

Aus der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Aktuelle Aspekte der rekonstruktiven Therapie von
Glenoidranddefekten und Knorpelschäden des Schultergelenks

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Elisabeth Böhm

aus Oschatz

Datum der Promotion: 05. März 2021

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
1. Abstract	4
2. Einführung	5
2.1. Zielstellung Publikation 1	7
2.2. Zielstellung Publikation 2	7
2.3. Zielstellung Publikation 3	7
3. Material und Methodik	8
3.1. Patientenkollektiv	8
3.1.1. Autologe Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten.....	8
3.1.2. Allogene Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten.....	8
3.1.3. Autologe Chondrozytentransplantation bei humeralen Knorpelschäden	8
3.2. Operative Technik	9
3.2.1. Autologe / allogene Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten	9
3.2.2. Autologe Chondrozytentransplantation bei humeralen Knorpelschäden	9
3.3. Klinische Evaluation	10
3.3.1. Subjective Shoulder Value.....	11
3.3.2. Constant Score	11
3.3.3. American Shoulder and Elbow Surgeons Standardized Shoulder Assessment Form ..	11
3.3.4. Rowe Score	11
3.3.5. Walch-Duplay Score.....	12
3.3.6. Western Ontario Shoulder Instability Index	12
3.4. Radiologische Evaluation	12
3.4.1. Nativ-radiologische Beurteilung der Instabilitätsarthropathie.....	12
3.4.2. Computertomografische Quantifizierung des Glenoidranddefektes.....	12
3.5. Arthroskopische Evaluation	13
3.6. Statistik	13
4. Ergebnisse	14
4.1. Autologe Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten	14
4.2. Allogene Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten	14
4.3. Autologe Chondrozytentransplantation bei humeralen Knorpelschäden.....	15
5. Diskussion	16
6. Literaturverzeichnis	20
7. Anhang	25
7.1. Eidesstattliche Versicherung	25
7.2. Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen	26
7.3. Ausgewählte Publikationen	27
7.4. Lebenslauf	55
7.5. Publikationsliste	56
7.6. Danksagung	58

1. Zusammenfassung

Die vorliegende, kumulative Dissertationsschrift befasst sich mit den aktuellen Aspekten der operativen Therapie von knöchernen Defekten der Schultergelenkpfanne und Knorpelschäden des Humeruskopfes unter besonderer Berücksichtigung arthroskopischer, minimalinvasiver Rekonstruktionstechniken. Diese strukturellen Defekte können im Rahmen von glenohumeralen Traumata entstehen und die Funktion des Schultergelenks maßgeblich beeinträchtigen. Zudem erhöhen posttraumatische Schulterluxationen und assoziierte oder isolierte Knorpelschäden das Risiko für die Entstehung einer frühzeitigen Omarthrose.

Substanzielle Glenoiddefekte führen zu einem relevanten Verlust der Schulterstabilität und können durch knöcherne Augmentationsverfahren wie der Beckenkammspanplastik offen oder arthroskopisch rekonstruiert werden. Für die offenen Verfahren sind gute klinische und radiologische Langzeitergebnisse beschrieben, für die jüngeren arthroskopischen Techniken stehen diese noch aus. Ziel der ersten Publikation im Rahmen dieser kumulativen Dissertation war es, die klinischen und radiologischen Ergebnisse der arthroskopischen, autologen Beckenkammspanplastik zur operativen Versorgung von substanziellen, anterioren Glenoiddefekten nach einem Zeitraum von mindestens fünf Jahren retrospektiv zu evaluieren. Es konnten gute klinische Ergebnisse und eine erfolgreiche Rekonstruktion der Glenoiddefekte gezeigt werden. Die postoperative Entwicklung bzw. Progredienz einer Instabilitärsarthropathie wurde nicht vollständig inhibiert.

Die Entnahme von autologen Knochenspänen an der Crista iliaca stellt eine wesentliche Komplikationsquelle der Beckenkammspanplastik dar. Zur Reduktion der Entnahmemorbidität wurden in der zweiten Publikation die klinischen und radiologischen Kurzeitergebnisse bei der alternativen Verwendung von allogenen Knochenspänen der Crista iliaca prospektiv untersucht. Die allogene Beckenkammspanplastik erzielte ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse im Hinblick auf die Funktion und Stabilität der Schulter. Radiologisch zeigte sich jedoch eine deutliche Resorption der Allografts. Eine anatomische Rekonstruktion des Glenoids konnte nicht bestätigt werden.

Die autologe Chondrozytentransplantation (ACT) ist ein operatives Verfahren zur Therapie fokaler Knorpelschäden und wird am Kniegelenk bereits häufig durchgeführt. Für die Anwendung am Schultergelenk existieren bisher nur geringe Daten. Im Rahmen der dritten Publikation wurden die klinischen, radiologischen und arthroskopischen Resultate der ACT zur operativen Versorgung von fokalen Knorpelschäden des Humeruskopfes retrospektiv ausgewertet. Es wurden zufriedenstellende klinische Resultate und eine Deckung der Knorpelschäden mit makroskopisch knorpelartigem Gewebe erzielt. Diese ersten Ergebnisse in einem kleinen, jedoch jungen und

aktiven Patientenkollektiv unterstützen die Anwendung der ACT am Schultergelenk und sollten weiter evaluiert werden.

1. Abstract

This cumulative doctoral thesis addresses the modern aspects of the surgical therapy of osseous defects of the glenoid concavity and cartilage lesions of the humeral head with special emphasis on arthroscopic, minimally invasive reconstructive techniques. These structural defects can originate from glenohumeral traumas and may have a substantial impact on the shoulder function. Furthermore, posttraumatic shoulder dislocations and associated or isolated cartilage defects increase the risk of developing early osteoarthritis.

Substantial glenoid rim defects have a considerable destabilizing effect on the shoulder joint and can be reconstructed by bony augmentation procedures such as open or arthroscopic iliac-crest-bone-grafting. Good clinical and radiologic long-term outcomes have been reported for the open approach. For the more recent arthroscopic techniques, these are still required. The objective of the first publication of this cumulative doctoral thesis was to retrospectively evaluate the clinical and radiologic results of arthroscopic, autologous iliac-crest-bone-grafting for the treatment of substantial anterior glenoid rim defects after a minimum follow-up period of five years. Good clinical outcomes and a successful reconstruction of the glenoid defects were shown. Postoperative development or progression of an instability arthropathy was not inhibited entirely.

Harvesting of the autologous bone block at the iliac crest constitutes a major source of complications of the bone-grafting procedure. The second publication prospectively evaluated the clinical and radiologic short-term results of the alternative use of allogenic iliac crest bone blocks in order to reduce harvest site morbidity. The allogenic iliac-crest-bone-grafting-technique also enabled satisfactory results with regard to the function and stability of the shoulder. However, radiologic evaluation showed a massive resorption of the allografts. An anatomic reconstruction of the glenoid morphology could not be confirmed.

Autologous chondrocyte implantation (ACI) is a surgical therapy for the treatment of focal cartilage defects and is already widely performed within the knee joint. To date, only few data is available for its use in the shoulder joint. During the third publication, the clinical, radiologic and arthroscopic results of ACI for the treatment of focal cartilage defects of the humeral head were analysed retrospectively. Satisfactory clinical results and coverage of cartilage defects with cartilage-like tissue were shown. These first results of a small, but young and active cohort of patients advocate the use of ACI in the glenohumeral joint and should be further evaluated.

2. Einführung

Die Schulter ist aufgrund ihrer einzigartigen funktionellen Anatomie das beweglichste Gelenk des Menschen. Der Humeruskopf liegt nur zu einem Viertel seiner Oberfläche auf der flachen Gelenkpfanne und wird maßgeblich durch das Weichteilgewebe geführt (1). Die gering ausgeprägte knöcherne Stabilisierung macht das Kugelgelenk zugleich anfällig für traumatische Verletzungen und Luxationen. Als passive Stabilisatoren fungieren neben dem Glenoid das Labrum, die kapsuloligamentären Strukturen und der negative intraartikuläre Druck (1, 2). In einem komplexen Zusammenspiel mit den muskulären, dynamischen Stabilisatoren halten sie den Humeruskopf über einen Konkavitäts-Kompressions-Mechanismus in der Gelenkpfanne und wirken dezentrierenden, translatorischen Kräften entgegen (1-3). Bei einer Dysbalance oder strukturellen Läsionen dieser Stabilisatoren entsteht eine Schulterinstabilität, die sich durch eine pathologisch erhöhte Translation des Humeruskopfes im Verhältnis zum Glenoid auszeichnet (4). Mit einer Inzidenz von 1,7 % (5) ist die Luxation der Schulter die häufigste Luxationsart des Körpers und betrifft insbesondere junge, männliche und körperlich aktive Patienten (6, 7). Die unidirektionale Luxation nach anteroinferior ist mit einem Anteil von über 90 % die weitaus häufigste Form, während nach posterior gerichtete oder multidirektionale Luxationen deutlich seltener vorkommen (2, 5, 8). In bis zu 86 % der Fälle einer chronisch rezidivierenden, anterioren Schulterinstabilität entstehen knöcherne Defekte unterschiedlicher Dimensionen am vorderen Glenoidrand (9, 10). Diese treten in geringerem Maße auch im Rahmen von primärtraumatischen Luxationen auf (9, 10). Klinische (11, 12) und biomechanische Arbeiten (13) zeigten, dass ein substanzieller Glenoidranddefekt und der resultierende Verlust der Pfannenkonkavität die Stabilität des Schultergelenks erheblich reduzieren. Weichteilige Stabilisierungsverfahren führen in diesem Fall zu hohen Reluxationsraten (11, 12). Über die Definition eines rekonstruktionspflichtigen Glenoiddefektes herrscht in der Literatur bisher keine Einigkeit, wobei aktuelle Arbeiten zunehmend geringere Defektausmaße als relevant bewerten und auf die Bedeutung zusätzlicher, patientenspezifischer und morphologischer Einflussfaktoren hinweisen (14, 15). Der Korakoidtransfer nach Latarjet (16) und die freie Knochenspanplastik (17-22) sind die operativen Verfahren der Wahl zur Rekonstruktion der physiologischen Anatomie und Konkavität der Gelenkpfanne. Die Technik der Knochenspanplastik geht auf die Beschreibungen von Eden 1918 (23) und Hybinette 1932 (24) zurück und hat im Laufe des Jahrhunderts mehrere technische Modifikationen erfahren (25-28). Zumeist wird ein autologer Knochenblock der Crista iliaca verwendet und dieser in einer implantatfreien J-Span-Technik oder mittels Schrauben oder Endobuttons am Skapulahals fixiert. Langfristige Nachuntersuchungen der offenen Beckenkammspanplastik zeigen gute klinische und radiologische Ergebnisse (17, 19, 29, 30). Als Folge des offenen Zugangs

wurden jedoch postoperativ Insuffizienzen, Atrophien und Verfettungen des Musculus subscapularis beschrieben (19, 20, 31). Mit dem Fortschreiten der technischen Entwicklung und der Erfahrung in der Arthroskopie wurden arthroskopische Verfahren entwickelt, welche die strukturelle Integrität und Funktion des Muskels schonen (21, 22, 32-34). Eine häufige Komplikationsquelle sowohl der offenen als auch der arthroskopischen Techniken stellt die Entnahme des Knochenspans am Beckenkamm dar (17, 29, 35-37). Eine systematische Übersichtsarbeit verzeichnete eine Morbiditätsrate von 19,4 % nach der Entnahme von autologem Knochenmaterial an der Crista iliaca bei 6.449 Patienten (35). Die Komplikationen umfassen unter anderem chronische Schmerzen, fokale Hypästhesien, Hämatome, Infektionen, unbefriedigende kosmetische Resultate, Nerven- und Arterienverletzungen, Serome, Wunddehiszenzen, Frakturen und hypertrophe Narben (35). Die Verwendung von allogenen Knochenmaterial wird zur Reduktion der Entnahmemorbidität vorgeschlagen.

Im Rahmen von Luxationen sowie weiteren hochenergetischen Traumamechanismen der Schulter können neben knöchernen Verletzungen auch Knorpelschäden am Glenoid und Humeruskopf entstehen (38, 39). Diagnostik und Therapie dieser Knorpeldefekte stellen eine Herausforderung dar. Im Vergleich zu dem gewichttragenden Hüft- und Kniegelenk sind für die Schulter bisher begrenzte Erfahrungen vorhanden. In der Literatur wird jedoch auch für das Schultergelenk eine relevante Prävalenz chondraler Grad II-IV Läsionen (Outerbridge Klassifikation (40)) von 12 % bis zu 17 % in verschiedenen Patientengruppen beschrieben (41-43). Personen mit einem körperlich anspruchsvollen Beruf sowie Überkopf- und Kontaktsportler sind vorrangig betroffen und profitieren aufgrund des häufig jungen Alters von rekonstruktiven und regenerativen Operationsverfahren (43, 44). Die Behandlungsmöglichkeiten fokaler, glenohumeraler Knorpeldefekte umfassen unter anderem das arthroskopische Debridement, die Mikrofrakturierung, den partiellen Gelenkflächenersatz und das relativ junge Verfahren der autologen Chondrozytentransplantation (ACT) (45-50). Bei einem arthroskopischen Debridement werden instabile Knorpelanteile und freie Gelenkkörper entfernt und auf diese Weise primär eine Symptomlinderung erzielt. Die Mikrofrakturierung des subchondralen Knochens stimuliert die Bildung von Faserknorpel zur Deckung des Defektes. Im Rahmen der ACT werden dem Patienten körpereigene Knorpelzellen aus einem nicht-artikulierenden Gelenkareal entnommen, extern kultiviert und in den Knorpeldefekt mit dem Ziel reimplantiert, das geschädigte Knorpelgewebe zu regenerieren (48-50).

Neben einem erheblichen Leidensdruck haben die oftmals sehr jungen Patienten ein erhöhtes Risiko, eine sekundäre Omarthrose mit resultierenden Schmerzen und funktionellen Einschränkungen zu entwickeln. Die rekonstruktive Therapie der Gelenkflächen ist daher essenziell und eine möglichst minimalinvasive, arthroskopische Versorgung anzustreben. Ziel dieser Dissertati-

onsschrift ist es, moderne Therapieverfahren für die Rekonstruktion von knöchernen Glenoidranddefekten und humeralen Knorpelschäden des Schultergelenks zu evaluieren, um zur Weiterentwicklung dieser Behandlungsmöglichkeiten beizutragen.

2.1. Zielstellung Publikation 1

Die arthroskopischen Techniken der Beckenkammspanplastik zeigen gute klinische und radiologische Kurzzeitergebnisse (36, 37, 51). Langfristige Untersuchungen stehen bisher jedoch aus. Daher war es das Ziel dieser Studie, diese Ergebnisse unter Verwendung eines autologen, trikortikalen Knochenspans der Crista iliaca zur operativen Versorgung von substanzialen, anterioren Glenoiddefekten nach einem Zeitraum von mindestens fünf Jahren zu evaluieren. Die Hypothese der Studie war, dass die Patienten gute klinische Ergebnisse bei stabilen Gelenkverhältnissen und eine erfolgreiche Rekonstruktion der anatomischen Glenoidkonfiguration zeigen.

2.2. Zielstellung Publikation 2

Die Entnahme von autologen Knochenspänen an der Crista iliaca stellt eine zentrale Komplikationsquelle der Beckenkammspanplastik dar (17, 29, 35-37). Die zweite Publikation widmete sich der Reduktion dieser Entnahmemorbidity und untersuchte die klinischen und radiologischen Ergebnisse bei einer alternativen Verwendung eines allogenen, trikortikalen Beckenkammspans zur arthroskopischen Glenoidrekonstruktion. Es wurde angenommen, dass mit diesem Verfahren gute klinische Ergebnisse erzielt und die glenohumerale Stabilität erfolgreich wiederhergestellt würde. Des Weiteren wurde erwartet, dass die Allografts, wie in der Literatur für die Autografts beschrieben, einen Remodellierungsprozess durchlaufen und die physiologische, birnenförmige Glenoidkonfiguration wiederhergestellt werden kann (36, 52).

2.3. Zielstellung Publikation 3

Die ACT wird zur Behandlung fokaler, artikulärer Knorpeldefekte des Hüft- und insbesondere des Kniegelenks bereits vielfältig durchgeführt. Für die Anwendung der ACT am Schultergelenk sind in der Literatur bisher nur Fallberichte mit unterschiedlichen operativen Techniken beschrieben (48-50). Ziel dieser Publikation war es, die klinischen, radiologischen und arthroskopischen Ergebnisse der ACT unter Verwendung von dreidimensionalen (3D) Sphäroiden aus humanen, autologen, matrixassoziierten Chondrozyten zur Behandlung von fokalen, artikulären Knorpeldefekten des Humeruskopfes auszuwerten. Die Hypothese dieser Studie war, dass die ACT zu zufriedenstellenden klinischen und radiologischen Ergebnissen führt und die Deckung der fokalen Knorpeldefekte ermöglicht.

3. Material und Methodik

3.1. Patientenkollektiv

3.1.1. Autologe Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten (Publikation 1)

Nach einem minimalen Follow-up von fünf Jahren wurden 17 Patienten in diese Studie aufgenommen und retrospektiv untersucht, die in dem Zeitraum von 2007 bis 2012 bei einer rezidivierenden, anterioren Schulterinstabilität und einem substanziellen Glenoidranddefekt mit einer anatomischen Knochenspanplastik unter Verwendung eines trikortikalen Crista-iliaca-Autografts in arthroskopischer Technik operativ versorgt wurden. Entsprechend der Klassifikation knöcherner Glenoiddefekte nach Scheibel et al. (53) wurden chronische Fragmentdefekte (Typ II) und chronische Erosionsdefekte des Glenoids mit einer Größe von $< 25\%$ (Typ IIIa) oder $\geq 25\%$ (Typ IIIb) der Oberfläche inkludiert. Patienten mit Frakturen angrenzender knöcherner Strukturen, einer Schultersteife bzw. einem Follow-up von weniger als fünf Jahren wurden ausgeschlossen.

3.1.2. Allogene Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten (Publikation 2)

In diese prospektive Studie wurden zehn Patienten mit einem substanziellen Glenoidranddefekt bei einer rezidivierenden, anterioren Schulterinstabilität aufgenommen, die mittels einer arthroskopischen, anatomischen Knochenspanplastik unter Verwendung eines allogenen, trikortikalen Crista-iliaca-Knochenblocks operativ versorgt wurden. Wie in Publikation 1 wurde die Indikation zur arthroskopischen, allogenen Beckenkammspanplastik bei Patienten mit einem Typ-II- oder Typ-III-Defekt des Glenoids gestellt. Angrenzende glenohumerale Frakturen und eine Schultersteife wurden ebenfalls als Ausschlusskriterien definiert. Die Patienten wurden präoperativ und postoperativ über einen Zeitraum von zwei Jahren strukturiert prospektiv untersucht.

3.1.3. Autologe Chondrozytentransplantation bei humeralen Knorpelschäden (Publikation 3)

Im Rahmen dieser Publikation wurden sieben Patienten retrospektiv evaluiert, die bei einem symptomatischen, fokalen Knorpelschaden des posterozentralen Humeruskopfes mit einer ACT unter Verwendung von 3D-Sphäroiden aus humanen, autologen, matrixassoziierten Chondrozyten operativ versorgt wurden. Die Indikation wurde bei aktiven Patienten < 60 Jahren mit isolierten, akuten oder chronischen, symptomatischen, viertgradigen Knorpeldefekten (Outerbridge Klassifikation (40)) des Humeruskopfes (Fläche $\geq 2\text{ cm}^2$) gestellt. Die ACT wird nicht empfohlen bei Patienten mit einer Arthrose, bei kombinierten Knorpeldefekten des Humeruskopfes und des Glenoids sowie bei Infektionskrankheiten (HIV, Hepatitis C). Diese Faktoren wurden als Ausschlusskriterien definiert. Alle Patienten gaben ein glenohumerales Trauma in Form eines

Sturzes, Distorsionstraumas oder einer Schulterinstabilität als Auslöser der Schulterbeschwerden an.

3.2. Operative Technik

3.2.1. Autologe / allogene Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten (Publikationen 1 und 2)

Die arthroskopische Technik der anatomischen Glenoidrekonstruktion unter Verwendung eines trikortikalen, autologen (Publikation 1) oder allogenen (Publikation 2) Beckenkammspans erfolgte wie von Scheibel et al. publiziert (21, 36). Abbildungen der operativen Schritte sind in den Publikationen eingefügt (Abbildung 1, Publikation 2, Seite 38). Für diese minimalinvasive Technik wurden die vier Arthroskopieportale eines posterioren Standardportals sowie eines anterosuperioren, anteroinferioren und eines tiefen anteroinferioren Portals angelegt. Zunächst wurde der Kapsel-Labrum-Komplex mobilisiert und der Skapulahals für die Platzierung des Knochenspans vorbereitet. Den Patienten in Publikation 1 wurde anschließend ein trikortikaler Knochenblock an der ipsilateralen Crista iliaca entnommen. Die Patienten in Publikation 2 erhielten einen trikortikalen Crista-iliaca-Allograft aus der klinikeigenen Gewebebank. Diese Allografts wurden post mortem gewonnen, mittels Peressigsäure sterilisiert und per Gefriertrocknung konserviert. Die Maße der Beckenkammspäne wurden anschließend in Abhängigkeit von der Größe des vermessenen Glenoiddefektes angepasst. Der Beckenkammspan wurde über das anteroinferiore Arbeitsportal in das Schultergelenk eingebracht und anatomisch korrekt positioniert. Mit Hilfe einer speziellen Bohrhülse (*Twist-Drill Guide*; Arthrex, Naples, Florida) wurde der Graft zunächst temporär mittels Kirschner-Drähten in dieser Position stabilisiert und sodann unter Verwendung von zwei Biokompressionsschrauben (Arthrex, Naples, Florida) permanent am Skapulahals fixiert. Zum Abschluss dieser anatomischen Rekonstruktion wurde der Kapsel-Labrum-Komplex mit zwei knotenlosen *PushLock*-Ankern (Arthrex, Naples, Florida) refixiert. Entsprechend eines standardisierten Nachbehandlungsschemas wurde die Schulter postoperativ mittels einer Orthese immobilisiert und begleitend eine begrenzte passive Mobilisierung durchgeführt. Anschließend folgten Übungen zur Wiederherstellung des aktiven Bewegungsumfangs und zur muskulären Kräftigung.

3.2.2. Autologe Chondrozytentransplantation bei humeralen Knorpelschäden (Publikation 3)

Die ACT unter Verwendung von 3D-Sphäroiden aus humanen, autologen, matrixassoziierten Chondrozyten (*Chondrosphere*; Co.don AG, Teltow, Deutschland) erfolgte als zweizeitiger Eingriff. Die detaillierte Beschreibung und Abbildungen der operativen Technik sind der Publika-

on 3 zu entnehmen. Während einer initialen Arthroskopie wurde der Knorpeldefekt evaluiert und vitale Chondrozyten in Form von drei osteochondralen Zylindern aus dem nicht-artikulierenden, posterosuperioren Anteil des Humeruskopfes zur externen Anzucht und Zellexpansion entnommen (Abbildung 2, Publikation 3, Seite 49). Die aufbereiteten 3D-Sphäroide wurden anschließend im offenen (Abbildung 3, Publikation 3, Seite 49) oder arthroskopischen Vorgehen (Abbildung 4, Publikation 3, Seite 50) implantiert. Aufgrund des erforderlichen Lernprozesses für diese neuartige Operationstechnik wurden die ersten drei Patienten in Publikation 3 über einen deltopectoralen Zugang mit Absetzen der Subscapularissehne versorgt, die folgenden vier hingegen arthroskopisch. Zunächst wurde der Knorpeldefekt für die Implantation vorbereitet und angefrischt. Die 3D-Sphäroide wurden mit einem Applikationsinstrument homogen in den Defekt injiziert und verteilt. Die 3D-Sphäroide haben die Fähigkeit, an dem Knorpeldefekt zu haften und diesen mit extrazellulärer Proteinmatrix zu füllen. Dabei entsteht keine Notwendigkeit einer zusätzlichen, exogenen Matrix oder einer Periostdeckung, wie es bei den matrixinduzierten ACT-Techniken erforderlich ist (54).

Die Nachbehandlung erfolgte entsprechend eines definierten Protokolls und wurde nach der ACT im offenen Vorgehen restriktiver gestaltet, um eine Heilung der Subscapularissehne zu gewährleisten. Postoperativ wurde die Schulter zunächst immobilisiert und passiv mobilisiert. Anschließend folgten sukzessive aktive Bewegungs- und muskuläre Kräftigungsübungen.

3.3. Klinische Evaluation

Im Rahmen der klinischen Evaluation wurden alle Instabilitätsereignisse inklusive eines subjektiven Instabilitätsgefühls, einer Subluxation oder einer Luxation der Schulter dokumentiert (Publikationen 1 und 2) und die Schmerzen mittels der visuellen Analogskala (VAS) quantifiziert (Publikation 3). Es erfolgte eine vollständige Untersuchung von beiden Schultergelenken und eine Beurteilung der subjektiven und objektiven Schulterfunktion anhand standardisierter Scores. Diese gliedern sich in solche zur Erfassung der allgemeinen Schulterfunktion (*Subjective Shoulder Value, Constant Score, American Shoulder and Elbow Surgeons Standardized Shoulder Assessment Form*) und solche zur Evaluation der glenohumeralen Stabilität (*Rowe Score, Walch-Duplay Score, Western Ontario Shoulder Instability Index*).

Die klinische Untersuchung der Schulter beinhaltete die Inspektion, Palpation und die Ermittlung des Bewegungsumfanges entsprechend der Neutral-Null-Methode im Seitenvergleich. Die Evaluation der anterioren Schulterstabilität erfolgte mit dem *Apprehension*-Zeichen (55) und die Funktionsprüfung des Musculus subscapularis mit dem *Belly-press*-Test (56), *Belly-off*-Zeichen (57), *Lift-off*-Test (58) und dem Innenrotations-*Lag*-Zeichen (59).

3.3.1. *Subjective Shoulder Value (SSV)*

Der SSV (60) entspricht dem subjektiven Wert der betroffenen Schulter im Verhältnis zu einer gesunden Schulter und wird als Prozentangabe durch den Patienten angegeben. Ein Wert von 100 % ist dabei einer uneingeschränkten Schulterfunktion gleichzusetzen. Der SSV bietet die Möglichkeit, die allgemeine schmerz- und funktionsbedingte Belastbarkeit der Schulter aus Sicht des Patienten zu quantifizieren.

3.3.2. *Constant Score (CS)*

Der CS von Constant und Murley (61) ist pathologieübergreifend an der Schulter anwendbar und wurde 1987 mit dem Ziel formuliert, eine allgemeine Beurteilungsmethode der klinischen Schulterfunktion zu schaffen. Der Score mit einer mit einer Gesamtpunktzahl von 100 gliedert sich in die Sektionen Schmerz (15 Punkte), ‚Aktivitäten des täglichen Lebens‘ (20 Punkte), Bewegungsumfang (40 Punkte) und Kraft (25 Punkte). Die glenohumerale Kraft wurde mit einem isometrischen Kraftmessgerät (*Isobex TM Dynamometer*, Medical Device Solutions AG, Burgdorf, Schweiz) bei 90° abduziertem Arm in der Scapulaebene gemessen.

3.3.3. *American Shoulder and Elbow Surgeons Standardized Shoulder Assessment Form (ASES)*

Mit Hilfe der ASES-Fragebogens (62) werden die Schmerzen und Einschränkungen bei Aktivitäten des täglichen Lebens erfasst. Die Schmerzen werden anhand der VAS quantifiziert und die subjektive Einschränkung bei den verschiedenen Aktivitäten auf einer Skala zwischen ‚nicht möglich‘ (0 Punkte) und ‚nicht schwer‘ (3 Punkte) durch den Patienten eingestuft. Das Ergebnis wird anhand einer Formel berechnet, welche die Punktwerte der Schmerzen und der Aktivitäten zu jeweils 50 % einbezieht und eine maximale Punktzahl von 100 ermöglicht.

3.3.4. *Rowe Score (RS)*

Der RS wurde in der erstpublizierten Version von Rowe et al. (63) aus dem Jahr 1978 verwendet. Dieser beinhaltet die Kategorien Stabilität (50 Punkte), Bewegungsumfang (20 Punkte) und Funktion (30 Punkte) bei einer Gesamtpunktzahl von 100. Bezüglich der Instabilität wird zwischen dem Nichtvorliegen eines erneuten Instabilitätsereignisses (50 Punkte), einem positiven *Apprehension*-Zeichen (30 Punkte), einer Subluxation (10 Punkte) und einer Rezidivluxation (0 Punkte) differenziert.

3.3.5. *Walch-Duplay Score (WD)*

Im Fokus des WD (64) liegt unter anderem die resultierende Sport- und Aktivitätseinschränkung des Patienten aufgrund der Schulterinstabilität. Der WD umfasst die Kategorien ‚alltägliche Aktivität im Sport und bei allgemeinen Belastungen‘ (25 Punkte), Stabilität (25 Punkte), Schmerz (25 Punkte) und Bewegungsumfang (25 Punkte). Für die Bewertung der Stabilität ist zwischen einem negativen (25 Punkte) gegenüber einem positiven (15 Punkte) *Apprehension*-Zeichen, einem Instabilitätsgefühl (0 Punkte) und einer Rezidivluxation (-25 Punkte) abzustufen.

3.3.6. *Western Ontario Shoulder Instability Index (WOSI)*

Der WOSI (65, 66) ist ein instabilitätsspezifischer Fragebogen, anhand dessen die Beeinträchtigung der Lebensqualität im Hinblick auf körperliche Symptome (10 Fragen), Sport / Freizeit / Arbeit (4 Fragen), Lebensgewohnheiten (4 Fragen) und das eigene Empfinden der Schulter (3 Fragen) bewertet werden. In der verwendeten deutschen Fassung von Drerup et al. (66) stufen die Patienten die Beantwortung der 21 Fragen jeweils auf einer Punkteskala zwischen 0 und 10 Punkten selbstständig ein. Dabei entspricht eine Zahl von 0 Punkten dem bestmöglichen Ergebnis bzw. der geringsten Beeinträchtigung. In den Publikationen wurde das relative Ergebnis des WOSI in Prozent berechnet und aufgeführt.

3.4. **Radiologische Evaluation**

3.4.1. *Nativ-radiologische Beurteilung der Instabilitätsarthropathie (Publikationen 1 und 3)*

Zur Beurteilung der Entstehung einer Instabilitätsarthropathie bzw. der Progression vorbestehender, degenerativer Veränderungen wurde die Klassifikation von Samilson und Prieto (67) verwendet. In Publikation 1 wurde neben der true-anteroposterioren (a. p.) und axialen Standardaufnahme eine bilaterale Bernageau-Aufnahme als spezifisches Abbild der Schulterinstabilität verwendet. Im Rahmen der Publikation 3 wurden eine true-a.-p., eine axiale- und eine Y-Aufnahme der Schulter angefertigt.

3.4.2. *Computertomografische Quantifizierung des Glenoidranddefektes (Publikationen 1 und 2)*

Zur Vermessung des Glenoiddefektes bzw. der Glenoidkonfiguration wurden bilaterale CT-Aufnahmen mit einer 3D-Rekonstruktion des Glenoids unter Subtraktion des Humeruskopfes angefertigt. Im Rahmen der Publikation 1 wurden die Oberfläche des Glenoids und der Glenoid-Index nach Chuang et al. erfasst (68). Letzterer berechnet sich aus der Breite im Verhältnis zur Länge des Glenoids der betroffenen Schulter im Vergleich zum kontralateralen Glenoid. Zudem

wurde das Vorhandensein und das Ausmaß von Osteolysen im Bereich der Biokompressionschrauben auf Basis der zweidimensionalen (2D) CT-Aufnahmen in dieser Publikation deskriptiv beurteilt. Im Rahmen der Publikation 2 wurden Glenoidfläche, -durchmesser und -defekt der betroffenen Schulter auf Basis der Pico-Methode von Baudi et al. gemessen (69). Wie von Sugaya et al. beschrieben (52, 70) wird für diese Messungen ein Kreis verwendet, welcher so dimensioniert und platziert wird, dass er den inferioren Anteil des Glenoids bestmöglich abdeckt.

3.5. Arthroskopische Evaluation

Eine arthroskopische Evaluation des Knorpelbefundes wurde bei fünf Patienten, zwischen vier und zwölf Monaten, im Median sechs Monate nach der ACT in Publikation 3 durchgeführt. Die patientenspezifischen Indikationen für die Re-Arthroskopie sind in der Publikation aufgelistet. Die Befunde dieser Gelenkspiegelung wurden im Hinblick auf die Deckung des Knorpelschadens sowie die Stabilität und Integration des regenerierten Gewebes in den angrenzenden vitalen Knorpel ausgewertet.

3.6. Statistik

Die statistischen Auswertungen wurden mittels SPSS-Statistik (Version 23.0 / 25.0, IBM, Armonk, NY, USA) durchgeführt. Die Daten der Publikationen sind als Mittelwerte bzw. Mediane mit der Range und für die radiologischen Parameter mit der Standardabweichung deskriptiv angegeben. Die Ergebnisse wurden auf eine Normalverteilung unter Verwendung des Kolmogorov-Smirnov-Tests und des Shapiro-Wilk-Tests geprüft. Zum Vergleich der Daten wurde der T-Test für gepaarte und parametrische Daten verwendet. Für nicht-parametrische Daten wurden der Wilcoxon-Test und der Mann-Whitney-U-Test bei gepaarten bzw. ungepaarten Proben angewendet. Im Rahmen der statistischen Auswertung wurde das Signifikanzlevel als ein P-Wert $< 0,05$ definiert.

4. Ergebnisse

4.1. Autologe Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten (Publikation 1)

Nach einem durchschnittlichen Follow-up von 78,7 (60-110) Monaten konnten 14 Patienten (N=1 weiblich, N=13 männlich, mittleres Alter 31,1 [18-50] Jahre) klinisch und radiologisch untersucht werden. Klinisch zeigten sich zufriedenstellende Ergebnisse. Mit Ausnahme der Außenrotation in der Neutralposition sowie in der 90°-Abduktionsposition wies der Bewegungsumfang der betroffenen Schulter keine signifikanten Unterschiede zur Gegenseite auf. Es lagen keine klinischen Einschränkungen der Funktion des Musculus subscapularis vor und die Patienten erzielten folgende durchschnittliche Scoreergebnisse: SSV von 87 (65-100) %, CS von 94 (83-100) Punkten, RS von 89 (30-100) Punkten, WD von 87 (25-100) Punkten und WOSI von 70 (47-87) %. Zwei Patienten (14 %) zeigten ein positives *Apprehension*-Zeichen, von denen einer ein Trauma mit einer Fraktur des Knochenblocks sowie nachfolgend Rezidivluxationen erlitt (Abbildung 5, Publikation 1, Seite 32). Der Patient lehnte eine Revisionsoperation ab. Ein Patient mit einem persistierenden subjektiven Instabilitätsgefühl ohne ein erneutes Instabilitätsereignis wurde acht Monate postoperativ mit einer arthroskopischen Kapselpliktur versorgt. Zum Zeitpunkt des Follow-ups konnte das Schultergelenk von zwölf Patienten (86 %) ohne ein erneutes Instabilitätsereignis und mit einem negativen *Apprehension*-Zeichen als vollständig stabil befundet werden. Als weitere Komplikation wurde eine temporäre Hypästhesie im Entnahmebereich des Beckenkamms in einem Fall beobachtet. Der Glenoid-Index konnte von präoperativ durchschnittlich $0,79 \pm 0,04$ (0,71-0,84) auf einen Wert von $1,01 \pm 0,11$ (0,81-1,19) zum Zeitpunkt des Follow-ups signifikant erhöht werden. Milde Osteolysen im Schraubenbereich wurden beobachtet, es zeigten sich jedoch keine hochgradigen osteolytischen Läsionen. Sechs Patienten (43 %) zeigten keine Anzeichen degenerativer Gelenksveränderungen, während eine Instabilitätsarthrose Grad I bei fünf Patienten und Grad II bei drei Patienten (Samilson-und-Prieto-Klassifikation (67)) sichtbar war. Vier Patienten mit einer vorbestehenden Arthrose wiesen keine radiologische Progredienz auf.

4.2. Allogene Beckenkammspanplastik bei anterioren Glenoidranddefekten (Publikation 2)

Zehn Patienten (N=1 weiblich, N=9 männlich, durchschnittliches Alter 31,9 [26-40] Jahre) wurden für einen durchschnittlichen Zeitraum von 23,2 (13-29) Monaten untersucht. Alle Patienten zeigten einen freien Bewegungsumfang des Schultergelenks und eine intakte Funktion des Musculus subscapularis. Das *Apprehension*-Zeichen war bei drei Patienten (30 %) positiv und einer dieser Patienten (10 %) gab eine atraumatische Subluxation 15 Monate postoperativ an. Mit Ausnahme des CS zeigten die klinischen Scores einen signifikanten Anstieg gegenüber dem

präoperativen Zustand hin zu einem Wert von 83 (70-95) % in der SSV, 90 (84-98) Punkten im CS, 83 (50-100) Punkten im RS, 81 (50-100) Punkten im WD und 72 (41-86) % im WOSI zum Zeitpunkt des finalen Follow-ups. Die Oberfläche des Glenoids ($84,4 \pm 5,7$ [73,5-92,1] %) konnte auf einen initial überdimensionierten Wert ($118,4 \pm 8,6$ [105,6-131,2] %) innerhalb der ersten zwei Wochen nach der Beckenkammspanplastik signifikant vergrößert werden. Im weiteren Verlauf kam es jedoch zu einer exzessiven Resorption des allogenen Knochenmaterials, sodass die Glenoidfläche ein Jahr postoperativ erneut auf Werte nahe dem Ausgangswert abfiel ($86,6 \pm 6,8$ [76,4-98,0] %). Folglich war eine anatomische Rekonstruktion des Glenoids mit dem Verfahren der arthroskopischen Beckenkammspanplastik unter Verwendung eines Allografts nicht möglich. In dieser Patientengruppe wurden bislang keine revisionspflichtigen intra- oder postoperativen Komplikationen beobachtet. Die detaillierten klinischen und radiologischen Ergebnisse sind der Publikation 2 zu entnehmen.

4.3. *Autologe Chondrozytentransplantation bei humeralen Knorpelschäden (Publikation 3)*

Nach einem Follow-up von im Median 32 (22-58) Monaten zeigten alle sieben Patienten (N=7 männlich, medianes Alter 42,8 [18-55] Jahre) einen freien Bewegungsumfang des Schultergelenks und erreichten Schmerzfreiheit in Ruhe. Alle Patienten gaben zudem an, dass sie die Therapie wiederholen bzw. weiterempfehlen würden und erzielten zufriedenstellende klinische Ergebnisse. Im Median war der postoperative Belastungsschmerz VAS 0 (0-2) Punkte, der CS 95 (80-100) Punkte, der ASES-Score 97 (90-100) Punkte und der SSV nahm von präoperativ 60 (30-60) % zu 95 (70-100) % zum Zeitpunkt des Follow-ups signifikant zu. Radiologisch zeigten zwei Patienten eine Instabilitätsarthropathie Grad I (Samilson-und-Prieto-Klassifikation (67)). Präoperativ lag eine mediane Knorpeldefektgröße von 3 (2,3-4,5) cm² vor. Arthroskopisch wurde bei vier Patienten im Median sechs (vier bis zwölf) Monate nach der ACT eine erfolgreiche Defektdeckung mit einem stabilen und gut adaptierten, makroskopisch knorpelartigen Gewebe beobachtet (Abbildung 5, Publikation 3, Seite 52). In einem Fall war ein peripherer Restdefekt einer Fläche von 0,25 cm² vorhanden. Dieser persistierende Defekt wurde debridiert und mikrofrakturiert und führte zum Zeitpunkt des Follow-ups zu keiner klinischen Einschränkung. Die detaillierten arthroskopischen Befunde sind in Publikation 3 aufgeführt. Eine revisionspflichtige Komplikation trat bei einem Patienten in Form einer postoperativen adhäsiven Kapsulitis und einer kapsulären Fibrose auf und wurde mittels einer arthroskopischen Arthrolyse zwölf Monate nach der ACT versorgt.

5. Diskussion

Glenoidranddefekte und humerale Knorpelschäden stellen eine therapeutische Herausforderung dar. In Abhängigkeit von der strukturellen Schädigung und dem Leidensdruck der Patienten besteht die Indikation zur operativen Rekonstruktion der Gelenkflächen mit dem Ziel, die glenohumerale Funktion und Stabilität wiederherzustellen und sekundäre degenerative Veränderungen zu verhindern. Die rekonstruktiven Möglichkeiten der autologen und der allogenen Beckenkammspanplastik zur Versorgung von anterioren Glenoiddefekten sowie der ACT für humerale Knorpelschäden konnten anhand der vorliegenden Publikation evaluiert werden.

Für die modernen offenen Techniken der autologen Beckenkammspanplastik sind gute klinische Ergebnisse mit Rezidivraten von maximal 4,7 % nach einem mittleren Follow-up von bis zu 18 Jahren beschrieben (17, 19, 29, 30). Die Progression einer Instabilitätsarthrose konnte nicht vollständig inhibiert werden, die Prävention weiterer Luxationen sollte zumindest additive degenerative Veränderungen verhindern (17, 19, 29). Die jüngeren arthroskopischen Techniken bieten die Vorteile minimalinvasiver Chirurgie und zeigen eine anatomische Rekonstruktion des Glenoids bei Rezidivraten von 0-9 % im kurz- bis mittelfristigen Follow-up (36, 37, 51). Im Vergleich zu diesen Ergebnissen ist die wichtigste Erkenntnis der Publikation 1, dass die arthroskopischen Beckenkammspanplastik auch nach einem längerfristigen Nachuntersuchungszeitraum von mindestens fünf Jahren zufriedenstellende klinische und radiologische Ergebnisse zeigt, bei einem Fall einer traumatisch bedingten Rezidivinstabilität. Die Resultate der Schulderscores fallen etwas geringer aus als in der Literatur beschrieben, wofür anteilig die negative Selektion der Patienten mit vorangegangenen Operationen und multiplen Luxationen, relativ hohem Alter und vorbestehender Instabilitätsarthrose verantwortlich sein kann. Moroder et al. beschrieben nach der autologen J-Span-Plastik einen anatomischen Remodellierungsprozess hin zur physiologischen Glenoidkonfiguration mit Abschluss nach einem Jahr (52). Die radiologischen Ergebnisse der Publikation 1 unterstützen diese Erkenntnis und zeigen auch nach einem Zeitraum von 60-110 Monaten eine rekonstruierte Glenoidkonfiguration. Die Entstehung bzw. Progression einer Instabilitätsarthrose nach der operativen Glenoidrekonstruktion bedarf einer weiteren Beurteilung im Verlauf. Im Rahmen der arthroskopischen Revisionsoperation eines Patienten zeigte sich eine Deckung des Knochenspans mit knorpelartigem Gewebe. Diese Beobachtung wird durch eine Studie von Auffarth et al. unterstützt, welche eine Bedeckung von Beckenkammspanen mit Weichteilgewebe und teilweise hyalinartigem Knorpel sowie Chondrozyten in der Magnetresonanztomographie (MRT) und in Biopsien nachwies (71). Im Rahmen der Publikation 1 konnte nur eine kleine Patientengruppe dieser relativ seltenen Pathologie ohne eine Kontrollgruppe un-

tersucht werden. Die Follow-up-Rate dieser Studie von 82,4 % war akzeptabel. Im Rahmen des retrospektiven Studiendesigns wurden die klinischen Ergebnisse präoperativ nicht routinemäßig erfasst. Das operative Verfahren ist technisch hoch anspruchsvoll und wird vorrangig in spezialisierten Einrichtungen durchgeführt. Langfristige Untersuchungen weiterer Autoren sind erforderlich, um die Erkenntnisse dieser Studie zu bestätigen.

Für die arthroskopische, allogene Glenoidrekonstruktion konnte im Rahmen der Publikation 2 aufgrund exzessiver Resorptionsvorgänge – entgegen der Studienhypothese – die Annahme nicht bestätigt werden, dass die verwendeten Crista-iliaca-Allografts eine anatomische Glenoidrekonstruktion ermöglichen. Die Verwendung der Allografts wurde daher beendet und keine weiteren Patienten in diese Studie aufgenommen. Interessanterweise zeigte sich im kurzzeitigen Follow-up dennoch eine zufriedenstellende Schulterstabilität bei einem Fall einer atraumatischen Subluxation (10 %), jedoch keiner Rezidivluxation. Eine Erklärung könnte die Entstehung von weichteiligem Narbengewebe sein, langfristige Evaluationen der Schulterstabilität sind jedoch zur Bestätigung dieser Hypothese erforderlich. In der Literatur werden neben der Crista iliaca (72-74) auch die distale Tibia (75-78) und der Femurkopf (79) als allogene Spenderquellen mit guten klinischen Ergebnissen und geringen Rezidivraten beschrieben. Die Resorption bzw. anatomische Remodellierung weisen in diesen Studien unterschiedliche Verläufe auf. Weng (79), Provencher (77), und Abdelshahed (73) et al. berichten keine bis minimale Resorptionsvorgänge, jedoch teilweise ausschließlich auf Basis von Röntgenanalysen, die eine adäquate Beurteilung der Glenoidmorphologie nicht ermöglichen. Zhao et al. verwendeten bikortikale Crista-iliaca-Allografts mit einer Fadenankerfixation und beobachteten eine mittlere Absorptionsrate von 32,3 (8,7-88,1) % (72). In einem Kollektiv von 42 Patienten mit *fresh-frozen*, distalen Tibia-Allografts zeigten sich Resorptionsrate von < 50 % bei 42 % und \geq 50 % bei 16 % der Patienten (75). Ein CT-basierter Vergleich einer Knochenspanplastik mit Verwendung von *fresh-frozen* Tibia-Allografts einerseits und einem Korakoidtransfer andererseits zeigte eine signifikant höhere Resorptionsrate in der Allograft-Gruppe (76). Eine unzureichende Vaskularisierung und Immunreaktionen der Allografts könnten für die Resorption verantwortlich sein (76, 80, 81). Die mechanische Belastung mit Resorption unbelasteter Knochenareale entsprechend des Wolff'schen Gesetzes stellt jedoch auch einen Einflussfaktor dar (82). Weiterhin sind Quelle und Konservierungstechnik der Allografts relevant und ermöglichen potenziell eine bessere knöcherne Integration und anatomische Remodellierung als im Rahmen dieser Publikation beobachtet wurde. Frische Allografts besitzen vermutlich ein größeres regeneratives Potenzial, die Verfügbarkeit ist jedoch limitiert und die Kosten sowie das Infektionsrisiko sind höher. Ein Vergleich

der verschiedenen Konservierungstechniken des allogenen Knochenmaterials ist im Rahmen weiterer Untersuchungen notwendig. Die kleine Anzahl an Patienten und das Fehlen einer Kontrollgruppe stellen auch in der Publikation 2 Limitationen dar. Nach Beobachtung einer massiven Resorption der Allografts wurden keine weiteren Patienten in diese Studie aufgenommen. Alle teilnehmenden Patienten konnten im Verlauf dieser prospektiven Studie nachuntersucht werden. Die Evaluation der Patienten erfolgte für ein kurzzeitiges Follow-up, sodass längerfristige Untersuchungen, insbesondere der klinischen Ergebnisse und der Schulterstabilität erforderlich sind. Zudem sollten randomisierte Studien folgen, um die Wertigkeit der autologen und allogenen Glenoidrekonstruktion vergleichen und belegen zu können.

Entsprechend der gegenwärtigen Erkenntnisse umfasst diese Arbeit die größte Anzahl an Patienten, die mit einer ACT am Schultergelenk versorgt wurden, und stellt hinsichtlich der Verwendung von 3D-Sphäroiden aus humanen, autologen, matrixassoziierten Chondrozyten zur Therapie von fokalen Knorpeldefekten des Humeruskopfes die Erstpublikation dar. Die ACT wurde bislang primär am Kniegelenk durchgeführt, und wenngleich die Inzidenz von fokalen, artikulären Knorpeldefekten an der Schulter geringer ausfällt, so ist die Behandlung auch bei dem beweglichsten aller menschlichen Gelenke essenziell zur Prävention einer sekundären Omarthrose. Die ACT zeigte im kurz- bis mittelfristigen Follow-up zufriedenstellende klinische Ergebnisse und eine Deckung fokaler Knorpeldefekte des Humeruskopfes mit einem makroskopisch knorpelartigen Gewebe. Diese ersten Ergebnisse in einem kleinen, jedoch jungen und aktiven Patientenkreis unterstützen die Anwendung der ACT am Schultergelenk und sollten weiter evaluiert werden. Auch im Vergleich zu den alternativen Therapiemöglichkeiten des arthroskopischen Debridements und der Mikrofrakturierung bietet die ACT potenzielle Vorteile. Ersteres führt meist lediglich zu einer kurzfristigen Symptomlinderung und ist vor allem bei Patienten mit einer Früharthrose indiziert (45, 83). Die Mikrofrakturierung des subchondralen Knochens stimuliert die Bildung von Faserknorpel, dessen biomechanische Eigenschaften denen des hyalinen Knorpels jedoch unterlegen sind (84). Eine Studie zeigte, dass die radiologische Progression einer Omarthrose nach Mikrofrakturierung fokaler Knorpeldefekte langfristig nicht verhindert werden kann (46). Angesichts des zweizeitigen operativen Designs und der hohen Kosten wurde die Indikation für die ACT in unserem Vorgehen auf symptomatische Patienten < 60 Jahren begrenzt. Es bedarf prospektiver und langfristiger Untersuchungen weiterer Patienten, um diese Ergebnisse zu bestätigen zu können. Als Limitationen sind neben dem kleinen Patientenkollektiv mit fehlender Kontrollgruppe das retrospektive Studiendesign ohne routinemäßig erfasste präoperative klinische Daten zu nennen. Alle Patienten, die durch den Seniorautor der Publikation operiert

wurden, konnten in diese Studie aufgenommen werden. Die arthroskopische Re-Evaluation der Defektdeckung erfolgte auf Basis patientenspezifischer Indikationen und wurde daher nicht bei allen Patienten durchgeführt. Aufgrund der traumatischen Pathogenese der Knorpeldefekte lagen heterogene Begleitpathologien vor, die entsprechend adressiert wurden. Diese Pathologien können die Ergebnisse der Patienten beeinflussen und werden in Publikation 3 aufgeführt. Die erforderlichen Lernprozesse des modernen Therapieverfahrens bedingen eine Abweichung der operativen Versorgung mit einer zunächst offenen und anschließend arthroskopischen Vorgehensweise. In der Literatur werden für die Anwendung der ACT am Schultergelenk gegenwärtig sechs Fälle mit unterschiedlichen operativen Versorgungstechniken beschrieben (48-50). Romeo et al. (50) publizierten den Fallbericht einer offenen, Periost-gedeckten ACT der 1. Generation unter Verwendung von Chondrozyten des Kniegelenks. Ebert et al. (49) beschrieben den Fall einer arthroskopischen, matrixassistierten ACT der 3. Generation. Die bisher größte Fallserie umfasst vier Patienten mit zwei humeralen, einem glenoidalen und einem bipolaren Knorpeldefekt unter Verwendung einer offenen, matrixgekoppelten ACT (48). Dabei zeigten sich zufriedenstellende klinische Ergebnisse sowie eine erfolgreiche Defektdeckung in der MRT-Untersuchung bei drei Patienten und ein Fall eines Restdefektes (8). Die im Rahmen dieser Veröffentlichung angewandte, arthroskopische ACT mit 3D-Sphäroiden wurde durch Siebold et al. (85) bei 57 Knorpeldefekten des Kniegelenks durchgeführt und arthroskopisch re-evaluiert. 91,3 % der Fälle zeigten einen normalen oder nahezu normalen makroskopischen Knorpelbefund durchschnittlich 13,8 Monate nach der ACT (85).

In Zusammenschau der Publikationen lässt sich schlussfolgern, dass die operative Rekonstruktion der Glenoidranddefekte und humeralen Knorpelschäden die Wiederherstellung der Schulterfunktion bei einem jungen und aktiven Patientenkreis ermöglicht. Die arthroskopische, autologe Beckenkammspanplastik erzielte auch im längerfristigen Nachuntersuchungszeitraum gute klinische und radiologische Ergebnisse. Auf Grundlage dieser Dissertationsschrift erscheint die allogene Beckenkammspanplastik der autologen Technik jedoch unterlegen, da eine anatomische Glenoidrekonstruktion unter Verwendung der Crista-iliaca-Allografts nicht erzielt werden konnte. Nach den arthroskopischen Operationsverfahren zeigten sich keine klinischen Beeinträchtigungen der Funktion des Musculus subscapularis. Die ersten Ergebnisse der ACT unterstützen die Anwendung am Schultergelenk und eine weitere Evaluation dieser Technik wird empfohlen.

6. Literaturverzeichnis

1. Wiedemann E. Pathologie und Pathomechanik der Schulterinstabilität. In: Habermeyer P, editor. *Schulterchirurgie*. 5. Ausgabe. München: Elsevier GmbH; 2017. p. 20-31.
2. Dodson CC, Cordasco FA. Anterior glenohumeral joint dislocations. *Orthop Clin North Am*. 2008;39(4):507-18, vii.
3. Matsen FA, 3rd, Harryman DT, 2nd, Sidles JA. Mechanics of glenohumeral instability. *Clin Sports Med*. 1991;10(4):783-8.
4. Moroder P, Minkus M, Bohm E, Danzinger V, Gerhardt C, Scheibel M. Use of shoulder pacemaker for treatment of functional shoulder instability: Proof of concept. *Obere Extrem*. 2017;12(2):103-8.
5. Hovelius L. Incidence of shoulder dislocation in Sweden. *Clin Orthop Relat Res*. 1982(166):127-31.
6. Kralinger FS, Golser K, Wischatta R, Wambacher M, Sperner G. Predicting recurrence after primary anterior shoulder dislocation. *Am J Sports Med*. 2002;30(1):116-20.
7. te Slaa RL, Wijffels MP, Brand R, Marti RK. The prognosis following acute primary glenohumeral dislocation. *J Bone Joint Surg Br*. 2004;86(1):58-64.
8. Kroner K, Lind T, Jensen J. The epidemiology of shoulder dislocations. *Arch Orthop Trauma Surg*. 1989;108(5):288-90.
9. Griffith JF, Antonio GE, Yung PS, Wong EM, Yu AB, Ahuja AT, Chan KM. Prevalence, pattern, and spectrum of glenoid bone loss in anterior shoulder dislocation: CT analysis of 218 patients. *AJR Am J Roentgenol*. 2008;190(5):1247-54.
10. Edwards TB, Boulahia A, Walch G. Radiographic analysis of bone defects in chronic anterior shoulder instability. *Arthroscopy*. 2003;19(7):732-9.
11. Burkhart SS, De Beer JF. Traumatic glenohumeral bone defects and their relationship to failure of arthroscopic Bankart repairs: significance of the inverted-pear glenoid and the humeral engaging Hill-Sachs lesion. *Arthroscopy*. 2000;16(7):677-94.
12. Tauber M, Resch H, Forstner R, Raffl M, Schauer J. Reasons for failure after surgical repair of anterior shoulder instability. *J Shoulder Elbow Surg*. 2004;13(3):279-85.
13. Itoi E, Lee SB, Berglund LJ, Berge LL, An KN. The effect of a glenoid defect on anteroinferior stability of the shoulder after Bankart repair: a cadaveric study. *J Bone Joint Surg Am*. 2000;82(1):35-46.
14. Moroder P, Damm P, Wierer G, Bohm E, Minkus M, Plachel F, Mardian S, Scheibel M, Khatamirad M. Challenging the Current Concept of Critical Glenoid Bone Loss in Shoulder Instability: Does the Size Measurement Really Tell It All? *Am J Sports Med*. 2019;47(3):688-94.
15. Shaha JS, Cook JB, Song DJ, Rowles DJ, Bottoni CR, Shaha SH, Tokish JM. Redefining "Critical" Bone Loss in Shoulder Instability: Functional Outcomes Worsen With "Subcritical" Bone Loss. *Am J Sports Med*. 2015;43(7):1719-25.
16. Young AA, Maia R, Berhouet J, Walch G. Open Latarjet procedure for management of bone loss in anterior instability of the glenohumeral joint. *J Shoulder Elbow Surg*. 2011;20(2 Suppl):S61-9.
17. Auffarth A, Schauer J, Matis N, Kofler B, Hitzl W, Resch H. The J-bone graft for anatomical glenoid reconstruction in recurrent posttraumatic anterior shoulder dislocation. *Am J Sports Med*. 2008;36(4):638-47.
18. Warner JJ, Gill TJ, O'Hollerhan J D, Pathare N, Millett PJ. Anatomical glenoid reconstruction for recurrent anterior glenohumeral instability with glenoid deficiency using an autogenous tricortical iliac crest bone graft. *Am J Sports Med*. 2006;34(2):205-12.

19. Steffen V, Hertel R. Rim reconstruction with autogenous iliac crest for anterior glenoid deficiency: forty-three instability cases followed for 5-19 years. *J Shoulder Elbow Surg.* 2013;22(4):550-9.
20. Scheibel M, Nikulka C, Dick A, Schroeder RJ, Gerber Popp A, Haas NP. Autogenous bone grafting for chronic anteroinferior glenoid defects via a complete subscapularis tenotomy approach. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2008;128(11):1317-25.
21. Scheibel M, Kraus N, Diederichs G, Haas NP. Arthroscopic reconstruction of chronic anteroinferior glenoid defect using an autologous tricortical iliac crest bone grafting technique. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2008;128(11):1295-300.
22. Anderl W, Kriegleder B, Heuberer PR. All-arthroscopic implant-free iliac crest bone grafting: new technique and case report. *Arthroscopy.* 2012;28(1):131-7.
23. Eden R. Zur Operation der habituellen Schulterluxation unter Mitteilung eines neuen Verfahrens bei Abriß am inneren Pfannenrande. *Dtsch Z Chir.* 1918;144(80):269.
24. Hybbinette S. De la transplantation d'un fragment osseux pour remédier aux luxations récidivantes de l'épaule. Constatations et résultats opératoires. *Acta Chir Scand.* 1932(71):411-45.
25. Alvik I. [Hybbinette's operation in three cases of habitual dislocation of the shoulder]. *Nord Med.* 1951;45(3):96-7.
26. Lange M. *Orthopädisch-chirurgische Operationslehre.* München: Bergmann; 1944. p. 162-6.
27. DePalma A. Unstable glenohumeral joint. In: A.F. D, editor. *Surgery of the shoulder.* Philadelphia: Lippincott; 1983. p. 530-2.
28. Resch H, Golser K, Thoni H. [Shoulder dislocation and -subluxation]. *Orthopade.* 1989;18(4):247-55; discussion 55-6.
29. Moroder P, Plachel F, Becker J, Schulz E, Abdic S, Haas M, Resch H, Auffarth A. Clinical and Radiological Long-term Results After Implant-Free, Autologous, Iliac Crest Bone Graft Procedure for the Treatment of Anterior Shoulder Instability. *Am J Sports Med.* 2018;46(12):2975-80.
30. Deml C, Kaiser P, van Leeuwen WF, Zitterl M, Euler SA. The J-Shaped Bone Graft for Anatomic Glenoid Reconstruction: A 10-Year Clinical Follow-up and Computed Tomography-Osteoabsorptiometry Study. *Am J Sports Med.* 2016;44(11):2778-83.
31. Scheibel M, Tsynman A, Magosch P, Schroeder RJ, Habermeyer P. Postoperative subscapularis muscle insufficiency after primary and revision open shoulder stabilization. *Am J Sports Med.* 2006;34(10):1586-93.
32. Taverna E, Golano P, Pascale V, Battistella F. An arthroscopic bone graft procedure for treating anterior-inferior glenohumeral instability. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2008;16(9):872-5.
33. Tokish JM, Fitzpatrick K, Cook JB, Mallon WJ. Arthroscopic distal clavicular autograft for treating shoulder instability with glenoid bone loss. *Arthrosc Tech.* 2014;3(4):e475-81.
34. Scheibel M, Nikulka C, Dick A, Schroeder RJ, Popp AG, Haas NP. Structural integrity and clinical function of the subscapularis musculotendinous unit after arthroscopic and open shoulder stabilization. *Am J Sports Med.* 2007;35(7):1153-61.
35. Dimitriou R, Mataliotakis GI, Angoules AG, Kanakaris NK, Giannoudis PV. Complications following autologous bone graft harvesting from the iliac crest and using the RIA: a systematic review. *Injury.* 2011;42 Suppl 2:S3-15.
36. Kraus N, Amphansap T, Gerhardt C, Scheibel M. Arthroscopic anatomic glenoid reconstruction using an autologous iliac crest bone grafting technique. *J Shoulder Elbow Surg.* 2014;23(11):1700-8.

37. Bockmann B, Venjakob AJ, Reichwein F, Hagenacker M, Nebelung W. Mid-term clinical results of an arthroscopic glenoid rim reconstruction technique for recurrent anterior shoulder instability. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2018;138(11):1557-62.
38. O'Brien J, Grebenyuk J, Leith J, Forster BB. Frequency of glenoid chondral lesions on MR arthrography in patients with anterior shoulder instability. *Eur J Radiol.* 2012;81(11):3461-5.
39. McCarty LP, 3rd, Cole BJ. Nonarthroplasty treatment of glenohumeral cartilage lesions. *Arthroscopy.* 2005;21(9):1131-42.
40. Outerbridge RE. The etiology of chondromalacia patellae. *J Bone Joint Surg Br.* 1961;43-B:752-7.
41. Elser F, Braun S, Dewing CB, Millett PJ. Glenohumeral joint preservation: current options for managing articular cartilage lesions in young, active patients. *Arthroscopy.* 2010;26(5):685-96.
42. Gartsman GM, Taverna E. The incidence of glenohumeral joint abnormalities associated with full-thickness, reparable rotator cuff tears. *Arthroscopy.* 1997;13(4):450-5.
43. Paley KJ, Jobe FW, Pink MM, Kvitne RS, ElAttrache NS. Arthroscopic findings in the overhand throwing athlete: evidence for posterior internal impingement of the rotator cuff. *Arthroscopy.* 2000;16(1):35-40.
44. Ruckstuhl H, de Bruin ED, Stussi E, Vanwanseele B. Post-traumatic glenohumeral cartilage lesions: a systematic review. *BMC Musculoskelet Disord.* 2008;9:107.
45. Weinstein DM, Bucchieri JS, Pollock RG, Flatow EL, Bigliani LU. Arthroscopic debridement of the shoulder for osteoarthritis. *Arthroscopy.* 2000;16(5):471-6.
46. Hunnebeck SM, Magosch P, Habermeyer P, Loew M, Lichtenberg S. Chondral defects of the glenohumeral joint: Long-term outcome after microfracturing of the shoulder. *Obere Extrem.* 2017;12(3):165-70.
47. Pauzenberger L HP, Anderl W. Partieller Oberflächenersatz beim Knorpelschaden der Schulter. *Obere Extremität.* (2017;12(3):159-64).
48. Buchmann S, Salzmann GM, Glanzmann MC, Wortler K, Vogt S, Imhoff AB. Early clinical and structural results after autologous chondrocyte transplantation at the glenohumeral joint. *J Shoulder Elbow Surg.* 2012;21(9):1213-21.
49. Ebert JR, Fallon M, Zheng MH, Tay A. Arthroscopic autologous chondrocyte implantation in the glenohumeral joint: a case report. *J Shoulder Elbow Surg.* 2018;27(10):e300-e7.
50. Romeo AA, Cole BJ, Mazzocca AD, Fox JA, Freeman KB, Joy E. Autologous chondrocyte repair of an articular defect in the humeral head. *Arthroscopy.* 2002;18(8):925-9.
51. Anderl W, Pauzenberger L, Laky B, Kriegleder B, Heuberger PR. Arthroscopic Implant-Free Bone Grafting for Shoulder Instability With Glenoid Bone Loss: Clinical and Radiological Outcome at a Minimum 2-Year Follow-up. *Am J Sports Med.* 2016;44(5):1137-45.
52. Moroder P, Hirzinger C, Lederer S, Matis N, Hitzl W, Tauber M, Resch H, Auffarth A. Restoration of anterior glenoid bone defects in posttraumatic recurrent anterior shoulder instability using the J-bone graft shows anatomic graft remodeling. *Am J Sports Med.* 2012;40(7):1544-50.
53. Scheibel M, Kraus N, Gerhardt C, Haas NP. [Anterior glenoid rim defects of the shoulder]. *Orthopade.* 2009;38(1):41-8, 50-3.
54. Anderer U, Libera J. In vitro engineering of human autogenous cartilage. *J Bone Miner Res.* 2002;17(8):1420-9.
55. Rowe CR, Zarins B. Recurrent transient subluxation of the shoulder. *J Bone Joint Surg Am.* 1981;63(6):863-72.

56. Gerber C, Hersche O, Farron A. Isolated rupture of the subscapularis tendon. *J Bone Joint Surg Am.* 1996;78(7):1015-23.
57. Scheibel M, Magosch P, Pritsch M, Lichtenberg S, Habermeyer P. The belly-off sign: a new clinical diagnostic sign for subscapularis lesions. *Arthroscopy.* 2005;21(10):1229-35.
58. Gerber C, Krushell RJ. Isolated rupture of the tendon of the subscapularis muscle. Clinical features in 16 cases. *J Bone Joint Surg Br.* 1991;73(3):389-94.
59. Hertel R, Ballmer FT, Lombert SM, Gerber C. Lag signs in the diagnosis of rotator cuff rupture. *J Shoulder Elbow Surg.* 1996;5(4):307-13.
60. Fuchs B, Jost B, Gerber C. Posterior-inferior capsular shift for the treatment of recurrent, voluntary posterior subluxation of the shoulder. *J Bone Joint Surg Am.* 2000;82(1):16-25.
61. Constant CR, Murley AH. A clinical method of functional assessment of the shoulder. *Clin Orthop Relat Res.* 1987(214):160-4.
62. Richards RR, An KN, Bigliani LU, Friedman RJ, Gartsman GM, Gristina AG, Iannotti JP, Mow VC, Sidles JA, Zuckerman JD. A standardized method for the assessment of shoulder function. *J Shoulder Elbow Surg.* 1994;3(6):347-52.
63. Rowe CR, Patel D, Southmayd WW. The Bankart procedure: a long-term end-result study. *J Bone Joint Surg Am.* 1978;60(1):1-16.
64. Walch G. Directions for the use of the quotation of anterior instabilities of the shoulder. Abstracts of the First Open Congress of the European Society of Surgery of the Shoulder and Elbow; 1978; Paris.
65. Kirkley A, Griffin S, McLintock H, Ng L. The development and evaluation of a disease-specific quality of life measurement tool for shoulder instability. The Western Ontario Shoulder Instability Index (WOSI). *Am J Sports Med.* 1998;26(6):764-72.
66. Drerup S, Angst F, Griffin S, Flury MP, Simmen BR, Goldhahn J. [Western Ontario shoulder instability index (WOSI): translation and cross-cultural adaptation for use by German speakers]. *Orthopade.* 2010;39(7):711-8.
67. Samilson RL, Prieto V. Dislocation arthropathy of the shoulder. *J Bone Joint Surg Am.* 1983;65(4):456-60.
68. Chuang TY, Adams CR, Burkhart SS. Use of preoperative three-dimensional computed tomography to quantify glenoid bone loss in shoulder instability. *Arthroscopy.* 2008;24(4):376-82.
69. Baudi P, Righi P, Bolognesi D, Rivetta S, Rossi Urtoler E, Guicciardi N, Carrara M. How to identify and calculate glenoid bone deficit. *Chir Organi Mov.* 2005;90(2):145-52.
70. Sugaya H, Moriishi J, Dohi M, Kon Y, Tsuchiya A. Glenoid rim morphology in recurrent anterior glenohumeral instability. *J Bone Joint Surg Am.* 2003;85(5):878-84.
71. Auffarth A, Resch H, Matis N, Hudelmaier M, Wirth W, Forstner R, Neureiter D, Traweger A, Moroder P. Cartilage Morphological and Histological Findings After Reconstruction of the Glenoid With an Iliac Crest Bone Graft. *Am J Sports Med.* 2018;46(5):1039-45.
72. Zhao J, Huangfu X, Yang X, Xie G, Xu C. Arthroscopic glenoid bone grafting with nonrigid fixation for anterior shoulder instability: 52 patients with 2- to 5-year follow-up. *Am J Sports Med.* 2014;42(4):831-9.
73. Abdelshahed MM, Shamah SD, Mahure SA, Mollon B, Kwon YW. Cryopreserved bone allograft for the treatment of shoulder instability with glenoid defect. *J Orthop.* 2018;15(1):248-52.
74. Taverna E, Garavaglia G, Perfetti C, Ufenast H, Sconfienza LM, Guarrella V. An arthroscopic bone block procedure is effective in restoring stability, allowing return to sports in cases of glenohumeral instability with glenoid bone deficiency. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2018;26(12):3780-7.

75. Amar E, Konstantinidis G, Coady C, Wong IH. Arthroscopic Treatment of Shoulder Instability With Glenoid Bone Loss Using Distal Tibial Allograft Augmentation: Safety Profile and Short-Term Radiological Outcomes. *Orthop J Sports Med.* 2018;6(5):2325967118774507.
76. Wong IH, King JP, Boyd G, Mitchell M, Coady C. Radiographic Analysis of Glenoid Size and Shape After Arthroscopic Coracoid Autograft Versus Distal Tibial Allograft in the Treatment of Anterior Shoulder Instability. *Am J Sports Med.* 2018;46(11):2717-24.
77. Provencher MT, Frank RM, Golijanin P, Gross D, Cole BJ, Verma NN, Romeo AA. Distal Tibia Allograft Glenoid Reconstruction in Recurrent Anterior Shoulder Instability: Clinical and Radiographic Outcomes. *Arthroscopy.* 2017;33(5):891-7.
78. Frank RM, Romeo AA, Richardson C, Sumner S, Verma NN, Cole BJ, Nicholson GP, Provencher MT. Outcomes of Latarjet Versus Distal Tibia Allograft for Anterior Shoulder Instability Repair: A Matched Cohort Analysis. *Am J Sports Med.* 2018;46(5):1030-8.
79. Weng PW, Shen HC, Lee HH, Wu SS, Lee CH. Open reconstruction of large bony glenoid erosion with allogeneic bone graft for recurrent anterior shoulder dislocation. *Am J Sports Med.* 2009;37(9):1792-7.
80. Goldberg VM, Stevenson S. Natural history of autografts and allografts. *Clin Orthop Relat Res.* 1987(225):7-16.
81. VandeVord PJ, Nasser S, Wooley PH. Immunological responses to bone soluble proteins in recipients of bone allografts. *J Orthop Res.* 2005;23(5):1059-64.
82. Wolff J. *Das Gesetz der Transformation des Knochens.* Berlin: A Hirschwald; 1892.
83. Cameron BD, Galatz LM, Ramsey ML, Williams GR, Iannotti JP. Non-prosthetic management of grade IV osteochondral lesions of the glenohumeral joint. *J Shoulder Elbow Surg.* 2002;11(1):25-32.
84. Banke IJ, Vogt S, Buchmann S, Imhoff AB. [Arthroscopic options for regenerative treatment of cartilage defects in the shoulder]. *Orthopade.* 2011;40(1):85-92.
85. Siebold R, Karidakis G, Feil S, Fernandez F. Second-look assessment after all-arthroscopic autologous chondrocyte implantation with spheroides at the knee joint. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2016;24(5):1678-85.

7. Anhang

7.1. Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Elisabeth Böhm, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Aktuelle Aspekte der rekonstruktiven Therapie von Glenoidranddefekten und Knorpelschäden des Schultergelenks“/ „Modern aspects of the reconstructive therapy of glenoid rim defects and cartilage lesions of the shoulder joint“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Erstbetreuer/in, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Berlin, den 24.04.2020

Elisabeth Böhm

7.2. Anteilserklärung an den erfolgten Publikationen

Die Promovendin Elisabeth Böhm hatte folgenden Anteil an den vorgelegten Publikationen:

Publikation 1: 45%

Boehm E*, Minkus M*, Moroder P, Scheibel M (* geteilte Erstautorenschaft)

Arthroscopic iliac crest bone grafting in recurrent anterior shoulder instability: minimum 5-year clinical and radiologic follow-up. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. 2020 Apr 13. <https://doi.org/10.1007/s00167-020-05986-7>.

Beitrag im Einzelnen: Mitwirkung während der Entwicklung des Studienprotokolls, Beteiligung bei der Nachuntersuchung der Patienten unter meiner Aufsicht, Beteiligung bei den radiologischen Vermessungen und der Primärdaten-Auswertung, Erstellung der Abbildungen 1, 2 und 5, Erstellung der Tabelle 1, Beitrag zu der Manuskripterstellung, Hauptanteil bei der Einreichung des Manuskripts und bei dem Review-Prozess der Zeitschrift

Publikation 2: 85%

Boehm E, Minkus M, Moroder P, Scheibel M

Massive graft resorption after iliac crest allograft reconstruction for glenoid bone loss in recurrent anterior shoulder instability. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*. 2020 Feb 24. <https://doi.org/10.1007/s00402-020-03380-z>.

Beitrag im Einzelnen: Gestaltung des Studienprotokolls inkl. der Auswahl der klinischen und radiologischen Evaluationsparameter bzw. Vermessungen, operative Assistenz, Nachuntersuchung und Betreuung der Patienten unter meiner Aufsicht, Vermessung der radiologischen Parameter, Auswertung der Primärdaten, statistische Analyse und Erstellung sämtlicher Abbildungen und Tabellen, Hauptanteil bei der Verfassung und der Einreichung des Manuskripts mit Bearbeitung der Korrekturen der Reviewer / Editoren der Zeitschrift

Publikation 3: 85%

Boehm E, Minkus M, Scheibel M

Autologous chondrocyte implantation for treatment of focal articular cartilage defects of the humeral head. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*. 2020 Jan; 29(1):2-11. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2019.07.030>.

Beitrag im Einzelnen: Erstellung des Studienprotokolls inkl. der Auswahl der klinischen Evaluationsparameter, vollständige Nachuntersuchung der Patienten unter meiner Aufsicht, Auswertung der Primärdaten und Erstellung sämtlicher Abbildungen und Tabellen, Hauptanteil bei der Erstellung des Manuskripts und Einreichung der Publikation mit Bearbeitung der Korrekturen der Reviewer / Editoren der Zeitschrift

Berlin, den 24.04.2020

Prof. Dr. med. Markus Scheibel

Elisabeth Böhm

7.3. Ausgewählte Publikationen

Boehm E, Minkus M, Moroder P, Scheibel M.

Arthroscopic iliac crest bone grafting in recurrent anterior shoulder instability: minimum 5-year clinical and radiologic follow-up.

Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy. 2020 Apr 13. [Epub ahead of print]

<https://doi.org/10.1007/s00167-020-05986-7>

Boehm E, Minkus M, Moroder P, Scheibel M.
Massive graft resorption after iliac crest allograft reconstruction for glenoid bone loss in
recurrent anterior shoulder instability.
Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery. 2020 Feb. 24. [Epub ahead of print]
<https://doi.org/10.1007/s00402-020-03380-z>

Boehm E, Minkus M, Scheibel M.
Autologous chondrocyte implantation for treatment of focal articular cartilage defects of the humeral head.
Journal of Shoulder and Elbow Surgery. 2020 Jan; 29(1):2-11.
<https://doi.org/10.1016/j.jse.2019.07.030>

7.4. Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

7.5. Publikationsliste

- **Boehm E**, Minkus M, Moroder P, Scheibel M
Arthroscopic iliac crest bone grafting in recurrent anterior shoulder instability: minimum 5-year clinical and radiologic follow-up
Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2020 Apr 13. DOI: 10.1007/s00167-020-05986-7. [Epub ahead of print]
- **Boehm E**, Minkus M, Moroder P, Scheibel M
Massive graft resorption after iliac crest allograft reconstruction for glenoid bone loss in recurrent anterior shoulder instability
Arch Orthop Trauma Surg. 2020 Feb 24. DOI: 10.1007/s00402-020-03380-z. [Epub ahead of print]
- **Boehm E**, Scheibel M, Streich J
Bildgebende Diagnostik
In: AGA Themenheft „Traumatische vordere Schultererstluxation“. Maier D, Streich J (ed). AGA-Komitee-Schulter-Instabilität, Zürich; 2018. pp. 17-20.
- **Boehm E**, Minkus M, Scheibel M
Autologous chondrocyte implantation for treatment of focal articular cartilage defects of the humeral head
J Shoulder Elbow Surg. 2020 Jan; 29(1):2-11.
- Moroder P, Damm P, Wierer G, **Böhm E**, Minkus M, Plachel F, Märdian S, Scheibel M, Khatamirad M
Challenging the current concept of critical glenoid bone loss in shoulder instability: Does the size measurement really tell it all?
Am J Sports Med. 2019 Mar; 47(3):688-694.
- Plachel F, Klatter-Schulz F, Minkus M, **Böhm E**, Moroder P, Scheibel M
Biological allograft healing after superior capsule reconstruction
J Shoulder Elbow Surg. 2018 Dec; 27(12):e387-e392.
- **Böhm E**, Scheibel M, Lädermann A
Subscapularis insufficiency: what's all the fuss about?
J of Shoulder and Elbow Arthroplasty. 2018 Aug; 2:1-9.
- Moroder P, **Böhm E**, Scheibel M
The arthroscopic bankart-plus procedure for treatment of anterior shoulder instability with small to intermediate glenoid defects
Arthrosc Tech. 2018 Mar 19; 7(4):e379-e384.
- Lädermann A, **Böhm E**, Tay E, Scheibel M
Bone-mediated anteroinferior glenohumeral instability: current concepts
Orthopäde. 2018 Feb; 47(2):129-138.
- **Böhm E**, Minkus M, Moroder P, Scheibel M
Therapiekonzepte bei der ventralen Schulterinstabilität
Chirurgische Praxis. 2018; 83/3:387-399.
- **Böhm E**, Minkus M, Moroder P, Scheibel M
Arthroskopische anatomische Gelenkrekonstruktion mit autologer Spanplastik
OUP. 2017; 11:530-537.

- Minkus M, **Böhm E**, Moroder P, Scheibel M
Initiales Management der traumatischen ventralen Schultererstluxation
Unfallchirurg. 2018 Feb; 121(2):100-107.
- Moroder P, Plachel F, Huettner A, Ernstbrunner L, Minkus M, **Boehm E**, Gerhardt C, Scheibel M
The effect of scapula tilt and best-fit circle placement when measuring glenoid bone loss in shoulder instability patients
Arthroscopy. 2018 Feb; 34(2):398-404.
- Minkus M, **Böhm E**, Scheibel M
Anterior glenoid bone graft
In: Atlas of advanced shoulder arthroscopy. Imhoff AB, Ticker JB, Mazzocca AD, Voss A (ed). Boca Raton, Florida: CRC Press; 2018. pp. 51-58.
- Kerschbaum M, Maziak N, **Böhm E**, Scheibel M
Elbow flexion and forearm supination strength in a healthy population
J Shoulder Elbow Surg. 2017 Sep; 26(9):1616-1619.
- Moroder P, Minkus M, **Böhm E**, Danzinger V, Gerhardt C, Scheibel M
Use of shoulder pacemaker for treatment of functional shoulder instability: proof of concept
Obere Extrem. 2017; 12(2):103-108.
- **Boehm E**, Gerhardt C, Kraus N, Scheibel M
Arthroscopic glenoid reconstruction for chronic anteroinferior shoulder instability using a tricortical iliac crest bone graft
JBJS Essent Surg Tech. 2016 Nov 23; 6(4):e39.

7.6. Danksagung

Zuallererst möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr. med. Markus Scheibel bedanken, dass er mir das Thema dieser Dissertation zur Verfügung gestellt hat und mir während der Bearbeitung stets unterstützend zur Seite stand. Darüber hinaus danke ich Prof. Dr. med. Markus Scheibel im besonderen Maße für die Förderung meiner bisherigen Karriere und für die herausragende klinische und wissenschaftliche Ausbildung und Motivation. Ich bedanke mich für das große Vertrauen und die Bereitstellung der einzigartigen Möglichkeiten, die er mir bereits in einem frühen Weiterbildungsstadium entgegenbrachte. So durfte ich mich unter seiner Betreuung an diversen wissenschaftlichen Projekten und Kongressen beteiligen und innerhalb der Fachgesellschaften aktiv tätig werden.

Meinen Ko-Autoren PD Dr. med. univ. Philipp Moroder und Dr. med. Marvin Minkus danke ich für die hervorragende und konstruktive Zusammenarbeit. Zudem bedanke ich mich bei der gesamten Arbeitsgruppe der Schulter- und Ellenbogenchirurgie und dem Team der Poliklinik des Centrums für Muskuloskeletale Chirurgie am Campus Charité Virchow Klinikum für die Unterstützung.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Meinen Eltern Annett Böhm und Olaf Ebert möchte ich für ihre bedingungslose Unterstützung und die Chancen, die sie mir während des Studiums und darüber hinaus ermöglicht haben danken. Ihre unerschöpfliche Hilfe und wertvollen Ratschlägen haben mir geholfen auch besonders herausfordernde Situationen und Aufgaben zu bewältigen. Meinen Eltern und meinen beiden Schwestern Charlotta und Josefine Böhm danke ich, dass sie mir immer liebevoll und aufbauend zur Seite standen und mich auch in sehr arbeitsreichen und frustrierenden Zeiten aufgemuntert und somit Kraft gegeben haben.