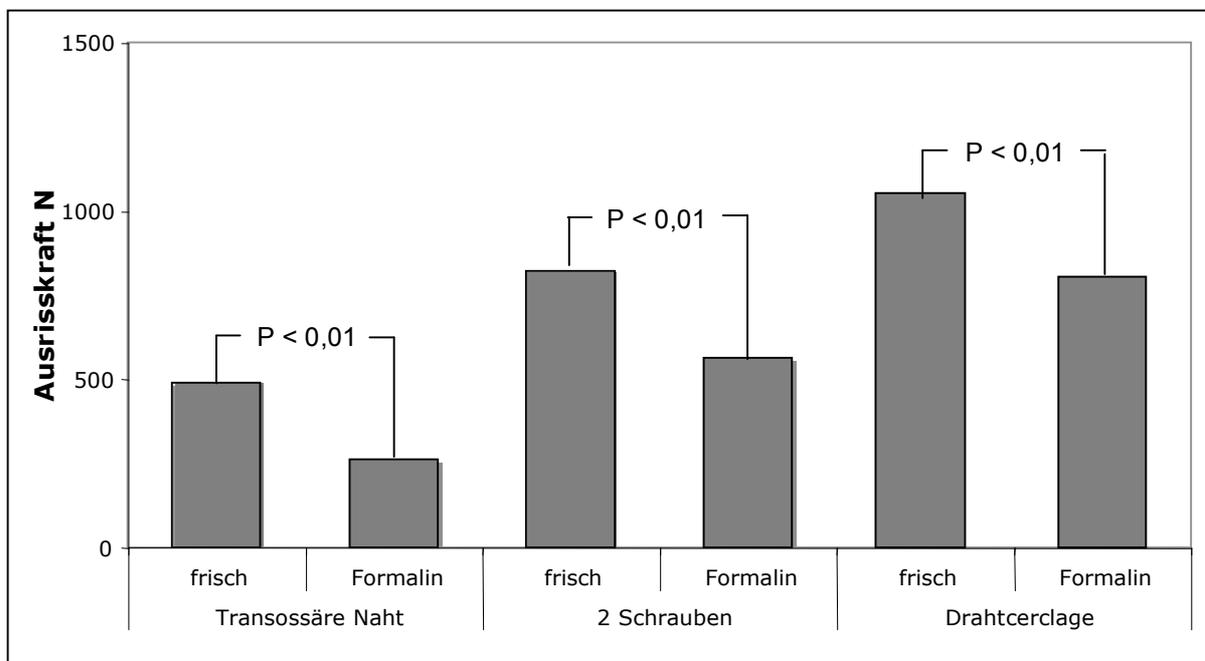


Abb. 14: Graphische Darstellung des statistischen Vergleichs zwischen formalinfixierten und frischen Präparaten. Dabei zeigt sich in allen Fällen ein signifikanter Unterschied

4.2 Versagensmechanismen

In der Gruppe der frischen Präparate kam es bei der Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube in keinem Fall zu einem Versagen der Osteosynthese. Der Versagensmechanismus war in allen sieben Fällen eine durch die Belastung entstandene, sekundäre Fraktur im chirurgischen Hals des Humeruskopfes. Es bestand in keinem der Fälle ein anatomischer Zusammenhang zwischen der Frakturlinie und dem Schraubenloch der Ankerschraube. In der Gruppe der Spongiosaschrauben-Osteosynthese zeigte sich in sechs Fällen eine horizontale Frakturlinie im Bereich des Humeruskopfes auf Höhe der Schraubenlöcher, durch welche die Frakturlinie zog. In einem Fall kam es zur Auslösung des Tuberkulum majus. Um die Schrauben, welche trotz des Versagens im Tuberkulum majus verankert waren, zeigte sich ein Spongiosablock. Bei der Gruppe der transossären Nähte kam es in fünf Fällen zu einem Ausschneiden des Fadenmaterials durch die Kortikalis des Humeruskopfes bei an sich intaktem Knoten und Faden. Zweimal lag ein Bruch des Nahtmaterials bei noch intaktem Knoten vor (Tab. 5).

In der Gruppe der formalinfixierten Präparate kam es bei der Zuggurtungsosteosynthese, genau wie in der Gruppe der frischen Präparate, in keinem Fall zu einem Versagen der Osteosynthese. Auch hier war der Versagensmechanismus in allen sieben Fällen eine durch die Belastung entstandene, sekundäre Fraktur im chirurgischen Hals des Humeruskopfes. Und wie bei der Gruppe der frischen Präparate bestand in keinem der Fälle ein anatomischer Zusammenhang zwischen der Frakturlinie und dem Schraubenloch der Ankerschraube. In der Gruppe der Spongiosaschrauben-Osteosynthese zeigte sich bei den formalinfixierten Präparaten in drei Fällen eine horizontale Frakturlinie im Bereich des Humeruskopfes auf Höhe der Schraubenlöcher, durch welche die Frakturlinie zog. Vier mal kam es zur Auslösung des Tuberkulum majus. Um die Schrauben, welche trotz des Versagens im Tuberkulum majus verankert waren, zeigte sich ein Spongiosablock (Tab. 6).

Präparate-Nr.	Transossäre Naht	2 Schrauben	Drahtcerclage
1 – 1, 2, 3	4	2	1
2 – 1, 2, 3	4	2	1
3 – 1, 2, 3	4	3	1
4 – 1, 2, 3	5	2	1
5 – 1, 2, 3	4	2	1
6 – 1, 2, 3	4	2	1
7 – 1, 2, 3	5	2	1

Tab. 5: Versagensmechanismen der Frischpräparate

Präparate-Nr.	Transossäre Naht	2 Schrauben	Drahtcerclage
8 – 1, 2, 3	4	3	1
9 – 1, 2, 3	5	3	1
10 – 1, 2, 3	4	2	1
11 – 1, 2, 3	4	3	1
12 – 1, 2, 3	4	2	1
13 – 1, 2, 3	4	3	1
14 – 1, 2, 3	4	2	1

Tab. 6: Versagensmechanismen der formalinfixierten Präparate

Versagensmechanismen:

1 = Bruch des chirurgischen Halses ohne Beteiligung des Ankerschrauben-Loches

2 = horizontale Frakturlinie (zwischen Schraubenlöcher) am Humeruskopf

3 = Auslösen des Tuberkulum majus mit Spongiosablock

4 = Ausschneiden des Fadens durch die Kortikalis

5 = Ruptur des Fadens ohne Versagen des Knotens

5. Diskussion

5.1 Frischpräparate

Bei der Testung dreier gängiger Osteosyntheseverfahren, welche zur Versorgung von Tuberkulum majus Frakturen durchgeführt werden, zeigte sich bei frischen Humeruskopfpräparaten, dass die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube die höchste Primärstabilität aufwies. Signifikant niedrigere Ergebnisse erbrachte die Technik mit zwei Großfragmentschrauben. Die Versorgung mit transossären Nähten erzeugte die signifikant niedrigste Primärstabilität.

Es zeigte sich, dass die verschiedenen Osteosyntheseverfahren unterschiedliche Versagensmechanismen präsentierten. Die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube versagte in keinem der Fälle an sich selbst. In allen Fällen war eine Fraktur im chirurgischen Hals des Humeruskopfes erkennbar. Bei der Spongiaschrauben-Osteosynthese zeigte sich am häufigsten eine horizontale Frakturlinie, welche durch die Schraubenlöcher zog. Lediglich in einem Fall kam es zur Auslösung eines Spongiasablocks, welcher um die Schrauben formiert war. Die Technik mit transossären Nähten zeigte zum einen das Ausschneiden des intakten Fadens durch die Kortikalis und zum anderen ein Zerreißen des Fadenmaterials als Versagensmechanismus.

Die auf den Humeruskopf einwirkenden Kräfte bestehen aus einer Kombination von Druck, Verwindung und Scherung. Die genannten Kräfte wurden in vorausgehenden Studien berechnet, indem die einzelnen Muskelkräfte in einem bestimmten Stellungswinkel des Glenohumeral-Gelenks addiert wurden [Inman, 1948; Poppen 1978]. Aus den Belastungsmustern der genannten Studien kann somit die Kraft abgeleitet werden, welche nach Refixation auf das Tuberkulum majus im Falle einer Elevation des Arms wirkt.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Ergebnisse muss davon ausgegangen werden, dass die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube den anderen Osteosyntheseverfahren überlegen ist. Ein wesentlicher Grund dafür besteht in der

Tatsache, dass die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube den Zug der Sehne des M. supraspinatus zur Frakturfixation nutzt. Wegen des Prinzips der Zuggurtungsosteosynthese wird der erwünschte Druck zwischen den Fragmenten durch Zug an der Supraspinatussehne erhöht. Um diesen Effekt optimal nutzen zu können, ist es notwendig die Ankerschraube lateral des Sulcus bicipitalis zu platzieren, da sich in diesem Bereich der Kraftvektor des M. supraspinatus befindet. Proximal wird der Draht durch den Ansatzbereich des M. supraspinatus geführt und umgibt somit breitflächig den superiores Anteil des Tuberculum majus. Durch die breitflächige Verankerung des Osteosynthesedrahtes wird dem Ausreißen des Drahtes vorgebeugt.

Die Ankerschraube wird lateral des Sulcus bicipitalis, im stabilsten Teil des Humeruskopfes [Lill 2002] platziert. Der Versagensmechanismus der Zuggurtungsosteosynthesen mit Ankerschrauben bestand in allen Fällen in einer Fraktur des chirurgischen Halses. In keinem Fall war ein Zusammenhang zwischen Frakturlinie und dem Bohrloch der Ankerschraube zu beobachten. Auch dies unterstreicht die Stabilität dieser Osteosynthesetechnik.

Klinische Studien zeigten, dass Zuggurtungsosteosynthesen bei gesunden und aktiven Patienten mit 3- und 4-Fragment-Frakturen zu einem guten klinischen Ergebnis führten wenn eine gute Knochenqualität vorlag [Hawkins 1986; Ilchmann 1998]. Bei älteren Patienten erbrachte die Zuggurtungsosteosynthese gegenüber der konservativen Behandlung keinen signifikanten Vorteil. Bei der Elevation des Arms erwies sich das Impingement des Osteosynthesematerials als typische Komplikation, was in vielen Fällen eine frühzeitige Materialentfernung notwendig machte [Zyto 1997].

Im Falle der Schraubenosteosynthese werden zwei Spongiosaschrauben in den Humeruskopf eingebracht. Die Schraubenspitze sollte dabei den kontralateralen, subcorticalen Bereich erreichen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass der Knorpel kontralateral liegenden Gelenkfläche nicht beschädigt wird. Dadurch würde es neben einer Knorpelschädigung des Humeruskopfes auch zwangsläufig zu einer Verletzung des Glenoidknorpels kommen. Des Weiteren würden die Schrauben durch eine Verletzung des Knorpels im Bereich des Humeruskopfes ihre Abstützung

einbüßen und die Osteosynthese an sich würde an Stabilität verlieren. In unseren Versuchen zeigte sich bei dieser Osteosynthesemethode als Versagensmechanismus in den meisten Fällen eine horizontal verlaufende Humerkopffraktur zwischen den beiden Schrauben. Die Einbringung von Schrauben im Bereich des Tuberkulum majus muss somit als potentielle Schwächung der knöchernen Struktur und somit als potentielles Frakturrisiko angesehen werden.

Im Allgemeinen kann ein optimaler Schraubenhalt im Humerkopf durch eine Positionierung der Schrauben in der kontralateralen, subchondralen Region erreicht werden [Liew 2000]. Unter der Voraussetzung, dass die Schraubengröße richtig gewählt wurde, erreichen Schrauben mit einem niedrigen Gewindegang eine bessere Wirkung entgegen Hebelkräften als Schrauben mit einem hohen Gewindegang [DeCoster 1990]. Großfragmentschrauben erreichen in spongiösem Knochen höhere Ausrisskräfte als Kleinfragmentschrauben, wobei jedoch zu beachten ist, dass solide und kanülierte Schrauben bezüglich der Ausreißkraft in spongiösem und kortikalem Knochen gleiche Werte erreichen [Leggon 1993]. Im Falle einer Tuberkulum majus Fraktur können, nach einer adäquaten geschlossenen Reposition, die Schrauben perkutan eingebracht werden, wodurch die Weichteile ausgezeichnet geschont werden. Jedoch muss beachtet werden, dass dieses Vorgehen technisch sehr anspruchsvoll ist [Resch 2001].

Dicke, nicht resorbierbare Nahtmaterialien werden bei der operativen Versorgung sowohl von 3- und 4-Fragment Frakturen als auch bei Tuberkulum majus Frakturen verwendet. Durch diese Technik kann der Weichteilschaden auf ein Minimum reduziert werden. Ein subacromiales Impingement oder eine Schädigung von Fraktur-Fragmenten durch Osteosynthesematerialien wie Schrauben, Drähte oder Platten werden in der Literatur beschrieben [Zyto 1997; Green 1996]. Dieser Gefahr kann durch Verwendung von transossären Nähten aus dem Wege gegangen werden. In der Literatur werden gute und ausgezeichnete Resultate beschrieben [Flatow 1991; Hockins 2003; Park 2003]. Diese Studie zeigt jedoch eindeutig Schwachpunkte der transossären Nähte auf. Schon bei relativ geringer Kraftereinleitung traten sowohl Fadenausrisse als auch Risse des Fadenmaterials selbst auf. Nähte im posterioren Frakturbereich können in vivo aufgrund des

eingeschränkten operativen Zugangs nicht durchgeführt werden. Deshalb wurden in dieser Studie nur Nähte im anterioren Frakturbereich durchgeführt. Das Fehlen der posterioren Stabilisierung führe jedoch zu keinen Problemen, da der bereits beschriebene Zug der Sehne des M. supraspinatus keine Spaltbildung zuließ.

5.2 Formalinfixierte Präparate

In der Literatur besteht bei der Verwendung von knöchernen Humanpräparaten zur Testung der Primärstabilität von Frakturversorgungen keine einheitliche Meinung, ob frische oder formalinfixierte Präparate verwendet werden sollen. Im Bereich verschiedener Körperregionen wie dem Unterarm, dem Kniegelenk oder dem Hüftgelenk finden sich in der Literatur Studien, welche ausschließlich formalinfixierte Präparate verwendeten [Jarit 2006, Patel 2006, Candal-Couto 2005]. Der Vorteil der formalinfixierten Präparate liegt zum einen darin, dass bei deren Verwendung keine Infektionsgefahr für den Anwender besteht, zum anderen stehen formalinfixierte Präparate in größerem Umfang zur Verfügung. Dies vereinfacht die Planung und Durchführung von Studien. Ob durch formalinfixierte Präparate eine zuverlässige Aussage bezüglich der größten mechanischen Stabilität gemacht werden kann und ob bei formalinfixierten Präparaten die gleichen Versagensmechanismen zustande kommen wie bei frischen Präparaten, ist jedoch umstritten.

Deshalb verwenden eine Vielzahl unterschiedlicher Autoren lediglich Frischpräparate zur biomechanischen Testung der Primärstabilität [Ahn 2006, Charlson 2006, Drobetz 2006, Zlowodzki 2006, Alfahd 2005].

Koval führt in seiner Studie zur Bestimmung der Stabilität verschiedener Versorgungsarten für Humeruskopffrakturen Belastungstests mit formalinfixierten und frischen Humeruspräparaten durch [Koval 1996]. Dabei stellt die Gruppe der Frischpräparate ein nicht-osteoporotisches Kollektiv und die formalinfixierten Präparate ein osteoporotisches Kollektiv dar.

Bislang jedoch bleibt die Frage unbeantwortet, ob formalinfixierte Präparate geeignet sind, Rückschlüsse auf frische Präparate, v.a. bezüglich der höchstmöglichen Primärstabilität und der Versagensmechanismen zu folgern.

Im Rahmen dieser Studie zeigte sich, dass sowohl bei formalinfixierten als auch bei Frisch-Präparaten die Reihenfolge der Primärstabilität bei der Versorgung von Tuberkulum majus Frakturen identisch ist. Höchste Werte erzielt jeweils die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube gefolgt von der Schraubenosteosynthese. Bei beiden Präparategruppen kamen die niedrigsten Ausrisskräfte durch transossäre Nähte zustande. Sowohl bei den formalinfixierten als auch bei den frischen Präparaten bestanden zwischen den Ausrisskräften der jeweiligen Osteosynthesemethoden signifikante Unterschiede. Jedoch muss unbedingt beachtet werden, dass die Ausrisskräfte der formalinfixierten Präparate in allen Fällen signifikant niedriger waren als bei den frischen Präparaten.

Bezüglich der Versagensmechanismen zeigte sich im Rahmen dieser Studie, dass sowohl bei formalinfixierten als auch bei frischen Präparaten die gleichen Versagensmechanismen beobachtet wurden. Jedoch zeigte sich, dass z.T. erhebliche Unterschiede in der Anzahl der jeweiligen Versagensmechanismen beim Vergleich zwischen formalinfixierten und frischen Präparate bestanden.

Obwohl von formalinfixierten Präparaten keine Rückschlüsse auf die absolute Höhe der Ausrisskräfte noch Rückschlüsse auf die Häufigkeit einzelner Versagensmechanismen von Frischpräparaten gezogen werden konnten, bestanden im Rahmen dieser Studie eindeutige Hinweise dafür, dass Frischpräparate und formalinfixierte Präparate bei der osteosynthetischen Versorgung von Humeruskopffrakturen prinzipiell sehr ähnlich reagieren.

Im Rahmen zukünftiger Studien könnten formalinfixierte Präparate somit sehr gut in Vorversuchen eingesetzt werden.

6. Zusammenfassung

Isolierte Tuberkulum majus Frakturen stellen eine häufige Verletzung bei jungen Patienten dar. Sofern primär keine Fragmentdislokation nach dorso-kranial vorliegt und sich diese im weiteren Verlauf nicht ausbildet, kann diese Verletzung konservativ behandelt werden. Bei OP-Indikation ist die Frage nach der optimalen Operationsmethode, welche der Dislokationskraft durch den Zug des M. supra- und infraspinatus den größtmöglichen Fragmenthalt gegenüberstellt, ungeklärt. Es stehen sich hier die Zuggurtungsosteosynthese mittels Drahtcerclage, die Schraubenosteosynthese und die transossäre Naht als die drei wesentlichen Methoden gegenüber. Ziel der Studie war es, die Primärstabilität dieser drei gebräuchlichsten Operationsverfahren zur Versorgung einer isolierten Tuberkulum majus Fraktur im biomechanischen Experiment zu testen. Außerdem sollte überprüft werden, ob sich frische und formalinfixierte Präparate in gleicher Weise eignen, um die Primärstabilität von Osteosyntheseverfahren im Bereich des Humeruskopfes zu testen.

An 21 humanen Frischpräparaten und an 21 formalinfixierten Präparaten wurde eine Tuberkulum majus Fraktur loco typico generiert. Die Präparate wurden anschließend zufällig drei Gruppen zugeteilt und mit den folgenden Operationsverfahren versorgt: 1. Zuggurtung (Drahtcerclage mit Ankerschraube), 2. Schraubenosteosynthese (zwei GF-Spongiosaschrauben mit Beilagscheibe), 3. Transossäre Naht. Die Präparate wurden anschließend in einer Materialprüfmaschine mittels einem konstanten Zug von 5 mm/min an der erhaltenen und mit einem Mersilene-Band augmentierten Supraspinatussehne aus der Neutral-Null-Position heraus bis zum Ausriss belastet. Als Zeichen für die Primärstabilität wurde die Maximalkraft in Newton (N) gemessen, bei der es zu einem plötzlichen Kraftabfall im Sinne eines Versagens der Operationsmethode kam.

Die Zuggurtungsosteosynthese stellte sich sowohl bei den frischen als auch bei den formalinfixierten Präparaten als das am höchsten belastbare Verfahren heraus, gefolgt von der Schraubenosteosynthese, die transossären Nähte erbrachten bei den frischen und den formalinfixierten Präparaten die niedrigsten Ausrisskräfte. Die Ergebnisse der einzelnen Gruppen wurden mit dem Anova on Ranks-Test

verglichen. Der Unterschied zwischen der Versorgung mittels Zuggurtung und der Schraubenosteosynthese waren sowohl bei den frischen als auch bei den formalinfixierten Präparaten signifikant, ebenso wie der Unterschied zwischen der Zuggurtung und der transossären Naht bzw. der Schraubenosteosynthese und transossärer Naht in beiden Präparategruppen signifikant war. Bei der Überprüfung der Versagensmechanismen zeigten sich zwar sowohl bei den frischen als auch bei den formalinfixierten Präparaten bei den jeweiligen Versorgungsmethoden die gleichen Versagensmechanismen, bei der Häufigkeit der einzelnen Versagensmechanismen kam es jedoch z.T. zu erheblichen Unterschieden.

Gemäß den vorgestellten Ergebnissen sollte die Zuggurtungsosteosynthese als Versorgung der Wahl bei isolierter Tuberkulum majus Fraktur angesehen werden. Ihre Überlegenheit gegenüber den ebenfalls getesteten Verfahren der Schraubenosteosynthese und der transossären Naht ist wahrscheinlich durch das biomechanisch günstige Zuggurtungsprinzip zu erklären. Dieses kann jedoch nur dann optimal genutzt werden, wenn die distale Verankerung der Drahtcerclage in direkter Fortsetzung des Supraspinatuszuges liegt, wofür eine ventrale Ankerschraube benötigt wird.

Sowohl bei frischen als auch bei formalinfixierten Präparaten zeigte sich, dass durch die Zuggurtungsosteosynthese mit Ankerschraube die höchste Primärstabilität erreicht werden konnte, gefolgt von der Schraubenosteosynthese und den transossären Nähten. Jedoch waren die durchschnittlichen Ausrisskräfte bei den formalinfixierten Präparaten signifikant niedriger. Bei den jeweiligen Operationsmethoden wurden die gleichen Versagensmechanismen beobachtet. Bei der Häufigkeit des Auftretens der verschiedenen Versagensmechanismen kam es jedoch in den entsprechenden Gruppen zu z.T. erheblichen Unterschieden. Konkrete Rückschlüsse bezüglich der Primärstabilität und den Versagensmechanismen konnten im Rahmen dieser Studie nicht getroffen werden. Trotzdem können formalinfixierte Präparate aufgrund des ähnlichen Verhaltensmusters z.B. für Vorversuch herangezogen werden.

7. Literaturverzeichnis

Ahn H, Mousavi P, Roths, Reidy D, Finkelstein J, Whyne C. Stability of the metastatic spine pre and post vertebroplasty. *J. Spinal Disord. Tech.* 2006;3:178-182

Alfahd U, Roth SE, Stephen D, Whyne CM. Biomechanical comparison of intramedullary nail and plate fixation for tibiototalcalcaneal arthodesis. *J. Orthop. Trauma* 2005;10:703-708

Anetzberger H, Putz R. The scapula: Principles of Construction and Stress. *Acta anat.* 1996;156:70-80

Bengner U, Johnell O, Redlund-Johnell, I. Changes in the incidence of fractures of the upper end of the humerus during a 3-year period: a study of 2125 fractures. *Clin. Orthop.* 1988;231:179-182

Bertoft ES, Lundh I, Ringqvist I. Physiotherapy after fracture of the proximal end of the humerus. *Scand. J. Rehab. Med.* 1984;16:11-16

Bigliani L. Fractures of the proximal humerus. In: *The shoulder. Rockwood CA and Matsen FA (Hrsg). Saunders, Philadelphia. 1998 Bd II; 755-839*

Blanton PL, Biggs NL. Density of fresh and embalmed human compact and cancellous bone. *Am. J. Phys. Antropol.* 1968;29:39-44

Böhler L. In: *Die Technik der Knochenbruchbehandlung. Ergänzungsband zur 12. und 13. Auflage. Maudrich, Wien 1963*

Brunner U. Humeruskopffrakturen. In: *Schulterchirurgie. Habermayer P (Hrsg). Urban&Fischer, München - Jena 2002;403-436*

Brunner U, Ruchholtz A, Trupka A, Wiedemann E, Habermayer P. Three- and four-part fractures of the proximal humerus in adults: factors to influence the outcome after ORIF. *J. Shoulder Elbow Surg.* 1995;1:63

Candal-Couto JJ, Williams JR, Sanderson PL. Impaired forearm rotation after tension-band-wiring fixation of olecranon fractures: evaluation of the transcortical K-wire technique. *J. Orthop. Trauma* 2005;7:480-482

Charlson MD, Parks BG, Weber TG, Guyton GP. Comparison of plate and screw fixation alone in a comminuted talar neck fracture model. *Foot ankle Int.* 2006;5:340-343

Codman EA. Rupture of the supraspinatus tendon and other lesions in or about the subacromial bursa. In: *The Shoulder. Thomas Todd, Boston. 1934*

Court-Brown CM, Garg A, McQueen MM. The epidemiology of proximal humeral fractures. *Acta Orthop. Scand.* 2001;72:365-371.

DeCoster TA, Heetderks DB, Downey DJ, Ferries JS, Jones W. Optimizing bone screw pullout force. *J Orthop Trauma.* 1990;4:169-174

Din KM, Meggitt BF. Bilateral four-part fractures with posterior dislocation of the shoulder. A case report. *J. Bone Joint Surg.* 1983;65B:176-178

Drobetz H, Bryant AL, Pokorny T, Spitaler R, Leixnering M, Jupiter JB. Volar fixed-angle plating of distal radius extension fractures: influence of plate position on secondary loss of reduction – a biomechanic study in a cadaveric model. *J. Hand Surg (Am).* 2006;4:615-622

Flatow EL, Cuomo F, Maday MG, Miller SR, McIlveen SJ, Bigliani LU. Open reduction and internal fixation of two-part displaced fractures of the greater tuberosity of the proximal part of the humerus. *J Bone Joint Surg Am.* 1991;73:1213-1218

Gerber C, Warner JJP. Alternatives to hemiarthroplasty for complex proximal-humeral fractures. In: *Complex and revision problems in shoulder surgery. Warner JJP, Iannotti JP, Gerber C, (Hrsg), Lippincott-Raven, Philadelphia, 1997, 215-243*

Gibb TD, Sidles JA, Harryman DT, McQuade KJ, Matsen FA. The effect of capsular venting on glenohumeral laxity. *Clin. Orthop.* 1991;268:120-126

Gohlke F. Biomechanik der Schulter. *Orthopäde* 2000;29:834-844

Green A, Norris T. Complications of non-operative management and internal fixation of proximal humerus fractures. In: *Musculoskeletal trauma series – humerus*, Editoren: Flatow E und Ulrich C. Butterworth-Heinemann, Oxford 1996, 106-120

Gurd FB. A simple effective method for the treatment of fractures of the upper part of the humerus. *Am J. Surg.* 1940;47:433-453

Hardcastle PH, Fisher TR. Intrathoracic displacement of the humeral head with fracture of the surgical neck. *Injury* 1981;12:313-315

Hawkins RJ, Bell RH, Gurr K. The three-part fracture of the proximal part of the humerus. Operative treatment. *J Bone Joint Surg.* 1986;68:1410-1414

Hawkins RJ, Neer CS, Pianti RM, Mendoza FX. Locked posterior dislocations of the shoulder. *J. Bone Joint Surg.* 1987;69A:9-18

Hayes MJN, Van Winkle N. Axillary injury with minimally displaced fracture of the neck of the humerus. *J. Trauma* 1987;23:431-433

Haza T. Analysis of the scapulohumeral rhythm. *Nippon Seikeigeka Gakkai Zasshi* 1988;62:1105-1119

Hockings M, Meines JF. Least possible fixation of fractures of the proximal humerus. *Injury.* 2003;34:443-447

Hoffmeyer P. Biomechanik der Schulter-Kinematik und intraartikuläres Vakuum. *Orthopäde* 1992;21:71-74

Horak J, Nilsson BE. Epidemiology of fracture of the upper end of the humerus. *Clin. Orthop.* 1975;112:250-253

Huber WP, Putz RV. Periarticular system of the shoulder joint. *Arthroscopy* 1997;13:680-691

Ianotti J, Gabriel JP, Schenk SL, Evans BG, Mistra S. *J. Bone Joint Surg.* 1992;74:491-500

Ilchmann T, Ochsner PE, Wingstrand H, Jonsson K. Non-operative treatment versus tension-band osteosynthesis in three- and four-part proximal humeral fractures. A retrospective study of 34 fractures from two different trauma centers. *In Orthop.* 1998;22:31-320

Inman V. T., Saunders M. Abbot L. C. Observation on the function of the shoulder joint. *J. Bone Joint Surg.* 1948;26:1-30

Jakob RP, Kristiansen T, Mayo K. Classification and aspects of treatment of fractures of the proximal humerus. In: *Surgery of the shoulder.* Bateman JE, Welsh RP(Hrsg). Decker, Philadelphia 1984

Jarit GF, Kummer FJ, Gibber MJ, Egol KA. A mechanical evaluation of two fixation methods using cancellous screws for coronal fractures of the lateral condyle of the distal femur (OTA type 33B). *J. Orthop. Trauma.* 2006;4:273-276

Jones R. Certain injuries commonly associated with displacement of the head of the humerus. *Br. Med. J.* 1906;1:1385-1386

Kocher MS, Feagin JA Jr. Shoulder injuries during alpine skiing. *Am. J. Sports Med.* 1996;24:665-669

Kocher MS, Dupre MM, Feagin JA Jr. Shoulder injuries from alpine skiing and snowboarding. Aetiology, treatment and prevention. *Sports Med.* 1998;25:201-211.

Kocher T. In: *Beiträge zur Kenntnis einiger praktischer, wichtiger Frakturformen*. Carl Sallmann. 1896

Koval KJ, Blair B, Takei R, Kummer FJ, Zuckermann JD. Surgical neck fractures of the proximal humerus: a laboratory evaluation of ten fixations techniques. *J. Trauma* 1996;40:778-783

Kristiansen B, Angermann P, Larsen TK. Functional results following fractures of the proximal humerus. A controlled clinical study comparing two periods of immobilization. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 1989;108:339-341.

Laing, PG. The arterial supply of the adult humerus. *J. Bone Joint Surg.* 1956;38A:1105-1116

Leggon R, Lindsey RW, Doherty BJ, Alexander J, Noble P. The holding strength of cannulated screws compared with solid core screws in cortical and cancellous bone. *J Orthop Trauma.* 1993;7:450-457

Liew AS, Johnson JA, Patterson SD, King GJ, Chess DG. Effect of screw placement on fixation in the humeral head. *J Shoulder Elbow Surg.* 2000;9:423-426

Lill H, Hepp P, Gowin W, Oestmann JW, Korner J, Haas NP, Josten C, Duda GN. Age- and gender-related distribution of bone mineral density and mechanical properties of the proximal humerus. *Rofo Fortschr Geb Rontgenstr N.* 2002;174:1544-1550

Lind T, Kroner K, Jensen J. The epidemiology of fractures of the proximal humerus. *Arch. Orthop. Trauma Surg.* 1989;108:285-287.

Lippitt S, Matsen FA. Mechanisms of glenohumeral joint instability. *Clin. Orthop.* 1993;291:20-8

Matsen FA, Arntz CT, Lippitt SB. Rotator cuff. In: *The shoulder*. Rockwood CA and Matsen FA (Hrsg). Saunders, Philadelphia 1998 Bd II; 755-839

Mc Afee PC, Werner FW, Glisson RR. A biomechanical analysis of spine instrumentation systems in thoracolumbar fractures. *Spine*. 1985;10:204-217

Melzer C, Werner A. Proximale Humerusfrakturen beim Erwachsenen. In: *Orthopädie und Orthopädische Chirurgie – Schulter*. Gohlke F, Hedtmann A. (Hrsg). Thieme, Stuttgart 2002:532-550

Milch H. The treatment of recent dislocations and fracture-dislocations of the shoulder. *J. Bone Joint Surg*. 1949;31A:173-180

Neer CS. Displaced proximal humeral fractures. Part I. Classification and evaluation. *J. Bone Joint Surg*. 1970;52A:1077-1089

Neer CS. Fractures. In: *Shoulder Reconstruction*. Neer CS (Hrsg). Saunders, Philadelphia 1990;363-420

Nordquist A, Petersson CJ. Incidence and causes of shoulder girdle injuries in an urban population. *J. Shoulder Elbow Surg*. 1995;4(2):107-112

Norlin R, Hermansson O, Överli P. The natural history of fractures of the greater tuberosity – displacement leads to impingement. *17th Congress of the European Society for Surgery of the Shoulder and the Elbow” Heidelberg, September 2003*

Ovesen J, Nielsen S. Anterior and posterior shoulder instability. *Acta Orthop. Scand*. 1986;57:324-327

Park MC, Murthi AM, Roth NS, Blaine TA, Levine WN, Bigliani LU. Two-part and three-part fractures of the proximal humerus treated with suture fixation. *J Orthop Trauma*. 2003;17:319-325

Park TS, Choi IY, Kim YH, Park MR, Shon JH, Kim SI. A new suggestion for the treatment of minimally displaced fractures of the greater tuberosity of the proximal humerus. *Bull. Hosp. Jt. Dis*. 1997;56:171-176.

Patel SH, Murphy KP. Fractures of the proximal femur: correlates of the radiological evidence of osteoporosis. *Skeletal Radiol.* 2006;4:202-211.

Pauwels F. In: *Gesammelte Abhandlungen zur funktionellen Anatomie des Bewegungsapparates.* Springer, Heidelberg 1965

Pfuhl W. Das subakromiale Nebengelenk des Schultergelenks. *Morph. Jb.* 1934;73:300-46

Poppen, NK, Walker P.S. Normal and abnormal motion of the shoulder. *J. Bone Joint Surg.* 1976;58 A:195-200

Post M. In: *The shoulder. Operative techniques.* Williams & Wilkins, Baltimore 1967

Reinus WR, Hatem SF. Fractures of the greater tuberosity presenting as rotator cuff abnormality: magnetic resonance demonstration. *J. Trauma.* 1998;44:670-675

Resch H, Hubner C, Schwaiger R. Minimally invasive reduction and osteosynthesis of articular fractures of the humeral head. *Injury.* 2001;32 Suppl 1: 25-32

Rodowsky MW, Harner CD, Fu FH. 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;22:121-130

Rose SH, Melton LJ, Morresy BF. Epidemiologic features of humeral fractures. *Clin. Orthop.* 1982;168:24-30

Salem ML. Bilateral anterior fracture-dislocation of the shoulder joints due to severe electric shock. *Injury* 1983;14:361-363

Sever, JW. Fracture of the end of the humerus. Treatment and results. *N. Engl. J. Med.* 1937;216:1100-1107

Sharkey N, Mader R, Hanson P. The entire rotator cuff contributes to the elevation of the arm. *J. Bone Joint Surg.* 1994;12:699-708

Shaw JL. Bilateral posterior fracture-dislocation of the shoulder, another trauma caused by convulsive seizures. *J. Bone Joint Surg.* 1971;53A:1437-1440

Siebenrock KA, Gerber C. The reproducibility of classifications of fractures of the proximal end of the humerus. *J. Bone Joint Surg.* 1993;75:1751-1755

Smyth, EHJ. Major arterial injury in closed fractures of the neck of the humerus. Report of a case. *J. Bone Joint Surg.* 1969;51B:508-510

Soslowsky LJ, Flatow EL, Bigliani LU, Pawluk RJ, Ateshian GA, Mow VC. Quantification of in situ areas at the glenohumeral joint: a biomechanical study. *J. Orthop. Res.* 1992;10:524-534

Szyszkowitz R, Seggl W, Schleifer P, Cundy PJ. Proximal humeral fractures: management, techniques and expected results. *Clin Orthop.* 1993;292:13-25

Turkel SJJ, Panio MW, Marshall IL, Girgis FG. Stabilizing mechanics of preventing anterior dislocation of the glenohumeral joint. *J. Bone Joint Surg.* 1981;64A:1208-1217

Viidik A, Lewin T. Changes in tensile strength characteristics and histology of rabbit ligaments induced by different modes of postmortal storage. *Acta Orthop. Scand.* 1966;37:141-155

Waston-Jones R. In: *Fractures and Joint Injuries.* Williams & Wilkins, Baltimore 1943:460-461

Williams GR Jr, Wong KL. Two-part and three-part fractures: open reduction and internal fixation versus closed reduction and percutaneous pinning. *Orthop. Clin. North Am.* 2000;31:1-21.

Wilson JC, McKeever FM. Traumatic posterior (retroglonoid) dislocation of the humerus. *J. Bone Joint Surg.* 1949;31A:160-172

Wülker N, Roetman B, Plitz W, Knop C. Untersuchungen zur Funktion des M. supraspinatus an einem dynamischen Schultermodell. *Unfallchirurg* 1994;97:308-313

Zlowodzki M, Williamson S, Zardiackas LD, Kregor PJ. Biomechanical evaluation of the less invasive stabilization system and the 95-degree angled blade for the internal fixation of distal femur fractures in human cadaveric bones with high bone mineral density. *J. Trauma* 2006;4:836-840

Zou D, Yoo J, Ordway N, Wu SS, Handal JA, Fredrickson BE. Interference screw fixation of cervical grafts: a biomechanical study of a new method of cervical fixation. *J. Spinal Disorders* 1991;4:168-176

Zyto K, Ahrengart L, Sperber A, Tornkvist H. Treatment of displaced proximal humeral fractures in elderly patients. *J Bone Joint Surg Br.* 1997;79:412-417

8. Danksagung

Die Idee dieser Studie stammt von Prof. Dr. Ernst Wiedemann. Erst durch seine Unterstützung konnte diese Promotionsarbeit von der Idee zur Verwirklichung gebracht werden. Außerdem möchte ich mich bei ihm dafür bedanken, dass er mir schon sehr oft, auch außerhalb dieser Studie, mit Rat und Tat zur Seite stand.

Diese Promotionsarbeit wurde im Labor für Biomechanik und experimentelle Orthopädie, dessen Leiter Prof. Dr. Wolfgang Plitz ist, durchgeführt. Aufgrund seiner großen Erfahrung und seiner großen Hilfsbereitschaft konnten viele Probleme schnell gelöst werden. Durch die problemlose Integration in sein Team war das Arbeiten in seinem Labor zu jeder Zeit ein Vergnügen.

Dr. Stefan Hinterwimmer war der Betreuer dieser Dissertation. Er hat sehr viele Stunden mit mir im Labor und bei der schriftlichen Anfertigung dieser Arbeit verbracht. Seine Geduld ist unerschöpflich, einen besseren Betreuer kann man sich nicht wünschen. Auch im klinischen Alltag habe ich sehr viel Unterstützung durch ihn erfahren, da wir in der gleichen Klinik arbeiten. Er ist mittlerweile zu einem guten Freund geworden, der auch außerhalb der klinischen Tätigkeit immer ein offenes Ohr für mich hat.

Meine liebe Frau Kirsten musste und muss, nicht nur aufgrund dieser Promotionsarbeit, sehr viele Stunden auf mich verzichten. Dies macht sie mir jedoch nie zum Vorwurf, sondern unterstützt mich in allen Lebenslagen, wofür ich mich bei ihr bedanken möchte.

Gewidmet habe ich diese Dissertation meinen Eltern. Nur durch Sie war es mir möglich Medizin zu studieren und meinen Traumberuf zu ergreifen. Meine Eltern unterstützten und unterstützen mich in vielen Situationen meines Lebens wofür ich Ihnen nicht genug danken kann.

9. Lebenslauf

Angaben zur Person:

Name: Volker Alexander Braunstein
Wohnort: Geissinger Str. 2
83278 Traunstein
Geburtstag: 04.12.1972
Geburtsort: Offenburg
Familienstand: verheiratet
Nationalität: deutsch

Schulbildung:

1979 – 1983: Grundschule Langenau
1983 – 1993: Robert-Bosch-Gymnasium Langenau
14.05.1993: Abitur

Zivildienst:

07/1993 – 09/1994: Rettungsdienst – Arbeiter-Samariter-Bund Ulm

Berufstätigkeit:

10/1994 – 04/1995: Hauptberufliche Tätigkeit im Rettungsdienst –
Arbeiter-Samariter-Bund Heilbronn

Berufsausbildung:

05/1995 – 03/1998: Vorklinischer Studienabschnitt – LMU München
 04/1998 – 03/1999: Erster klinischer Studienabschnitt – LMU München
 04/1999 – 09/2001: Zweiter klinischer Studienabschnitt – LMU München
 10/2001 – 09/2002: Praktisches Jahr – LMU München
 23.10.2002: Absolvierung des 3. Staatsexamens
 01/2003 – 06/2004: AiP an der Chirurgischen Klinik und Poliklinik –
Innenstadt, Klinikum der Universität München
 Seit 01.07.2004: Assistenzarzt an der Chirurgischen Klinik und Poliklinik –
Innenstadt, Klinikum der Universität München

Publikationen:

12/2005: Kettler M, Braunstein V, Biberthaler P, Krammer M,
Mutschler W. Komplikationen winkelstabiler
Plattenosteosynthesen am Humeruskopf – Darstellung
und Management. Trauma Berufskrankh, 2005, DOI:
10.1007/s10039-005-1079-6

12/2005: Kettler M, Schieker M, Braunstein V, König M, Mutschler
W. Die minimalinvasive Markraumschienung mit
Titannägeln zur Therapie von dislozierten
Klavikulafrakturen – Technik und Ergebnisse bei 55
Anwendungen. Akt Traumatologie, 2005; 35: 303 – 307

Buchbeiträge:

„Die Bedeutung der Kombination von Knoten und Fadenmaterial für die Festigkeit von arthroskopischen Knoten“ in „Spezialgebiete aus der Schulter- und Ellenbogenchirurgie 2“, Herausgeber U. Brunner, Steinkopff /Springer-Verlag (voraussichtliches Erscheinungsdatum: 09/2006)

Vorträge:

- 04.06.2005: Die elastische intramedulläre Markraumschienung bei dislozierten Klavikulafrakturen
122. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie, München
- 01.10.2005: Arthroskopische Knotentechniken
22. Kongress der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Arthroskopie (AGA), Frankfurt am Main
- 28.10.2005: Arthroskopische Operationen bei Schulterverletzungen
15. Enzensberger Tage der Fachklinik Enzensberg, Hopfen am See

- 23.06.2006 Die Bedeutung der Kombination von Knoten und Nahtmaterial für die Festigkeit von arthroskopischen Knoten
13. Jahreskongress der Deutschen Vereinigung für Schulter- und Ellenbogenchirurgie (DVSE), Wildbad Kreuth
- 27.06.2006 Biomechanische Testung unterschiedlicher Osteosyntheseverfahren bei Tuberkulum majus Frakturen
Schultersymposium der Sportorthopädie Klinikum Rechts der Isar, München
- Poster:**
- 05/2005: Die elastische intramedulläre Markraumschienung bei dislozierten Klavikulafrakturen
12. Jahreskongress der Deutschen Vereinigung für Schulter- und Ellenbogenchirurgie (DVSE), Weimar
- 09/2005: The elastic stable intramedullary nailing of dislocated clavicular fractures
The 19th Congress of the European Society for Surgery of the Shoulder and the Elbow (ESSSE/SECEC), Rom

Preise:

28.05.2005: 1. Posterpreis der Deutschen Vereinigung für Schulter- und Ellenbogenchirurgie (DVSE), verliehen im Rahmen des 12. Jahreskongresses der Gesellschaft in Weimar

Stipendien:

06-07/2006: Reisestipendium der Deutschen Vereinigung für Schulter- und Ellenbogenchirurgie e.V. (DVSE)