

**Interobserver und Intraobserver Reliabilität eines qualitativen dreidimensionalen  
Klassifikationssystems für knöcherne Glenoiddefekte in der inversen  
Schulterendoprothetik**

Dominik Benjamin Tim Gumbiller

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Medicine and Health der Technischen  
Universität München zur Erlangung eines  
Doktors der Medizin (Dr. med.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. Florian Eyer

Prüfende der Dissertation:

1. Priv.-Doz. Dr. Christian Suren
2. apl. Prof. Dr. Nael Hawi

Die Dissertation wurde am 29.08.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und  
durch die TUM School of Medicine and Health am 04.12.2024 angenommen.

## Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	3
1.1 Hintergrund .....	3
1.2 Anatomie und Biomechanik des Schultergelenks.....	4
1.2.1. Allgemeine Anatomie des Schultergelenks .....	4
1.2.2. Knöcherne Anatomie des Schultergelenks .....	5
1.2.3. Passive Stabilisatoren des Glenohumeralgelenks .....	7
1.2.4 Aktive/Dynamische Stabilisatoren des Schultergelenks .....	11
1.2.4 Biomechanik des Schultergelenks .....	12
1.3 Inverse Schulterendoprothetik.....	16
1.3.1 Entwicklung der inversen Prothetik.....	16
1.3.2 Wachsende Indikationen für inverse Schulterprothesen .....	20
1.4 Knochendefekte des Glenoids .....	20
1.4.1 Ätiologie.....	20
1.4.2 Symptomatik .....	21
1.4.3 Bedeutung von Glenoiddefekten in der inversen Schulterendoprothetik .....	22
1.4.4 Diagnostik und Assessment von Glenoiddefekten.....	24
1.4.5 Therapie von Glenoiddefekten .....	25
1.4.6 Klassifikationssysteme für Knochendefekte am Glenoid .....	29
1.4.7 Vorstellung des hier überprüften, qualitativen dreidimensionalen Klassifikationssystems für knöcherne Glenoiddefekte in der inversen Schulterendoprothetik: .....	42
2 Studie .....	47
2.1 Fragestellung .....	47
2.2 Material und Methodik.....	47
2.2.1 Einschluss- und Ausschlusskriterien .....	47
2.2.2 Methodik .....	48
2.2.3 Bewertungsprotokoll: .....	48
2.2.4 Statistische Reliabilitätsanalyse:.....	49
2.3 Ergebnisse der statistischen Reliabilitätsanalyse: .....	52
2.3.1 Interobserver Reliabilität: .....	52
2.3.2 Intraobserver Reliabilität: .....	62
2.3.3 Untersuchung der Auswirkung von Modifikationen des Klassifikationssystems auf die Ergebnisse der statistischen Reliabilitätsanalyse: .....	65
3 Diskussion.....	82
3.1 Zusammenfassung der statistischen Reliabilitätsprüfung .....	82
3.2 Übersicht über die Ergebnisse der Reliabilitätsanalysen anderer Klassifikationen für Glenoiddefekte .....	84
3.2.1 Frankle et al.....	84

3.2.2 Habermeyer et al. ....	84
3.2.3 Sirveaux et al. ....	84
3.2.4 Walch et al. ....	85
3.2.5 Bercik et al. ....	85
3.3 Vergleich der Ergebnisse der statistischen Reliabilitätsprüfung .....	86
3.3.1 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Frankle et al. ....	86
3.3.2 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Habermeyer et al. ....	87
3.3.3 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Sirveaux et al. ....	88
3.3.3 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Walch et al. ....	88
3.3.4 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Bercik et al. ....	90
3.4 Konklusion .....	91
4. Zusammenfassung der Studie .....	92
5. Literaturverzeichnis .....	94
6. Abbildungsverzeichnis .....	98
7. Tabellenverzeichnis .....	99
8. Danksagung .....	101

## **1 Einleitung**

### **1.1 Hintergrund**

Die inverse Schulterendoprothetik wurde für den Gelenkersatz bei Defektarthropathie des Schultergelenks entwickelt. Ein suffizientes knöchernes Lager der Glenoidkomponente ist für die Standzeit der Prothese hierbei von essenzieller Bedeutung. Knochendefekte am Glenoid stellen problematische Situation bei der Implantation einer inversen Prothese dar und sollten therapeutisch adressiert werden. Mit zunehmender Ausweitung der Indikationen für inverse Schulterprothesen, gewann die Problematik von Defektsituationen am Glenoid an Bedeutung. Aus diesem Grund wurden verschiedene Versuche unternommen, Glenoiddefekte zu klassifizieren. Allerdings besteht kein Klassifikationssystem, welches unabhängig der zugrundeliegenden Pathologie angewandt werden kann.

Glenoiddefekte haben in der heutigen inversen Schulterendoprothetik großen Einfluss auf die kurz- und langfristigen postoperativen Ergebnisse. Deswegen wurde eine qualitative Klassifikation der Glenoiddefekte unabhängig der zugrundeliegenden Ätiologie und Pathogenese und fokussierend auf die Pathomorphologie in exzentrischem und zentrischem Defektausmaß etabliert und 2005 erstmals publiziert. Dieses Klassifikationssystem ermöglicht eine feine Graduierung des Defektausmaßes, wodurch die vorliegende klinische Situation exakt beschreiben werden kann. Ein signifikantes Merkmal des Klassifikationssystems ist die Anwendbarkeit sowohl in Revisions- als auch Primärsituation [1, 11, 12].

Ziel dieser Klassifikation war es, eine Hilfestellung für die optimale Auswahl der Therapieoptionen durch korrekte präoperative Einordnung des Glenoiddefekts bei Versorgung mit einer inversen Schulterendoprothese zu bieten. Eine Entscheidungshilfe bezüglich der Möglichkeit autologen oder allogenen Knochenaufbaus, ein- oder zweizeitigen Vorgehens oder der Defektaugmentation durch augmentierende Platten könnte durch das Klassifikationssystem geboten werden.

Bis dahin gab es keine von Ätiologie und Pathogenese unabhängige Klassifikation, welche eine Graduierung des Defekts zulässt und speziell für die inverse Schulterendoprothetik entwickelt wurde.

So wurde beispielsweise die Klassifikation nach Walch et al. [6] lediglich für Glenoiddefekte bei Omarthrose entwickelt, das Klassifikationssystem nach Favard et al. [13] betrachtete das Glenoid in Frontalebene und ist lediglich für Defektarthropathien geeignet, während die Klassifikation von Frankle et al. [7] Glenoiddefekte rein morphologisch ohne Möglichkeit der Defektgraduierung beschreibt und ebenfalls ausschließlich für das Krankheitsbild der Defektarthropathie etabliert wurde. Eine therapeutische Konsequenz durch die präoperative Defektklassifizierung entsprechend den oben aufgeführten Klassifikationen ergibt sich bei dem Klassifikationssystem nach Favard et al. nicht, von Frankle et al. wurden vor zwei Jahren adäquate Therapieoptionen entsprechend der Evaluation des Defektausmaßes vorgeschlagen.

## **1.2 Anatomie und Biomechanik des Schultergelenks**

### **1.2.1. Allgemeine Anatomie des Schultergelenks**

Die einzigartige Bewegungsfreiheit des Schultergelenks wird durch die spezielle Anatomie des kapsulo-ligamentären Apparats, die Verkettung mehrerer Haupt- und Nebengelenke und die komplexe neuromuskuläre Steuerung ermöglicht. Im Gegensatz zu anderen Kugelgelenken, wie dem Hüftgelenk, erlaubt die funktionelle Einheit des Schultergelenks durch zusätzliche Translationsbewegungen neben den rein gleitenden Rotationsbewegungen eine Beweglichkeit in 5 Freiheitsgraden [14]. So sind die Anteversion und Retroversion, Abduktion und Adduktion, Innenrotation und Außenrotation, wie auch die Translation in anteroposteriorer Ebene als auch in kraniokaudaler Ebene möglich.

Dieser enorme Bewegungsradius ist allerdings auch die Ursache für das Auftreten spezifischer Verletzungsmuster und spezieller Formen der degenerativen Veränderungen, wie die Cuff-Tear-Arthropathie und die Omarthrose mit Rotatorenmanschetten-Insuffizienz.

Die Schulter ist knöchern aus dem Humerus (Oberarmknochen), der Skapula (Schulterblatt) und der Clavicula (Schlüsselbein) aufgebaut.

Die drei Hauptgelenke sind das Glenohumeralgelenk, das Akromioklavikulargelenk und das Sternoklavikulargelenk. Das subakromiale Gelenk und das skapulothorakale Gelenk sind die Nebengelenke des Schultergelenks [15].

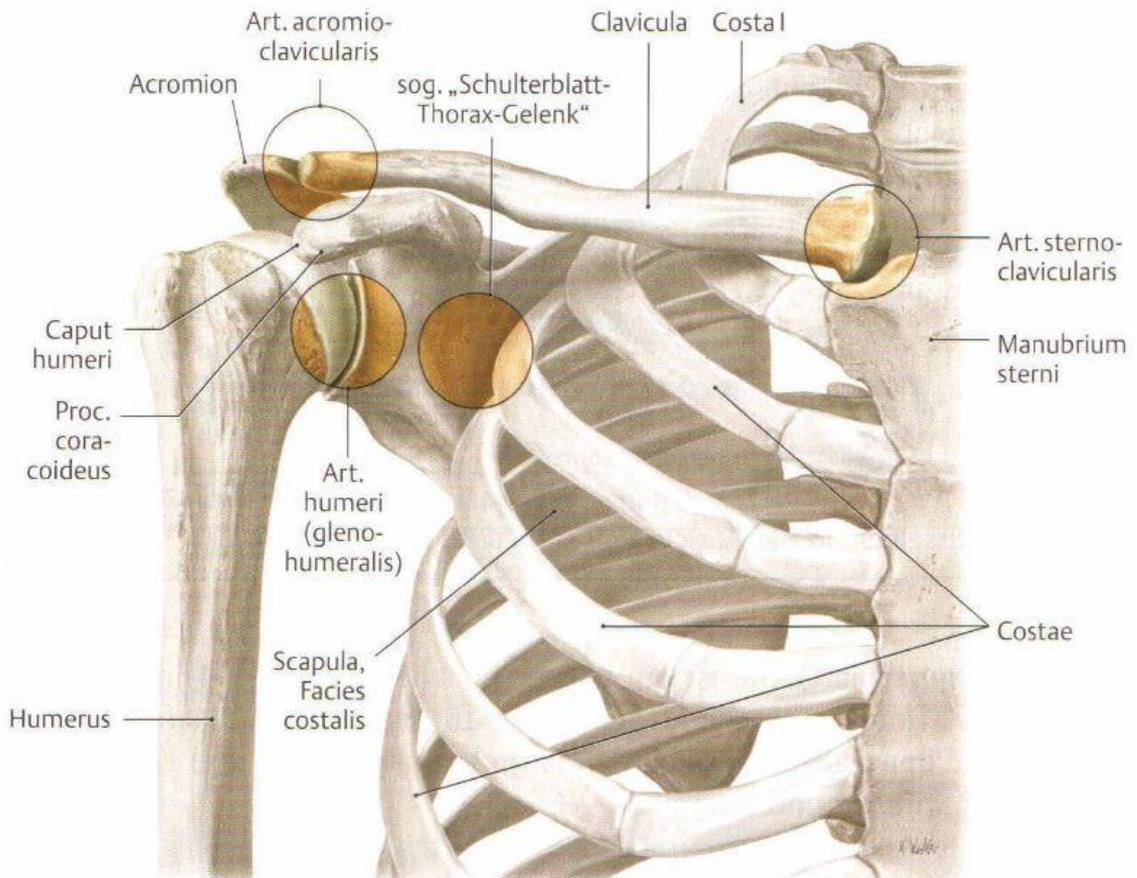


Abbildung 1: Aufbau der Schultergelenke [4]

### 1.2.2. Knöcherne Anatomie des Schultergelenks

Bei dem Glenohumeralgelenk (Articulatio glenohumeralis) handelt es sich um das eigentliche Schultergelenk. Die Cavitas glenoidalis der Scapula, auch Glenoid genannt, bildet die Gelenkspfanne, die mit dem Caput humeri (Humeruskopf) interagiert. Die Gelenkfläche des Humeruskopfes hat eine ovoide Form und steht in medialer, superiorer und posteriorer Ausrichtung. Der Humeruskopf steht dem Schaft in 130° Inklination sowie den Kondylen des Ellenbogens in 30° Retroversion gegenüber [16].

Das Glenoid wird durch eine Verdickung der Scapula unterhalb des Akromions geformt. Durch die Incisura spinoglenoidalis wird das Glenoid von der Basis des Akromions getrennt [16]. Das Tuberculum supraglenoidale an der Oberseite bietet den Ursprung der langen Sehne des M. biceps brachii, während das Tuberculum infraglenoidale an der Unterseite den Ursprung der langen Sehne des M. triceps brachii markiert [17]. Die Cavitas glenoidalis weist im Vergleich zu anderen Kugelgelenken des menschlichen Körpers nur eine sehr geringe Konkavität auf. Die Ausrichtung

des Glenoids zeigt nach lateral mit einer Abweichung von 10° bis 15° nach superior und hat nach Saha et al. eine durchschnittliche Retroversion von 7° [16-18].

Die Form der Gelenkfläche des Glenoids beschreibt die Form eines invertierten Kommas.

Howell und Galinat stellten fest, dass die durchschnittliche Tiefe des knöchernen Glenoids in anteroposteriorer Dimension lediglich 2,5 mm beträgt, in superio-inferiorer Ausrichtung dagegen 9.0 mm [17, 19].

Der Knorpel des Glenoids ist ebenfalls leicht konkav geformt. Die dünnste Stelle des Knorpels befindet sich im Zentrum des Glenoids, dem Ort mit dem meisten Kontakt zum Humeruskopf [20].

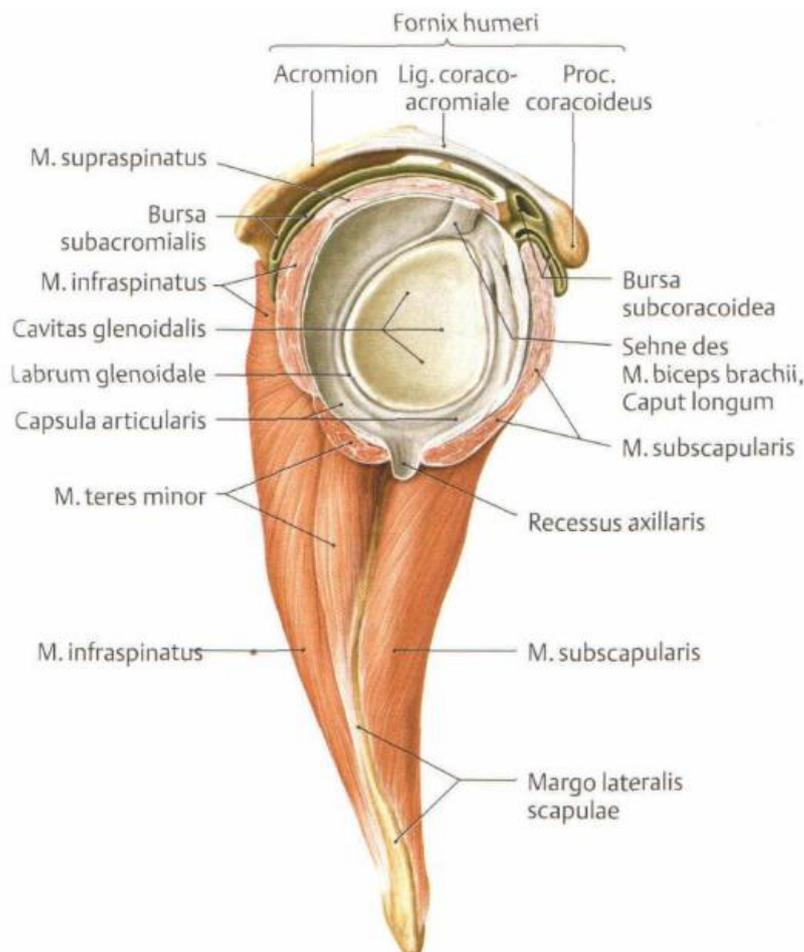


Abbildung 2: Schematische Aufsicht des rechten Glenoids[4]

Die beiden Gelenkpartner stehen bezüglich ihrer Artikulationsflächen in einem Missverhältnis. Der Humeruskopf hat eine Gelenkfläche von durchschnittlich 24 cm<sup>2</sup>, die Artikulationsfläche des Glenoids ist auf 6-7 cm<sup>2</sup> begrenzt und hat damit nur ein Viertel der Größe der Gelenkfläche des Humeruskopfes [15]. Die geringe Konkavität der Cavitas glenoidalis und das Größenmissverhältnis der Gelenkpartner sind mitverantwortlich für die große Bewegungsfreiheit

im Glenohumeralgelenk, da Translationsbewegungen des Humeruskopfes ermöglicht werden [21, 22]. Diese Faktoren bedingen allerdings auch die geringe knöcherne Stabilität des Schultergelenks [17].

Das Akromioclaviculargelenk wird durch vier ligamentäre Strukturen (Das Ligamentum acromioclaviculare, Ligamentum coracoclaviculare und Ligamentum coracoacromiale) und einen Diskus stabilisiert. Das Ligamentum coracohumerale verbindet das Acromion und den Proc. coracoideus zum sogenannten Schulterdach [23].

Das Sternoklavikulargelenk nimmt als einzige gelenkige Verbindung zwischen Schultergürtel und Thorax eine besondere Position ein. Es wird verfügt auch über einen Gelenksdiskus und wird durch vier Bänder stabilisiert (Das Ligamentum sternoclavicularia anterius et posterius, Ligamentum interclaviculare und Ligamentum costoclaviculare) [23].

Das Glenohumeralgelenk hat im Vergleich zu anderen menschlichen Kugelgelenken ein geringes Ausmaß an knöcherner Führung, was einen besonders großen Bewegungsradius ermöglicht. Um trotz dieser Eigenschaft Stabilität im Gelenk zu wahren, wird das Glenohumeralgelenk sowohl durch passive Stabilisatoren als auch durch aktive Stabilisatoren in seiner Position gehalten.

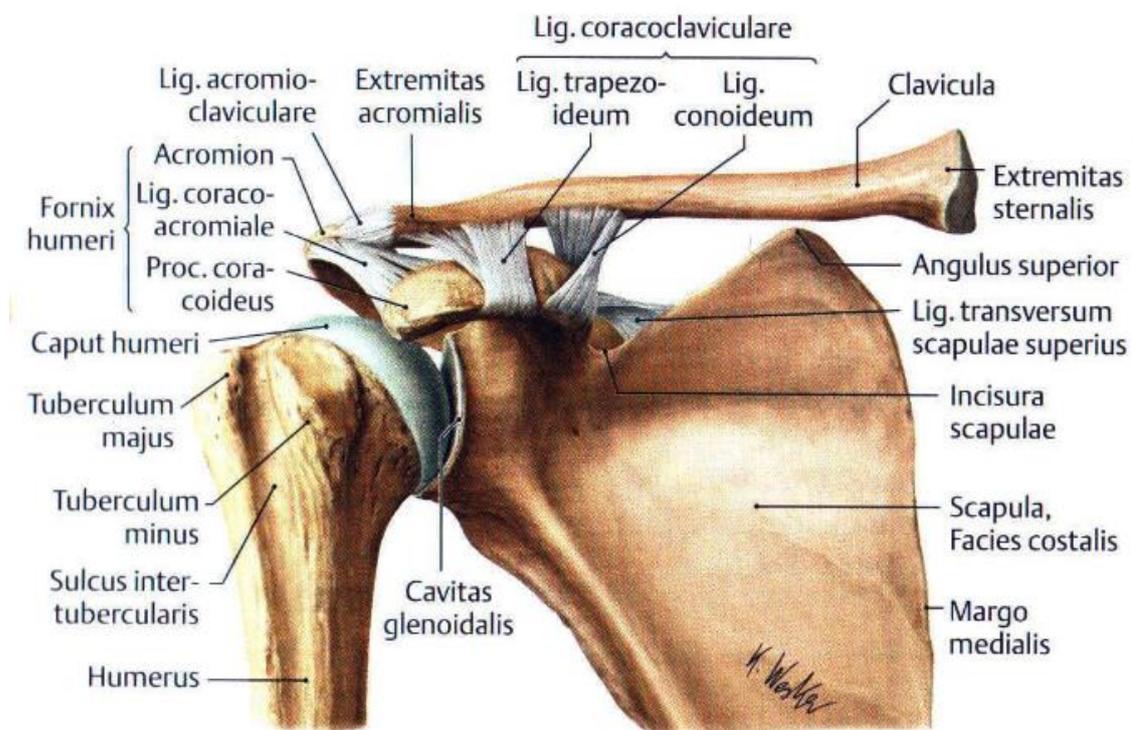


Abbildung 3: Knöcherne und ligamentäre Anatomie der Schulter [4]

### 1.2.3. Passive Stabilisatoren des Glenohumeralgelenks

Das Glenohumeralgelenk wird durch verschiedene anatomische Faktoren stabilisiert. Zu diesen auch als statische Stabilisatoren bezeichneten Strukturen werden neben der knöchernen Anatomie

des Gelenks auch die Gelenkkapsel mit negativem intraartikulärem Druck, das Labrum glenoidale und die Ligamente gezählt [14, 17, 21].

Zu den knöchernen Stabilisatoren werden im Wesentlichen der Humeruskopf und das Glenoid gezählt. Auch die Fornix Humeri wirkt stabilisierend. Sie begrenzt das Gelenk nach kranial und wird durch das Akromion, den Processus coracoideus und das Ligamentum coracoacromiale gebildet. So wird der Humeruskopf gegen kraniale, dorsale und ventrale Dislokationen gesichert [15].

Die Formgebung und Morphologie des Glenoids ist als stabilisierendes Element maßgeblich an der Stabilität des Schultergelenks beteiligt.

Die Gelenkflächen des Glenoids und des Humeruskopfes stimmen in ihrer Anatomie weitgehend überein. Aufgrund der geringen Größe der Pfanne in Relation zum Kopf ist die Kompression des Humeruskopfes in die Konkavität des Glenoids der Hauptfaktor der knöchernen Stabilität bei Mid-Range-Bewegungen im Glenohumeralgelenk [16, 24]. Hier kommt der exakten Anatomie des Glenoids in seiner Breite, Tiefe und Version eine wichtige Rolle zu [24]. Das Glenoid zeigt eine höhere Konkavität in superior-inferiorer Ausrichtung als in anterior-posteriorer Ausrichtung [16, 17]. Dies hat Auswirkung auf die Gelenkstabilität. Der Humeruskopf in der Fossa glenoidalis in superior-inferiorer Ausrichtung stärker stabilisiert als in anterior-inferiorer Richtung [16]. Lippert et al. konnten nachweisen, dass die Translationskraft, die für eine Dislokation des Humeruskopfes benötigt ist, in superiorer und inferiorer Richtung fast doppelt so stark sein muss als in anteriorer und posteriorer Richtung [24, 25].

Auch die Ausrichtung des Glenoids in Relation zur Skapula kann die Stabilität beeinflussen.

Edelson und Weishaupt et al. konnten bei Beobachtung der knöchernen Anatomie bei Glenoiddysplasie herausfinden, dass auch die Ausrichtung des Glenoids große Auswirkung auf die Stabilität hat [26, 27]. Dies spiegelt sich auch in den Arbeiten von Inui et al. wider [24, 28].

Gemäß Itoi et al. tritt ab einem Knochendefekt von mehr als 21% des superior-inferioren Diameters des Glenoids auch trotz korrekter chirurgischer Weichteilreparatur im Verlauf eine Instabilität des Glenohumeralgelenk auf [17, 29]. Burkhart et al. empfehlen eine operative Stabilisierung ab einem Knochendefekt von 25% des anterioren Glenoids [17, 30]. Auch Moroder et al. und Peltz et al. fanden eine Korrelation zwischen dem Verlust der Konkavität und damit der ursprünglichen Anatomie des Glenoids und einer Zunahme an Instabilität im Glenohumeralgelenk [24, 31, 32]

Als Gelenkpartner zum Glenoid können auch Pathologien der humeralen Anatomie die Stabilität im Glenohumeralgelenk negativ beeinflussen. Lugo et al. nennen hier als Beispiel Hill-Sachs-Läsionen, welche bei (Sub-) Luxationen das anteriore Glenoid beschädigen können oder im Rahmen einer Luxation einhaken und zu einer fixierten Luxation führen können [17].

Die Gelenkkapsel besteht aus kollagenen Fasern und reicht vom Pfannenrand bis zur Knochen-Knorpel-Grenze des Humeruskopfes. Ihr stabilisierender Effekt wirkt vor allem bei der Abduktion über 90° [15]. Das Volumen der Kapsel beträgt näherungsweise 10-15 Milliliter [16].

An dieser Stelle ist auch der negative intraartikuläre Druck als stabilisierender Faktor im Glenohumeralgelenk zu nennen. Bei herunterhängendem Arm beträgt er ungefähr 30 mmHg und schützt gegen Dislokationen vor allem in inferiorer Richtung [14, 17, 20, 24].

Das Labrum ist eine ca. 4 mm breite, fibrocartilaginöse Struktur mit triangulärem Querschnitt und umfasst ringförmig die Fossa glenoidalis. Das Labrum trägt zu 50% der Tiefe der glenoidalen Gelenkpfanne bei und erhöht die Kongruenz der Gelenkpartner. Die stabilisierende Funktion ist abhängig von der Tiefe der Cavitas glenoidalis und Stärke der Kompression des Humeruskopfes in diese. Das Labrum dient auch als Widerlager gegen Scherkräfte im Glenohumeralgelenk und als Ursprung glenohumeraler Ligamente [15-17].

Nach Entfernung des Labrums verringert sich die Stabilitätsratio, also das Verhältnis von komprimierenden zu dislozierenden Kräften, welche den Humeruskopf im Glenoid zentrieren, durchschnittlich um 20%. In der Folge verringert sich die Kraft, welche benötigt wird, um den Humeruskopf zu dislozieren [16, 20].

Der Bandapparat des Glenohumeralgelenks trägt ebenfalls zur Stabilisierung des Gelenks bei. Die Ligamente werden auch als grobfasrige Verdickung der Kapsel gesehen und erreichen ihren Effekt einerseits durch die mechanische Einschränkung von Bewegungen als auch durch in die Ligamente eingebettete Mechanorezeptoren, welche auf Antagonisten aktivierend und auf Agonisten hemmend wirken [15]. In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass die Sicherung des Gelenks durch die glenohumeralen Ligamente erst in extremen Bewegungsradien oder bei Versagen anderer Stabilisierungsmechanismen relevant wird [14, 15, 17, 21]. In mittleren Bewegungsradien wird die Stabilität vor allem durch Prinzipien wie die Muskel-Ko-Kontraktion und protektive Reflexe erhalten, der mechanische Effekt der Bänder auf die Stabilität ist hier eher gering [22].

Keines der Bänder des Glenohumeralgelenks ist während des kompletten Bewegungsbogens des Schultergelenks unter Spannung. Erst bei Erreichen extremer Bewegungsradien wirken die glenohumeralen Ligamente zusammen mit dem Kapsel-Labrum-Apparat als Hauptstabilisatoren der Schulter [20, 24].

Zu den Bändern des Schultergelenks werden das Ligamentum transversum humeri, das Ligamentum coracohumerale, das Ligamentum coracoacromiale und der Glenohumerale Bandapparat gezählt. Letzterer kann unterteilt werden in das Ligamentum glenohumerale superius, das Ligamentum glenohumerale mediale und das Ligamentum glenohumerale inferius [20].

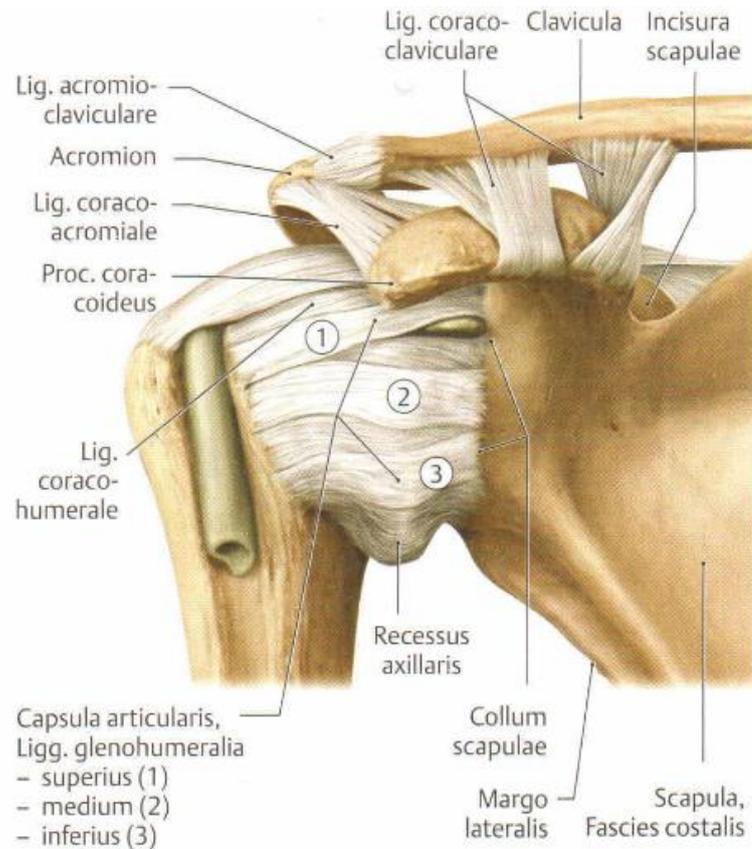
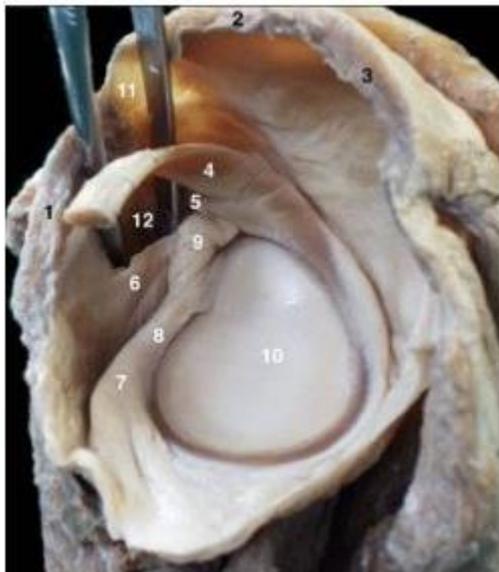


Abbildung 4: Bandapparat des Schultergelenks [4]

Das Ligamentum glenohumerale superior wirkt limitierend auf dorsale und inferiore Verschiebungen des Humeruskopfes in Flexion, Extension, Adduktion und Außenrotation [20].

Das Ligamentum glenohumerale mediale wird gespannt in Außenrotation und Abduktion bis 45° und verhindert in diesen Bewegungen eine Translation des Humeruskopfes nach anterior [20].

Das Ligamentum glenohumerale inferius wirkt als wichtigstes Band des Glenohumeralgelenks als Hauptstabilisator gegen Dislokationen nach anterior während Abduktionsbewegungen und in der Außenrotation [16, 20].



1. M.subscapularis
2. M.supraspinatus
3. M.infraspinatus
4. Caput longum M.biceps brachii
5. Lig.glenohumerale superius (SGHL)
6. Lig.glenohumerale medius (MGHL)
7. Lig.glenohumerale inferius (IGHL)
8. Labrum glenoidale
9. „Connecting band“
10. Cavitas glenoidalis
11. Rotatorenintervall
12. Recessus subscapularis (markiert durch Pinzette)

Abbildung 5: Aufsicht auf das rechte Glenoid nach Entfernung des Humeruskopfes [5]

### 1.2.4 Aktive/Dynamische Stabilisatoren des Schultergelenks

Das Glenohumeralgelenk ist im Gegensatz zu anderen Kugelgelenken des menschlichen Körpers kein formschlüssiges Gelenk. Stattdessen wird ein ausreichendes Maß an Stabilität durch den kraftschlüssigen Aufbau der Schultermuskulatur erreicht [14]. Perry et al. unterteilt die 12 muskulären Einheiten, welche für Beweglichkeit und Stabilität im Glenohumeralgelenk sorgen, in drei funktionelle Gruppen: Die oberflächliche Muskulatur mit dem Deltamuskel ist maßgeblich für die Elevation zuständig und die tiefe Muskulatur mit der Rotatorenmanschette hat ihre Hauptaufgabe in der dynamischen Stabilisierung des Gelenks. Als periphere Gruppe bezeichnet Perry et al. die Muskeln, die vom Thorax zum Humerus ziehen [14].

Aufgrund der großen Bedeutung der Rotatorenmanschette für die Gelenkstabilität wird sie im Folgenden näher beschrieben:

Der M. teres minor ist zuständig für Außenrotation und Retroflexion, der M. infraspinatus für Außenrotation und Abduktion, der M. supraspinatus initiiert die Abduktion aus 0°, der M. subscapularis ist der wichtigste Innenrotator und der wichtigste aktive und passive anteriore Stabilisator der Rotatorenmanschette [15, 16].

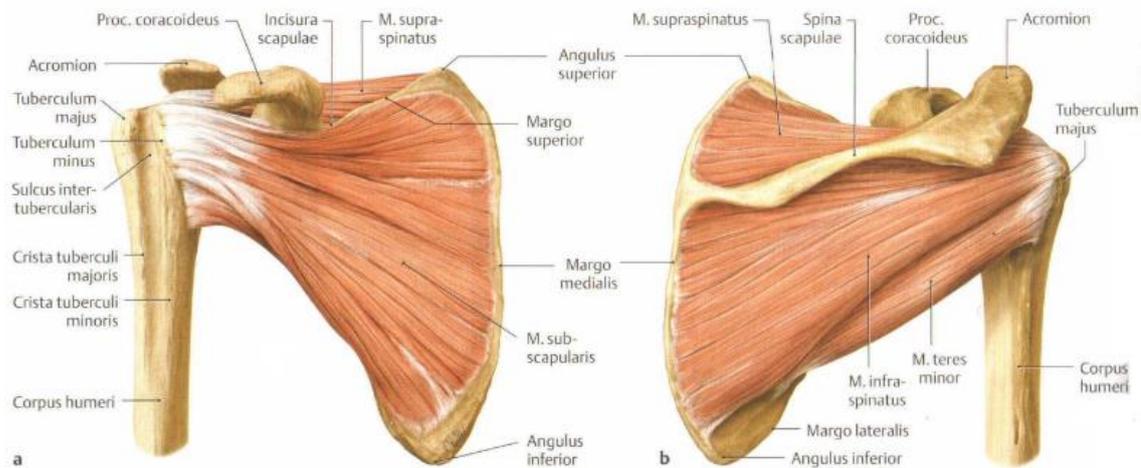


Abbildung 6: Die Rotatorenmanschette [4]

Die Schlüsselfunktion der Rotatorenmanschette in der Stabilisierung des Gelenks erfolgt durch aktive und passive („bulk effect“) Erhöhung von Kompressionskräften, Depression und Zentralisierung des Humeruskopfes in das Glenoid als Protektion gegen dezentrierende Schwerkkräfte und Erzeugung von Vorspannung in der Gelenkkapsel. Die einzelnen Muskeln der Rotatorenmanschette führen unterschiedliche Bewegungen aus, ihre Kombination trägt jedoch maßgeblich zur Stabilisierung von Bewegungen im Bereich des mittel- bis endgradigen Bewegungsausmaßes bei [14, 16, 17].

## 1.2.4 Biomechanik des Schultergelenks

### 1.2.4.1 Biomechanik Stabilität

Zur Gelenkstabilität des Glenohumeralgelenks trägt die Kombination der oben beschriebenen passiven und aktiven Faktoren bei.

Die geringe knöcherne Führung des Glenohumeralgelenks ist Grundlage des großen Bewegungsumfangs der Schulter. Aufgrund der geringen Formstabilität wird ein hohes Maß an Stabilität durch die Kraftschlüssigkeit des muskulären Aufbaus der Rotatorenmanschette erbracht.

Während bei geringen Bewegungsradien die passiven Stabilisatoren, wie das der Kapsel-Band-Apparat, der negative intraartikuläre Druck und die knöcherne Anatomie, für ein ausreichendes Maß an Stabilität beitragen, übernehmen bei mittel- und endgradigen Bewegungsausmaßen die

Muskeln der Rotatorenmanschette die Schlüsselfunktion in der Stabilisierung des Gelenks [17, 22].

Bei extremen passiven Bewegungen nehmen auch die Kapsel und vor allem die Ligamente wieder eine stabilisierende Funktion ein, wenn sie über die maximale Bandlänge gedehnt werden [21, 22, 24].

Die stabilisierende Funktion der Rotatorenmanschette ergibt sich durch ein differenziertes Zusammenspiel von Propriozeptoren und Mechanorezeptoren der kapsuloligamentären Strukturen mit der motorischen und reflektorischen Koordination der Muskulatur und durch die zentrierende Kompressionskraft, welche sich entlang des topographischen Verlaufs der individuellen Muskeln auf den Humeruskopf entwickelt [20].

Die Muskeln der Rotatorenmanschette arbeiten in funktionellen Einheiten, was als sog. „force-couple-Prinzip“ bezeichnet wird. In der Frontalebene bewirkt das Zusammenspiel aus dem M. deltoideus und dem M. supraspinatus eine Elevation, während die kaudalen Anteile der Rotatorenmanschette zusammen als Depressoren wirken. Bewegungen in der Horizontalebene werden durch die funktionelle Einheit des M. subscapularis ventralseitig und der Mm. infraspinatus und teres minor dorsalseitig als „force couple“ durchgeführt. Werden die Muskeln gleichzeitig angespannt, so wird der Humeruskopf sowohl in superoinferiorer Ausrichtung als auch in anteroposteriorer Ausrichtung in der Cavitas glenoidalis zentriert [16].

#### **1.2.4.2 Kinematik**

Mit der Kinematik wird hier die Bewegung des Schultergelenks und die sich damit verändernde Beziehung der Gelenkpartner beschrieben. Die mehrdimensionale Bewegungsfreiheit der oberen Extremität wird durch Kombination der Haupt- und Nebengelenke des menschlichen Schulterapparats und eine komplexe Kinematik des Glenohumeralgelenks ermöglicht, sodass das Bewegungsausmaß fast 65% einer dreidimensionalen Kugel abgedeckt [22].

Störungen der Kinematik können durch Schulterinstabilität, Schmerzen und Bewegungseinschränkungen symptomatisch werden. Auch bei knöchernen Glenoiddefekten kann die Kinematik des Glenohumeralgelenks gestört werden.

Die Hauptbewegungen des Glenohumeralgelenks sind Abduktion/Adduktion, Flexion/Extension und Innen-/Außenrotation.

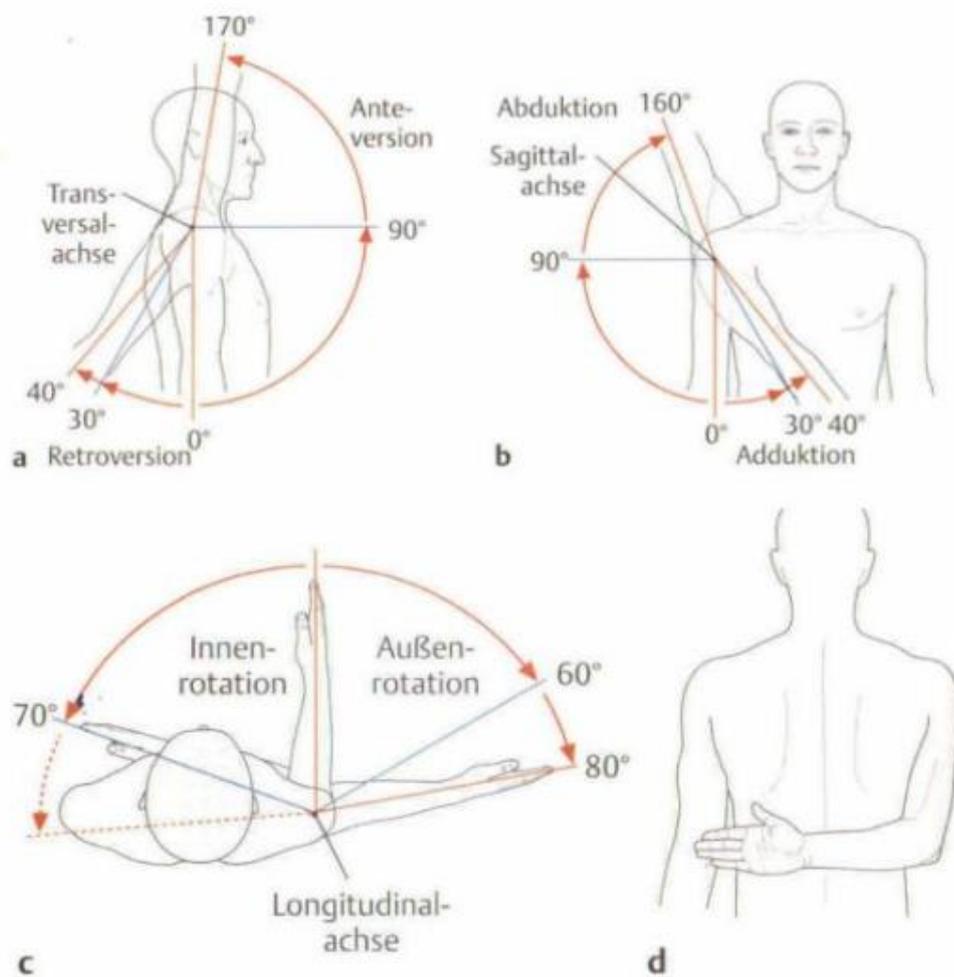


Abbildung 7: Bewegungsumfang des Glenohumeralgelenks und Gesamtbeweglichkeit der Schulter [4]

Ermöglicht werden diese Bewegungsrichtungen durch die komplexe Biomechanik des Schultergelenks und die Kombination von Rotations-, Translations- und Rollbewegungen. Differenziert werden diese Bewegungen durch die jeweils unterschiedliche Veränderung des Kontaktpunktes zwischen Humeruskopfes und Glenoid. So wird bei Translationsbewegungen lediglich der Kontaktpunkt am Glenoid verändert, bei Rotationsbewegungen am Humeruskopf und bei Rollbewegungen bei beiden Gelenkpartnern gleichermaßen [15].

### 1.2.4.3 Veränderung der Stabilität und Biomechanik bei Pathologien der Rotatorenmanschette

Verletzungen der Rotatorenmanschette sind einer der häufigsten Gründe für Schulterschmerz und für 70% der Arztbesuche bei Schulterbeschwerden verantwortlich. Die Inzidenz von Rotatorenmanschettenrupturen beträgt 20 bis 54% bei der Bevölkerung im Alter von 60 bis 80 Jahren [33].

Abgesehen von einer Kraftminderung individueller Bewegungsrichtungen je nach Verletzungsmuster der Rotatorenmanschette, droht bei Rotatorenmanschettenrupturen die Gefahr

der Instabilität im Glenohumeralgelenk. Matsen et al. beschreibt das Konkavitäts-Kompressions-Konzept des Schultergelenks als einen Ball, welcher in einer Kuhle liegt. Hierbei gilt, dass die dislozierende Kraft höher sein muss, je höher die Kompressionskraft und je tiefer die Konkavität sind [34, 35].

In ihrer Gesamtheit üben die Muskeln Rotatorenmanschette eine Kompressionskraft, die „net reaction force“, auf den Humeruskopf in Richtung Glenoid aus. Bei Läsionen und Kraftdefiziten der Muskulatur der Rotatorenmanschette fehlt diese Kompressionskraft und es entsteht ein Ungleichgewicht der zentrierenden Kräfte, was eine Dislokation begünstigen kann [20, 34].

Auch begünstigt eine Ruptur einzelner Muskeln der Rotatorenmanschette pathologische Bewegungsmuster im Glenohumeralgelenk, welche sich negativ auf die passiven Stabilisatoren auswirken können. So migriert beispielsweise der Humeruskopf bei Partialrupturen und kompletten Rupturen der Rotatorenmanschette bei der Elevation typischerweise nach kranial [16].

Durch die Kranialisierung des Humeruskopfes bei chronischen Rupturen der Rotatorenmanschette verschmälert sich den subakromialen Raum und begünstigt die Entstehung einer sekundären exzentrischen Omarthrose mit konsekutiver schmerzhafter Pseudoparalyse des Schultergelenks.

Dies wird als Rotatorenmanschetten-Defektarthropathie bezeichnet und stellt ein eigenständiges Krankheitsbild dar, welches von Neer et al. bereits 1983 als "Cuff-Tear-Arthropathy" beschrieben wurde. Neer et al. stellte damals eine Korrelation zwischen verschiedenen strukturellen Veränderungen des Schultergelenks und Rotatorenmanschetten-Massenrupturen fest [21, 34, 36, 37].

Die Defektarthropathie entsteht ätiologisch aus einer Inaktivität des Schultergelenks im Rahmen einer Rotatorenmanschettenruptur, anschließendem Einfließen glenohumeraler Synovialflüssigkeit in den Subakromialraum, eines konsekutiven Abbaus humeralen Knorpels und humeralen subchondralen Knochengewebes durch pathologisch veränderte nutritive und biomechanische Faktoren. Durch die Dysbalance zwischen M. deltoideus und der insuffizienten Rotatorenmanschette kommt es zu einer Dezentrierung des Humerus nach kranial und im Zuge dessen zu einer arthrotischen Arrosion der vorderen Anteile des Akromions und des Akromioklavikulargelenks. Final kann es zu einer starken Deformation des Humeruskopfes und resultierendem Aufbrauchen des Glenoids mit massivem Verlust des glenohumeralen Offsets kommen [16, 37].

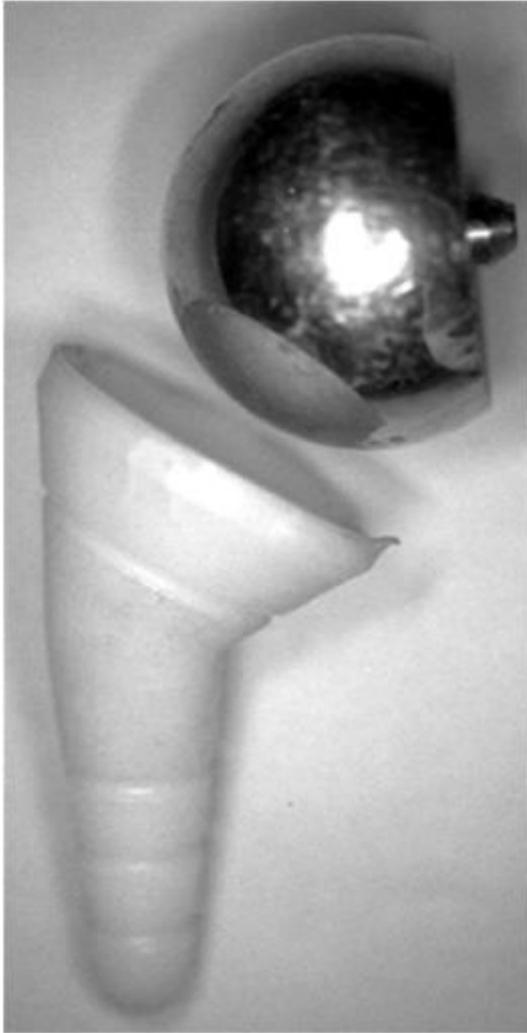
Die Ursache der Rotatorenmanschetteninsuffizienz ist für dieses Krankheitsbild nicht klar definiert und kann sowohl degenerativ als auch posttraumatisch sein [36].

## **1.3 Inverse Schulterendoprothetik**

### **1.3.1 Entwicklung der inversen Prothetik**

Für die Therapie der Defektarthropathie wurde von Neer et al. 1983 ursprünglich die Hemiarthroplastik als Erstlinientherapie empfohlen [34, 36]. Aufgrund der unbefriedigenden Ergebnisse in der postoperativen Funktionalität dieser Therapieoption hat sich diese allerdings nicht bewährt. Auch anatomische Totalendoprothesen hatten keine befriedigenden postoperativen Ergebnisse, da die fehlende Kompression aufgrund der Insuffizienz der Rotatorenmanschettenmuskulatur nicht kompensiert werden konnte und somit keine inhärente Stabilität im Glenohumeralgelenk etabliert werden konnte. In der Konsequenz kam es vermehrt zu humeraler Dezentrierung nach kranial und Lockerung der Glenoidkomponente durch zu starke exzentrische Scherkräfte [38]. Auch die Implantation von Hemi- oder bipolare Prothesen bei Insuffizienz der Rotatorenmanschette und beschädigter Fornix humeri liefert keine befriedigenden funktionellen Ergebnisse, regelhaft kommt es zu anterosuperioren Dislokationen [39].

Inverse Schulterprothesen wurden als weitere Therapieoption der Defektarthropathie mit Pseudoparalyse entwickelt. Während die ursprünglichen Modelle dem Prinzip einer gekoppelten Prothese entsprachen, welche hohe Komplikationsraten hatten, wurde die erste halbgekoppelte ("semiconstrained") Prothese im Jahr 1985 von Grammont entworfen. Diese wurde mehrmals weiterentwickelt und 1991 als Delta-III-Prothese vertrieben. Durch die Delta-III-Prothese konnte unabhängig von der Defektsituation durch Umkehr der Gelenkanatomie mit glenoidaler metallener Hemisphäre und konkaver Polyethylen-Schale an der Humerusepiphyse eine dynamisch stabile Totalendoprothese geschaffen werden [34, 39, 40].



*Abbildung 8: Erstes Modell der inversen Prothese nach Grammont 1985 mit lediglich zwei Komponenten [41]*

Das postoperative Ergebnis dieser Prothese in Bezug auf Funktionalität und Verbesserung der Schmerzsymptomatik war gut und bestimmte die weitere Entwicklung der inversen Prothesen bis heute [34].

Das Prinzip der Delta-III-Prothese bestand in der Erhöhung der Spannung des M. deltoideus und der Kompression zwischen der humeralen Prothesenpfanne und der Glenosphäre. Auch konnte durch die Etablierung eines konstanten Rotationszentrums eine inhärente Stabilität der Prothese geschaffen werden. Durch das halbgekoppelte Layout der Prothesenkomponenten mit Verwendung einer größeren Glenosphärenkomponente in Relation zur humeralen Pfanne wurde ein ausreichend großer Bewegungsradius ermöglicht.

Durch einen Versatz des Rotationszentrums nach medial und kaudal in Relation zum nativen Rotationszentrum werden durch Bewegungen um diesen Punkt die nun komprimierenden, zentripetalen Kräfte auf das Gelenk erhöht und Scherkräfte vermindert. Eine Distalisierung des Humerus ermöglicht die Erhöhung der Muskelspannung des M. deltoideus. Durch das verlagerte Rotationszentrum und somit den Versatz des Hebelarms werden vermehrt Muskelfasern des M.

deltoideus rekrutiert, welche die insuffiziente Funktion der Rotatorenmanschettenmuskulatur kompensieren. Alle drei Anteile des M. deltoideus werden zu primären Abduktoren des Schultergelenks. Deltahebelarm- und Drehmoment können vor allem in der Abduktionsstartphase verbessert werden, eine Zunahme des Drehmoments um 20-30% wird laut Grammont und Baulot durch Kaudalisierung und Medialisierung um 1 cm erreicht. Dies hatte auch negative Auswirkungen auf die Biomechanik, da die Außenrotation nur noch in limitiertem Ausmaß von den posterioren Anteilen des M. deltoideus übernommen wird. Auch ist ein strukturell und neurologisch gesunder M. deltoideus somit unerlässliche Grundvoraussetzung für die Implantation einer inversen Prothese [38, 39].

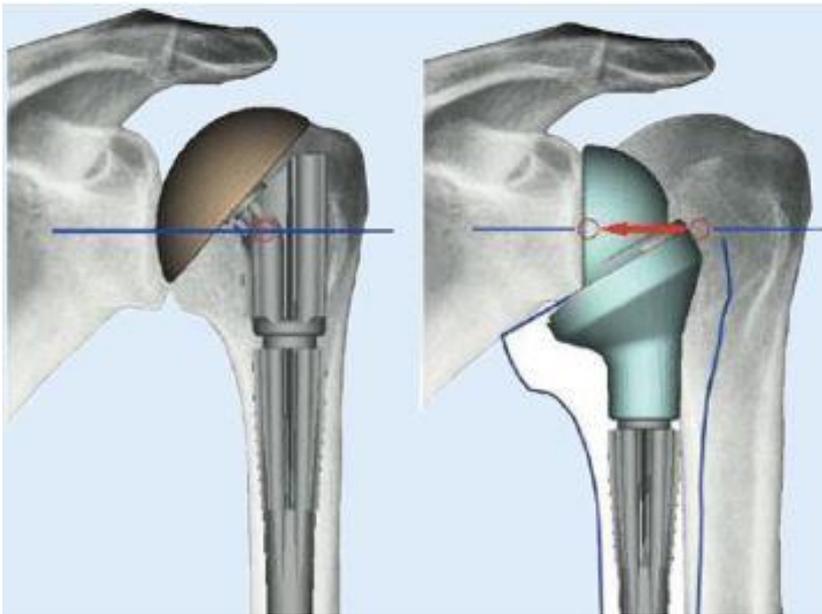


Abbildung 9: Biomechanik der inversen Schulterprothese: Erhöhung der Vorspannung und damit Verbesserung der Abduktionsfähigkeit durch Versatz des Drehzentrums nach kaudal und medial [42]



**Figure 4** Current design of the Grammont reverse prosthesis. The Delta III prosthesis has 5 parts: the glenoid base plate (metaglenoid), the glenosphere, the polyethylene cup, the humeral neck, and the humeral stem.

*Abbildung 10: Finales Design einer inversen Prothese (Delta III) nach dem Prinzip von Grammont bestehend aus Metaglène, Glenosphäre, Polyethyleninlay, Epiphyse und Humerusschaft [41]*

Trotz der verbesserten postoperativen funktionellen Ergebnisse im Vergleich zu anderen Therapieansätzen bestanden weiterhin mechanische Probleme, wie Scapular Notching, verminderte Außenrotationsfähigkeit und Konturverlust des M. deltoideus, welche neben kosmetischen Aspekten auch mit einem Kraftverlust im Glenohumeralgelenk und einem Stabilitätsverlust der Prothese einherging [34]. Scapular Notching ist eine häufige Komplikation, welche in Korrelation mit negativen klinischen Ergebnissen auftritt. Als Scapular Notching werden erosive Veränderungen der axillären Randzone am Übergang von Glenoid zu Skapulakörper (sog. Skapulahals) bezeichnet, welche bei Kontakt zwischen der Prothese und dem Schulterblatt bei Adduktionsbewegungen im Schultergelenk auftreten können [43].

Um das Auftreten dieser Komplikationen zu minimieren und das Bewegungsausmaß zu maximieren, wurden basierend auf dem Prinzip der inversen Prothesen nach Grammont in den folgenden Generationen zahlreiche Modifikationen in Bezug auf Prothesendesign und -positionierung vorgenommen und untersucht. Beispielsweise wurden Versuche unternommen, durch eine vermehrt inferiore und weniger mediale Glenosphärenpositionierung Komplikationen wie Impingement und Scapular Notching zu vermindern. Dies beruhte auf der Beobachtung, dass die Medialisierung des Rotationszentrums zwar für die Reduktion der Scherkräfte als auch die Erhöhung der Kompression an der Schnittfläche zwischen Knochen und Prothese ausschlaggebend ist und damit zu einer Verminderung von Lockerungen der Glenosphäre und

erforderlicher Initiierungskraft des Deltamuskels für Bewegungen des Schultergelenks führt. Allerdings wurde bei vermehrter Medialisierung des Rotationszentrums eine höhere Rate an Scapular Notching und ein verminderter Bewegungsradius wegen früheren Impingements beobachtet [38].

Auch für die humerale Komponente konnten protektive Faktoren bestimmt werden, um Impingement zu verhindern [38].

### **1.3.2 Wachsende Indikationen für inverse Schulterprothesen**

Durch andauernde Forschung und Innovationen im Bereich der inversen Schulterendoprothetik konnte im Laufe der Jahre nicht nur das postoperative Ergebnis bezüglich Biomechanik und Funktion, Schmerzsymptomatik und Kosmetik verbessert, sondern auch der Einsatzbereich für inverse Schulterprothesen vergrößert werden.

Nach der Zulassung der inversen Schulterendoprothese bei Defekarthropathie in den USA durch die Food and Drug Administration (FDA) im Jahr 2003, stieg die Verwendung dieses Prothesentyps stetig an. Von 2011 zu 2014 verzeichnete der Anteil von inversen Prothesen an allen Prothesenimplantationen am Schultergelenk einen Anstieg von 33% auf 46% und somit eine Erhöhung um fast 40%. Die Indikationen für inverse Prothesen wurden vielfältiger und gehen inzwischen über die Defekarthropathie hinaus. Die inverse Schulterprothese wird heutzutage neben der Defekarthropathie auch als Revisionsimplantat nach Hemi- und Totalprothesenimplantation, massiven irreparablen Rotatorenmanschettenrupturen, Osteonekrose des Glenohumeralgelenks, chronischer Instabilität, posttraumatischer Arthrose, Knochentumoren des proximalen Humerus, proximalen Humerusfrakturen bei älteren Patienten und bei Patienten mit ausgeprägten Knochendefekten des Glenoids aufgrund von inflammatorischer oder septischer Arthritis oder als Folge einer Revision nach vorhergegangener Prothesenimplantation eingesetzt [38, 44].

## **1.4 Knochendefekte des Glenoids**

Das Glenoid stellt die Artikulationsfläche für den Humeruskopf. Als Glenoiddefekte werden knöcherne Substanzverluste an der Oberfläche des Glenoids bezeichnet, deren Ätiologie variieren kann.

### **1.4.1 Ätiologie**

Glenoiddefekte werden heute bei der Versorgung mit inversen Schulterendoprothesen häufig beobachtet. Sie können durch eine Vielzahl von Primärerkrankungen des Glenohumeralgelenks entstehen und unterscheiden sich in Größe, Lokalisation, klinischer Relevanz und therapeutischer Konsequenz. Knochendefekte entstehen häufig im Rahmen der primären Omarthrose, bei Patienten mit chronischen Dislokationen des Glenohumeralgelenks, durch Glenoiderosionen im

Rahmen der Defektarthropathie, bei Revisionsoperationen oder durch Verletzung des Glenoids [1].

Die Morphologie von Glenoiddefekten richtet sich oft nach der zugrundeliegenden Ätiologie. Randständige, exzentrische Knochendefekte entstehen oft als Konsequenz einer "verhakten" oder chronisch rezidivierenden Luxation. Nach Dislokationen des Glenohumeralgelenks entstehen in 22% der Fälle Knochendefekte am Glenoid, bei rezidivierenden Dislokationen können bei 90% der Patienten Glenoiddefekte beobachtet werden [20]. Die Defektarthropathie verursacht meist den Verlust antero- oder posterosuperioren Knochens am Glenoid, während die primäre Omarthrose charakteristischerweise zu einem exzentrischen posteroinferioren Knochenverlust führt. Zu diesem Substanzverlust kommt es durch Abrieb und angeborene oder erworbene Veränderungen von Glenoidversion und -ausformung [45]. 10% bis 15% der Patienten mit primärer Omarthrose haben einen posterioren Knochenverlust, welcher aufgrund seiner Ausdehnung die Implantation der Glenoidkomponente einer Prothese ohne zusätzlichen Ausgleich des Defekts verhindert [46]. Bei der Defektarthropathie kommt es durch die Dezentrierung des Humeruskopfes nach kranial zu einer vermehrten Belastung des superioren Glenoids mit sukzessiver Arrosion [47]. Walker et al. und Donohue et al. konnten eine Korrelation zwischen vermehrt fettiger Infiltration von Muskeln der Rotatorenmanschette und posteriorem Knochenverlust als auch Retroversion des Glenoids feststellen. Gohlke et al. stellten eine vermehrte Assoziation zwischen Defektarthropathie mit sekundärer Osteoarthrose und posterosuperiorem Glenoidabrieb sowie superiorer Inklination des Glenoids fest. Bei Patienten mit intakter Rotatorenmanschette wurde dieses Defektmuster seltener gefunden [48-50]. Seltener kann es auch zur Verlagerung des Humeruskopfes nach anteroinferior mit dort lokalisiertem Knochenabrieb kommen [47].

In der revisionsendoprothetischen Versorgung mit inversen Prothesen können nach Entfernung der Glenoidkomponente der primären Prothese häufig zentrale kavitäre Knochenverluste beobachtet werden [51, 52].

Des Weiteren können Knochendefekte auch als Folge von Tumoren inflammatorischer oder septischer Arthritis entstehen [38].

### **1.4.2 Symptomatik**

Die Symptomatik eines Glenoiddefekts richtet sich stark nach der zugrundeliegenden Erkrankung, welche zur Entwicklung des Knochendefekts geführt hat. Ebenso sind das Ausmaß des Defekts und die Lokalisation entscheidend für das klinische Beschwerdebild der Patient:innen. Allgemeine Symptome beinhalten persistierende Schmerzen, verminderte Kraft und verminderten Bewegungsumfang. Eine besondere Problematik ist die glenohumerale Instabilität mit rezidivierenden Dislokationen und Subluxationen des Schultergelenks, da das native Glenoid einen wesentlichen Faktor für die Stabilität im Schultergelenk darstellt. Die Biomechanik des Glenohumeralgelenks in Bewegung wird durch knöcherne Pathologien maßgeblich verändert,

wodurch eine Instabilität besonders unter Bewegung entstehen kann. Folglich kann es zu Luxationen des Schultergelenks und damit zur weiteren Schädigung des umgebenden Weichteilgewebes, wie zum Beispiel dem Labrum oder der Rotatorenmanschette führen [53]. Auch Krepitationen bei Bewegung können auftreten. Weiterhin entsteht durch die vermehrte Instabilität des Gelenks eine zunehmende Belastung des Humeruskopfes mit konsekutiver Degeneration [54].

Glenoiddefekte verändern die Kinematik der Schulter. Durch den Verlust von glenoidalem Knochen kann eine Dezentrierung des Humeruskopfes nach kranial mit Veränderung der Muskelrekrutierung und der Gelenkmechanik entstehen. Dies führt zu verringertem Bewegungsausmaß und verminderter Kraft [55].

### **1.4.3 Bedeutung von Glenoiddefekten in der inversen Schulterendoprothetik**

Mit Innovationen im Bereich der inversen Schulterendoprothetik kam es sukzessive zu einer Ausweitung der Indikationen für die Anwendung dieses Prothesen-Typs [38, 44]. Infolgedessen trat die Problematik von Glenoiddefekten und deren Versorgung in den Vordergrund. Im eigenen Patientengut wurde im Jahr 2015 gemäß einer internen Untersuchung bei 15% der Patienten, welche mit einer inversen Prothese versorgt wurden, ein relevanter Glenoiddefekt festgestellt, heute weisen ca. 30% dieser Patientengruppe einen Glenoiddefekt auf.

Auch andere Autoren beobachten eine hohe Inzidenz von Glenoiddefekten bei der Versorgung mit inversen Prothesen, was neben anderen Gründen in hohem Masse auf die Weiterentwicklung der Prothesentechnologie und einer damit einhergehenden, vermehrten Einsetzbarkeit zurückzuführen ist, auch wenn der Anteil der Patienten in den jeweiligen Studienpopulationen stark schwankt [1, 7].

Der Anteil an Patienten, die bei Versorgung mit inversen Prothesen auch einen therapiebedürftigen Glenoiddefekt hatten, wird von Gupta et al. mit 9% beziffert [1]. Lanzetti et al. berichten von einer abnormalen Morphologie des Glenoids bei 37,5-39% der mit primärer inverser Prothese versorgten Patienten [56]. Frankle et al. berichten alleinig für das Krankheitsbild der Defekarthropathie von radiologisch abnormalen Glenoiden bei 37,5% der Patienten [1] [7]. Bei primärer Arthrose des Glenohumeralgelenks haben 10-15% der Patienten einen posterioren Glenoiddefekt, der aufgrund seiner Größe zu adressieren ist. Bei der Defekarthropathie werden größere Glenoiddefekte im superioren Bereich des Glenoids bei bis zu 40% der Patienten beobachtet [46].

Aufgrund der häufigeren Primärimplantation von Schulterprothesen ist auch die Anzahl an Revisionsoperationen anatomischer und inverser Prothesen gestiegen. Zu den Grundvoraussetzungen für eine stabile inverse Schulterprothese mit guten Langzeitergebnissen werden sowohl ein funktionell gut erhaltener M. deltoideus als auch ein suffizienter Knochen am

Glenoid gezählt [1]. Eine verminderte Knochenqualität, ein glenoidaler Knochenverlust und eine verminderte Deltaspannung stellen wesentliche Probleme der revisionsendoprothetischen Therapie dieser Patienten dar und haben direkte Auswirkungen auf den langfristigen Erfolg der inversen Prothese. Vor diesem Hintergrund konnte bei 44% bis 96% der Patienten eine implantatassoziierte Defektsituation am lateralen knöchernen Rand des Glenoids durch Notching, also Kontakt der humeralen Pfannenkomponente am inferioren Glenoid in Ruheposition und Adduktion mit konsekutivem Knochen- und Polyethylenabrieb, festgestellt werden [45, 51]. In Folge einer Verminderung der Quantität glenoidalen Knochens kommt es auch zur Abnahme der Qualität des noch bestehenden Knochens. Codsi et al. konnten nachweisen, dass es bei größeren zentralen, kavitären Glenoiddefekten zu mehr Mikrobewegungen der glenoidalen Prothesenkomponente kommt [57]. Dies kann die Verankerung der Glenosphäre und die Stabilität der Prothese beeinträchtigen. Im Rahmen von Revisionsoperationen kommt es häufig zu eben diesen Defekten [52]. Formaini et al. untersuchten die Auswirkung einer verminderten Kontaktfläche zwischen glenoidalem Knochen und der Basisplatte an knochenähnlichen Modellen. Hier konnte gezeigt werden, dass bei einer Kontaktfläche von nur 25% der Basisplatte mit glenoidalem Knochen signifikant mehr Mikrobewegungen der Prothesenkomponenten entstehen [58].

Die ungenügende intraoperative Rekonstruktion von Glenoiddefekten erhöht das Risiko von Komponenteninstabilität, Impingement, Notching und zu geringer Weichteilspannung. Auch ist die Ausgangslage für eventuelle Revisionsoperationen ungünstiger. Zu große Knochendefekte werden von manchen Autoren nach wie vor als Kontraindikation für eine Versorgung mit inversen Prothesen angesehen. Allerdings wurde durch die gesteigerte Bedeutung von Glenoiddefekten in der Schulterendoprothetik aufgrund der häufigeren Inzidenz bei der Versorgung mit inversen Prothesen auch die Nachfrage nach einem besseren Management von diesen Situationen größer. Nach Klein et al. gilt ein signifikanter, therapiebedürftiger Knochenverlust nicht mehr prinzipiell als Kontraindikation, nach Amar et al. gilt ein Glenoiddefekt nur als Kontraindikation, wenn aufgrund von Ausmaß und Morphologie die Auffüllung und Implantation eines stabilen Konstrukts nicht möglich ist [44, 56, 59-61].

Bei signifikanten Glenoiddefekten kommt es zu einer Medialisierung der nativen glenoidalen Gelenklinie. Dieser Umstand führt zu einer Fehlpositionierung der Glenoidkomponente und damit zum glenohumeralem Impingement mit Einschränkungen der Bewegungsfreiheit und skapulärem Notching. Auch wird das Risiko postoperativer Protheseninstabilität durch das Impingement erhöht, begünstigt durch die verminderte Weichteilspannung aufgrund der Medialisierung der Gelenklinie. Die Rekonstruktion der glenoidalen Gelenklinie ist Grundvoraussetzung für zufriedenstellende funktionelle Ergebnisse nach der Implantation von inversen Endoprothesen bei Schultern mit Glenoiddefekten [52]. Frankle et al. postulierten, dass Knochenverluste meist am posterioren Glenoid lokalisiert sind und zu einer Fehlpositionierung in Retroversion führen [7, 52]. Shapiro et al. konnten mit Kadaversuchen nachweisen, dass eine Verschiebung der Glenosphärenposition um 15° in Retroversion negative Auswirkungen auf die Biomechanik der Prothese hatten. Die glenohumerale Kontaktfläche wurde signifikant verringert, der Anpressdruck wurde erhöht, inferior und posterior wirkende glenohumerale Kräfte

wurden vergrößert. In der Konsequenz erhöhte sich das Risiko von Prothesenlockerung und Instabilität des Gelenkersatzes [52, 62].

Das Management von Glenoiddefekten im Rahmen der Versorgung mit inversen Schulterprothesen soll im Folgenden erklärt werden.

#### **1.4.4 Diagnostik und Assessment von Glenoiddefekten**

Eine präoperative Darstellung und Evaluation des Glenoids ist die Grundlage einer suffizienten Therapie von knöchernen Glenoiddefekten und erfordert eine genaue Diagnostik mithilfe bildgebender Verfahren [1, 63]. Standardisierte Röntgendiagnostik mit Aufnahmen in anteroposteriorer Ebene ("true anteroposterior" oder "Grashey view"), axillarer Ebene und Y-Ebene sollte durchgeführt werden, die Röntgenaufnahmen allein können Hinweise auf Glenoiderosionen geben, liefern allerdings keine ausreichende Genauigkeit für die Therapieplanung [1].

Ein vermindertes Akromio-Humerales Intervall unter 6 mm, eine Abrundung des Humeruskopfes und des Tuberculum majus ("Femoralization"), konkave erosive Veränderungen der nativen Anatomie von Akromion und akromioclavicularem Bogen (sog. „Acetabulization“) im Rahmen der Kranialisierung des Humeruskopfes und eine Medialisierung der Gelenklinie sind radiologische Anzeichen eines bestehenden Glenoiddefekts im Röntgen. [7, 10, 60].

Als weiterführende radiologische Diagnostik wird eine Multi-Slice-Computertomographie des Humeruskopfes und der gesamten Skapula empfohlen, anhand derer anschließend dreidimensionale Aufnahmen rekonstruiert werden können [1, 24, 46, 52, 64]. Dies erlaubt eine exakte Quantifizierung der glenoidalen Defektsituation. Die dreidimensionale Rekonstruktion bietet vor allem bei Primäroperationen der Schulter einen diagnostischen Mehrwert, bei Revisionsoperationen vermindert die bereits implantierte Prothese die Qualität der 3D-CT und damit ihre Aussagekraft [1, 44, 45, 52].

Für primäre Prothesenimplantationen konnte gezeigt werden, dass die präoperative Diagnostik und Operationsplanung mit dreidimensionalen CT-Aufnahmen der wichtigste Prädiktor der korrekten Positionierung der glenoidalen Prothesenkomponente ist [49]. Scalise et al. berichteten, dass die präoperative Planung mit dreidimensionalen computertomographischen Aufnahmen der Schulter die postoperativen Ergebnisse bei der Implantation von inversen Schulterendoprothesen verbessert und die Planung von chirurgischen Therapieansätzen für Glenoiddefekte aufgrund der genaueren Darstellung des Knochenverlusts günstig beeinflusst [64]. Auch Gohlke et al. legten die dreidimensionale Darstellung des Glenoids mittels 3D-CT als Voraussetzung für eine erfolgreiche Planung und Implantation von Schulterprothesen fest [50].

Als Entscheidungshilfe für die korrekte Quantifizierung der individuellen Defektsituation am Glenoid und die Auswahl einer geeigneten Therapie können verschiedene Klassifikationssysteme

verwendet werden. Diese basieren auf unterschiedlichen diagnostischen Techniken. Meist wurden hierfür standardisierte Röntgenaufnahmen oder zweidimensionale Computertomographien genutzt, heutzutage werden hierfür vermehrt dreidimensional rekonstruierte Computertomographien verwendet [63]. Die einzelnen Klassifikationen werden im Kapitel 1.5.6 vorgestellt.

Die Magnetresonanztomographie hat einen geringen Stellenwert in der präoperativen Diagnostik von Glenoiddefekten. Lediglich für die Darstellung von Pathologien des Knorpels und der glenoidalen Oberfläche wird von manchen Autoren dennoch die Anfertigung einer Magnetresonanztomographie empfohlen [65].

### **1.4.5 Therapie von Glenoiddefekten**

Die Rekonstruktion des Defekts und der nativen glenohumeralen Gelenklinie ist von essenzieller Bedeutung für das postoperative Ergebnis [1, 52]. Knochendefekte und die damit einhergehende Medialisierung der Gelenklinie wirken sich negativ auf die korrekte Implantatposition, postoperative Stabilität und Inzidenz von Impingement aus [52]. Prinzipiell kann der glenoidale Knochenverlust auf verschiedene Arten ausgeglichen werden. Die Wahl der optimalen Therapiestrategie ist individuell zu treffen und wird durch eine präoperative Klassifikation ermöglicht.

Die Verwendung von anatomischen Totalendoprothesen hat bei der Versorgung von Pathologien der Schulter bei gleichzeitig bestehenden glenoidalen Knochendefekten bislang schlechtere Langzeitergebnisse zur Folge. Frühzeitige postoperative Lockerungen der Glenoidkomponente wurden durch Resorption und Einsinken des zum Ausgleich des Defekts verwendeten Knochenpräparats mit anschließender Protheseninstabilität begünstigt. Mit inversen Schulterendoprothesen konnten bessere postoperative Ergebnisse erreicht werden [1, 45, 59]. Wie auch die anatomische Prothese, bietet die inverse Schulterprothese die Möglichkeit, die glenoidale Basisplatte auch mit untergelegtem Knochenkeil zementfrei und stabil zu verankern. Jedoch begünstigt die inverse Schulterprothese aus biomechanischen Gründen die Einheilung von Knochentransplantaten [45]. Bei anatomischen Totalendoprothesen wirkt die Zugkraft des M. deltoideus zentrifugal zum Drehzentrum. Dies wird durch die Umkehr des Konkav-Konvex-Aufbaus des Schultergelenks bei Implantation einer inversen Prothese in zentripetale Kräfte umgewandelt, was zu einer Verminderung von Scherkräften und einem axialen Zug auf das Glenoid führt. Dies begünstigt die Osteointegration von Knochentransplantaten [39].

Glenoiddefekte variieren in Ausmaß, Form und Lokalisation. Dementsprechend existieren unterschiedliche Therapiemöglichkeiten, die sich von exzentrischem Fräsen des Glenoids ("excentric reaming") bei kleineren Defektsituationen bis zum kortikospongiösen Auto- oder Allograft bei größeren Defekten erstrecken [1].

Folgende Therapieoptionen stehen grundsätzlich zur Auswahl:

## 1. Exzentrisches Fräsen ("eccentric reaming")

Bei dieser chirurgischen Technik wird durch Abfräsen von peripheren Anteilen des Glenoids eine optimierte Auflagefläche für die glenoidale Basisplatte geschaffen. So kann die Kontaktfläche zwischen Knochen und Prothesenkomponente vergrößert und damit die Stabilität verbessert werden. Hierbei können auch die glenoidale Ausrichtung und die glenoidale Neigung adressiert werden. Ziel ist es, eine neutrale Verankerungsfläche für die Glenoidkomponente zu schaffen, um eine möglichst große Kontaktfläche zwischen Knochen und Implantat herstellen zu können und damit das Risiko von Prothesenlockerungen zu minimieren [66] [67].

Bei ausgiebigem glenoidalen Fräsen kann es zur Verminderung der subchondralen Knochenmatrix und im Rahmen dessen zu einer schlechteren Verankerung der Basisplatte kommen. Auch besteht das Risiko, durch zu starkes Abfräsen das Drehzentrum der Prothese zu verlagern, was zu einem schlechteren funktionellen Ergebnis der inversen Prothese, Instabilität und Impingement führen kann [68]. Bei kleinen Glenoiddefekten hat sich exzentrisches Fräsen als effiziente Therapieoption durchgesetzt, um die korrekte Positionierung der Basisplatte zu ermöglichen [67] [69].

Klein et al. verglichen die postoperativen Ergebnisse von inversen Prothesen bei Patienten mit Glenoiddefekten, welche auf unterschiedliche Weise ausgeglichen wurden. Postoperativ zeigten sich zwischen Patienten, deren Glenoiddefekt mit exzentrischem Fräsen ausgeglichen wurde, und Patienten, welche einen knöchernen Aufbau durch einen Allograft benötigten, keine Unterschiede in der Schmerzreduktion und funktionellem Outcome. Bei beiden Patientengruppen konnte im Vergleich zur präoperativen Situation eine Verbesserung der Schmerzen und der Funktionalität festgestellt werden [60, 67]. Von Vorteil ist auch, dass der noch bestehende glenoidale Knochen erhalten bleibt und im Gegensatz zu den Knochentransplantaten nicht das Risiko von Pathologien der Entnahmestelle besteht [60]. Allerdings wird exzentrisches Fräsen nicht für größere Glenoiddefekte oder Glenoiddefekte mit signifikanter Medialisierung der Gelenklinie empfohlen.

## 2. Knochenersatz ("bone grafting")

Die Rekonstruktion des nativen Glenoids durch Knochenersatz ist bei signifikantem Knochenverlust angezeigt, wenn ein Ausgleich der glenoidalen Defektsituation durch die Anwendung von exzentrischem Fräsen nicht in ausreichendem Maße möglich ist. Eine Korrektur des Knochenverlusts durch exzentrisches Fräsen geht in diesen Fällen mit einer zu starken Reduktion des glenoidalen Knochens einher [67].

Die Verwendung von Knochenersatz im Rahmen der primären Implantation inverser Prothesen ist indiziert bei Glenoiderosionen, welche durch exzentrisches Fräsen nicht ausgleichbar sind, mehr als 15° glenoidaler Retroversion, verminderter glenoidaler Knochenqualität und verminderter glenoidaler Knochenmasse, weniger als 50% Kontaktfläche zwischen glenoidaler Basisplatte und Glenoid und zentralen Defektsituationen mit Medialisierung der Gelenklinie [67, 68, 70].

Knochenersatztechniken am Glenoid sind kosteneffizient und bieten eine gute Möglichkeit der Wiederherstellung des nativen Glenoids zur Verankerung der Basisplatte ohne das Risiko einer Medialisierung der Gelenklinie. Auch ist Knochenersatz bei

Revisionsoperationen der Schulter eine etablierte Technik zur Wiederherstellung der glenoidalen Anatomie. Allerdings ist diese Therapieoption assoziiert mit höheren Komplikationsraten, vermehrtem Blutverlust und längerer Operationsdauer als exzentrisches Fräsen. Auch besteht das Risiko von Pathologien der Entnahmestelle und bei der Verwendung von Allografts das Risiko von Abstoßungsreaktionen des verwendeten Aufbaumaterials [70].

Mit Autografts, Allografts oder synthetischem Knochenersatz bestehen mehrere Möglichkeiten, welche entsprechend den individuellen Anforderungen ausgewählt werden sollten. Beispielsweise empfehlen Scalise und Iannotti die Verwendung von autogenen Beckenkammtransplantaten zum Ausgleich von massiven Glenoiddefekten bei Revisionsoperationen mit Implantation einer inversen Schulterprothese [71].

Die Inkorporationsraten von Autograft-Transplantaten sind mit 86% kompletter oder Teil-Inkorporation im Vergleich zu Allografts mit 66% als überlegen anzusehen [72]. Inverse Schulterendoprothesen bieten eine bessere Grundlage für den Einsatz von Knochentransplantaten als anatomische Schulterprothesen. Dies liegt an den besseren Fixationsmöglichkeiten des eingesetzten Knochenspanns und den höheren Kompressionskräften auf das Neo-Glenoid [73].

Boileau et al. führten mit der Beschreibung der BIO-RSA ("Bony-increased offset-reverse shoulder arthroplasty") eine Technik ein, bei welcher aus dem routinemässig bei Versorgung mit einer inversen Prothese entnommenen Humeruskopf ein Knochenspan entnommen wird. Dieser wird anschliessend zur Rekonstruktion des Knochenverlustes unter der Basisplatte fixiert. Das eingesetzte Transplantat kann entsprechend der Defektsituation symmetrisch oder asymmetrisch geformt sein. Mithilfe der BIO-RSA-Technik kann auch bei Knochenverlusten am Glenoid eine Gelenkbiomechanik geschaffen werden, deren postoperative funktionelle Ergebnisse vergleichbar mit den Werten nach Implantation inverser Prothesen ohne Defektsituation sind [73-75].

Beim sogenannten „Bone Impaction Grafting“ werden Glenoiddefekte durch das Einsetzen von Knochenchips ausgeglichen, welche durch Verdichtung von gemahlener Autograft- oder Allograft-Spongiosa erzeugt werden [45, 76].

Knochenverluste am Glenoid können auch durch einen knöchernen Aufbau ausgeglichen werden, bei dem der zu implantierende Knochenspan dreidimensional an die Defektgeometrie angepasst und auf einer Basisplatte fixiert wird, die aus Kunststoff oder Metall besteht und sich durch einen langen zentralen Verankerungszapfen auszeichnet ("composite graft"). Die Kombination aus dem Knocheninterponat und Kunststoffkomponente wird nun mit dem Verankerungszapfen in der Defektsituation befestigt. Dadurch soll eine stabile Fixierung und ein Einwachsen des Knochenaufbaus gewährleistet werden [1, 11, 77]. Auch hier konnten in mehreren Studien verlässlich gute Inkorporationsraten, funktionelle Ergebnisse und Schmerzreduktion gezeigt werden [1, 67, 78, 79].

Neben der Auswahl der Entnahmestelle des Knochenersatzes ist auch die Entscheidung bezüglich eines einstufigen ("single-stage") oder zweizeitigen ("two-stages") Vorgehens bei der Rekonstruktion von Glenoiddefekten individuell entsprechend der vorliegenden Defektsituation zu treffen. Gupta et al. analysierten in einer Follow-Up-Studie, dass bei

fortgeschrittenen exzentrischen und zentrischen Knochendefekten ein zweizeitiges Vorgehen indiziert ist, wenn der zentrale Verankerungszapfen der glenoidalen Basisplatte nicht zu mindestens 50% der Zapfenlänge in der nativen Skapula sitzt. Bei der zweistufigen Therapie wird zunächst ein Knochentransplantat eingesetzt und mit Kortikalisschrauben fixiert, bevor im nächsten Schritt eine Prothese eingesetzt wird. Dieses Verfahren kam bei 8% der Patienten mit Glenoiddefekt zum Einsatz, bei 92% der Patienten konnte in einer Operation der Knochenverlust adressiert und die Prothesenimplantation einer inversen Prothese durchgeführt werden [1].

### 3. Augmentierte glenoidale Basisplatten

Augmentierte Basisplatten gleichen den Knochenverlust am Glenoid aus und bieten eine stabile Plattform für die Basisplatte der inversen Prothese bei massivem glenoidalen Knochenverlust. Diese Operationstechnik mit Implantation von Metall-augmentierten Glenoidkomponenten wurde 2011 in die inverse Schulterendoprothetik eingeführt und hat in den letzten Jahren an Popularität gewonnen. Die Indikationen für die Verwendung augmentierter glenoidaler Basisplatten sind vergleichbar mit dem Knochenersatz. Augmentierte Basisplatten sind in verschiedenen Formen und Ausführungen erhältlich und lassen sich so an die individuelle Defektsituation anpassen [67]. Ähnlich wie bei glenoidalem Knochenersatz bietet auch die Verwendung von augmentierten Basisplatten den biomechanischen Nutzen einer vermehrten Weichteilspannung. Ein weiterer Vorteil der augmentierten Basisplatten ist die im Vergleich zur Implantation von Knochentransplantaten geringere technische Komplexität und die kürzere Operationszeit. Des Weiteren besteht nicht das Risiko einer Resorption des Transplantats oder einer ausbleibenden Inkorporation [67, 68]. Allerdings sind augmentierte Basisplatten teuer und nicht universell erhältlich.

Sirveaux et al. konnten zeigen, dass bei 96% der Patienten, welche mit inversen Schulterendoprothesen mit augmentierter glenoidaler Basisplatte versorgt wurden, befriedigende postoperative Ergebnisse vorlagen [2] [41]. Auch in anderen Studien konnten gute postoperative Ergebnisse mit geringen Komplikationsraten für die Verwendung von augmentierten Basisplatten zum Ausgleich von Knochendefekten gezeigt werden [77, 80]. Die Standzeit der augmentierten Basisplatten muss noch in geeigneten Langzeitstudien überprüft werden [67].

### 4. Individuell angepasste glenoidale Basisplatten („custom glenoid implant“)

Die Implantation einer individuell angepassten glenoidalen Basisplatte kann bei Patienten mit massivem Knochenverlust am Glenoid indiziert sein, wenn die Verwendung von traditionellen Techniken zum Knochenaufbau nicht erfolgversprechend scheint, weil das Ausmaß des Glenoiddefekts zu ausgeprägt ist. Auch bei verminderter Knochenqualität des Glenoids oder Kontraindikationen für einen knöchernen Glenoidaufbau können individuell angepasste Basisplatten angewandt werden. Die Glenoidkomponente wird hier an die dreidimensionale Anatomie des pathologisch veränderten Glenoids angepasst, maximiert die Kontaktfläche und ermöglicht so eine stabile Verankerungsbasis für die Prothese [81]. In der Literatur zeigte dieses Verfahren gute postoperative Ergebnisse bei allerdings höheren Revisionsraten. Dies kann allerdings auch der Verwendung individueller Basisplatten in ausschließlich komplexen Defektsituationen geschuldet sein

[81]. Allerdings verhindern die höheren Produktionskosten, der vermehrte Planungsaufwand und die längere Vorbereitungszeit die ubiquitäre Verwendung dieser Therapieoption. In die Entscheidung für die Implantation einer individuell angefertigten Basisplatte sollten neben dem Ausmaß des Glenoiddefekts auch Faktoren wie das Patientenalter und der Funktionsanspruch einfließen.

Die Auswahl der optimalen Versorgungsstrategie für die individuelle glenoidale Defektsituation ist weiterhin eine komplexe Fragestellung. Grundsätzlich orientiert sich die Therapie an Form, Volumen und Ausrichtung des Knochendefekts, beziehungsweise des noch bestehenden glenoidalen Knochens, und daran, ob eine primäre Implantation oder eine Revisionsoperation durchgeführt werden soll. Um Glenoiddefekte standardisiert evaluieren und eine Entscheidungshilfe bezüglich des optimalen Management des Knochendefekts bieten zu können, wurden bereits verschiedene Klassifikationssysteme entwickelt – bisher gibt es hier allerdings noch keinen Konsens [67] [82].

## **1.4.6 Klassifikationssysteme für Knochendefekte am Glenoid**

Das präoperative Assessment hat eine große Bedeutung für die optimale Versorgung von Glenoiddefekten [1] [63]. Um eine differenzierte Einschätzung der Defektsituation zu ermöglichen und eine Vergleichsbasis zu schaffen, wurden verschiedene Klassifikationssysteme entwickelt. Walch et al. beschreiben die Aufgaben der gleichnamigen, frequentiert eingesetzten Walch-Klassifikation als Entscheidungshilfe für das operative Management, als Grundlage für die Kommunikation unter Operateuren und als Wegweiser für prognostische Aussagen. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden ist eine möglichst optimale Interobserver und Intraobserver Reliabilität vonnöten [83].

### **1.4.6.1 Unterschiedliche Klassifikationssysteme von Glenoiddefekten**

Im Folgenden sollen bereits bestehende Klassifikationen vorgestellt werden, um eine Vergleichsgrundlage für das in dieser Arbeit untersuchte Klassifikationssystem zu schaffen.

#### **1.4.6.2 Klassifikation nach Walch et al.**

Im Jahr 1999 wurde von Walch et al. eine Klassifikation für die Glenoidmorphologie bei primärer Osteoarthrose entwickelt. Die ursprüngliche Version der Walch-Klassifikation bietet die drei Haupteinteilungsmöglichkeiten Typ A, Typ B und Typ C entsprechend den morphologischen Gegebenheiten in der transversalen (axialen) Schnittebene von zweidimensionalen computertomographischen Aufnahmen. Typ A wurde definiert als symmetrische Glenoiderosion aufgrund eines zentriert liegenden Humeruskopfes und damit gleichmäßiger Kräfteverteilung auf das gesamte Glenoid ohne glenohumerale Subluxation. Bei Vorstellung des Klassifikationssystems war Typ A mit 59% die am häufigsten identifizierte Glenoidmorphologie bei 113 untersuchten Schultern. Typ A kann gemäß des Schweregrades der Glenoiderosion unterteilt werden in A1 und A2. Typ A1 zeichnet sich durch geringen zentralen Glenoidabrieb

aus, Typ A2 durch starken zentralen Abrieb oder massive zentrale Erosion. Typ B zeichnet sich dagegen durch eine Subluxation des Humeruskopfes nach posterior aus, welche eine ungleichmäßig verteilte Kräftewirkung auf das Glenoid zur Folge hat. Vor allem in den Anfangsstadien der Osteoarthritis kann dies zu bedeutendem Knochenverlust vor allem am posterioren Glenoid führen. 32% der bewerteten Glenoide wurden als Typ B eingestuft. Auch Typ B kann entsprechend der Ausprägung des Knochenverlustes in B1 und B2 eingeteilt werden. Als Typ B1 werden hier Glenoide mit posteriorer Gelenkspaltverschmälerung, subchondraler Sklerose und Osteophytenwachstum bezeichnet, welche keine offensichtliche Glenoiderosion vorweisen. Bei Typ B2 wird dagegen durch deutlichen Knochenverlust am posterioren Glenoid eine bikonkave Formgebung des Glenoids suggeriert. In die Kategorie Typ C wurde jedes Glenoid mit einer Retroversion von mehr als 25° unabhängig von der Morphologie des vorliegenden Knochenabriebs eingeteilt. Meist konnte eine Glenoiddysplasie als Ursache für die Retroversion identifiziert werden. Typ C wurde bei 9% der untersuchten Glenoide beobachtet [1, 6, 83].

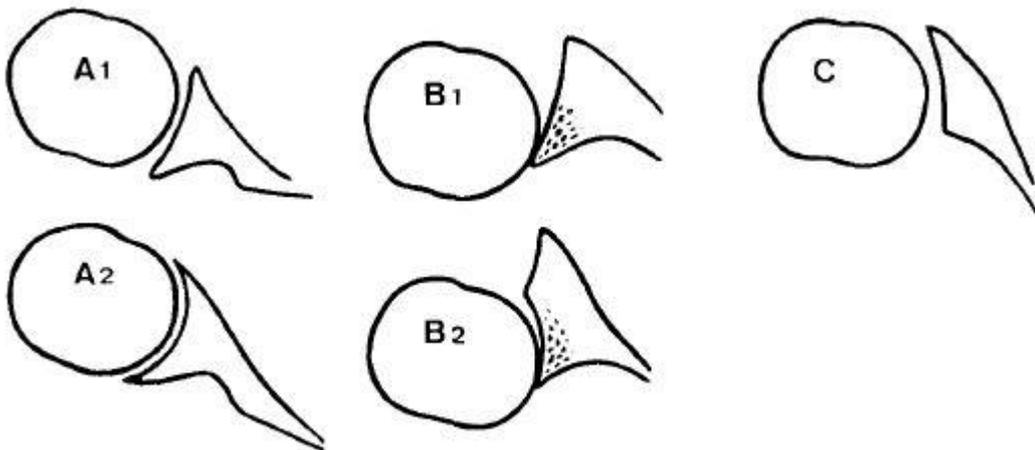


Abbildung 11: Morphologische Einteilungsmöglichkeiten des Glenoids bei primärer Osteoarthritis gemäß des Klassifikationssystems nach Walch et al.[6]

Mehrere Studien haben die Reliabilität des ursprünglichen Klassifikationssystems nach Walch et al. überprüft. Die Arbeitsgruppe selbst veröffentlichte bei Vorstellung des Klassifikationssystems auch eine Reliabilitätsanalyse. Hier wurde eine beachtliche Übereinstimmung (Kappa = 0.65 – 0.7) bei Bestimmung der Interobserver Reliabilität festgestellt. Auch für die Intraobserver Reliabilität wurde eine beachtliche Übereinstimmung (Kappa = 0.65 – 0.7) bemessen. Die Reliabilitätsanalyse im Rahmen dieser Studie wurde an Computertomographien von 24 erkrankten Glenoiden durch zwei verschiedene Bewerter durchgeführt. Allerdings ist hier anzumerken, dass für diese Validierungsstudie lediglich die Einteilung in die Hauptgruppen A, B und C vorgenommen wurde. Eine präzise Unterteilung in die jeweiligen Subgruppen wurde nicht untersucht [6, 83].

Auch weitere Autoren überprüften die Intra- und Interobserver Reliabilität der Walch-Klassifikation mit sehr heterogenen Ergebnissen.

Kidder et al. führten eine Studie mit drei Observern an Computertomographien von 116 Schultern durch. Eine vereinfachte Version der Walch-Klassifikation ("Regroup Walch classification") auf die drei Haupttypen Typ A, B und C wurde auch untersucht. Eine moderate Interobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.6$ ) und eine exzellente Intraobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.866$ ) wurden festgestellt. Für die vereinfachte "Regroup Walch classification" wurde eine moderate Interobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.548$ ) und eine exzellente Intraobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.915$ ) bestimmt [83, 84].

Scalise et al. konnten bei der Bewertung von Computertomographien von 24 Schultern durch vier Observer eine ausreichende Übereinstimmung in der Interobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.34$ ) und Intraobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.37$ ) nachweisen. Bei der Untersuchung der "Regroup Walch classification" mit drei Haupttypen zeigte sich eine moderate Interobserver Reliabilität [83, 85].

Nowak et al. analysierten die Reliabilität mit acht Observern an Computertomographien von 26 Schultern. Im Durchschnitt zeigte sich eine moderate Interobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.508$ ) und eine beachtliche Intraobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.611$ ). Es konnte gezeigt werden, dass der unterschiedliche Erfahrungsstand der Observer keine Auswirkungen auf die Übereinstimmung der Intraobserver Reliabilität hatte [83, 86].

Bercik et al. untersuchten die Klassifikation an dreidimensionalen Rekonstruktionen aus Computertomographien von 129 Schultern mit drei Observern. Hier zeigte sich eine ausreichende Interobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.391$ ) und eine moderate Intraobserver Reliabilität ( $\text{Kappa} = 0.604$ ) [3, 83].

Lowe et al. stellten an Computertomographien und Magnetresonanztomographien von 30 Patienten durch drei Observer eine ausreichende Interobserver Reliabilität bei Computertomographien ( $\text{Kappa} = 0.26 - 0.34$ ) und Magnetresonanztomographien ( $\text{Kappa} = 0.23 - 0.26$ ) fest. Für die Intraobserver Reliabilität zeigte sich eine moderate Übereinstimmung bei Bewertung von Computertomographien ( $\text{Kappa} = 0.47 - 0.60$ ) und eine gute Übereinstimmung bei Magnetresonanztomographien ( $\text{Kappa} = 0.61 - 0.73$ ) [83] [87].

Diese Klassifikation ist die Grundlage der heute im klinischen Alltag häufig angewandten Walch-Klassifikation, auch wenn das ursprüngliche System mehrfach modifiziert und überarbeitet wurde.

#### **1.4.6.3 Modifizierte Walch-Klassifikation nach Bercik et al.**

Aufgrund der heterogenen Ergebnisse verschiedener Reliabilitätsanalysen der ursprünglichen Walch-Klassifikation wurde das Klassifikationssystem 2016 von Bercik et al. weiterentwickelt und an moderne Anforderungen adaptiert.

Als Grundlage für die Anwendung der modifizierten Walch-Klassifikation nach Bercik et al. wurde nicht mehr die axiale Schnittebene einer zweidimensionalen Computertomographie, sondern die korrigierte axiale zweidimensionale Schnittebene einer dreidimensional rekonstruierten Computertomographie empfohlen. Hintergrund davon war die verbesserte Darstellung der transversalen Schnittebene in planer Skapulaebene in der dreidimensionalen Rekonstruktion [3]. In mehreren Studien konnte davor die Überlegenheit der Verwendung dreidimensional rekonstruierter Computertomographien im Vergleich zu zweidimensionalen Computertomographien gezeigt werden [64] [88] [89].

Zusätzlich zu den Einteilungsmöglichkeiten der ursprünglichen Walch-Klassifikation, welche sich auf die fünf Typen A1-A2, B1-B2 und C beschränkte, wurden folgende Glenoidmorphologien charakterisiert: Typ B3 wurde definiert als monokonkaves Glenoid mit posterioem Abrieb, mindestens 15° Retroversion und/oder 70% posteriorer Subluxation des Humeruskopfes. Weiterhin wurde Typ D eingeführt für Glenoide mit Anteversion oder Subluxation des Humeruskopfes um weniger als 40%, was einer anterioren Subluxation entspricht [3].

Der Typ A2 war bereits in der ursprünglichen Walch-Klassifikation als Glenoid mit massivem zentralem Abrieb beschrieben. Um eine genauere Abgrenzung zum Typ A1 zu ermöglichen, wurde Typ A2 nun als Glenoid mit zentralem Defekt festgesetzt, bei dem im axialen Computertomographie-Schnitt eine Verbindungslinie zwischen anteriorem Glenoidrand und posterioem Rand den Humeruskopf durchschneiden würden. Diese Linie würde bei Typ A1 zu die Konturlinien des Humeruskopfes nicht kreuzen [3].

Ferner wurde die Einteilungsmöglichkeit Typ C der ursprünglichen Walch-Klassifikation exakter definiert. Als Typ C wurden nun Glenoide definiert, welche  $25^\circ$  Retroversion aufweisen, welche nicht durch Glenoidabrieb entstanden ist. In der vorgehenden Klassifikation war von  $25^\circ$  Retroversion ohne Beachtung der Glenoiderosion gesprochen worden, dies wurde auf einen Übersetzungsfehler in der ursprünglichen Veröffentlichung zurückgeführt und als Ursache für Fehlklassifizierungen von Glenoiden Typ B2 als Typ C angeführt [3].

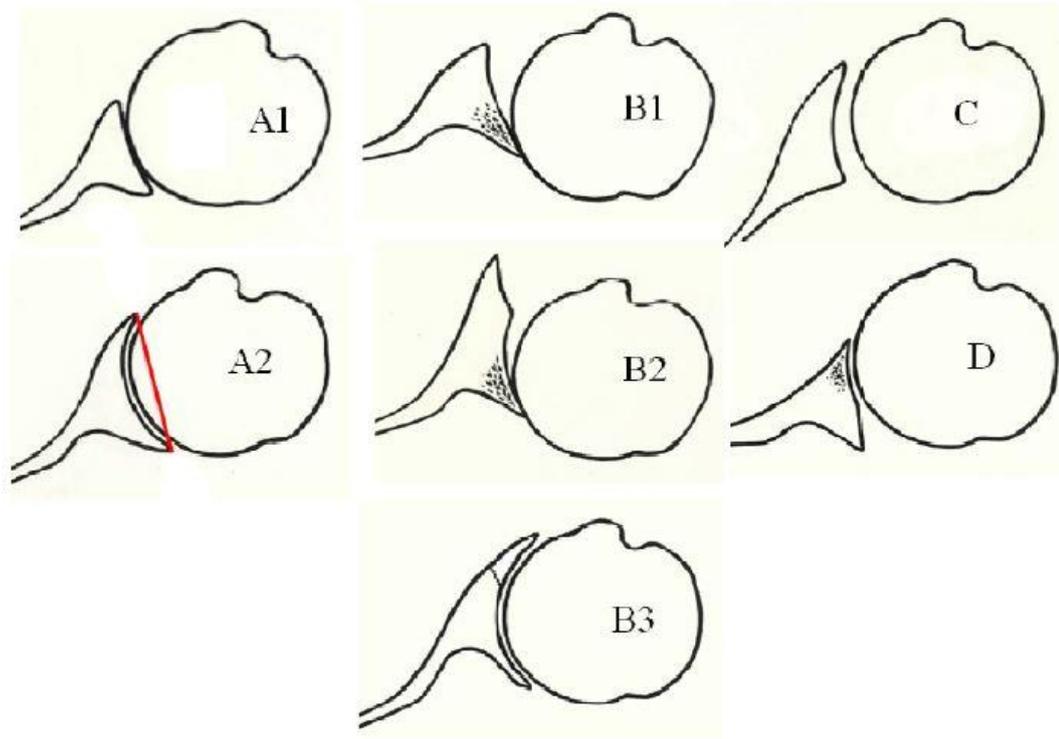


Abbildung 12: Morphologische Einteilungsmöglichkeiten des Glenoids bei primärer Omarthrose gemäß des Klassifikationssystems nach Bercik et al. [3]

In einer Reliabilitätsanalyse mit drei Observern überprüften Bercik et al. die modifizierte Walch-Klassifikation im Vergleich zur ursprünglichen Walch-Klassifikation. Während für die ursprüngliche Walch-Klassifikation für die Interobserver Reliabilität im Durchschnitt eine ausreichende Übereinstimmung (Kappa = 0.391) festgestellt wurde, erreichte das modifizierte Klassifikationssystem eine beachtliche Übereinstimmung (Kappa = 0.703). Die Intraobserver Reliabilität erhöhte sich ebenfalls von durchschnittlich moderater Übereinstimmung (Kappa = 0.604) zu fast perfekter Übereinstimmung (Kappa = 0.882) durch die Anwendung der modifizierten Klassifikation [3].

Iannotti et al. führten 2021 eine Multicenter Studie durch, bei der die Reliabilität der modifizierten Walch-Klassifikation analysiert wurde. Für die Reliabilitätsbewertung wurden zwei Patientengruppen von insgesamt 23 unterschiedlichen Bewertern untersucht. Die erste Gruppe bestand aus 96 Glenoiden, bei welchen alle Einordnungstypen der modifizierten Walch-Klassifikation vertreten waren, und wurde von 12 Bewertern evaluiert. Bei der zweiten Gruppe wurden 98 Glenoide bewertet, welche posteriore glenoidale Anomalien aufwiesen. Diese wurden von 11 Bewertern analysiert. Die Klassifizierung der Glenoide wurde an dreidimensional

rekonstruierten Computertomographien durchgeführt. Bei der Anwendung des Klassifikationssystems auf die erste Gruppe zeigte sich eine moderate Übereinstimmung (Kappa = 0.43) in der Interobserver Reliabilität. Bei Überprüfung der Interobserver Reliabilität bei Evaluation der zweiten Gruppe mit lediglich posterioren Glenoiddefekten konnte eine ausreichende Übereinstimmung ohne Hinterlegen (Kappa = 0.38) und mit Einfügen (Kappa = 0.37) des virtuellen Modells des Glenoidgewölbes nachgewiesen werden. Die Intraobserver Reliabilität des Klassifikationsmodells wurde ebenfalls analysiert. Bei der ersten Gruppe zeigte sich eine beachtliche Übereinstimmung (Kappa = 0.63). Bei der zweiten Stichprobengruppe konnte eine moderate Übereinstimmung (Kappa = 0.51) festgestellt werden [90].

Shukla et al. führten eine Reliabilitätsanalyse an 100 Glenoiden mit drei Observern durch. Hierbei konnte durchschnittlich eine moderate Übereinstimmung in der Interobserver Reliabilität sowohl bei Klassifizierung von Röntgenaufnahmen (Kappa = 0.55) als auch bei Evaluation der Defektsituation anhand von computertomographischen Aufnahmen (Kappa = 0.52). Für die Intraobserver Reliabilität zeigte sich bei Analyse von Röntgenaufnahmen und Computertomographien eine beachtlichen Übereinstimmung (Kappa = 0.73) [91].

Pajolli et al. untersuchten die Reliabilität der modifizierten Klassifikation nach Bercik et al. an Computertomographien bei fünf Observern unterschiedlicher Erfahrung in drei Bewertungsrunden und stellten das in Relation zur Reliabilität der ursprünglichen Walch-Klassifikation. Für die modifizierte Walch-Klassifikation konnte für die Interobserver Reliabilität eine geringe Übereinstimmung gefunden werden (Kappa = 0.132). Für die Intraobserver Reliabilität zeigte sich durchschnittlich eine moderate Übereinstimmung (Kappa = 0.456). Die Ergebnisse legen nahe, dass die Reliabilität der modifizierten Klassifikation nach Bercik et al. nicht mit der Berufserfahrung der Anwender korreliere. Die ursprüngliche Walch-Klassifikation mit vier Einteilungsmöglichkeiten hatte höhere Reliabilitätswerte als die modifizierte Klassifikation, welche sich aus sieben Einteilungstypen zusammensetzt [92].

#### 1.4.6.4 Klassifikation nach Sirveaux und Favard

Das Klassifikationssystem nach Favard et al. beschreibt die Veränderung der Glenoidmorphologie durch Glenoiderosion bei Defektarthropathie in der koronaren Schnittebene. Die jeweiligen Einteilungsmöglichkeiten gehen mit einem unterschiedlichen Risiko für eine vermehrte Inklination der Glenoidkomponente bei der Implantation von inversen Prothesen und damit der Entstehung von Scapular Notching einher. Favard et al. definiert Typ E0 als Glenoid mit Kranialisierung des Humeruskopfes ohne Glenoiderosion. Als Typ E1 werden konzentrische Abriebmuster am Glenoid beschrieben. Typ E2 kennzeichnet Glenoiddefekte, welches sich auf die superioren Anteile des Glenoids beschränken, wohingegen Glenoiddefekte, die auch die inferioren Bereiche des Glenoids betreffen, als Typ E3 bezeichnet werden. Typ E4 wurde als Ergänzung für hauptsächlich inferiore Glenoiderosionen hinzugefügt. [13] [93] [2]

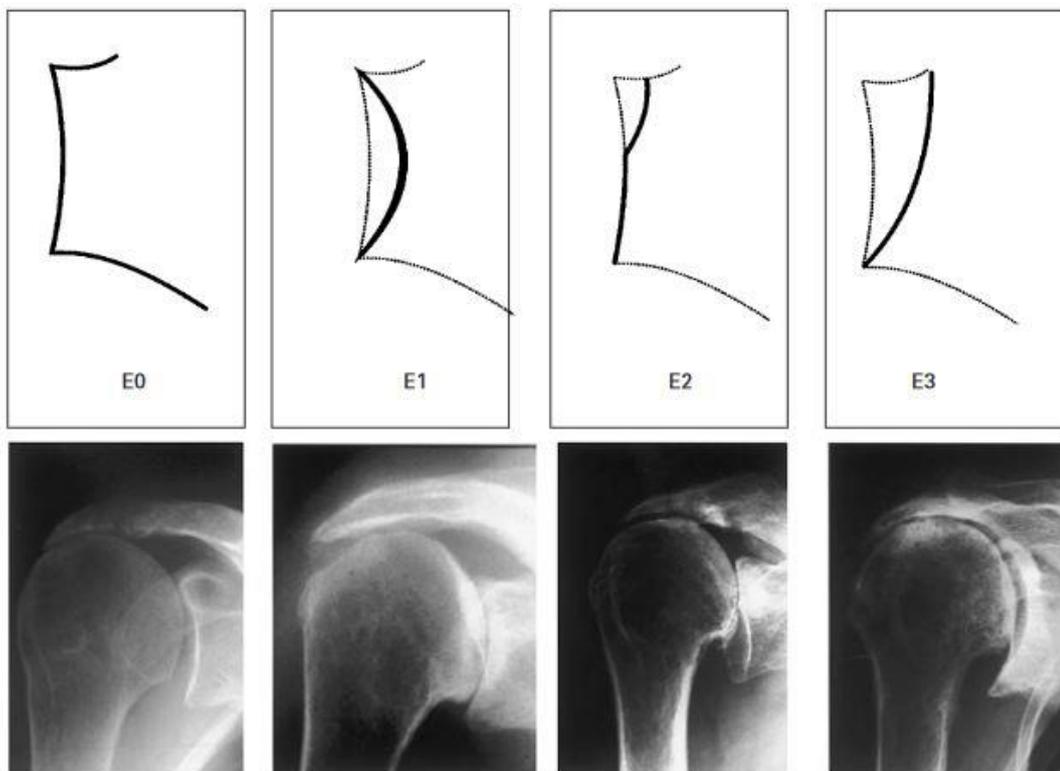


Abbildung 13: Die Einteilungsmöglichkeiten gemäß des Klassifikationssystems nach Sirveaux und Favard [2]

Die Reliabilität des Klassifikationsmodells nach Sirveaux und Favard wurde von Kappe et al. analysiert. Es konnte eine moderate Übereinstimmung ( $Kappa = 0.598$ ) für die Interobserver Reliabilität und eine im Durchschnitt beachtliche Übereinstimmung ( $Kappa = 0.727$ ) für die Intraobserver Reliabilität gezeigt werden [94].

#### 1.4.6.5 Klassifikation nach Antuna et al.

Antuna et al. entwickelten ein Klassifikationssystem für die intraoperative Einschätzung von knöchernen Glenoiddefekten bei revisionsendoprothetischen Operationen. Mithilfe der Einordnung der Defektsituation in zwei Parameter kann der Knochenverlust beschrieben werden.

Die Klassifikation besteht aus der Angabe der Defektlokalisierung ("central, peripheral, combined") und der Defektausprägung ("mild, moderate, severe"). Als "mild" galten Glenoiddefekte, bei denen weniger als ein Drittel des Glenoidrands oder der Glenoidoberfläche betroffen waren, als "moderate" Glenoiddefekte mit einer involvierten Fläche zwischen einem und zwei Drittel von Rand oder Fläche und als "severe" galten Glenoiddefekte mit mehr als zwei Drittel betroffenem Areal. Durch die intraoperative Verwendung dieses Klassifikationssystems können bei Revisionsoperationen der Schulter Rückschlüsse auf die passenden Therapieoptionen gezogen werden. Als "mild" und "moderate" evaluierte glenoidale Knochenverluste erlauben meist die Versorgung durch Reimplantation einer glenoidalen Prothesenkomponente mit oder ohne Verwendung von Knochentransplantaten, wohingegen Defektsituationen, welche als "severe" oder "combined" eingeordnet werden, die Implantation einer neuen Glenoidkomponente vor Rekonstruktion einer zuverlässigen glenoidalen Verankerungsbasis verhindern. Ein zweizeitiges Vorgehen war hier angezeigt [8] [44].

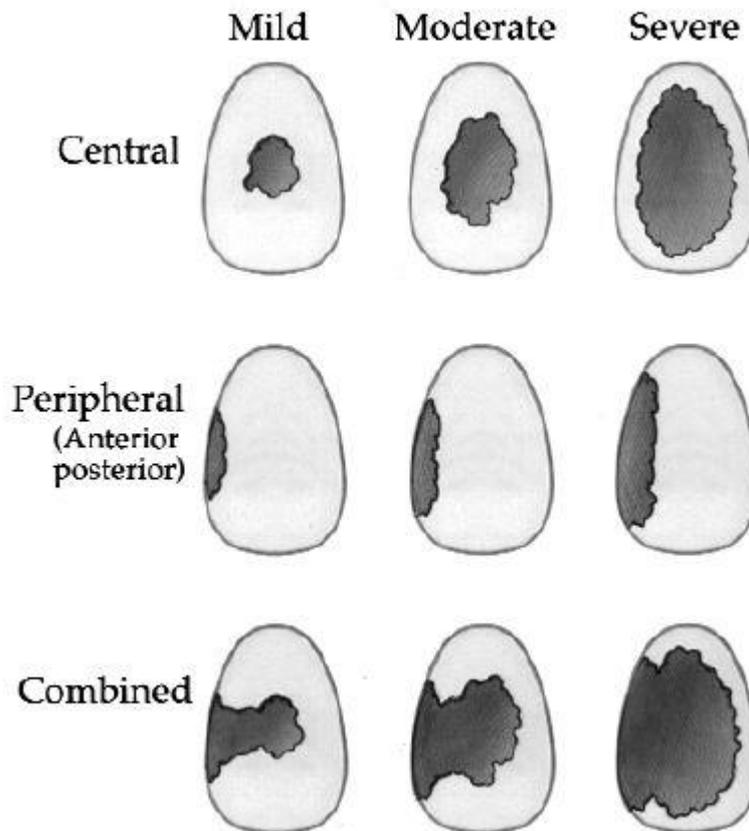


Abbildung 14: Einteilungsmöglichkeiten für glenoidale Knochendefekte nach Entfernung der Glenoidkomponente gemäß des Klassifikationssystems nach Antuna et al.[8]

Eine Studie zur Überprüfung der Interobserver und Intraobserver Reliabilität steht für dieses Klassifikationssystem zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit noch aus.

#### **1.4.6.6 Klassifikation nach Page et al.**

Page et al. modifizierten das Klassifikationssystem nach Antuna et al., um es als Entscheidungshilfe bezüglich der Verwendung von Bone Impaction Grafting, also der Verwendung von Knochenchips zum Auffüllen von Glenoiddefekten, zu verwenden. Die Klassifikation charakterisiert die Glenoide nach Zustand des Glenoidrands und – Gewölbes. Typ 1 nach Page et al. klassifiziert knöchern umschlossene Glenoiddefekte ("contained") mit intaktem Glenoidwall und Gewölbe. Typ 2 beschreibt Glenoide, die unvollständig knöchern umschlossen sind ("uncontained"), allerdings zugänglich für eine Rekonstruktion des Glenoids oder Herstellung des "contained"-Zustands sind. Dies sind Glenoide mit intaktem Glenoidrand aber Verletzung des Gewölbes. Als Typ 3 werden Glenoide eingeordnet, deren Defektsituation den defekten Rand, den Wall und das Gewölbe betreffen ("uncontainable"). Glenoide des Typ 1 können durch Bone Impaction Grafting therapiert werden. Bei Glenoiden des Typ 2 kann durch verschiedene Techniken eine Downgrading auf Typ 1 erfolgen, wonach diese dann ebenfalls zugänglich für die Technik des Bone Impaction Grafting sind. Glenoiddefekte des Typ 3 sind zu weit fortgeschritten, Bone Impaction Grafting wird nicht mehr empfohlen. Andere Aufbautechniken wie beispielsweise individuell angepasste augmentierende Basisplatten können hier zur Anwendung kommen [44] [76].

#### **1.4.6.7 Klassifikation nach Willams und Iannotti**

Dieses Klassifikationssystem wurde 2007 entwickelt. Vor dem Hintergrund erschwerter Bedingungen für die Verankerung der glenoidalen Prothesenkomponente bei Glenoiddefekten soll die Klassifikation eine Hilfestellung für die Evaluierung des Zustands des glenoidalen Gewölbes geben. Im Zentrum der Betrachtung stehen nicht Erosionen der Glenoidoberfläche, sondern die Intaktheit des Glenoidgewölbes ("glenoid vault") und des Glenoidrands ("glenoid rim"). Die Fragestellung variiert somit für dieses Klassifikationssystem von der Bewertung der Defektsituation zur Evaluierung der noch bestehenden Verankerungsmöglichkeiten. Bei den meisten glenoidalen Defektsituationen besteht ein ausreichendes Mass an subchondralem Knochen, was die zufriedenstellende Implantation einer standardmässigen Glenoidkomponente ermöglicht. Diese Prothesenkomponenten sind von der Oberflächenmorphologie des Glenoids abhängig und können bei ausgeprägten Defektsituationen keine Stabilität garantieren. Hier wird die Verankerung der Glenoidkomponente in das Glenoidgewölbe und den Glenoidwall empfohlen. Als Klassifikationskriterien dienen folglich der Zustand der Glenoidoberfläche ("glenoid surface", "S"), des Glenoidgewölbes ("glenoid vault", "V") und des Glenoidrands ("glenoid rim", "R").

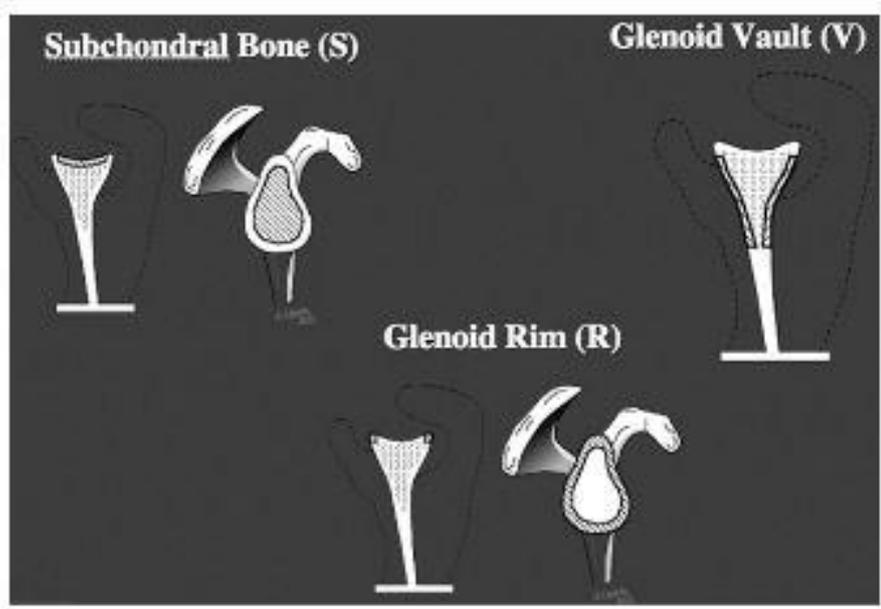


Abbildung 15: Aufbau des physiologischen Glenoids in subchondrale Oberfläche (S), welche sich 5 mm lateral der Korakoidbasis befindet, Glenoidgewölbe (V) und Glenoidrand (R) [9]

Die Bewertung des Glenoids wird durch die Angabe des Zustandes der jeweiligen Strukturen angegeben. Intaktheit wird mit "+", Defektsituation mit "-" gekennzeichnet. Eine optimale Glenoidmorphologie wird also als (S+, R+, V+) angegeben, das Szenario mit der ausgeprägtesten Defektsituation als (S-, R-, V-). Insgesamt ist somit die Einteilung der Glenoidmorphologie und Verankerungsmöglichkeit von Prothesen in acht verschiedene Kategorien möglich [9].

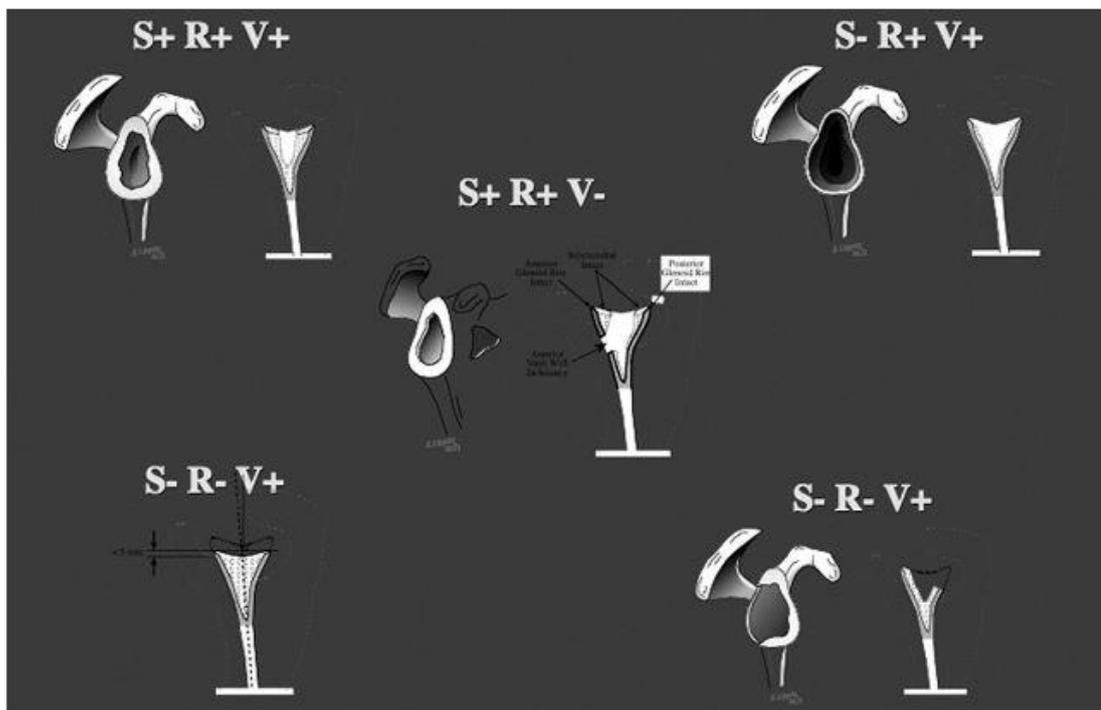


Abbildung 16: Einteilungsmöglichkeiten für Glenoiddefekte gemäß des Klassifikationssystems nach Williams und Iannotti [9]

Unter den Annahmen, dass Randdefekte eine Humerussubluxation begünstigen und aufgrund der damit verbundenen asymmetrischen Defektsituation andere Therapieoptionen erfordern würden, empfehlen Williams und Iannotti die Integration des vorgestellten Evaluationssystems in die von Antuna et al. entwickelte Klassifikation für Glenoiddefekte bei Revisionsoperationen der Schulter [8]. Es ergibt sich ein modifiziertes Klassifikationssystem, bei dem Typ I als zentral lokalisierter und knöchern von einem Glenoidwall umschlossener Defekt ("central-contained") die Defekttypen (S+, R+, V+) und (S-, R+, V+) als inkomplett knöchern umrandete Defekte mit den Typen (S+, R+, V-) und (S-, R+, V-) beinhaltet. Unter Typ II werden peripher-symmetrische Defektsituationen (S+, R-, V+) und (S+, R-, V-) als auch asymmetrische Defektsituationen (S+, R-, V+) und (S+, R-, V-) eingeordnet. Als Typ III werden kombiniert-symmetrische Knochenverluste (S-, R-, V+) und (S-, R-, V-) und asymmetrische Defekte (S-, R-, V+) und (S-, R-, V-) bezeichnet [9].

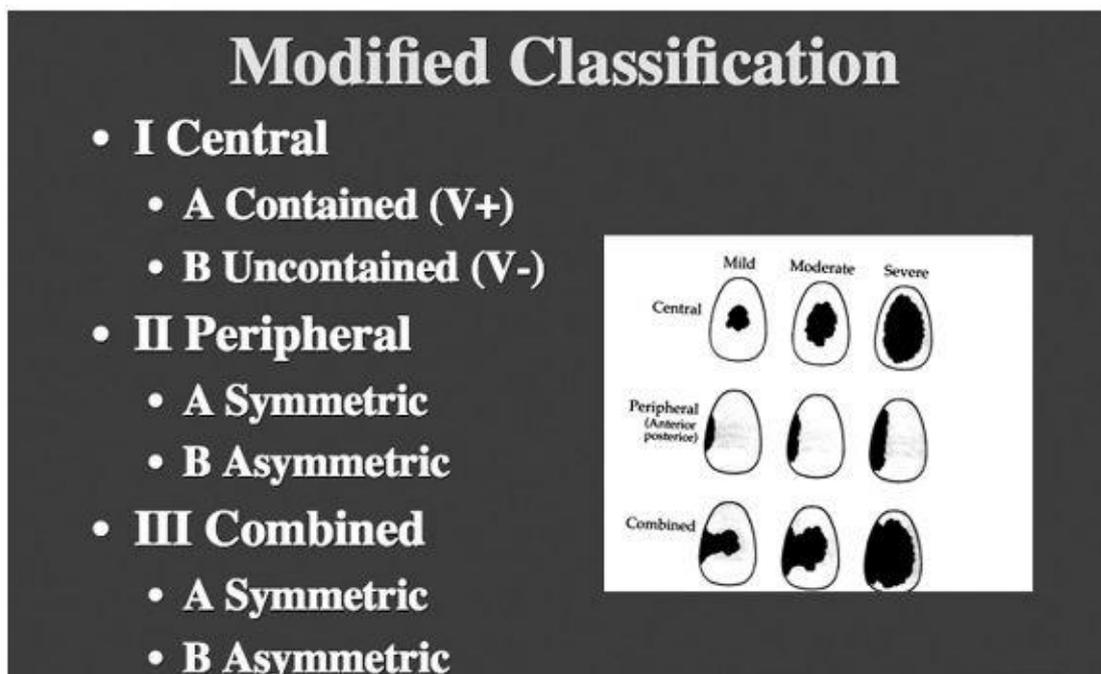


Abbildung 17: Modifiziertes Klassifikationsmodell nach Williams und Iannotti [9]

Dieses modifizierte Klassifikationssystem kann somit grundsätzlich als Entscheidungshilfe für die adäquate Therapieoption dienen. Williams und Iannotti empfehlen für zentrale Knochenerosionen von milder bis moderater Ausprägung die Rekonstruktion des Knochendefektes mittels Knochenspongiosa und die Verwendung einer Prothese mit standardmäßiger, anatomischer Glenoidkomponente. Bei inkomplett knöchern umschlossenen Knochendefekten entspricht die empfohlene Therapie einem Defektausgleich mit einem Kortikalistransplantat. Für symmetrische randständige Defektsituationen wird die Versorgung mittels standardmäßiger, anatomischer Glenoidkomponenten empfohlen. Asymmetrische randständige Knochenerosionen milden bis moderaten Schweregrades sollten durch exzentrisches Fräsen des Glenoids, Knochentransplantate oder augmentierte glenoidale Basisplatten ausgeglichen werden. Die Therapie stark ausgeprägter asymmetrischer randständiger Knochenverluste ergibt sich dagegen am ehesten durch die Verwendung des Glenoidgewölbes und Glenoidrands als Verankerungselemente für augmentierte Basisplatten oder

Knochentransplantate. Für kombiniert vorliegende, symmetrische Defektsituationen mit lediglich leichtem subchondralen Knochenverlust wird die Therapie mit Kortikalistransplantaten und oberflächenverankerter Glenoidkomponente empfohlen. Für andere kombinierte Knochendefekte wird zur Verwendung von individuell angefertigten Basisplatten geraten. Folglich wird die Implantation oberflächenabhängiger Glenoidkomponenten für Typ I Defekte und wenige Typ II Defekte empfohlen. Bei Knochendefekten des Typ II und Typ III wird die Verankerung der Basisplatte in das Glenoidgewölbe und den Glenoidrand angeraten [9].

#### 1.4.6.9 Klassifikation nach Frankle et al.

Frankle et al. stellten 2009 ein Klassifikationssystem für Glenoiddefekte bei Defektarthropathie vor. Die Glenoidmorphologie wird bei dieser Klassifikation zunächst in die Kategorien "abnormal" und "normal" eingeteilt. Anschließend wird die Kategorie "abnormal" entsprechend der Hauptlokalisation des glenoidalen Knochenverlustes in die Subkategorien "posterior", "superior", "global" und "anterior" eingeordnet [7].

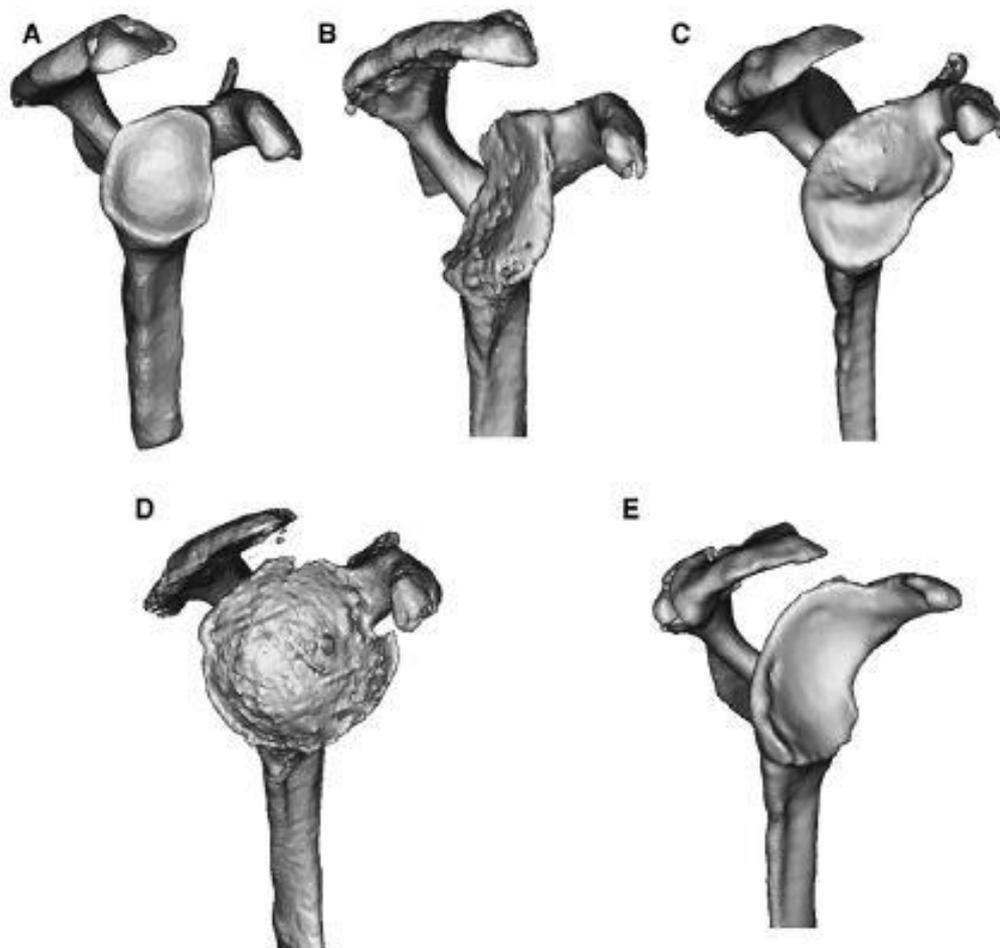


Abbildung 18: Morphologische Einteilungsmöglichkeiten für das Glenoid gemäß des Klassifikationssystems nach Frankle et al.: normales Glenoid (A), posteriore Erosion (B), superiore Erosion (C), globale Erosion (D) und anteriore Erosion (E) [7]

Die Klassifikation wurde an mehreren radiologischen Modalitäten durchgeführt, um die optimale Grundlage für dieses Klassifikationssystem zu finden. Sowohl an Röntgenaufnahmen in einer

Ebene als auch an Röntgenaufnahmen in mehreren Ebenen zusätzlich zu einer zweidimensionalen Computertomographie und an einer dreidimensionalen Rekonstruktion einer Computertomographie wurde die Klassifikation von drei Observern in zwei Bewertungsrounden an 216 Glenoiden von 212 Patienten überprüft. Die Interobserver Reliabilität wurde an 12 zufällig gewählten Fällen zwischen dem ersten Observer und dem zweiten Observer bestimmt [7].

Für die Intraobserver Reliabilität konnte für die Einteilung in die Kategorien "normal" und "abnormal" eine moderate bis fast perfekte Übereinstimmung (Kappa = 0.77 – 0.97) bestimmt werden, hierbei zeigte sich keine Verbesserung der Reliabilität durch die Bewertung mithilfe von zwei- oder dreidimensionalen Computertomographien. Die Reliabilität entsprach bei Röntgenaufnahmen in einer Ebene einem durchschnittlichen Übereinstimmungskoeffizienten Kappa von 0.91, bei Bewertung von Röntgenaufnahmen in mehreren Ebenen und zweidimensionalen Computertomographien einem Kappa von 0.87 und bei Bewertung von dreidimensional rekonstruierten Computertomographien einem Kappa von 0.88. Die Überprüfung der Intraobserver Reliabilität für die Einteilung der als "abnormal" klassifizierten Glenoide in die Subkategorien entsprechend der Erosionslokalisation zeigte eine im Durchschnitt fast perfekte Übereinstimmung (Kappa = 0.82). Für Interobserver Reliabilität wurde für die primäre Einteilung in "normale" oder "abnormale" Glenoidmorphologie eine moderate Übereinstimmung (Kappa = 0.67 – 0.80) festgestellt, es konnte keine signifikante Auswirkung durch die Verwendung der unterschiedlichen radiologischen Bewertungsgrundlagen nachgewiesen werden. Bei genauerer Einteilung der Defektsituation entsprechend der Lokalisation zeigt sich bei Analyse der Interobserver Reliabilität eine moderate Übereinstimmung (Kappa = 0.54) [7].

#### **1.4.6.10 Klassifikation nach Habermeyer et al.**

Habermeyer et al. stellten ein Klassifikationssystem vor, welches die Evaluation der Inklinations des Glenoids nach inferior und damit auch inferosuperiorem Knochenabrieb bei Omarthrose ermöglicht. Knochendefekte am inferioren Glenoid sind bei Osteoarthrose des Schultergelenks häufig [10]. Die Identifizierung von Knochenverlusten am inferioren Glenoid und die Wiederherstellung der nativen Glenoidversion wurden als Risikoreduktion für Lockerungen der glenoidalen Prothesenkomponente aufgrund gleichmäßigerer Kräfteverteilung angesehen. Bei Anwendung der Walch-Klassifikation können die glenoidale Inklinations und inferiore Defektsituationen weniger exakt eingeordnet werden, was durch die von Habermeyer et al. vorgestellte Klassifikation ausgeglichen werden soll.

Die Einteilung der glenoidalen Defektsituation anhand des Klassifikationssystems erfolgt anhand zweier Hilfslinien, welche in die anteroposteriore Röntgenaufnahme der Schulter eingezeichnet werden. Die erste Linie wird vom superioren zum inferioren Glenoidrand gezogen und wird als Glenoidlinie ("glenoid line") bezeichnet. Die zweite Linie, die Korakoidbasislinie ("coracoid base line"), läuft vom superioren Glenoidrand entlang der lateralen Basis des Processus Coracoideus senkrecht zum Unterrand der Röntgenaufnahme. Die Klassifizierung wird entsprechend des

Schnittpunkts der beiden Geraden vorgenommen. Typ 0 entspricht paralleler Linien ohne Schnittpunkt. Bei Typ 1 schneiden sich die beiden Linien unterhalb des Glenoids. Bei Typ 2 ist der Schnittpunkt der beiden Linien im Bereich des Glenoids und bei Typ 3 oberhalb des Korakoids [10] [44].

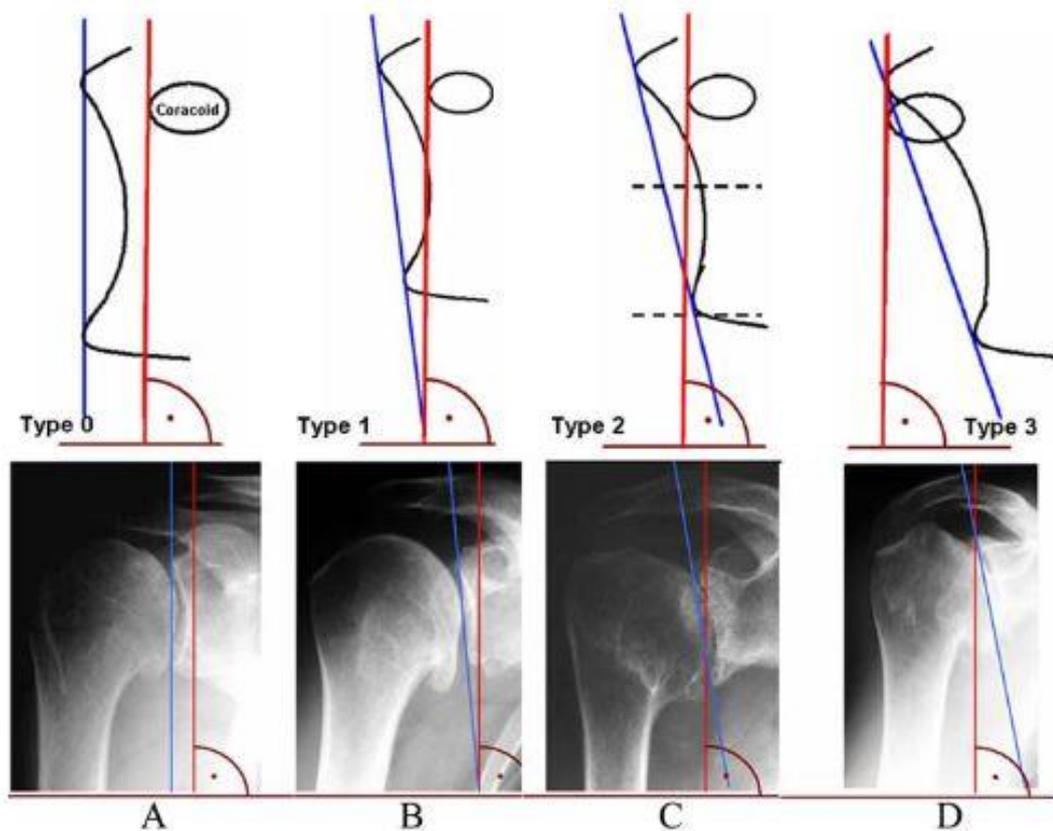


Abbildung 19: Einteilungsmöglichkeiten der Glenoidinklination gemäß des Klassifikationssystems nach Habermeyer et al.: Typ 0 (A): Korakoidbasislinie und Glenoidlinie verlaufen parallel, Typ 1 (B): Treffpunkt der beiden Linien unterhalb des inferioren Glenoidrands, Typ 2 (C): Treffpunkt der beiden Linien zwischen dem inferioren Glenoidrand und dem Glenoidmittelpunkt, Typ 3 (D): Treffpunkt der beiden Linien oberhalb der Korakoidbasis [10].

Die Interobserver Reliabilität wurde an jeweils einhundert gesunden Schultern und einhundert an Omarthrose erkrankten Schultern durch zwei Observer überprüft. In der gesunden Kontrollgruppe zeigte sich eine sehr hohe Übereinstimmung ( $Kappa = 0.82$ ). Auch in der Osteoarthrose-Gruppe eine sehr hohe Übereinstimmung ( $Kappa = 0.952$ ) festgestellt werden [10] [44].

### 1.4.7 Vorstellung des hier überprüften, qualitativen dreidimensionalen Klassifikationssystems für knöcherne Glenoiddefekte in der inversen Schulterendoprothetik:

Die knöchernen Glenoiddefekte wurden in den dreidimensionalen computertomographischen Aufnahmen entsprechend der Seebauer-Klassifikation bewertet, welche 2018 von Gupta et al. für die intraoperative Bewertung von Glenoiddefekten vorgestellt wurde [1]. Die Klassifikation analysiert den glenoidalen Knochenverlust unabhängig von der Ätiologie[1].

Das Klassifikationssystem analysiert primär, ob der Knochendefekt am Glenoid exzentrisch oder zentrisch orientiert ist [1].

Bei zentrischen Defekttypen wird der Parameter "Centricity" (C) entsprechend der maximalen Tiefe des Defekts in die Grade C1 bis C4 eingeteilt. Der Parameter "Eccentricity" wird bei zentralen Glenoiddefekten definitionsgemäss als E0 beschrieben [1].

Handelt es sich um einen exzentrischen Defekt, so wird der Parameter "Eccentricity" (E) gemäß dem Anteil der betroffenen Glenoidfläche in die Grade E1 bis E4 eingestuft, die maximale Defekttiefe wird nun durch den Parameter C mit der Graduierung C1 bis C4 dargestellt [1].

Bei exzentrischen Glenoiddefekten wird nun die Hauptlokalisierung des Defekts mit dem Parameter "Major Location" bewertet, welcher vier Werte annehmen kann und durch den entsprechenden Großbuchstaben gekennzeichnet wird: Anterior (A), Posterior (P), Inferior (I), Superior (S) [1].

Die sekundäre Ausrichtung exzentrischer Knochendefekte wird mit dem Parameter "Direction of the defect" beschrieben. Dieser Parameter kann wie "Major Location" ebenfalls vier Werte annehmen, wird jedoch als Kleinbuchstabe erfasst: anterior (a), posterior (p), inferior (i) und superior (s) [1].

Eine Übersicht über die verschiedenen Parameter und deren Abstufung:

„Centricity“:

C1: flacher Defekt (Tiefe <50% des AP Glenoid Diameters)

C2: Tief (Tiefe >50% des AP Glenoid Diameters + stabiler Wall)

C3: Aushöhlend (C2 + instabiler Wall)

C4: Zerstörend (signifikante Zerstörung des Glenoids und des Walls)

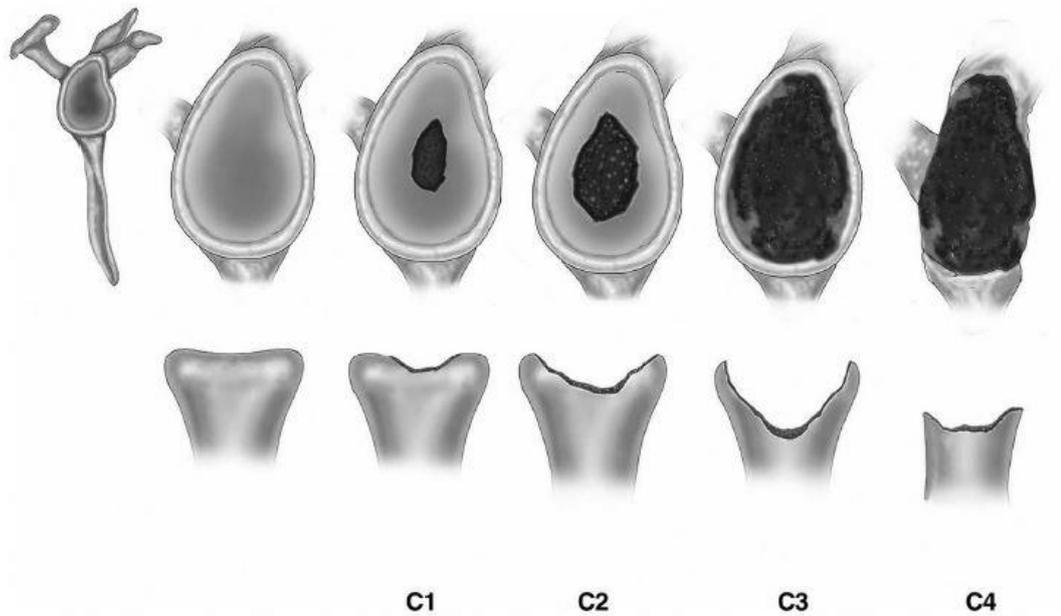


Abbildung 20: Centricity mit Graduierung C1-C4 [1]

“Eccentricity”:

E0: lediglich zentraler Defekt

E1: klein oder flach

E2: mittel (<30% der Glenoidfläche)

E3: groß (30%-60% der Glenoidfläche)

E4: massiv (>60% der Glenoidfläche)

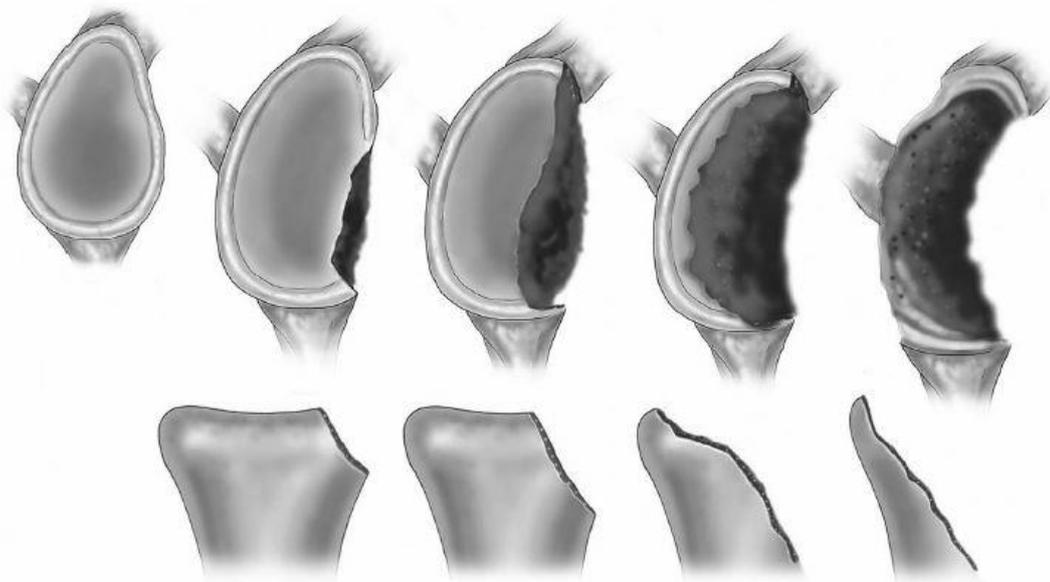


Abbildung 21: Eccentricity mit Graduierung E1-E4 [1]

Abhängig von der Hauptlokalisation des Defekts:

Anterior (A)

Posterior (P)

Inferior (I)

Superior (S)

Abhängig von der sekundären Defektausrichtung:

anterior (a)

posterior (p)

inferior (i)

superior (s)

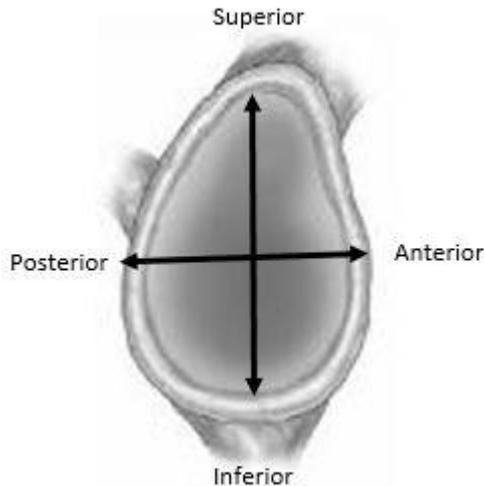


Abbildung 22: Einteilungsmöglichkeiten der Parameter "Major Location" und "Direction of the defect" [1]

Zur leichteren Anwendbarkeit des Klassifikationssystems bei exzentrischen Defekten wurde der Parameter "Centricity", welcher die maximale Tiefe des Glenoiddefekts beschreibt, durch einen der Autoren noch praxisnäher definiert:

C1: flacher Defekt

C2: maximale Defekttiefe in lateraler Hälfte der Strecke von lateraler Kante der Korakoidbasis zur nativen Glenoidoberfläche + stabiler Wall

C3: maximale Defekttiefe in medialer Hälfte der Strecke von lateraler Kante der Korakoidbasis zur nativen Glenoidoberfläche + instabiler Wall

C4: maximale Defekttiefe weiter medial als Korakoidbasis

Auf der Grundlage des Klassifikationssystems konnten Empfehlungen für die Auswahl des passenden Rekonstruktionsverfahrens der unterschiedlichen Defektsituationen am Glenoid ausgesprochen werden. Die Therapieempfehlungen wurden durch eine retrospektive Analyse der radiologischen und funktionellen Untersuchungsergebnisse jeweils prä- und postoperativ aufgestellt.

Die Anwendbarkeit des Klassifikationssystems unabhängig der Ätiologie, die Möglichkeit einer sehr präzisen Beschreibung der individuellen Defektsituation in mehreren Parametern und die Aussagekraft bezüglich des indizierten Therapieverfahrens sind wesentliche Alleinstellungsmerkmale der Klassifikation.

Bei einer hohen Reliabilität könnte ein solches Klassifikationssystem bei der Behandlung von knöchernen Glenoiddefekten eine signifikante Rolle spielen.

## **2 Studie**

### **2.1 Fragestellung**

Ziel dieser Studie war, die Interobserver und Intraobserver Reliabilität eines qualitativen Klassifikationssystems für Glenoiddefekte zu prüfen. Eine präzise präoperative Einordnung des Defektausmaßes erlaubt eine Stratifizierung der operativen Versorgungsstrategie.

Die Fragestellungen werden wie folgt formuliert:

Welche Reliabilität bietet dieses qualitative Klassifikationssystem zwischen verschiedenen Anwendern unterschiedlicher Erfahrung (= Interobserver Reliabilität)?

Welches Maß an Übereinstimmung ergibt sich innerhalb der einzelnen Anwender zu unterschiedlichen Zeitpunkten (= Intraobserver Reliabilität)?

Welche Vor- und Nachteile ergeben sich im Vergleich zu anderen Klassifikationssystemen?

Lässt sich aus den Reliabilitätswerten eine Aussage bezüglich der Anwendbarkeit und des Nutzens der Klassifikation im klinischen Alltag treffen?

### **2.2 Material und Methodik**

#### **2.2.1 Einschluss- und Ausschlusskriterien**

Eingeschlossen wurden Patienten, die zwischen Januar 2016 und Januar 2021 operiert wurden. Die Patienten stammten aus dem Patientenkollektiv der Kliniken, in denen Observer A und Observer B jeweils in leitender Funktion tätig waren. Dies war für Dr. Ludwig Seebauer (Observer A) das Zentrum für Orthopädie, Unfallchirurgie und Sportmedizin der MünchenKlinik Bogenhauen in München und für Prof. Ashish Gupta (Observer B) das Greenslopes Private and Mater Public Hospital in Brisbane, Australien. In die Studie aufgenommen wurden Patienten mit einem bestehenden Glenoiddefekt, welcher durch einen Knochenaufbau im Rahmen einer Implantation einer inversen totalen Schulterprothese augmentiert wurde. Dabei wurden sowohl Patienten mit Knochenaufbau durch einen Knochenspan von der Crista iliaca oder dem abgesetzten Humeruskopf als auch Patienten mit Aufbau des Knochendefekts durch einen allogenen Femurkopf-Span in die Studie eingeschlossen. Die Ätiologie des glenoidalen Knochenverlustes hatte keinen Einfluss auf den Studieneinschluss.

Ferner war eine präoperative Computertomographie der gesamten Skapula mit mehr als 250 Schnittebenen in der axialen Schnittführung und einer Schichtdicke weniger als ein Millimeter Voraussetzung für den Studieneinschluss.

Vom Zentrum für Orthopädie, Unfallchirurgie und Sportmedizin der MünchenKlinik Bogenhauen in München wurden 162 Computertomographien von Schultern mit knöchernen Glenoiddefekten für die Studie vorgeschlagen. Nach Anwendung der Ausschlusskriterien wurden 39 Glenoide von 38 Patienten in die Studie aufgenommen.

Vom Team des Greenslopes Private and Mater Public Hospital in Brisbane, Australien, wurden 51 Schulter-Computertomographien für diese Studie ausgewählt, wovon nach Überprüfung der Kriterien 47 Glenoide von 41 Patienten aufgenommen wurden.

Insgesamt wurden so 86 Computertomographien von 79 Patienten ausgewählt.

### **2.2.2 Methodik**

Aus den zweidimensionalen Computertomographien wurden dreidimensionale Rekonstruktionen erstellt, welche pseudonymisiert wurden. Der Humeruskopf wurde in der dreidimensionalen Darstellung subtrahiert. Anschließend wurden diese dreidimensionalen Computertomographien mit der Software zur Designentwicklung Materialise 3-matic 14.0 der Firma Materialise in Leuven, Belgien, bearbeitet, um die Dateigröße zu verringern und die Kompatibilität zu erhöhen.

Die Computertomographien wurden von zwei erfahrenen Schulterchirurgen in Chefarztposition (Observer A und Observer B), einem erfahrenen Schulterchirurgen in Oberarztposition (Observer C und einem Medizinstudenten im endklinischen Studienabschnitt (Observer D) entsprechend der zu überprüfenden Klassifikation klassifiziert. Observer A hat in Zusammenarbeit mit Observer B das hier untersuchte dreidimensionale Klassifikationssystem begründet, beide sind mit dem Einsatz des Verfahrens im klinischen Alltag vertraut. Der Medizinstudent wurde von Observer A in die Klassifikation eingeführt. Vor dem Zeitpunkt der Bewertungsrunden hatte er keine Erfahrung in der klinischen Anwendung dieses Systems.

### **2.2.3 Bewertungsprotokoll:**

Für die Schätzung der Interobserver- und Intraobserver Reliabilität war gemäß Studienprotokoll geplant, diese 86 dreidimensionalen Computertomographien von vier Bewertern an jeweils zwei Zeitpunkten zu klassifizieren. Der zeitliche Abstand zwischen den Bewertungsrunden betrug jeweils mindestens 6 Wochen. Die Bewertungsrunden wurden in räumlicher Trennung und ohne direkten Austausch zwischen den Observern durchgeführt. Von Observer B liegt nur eine Klassifikationsrunde zur Auswertung vor. Die Bewertung der übrigen Observer erfolgten gemäß Protokoll.

Die Bewertung der Glenoide erfolgte in einer standardisierten Programmeinstellung der Software Adobe Acrobat Reader Version 2021.001.20135.

Für die Evaluation zentrischer Defekte wurde die Ansicht des Glenoid als Glenoidaufsicht („Enface view“) empfohlen. Für die Erfassung exzentrischer Defekte wurde die Betrachtung des Glenoids von inferior paraaxial nahegelegt.

#### **2.2.4 Statistische Reliabilitätsanalyse:**

Als Interobserver Reliabilität wird die Übereinstimmung zwischen den Bewertungen verschiedener Observer beschrieben. Hierfür werden die einzelnen Parameter des Klassifikationssystems mit den Einschätzungen der anderen Bewerter verglichen. Die Interobserver Reliabilität bildet die Übereinstimmung der Bewertung eines gleichbleibenden Datensatzes durch einzelne Observer zu verschiedenen Zeitpunkten ab.

Die Interobserver- und Intraobserver Reliabilität wurden anschließend mit der Software IBM SPSS Statistics Version 28.0.1.1 (14) geschätzt.

Bei dem hier untersuchten Klassifikationssystem werden Knochendefekte am Glenoid anhand von vier Parametern analysiert. Diese vier Parameter lassen sich in zwei Gruppen unterscheiden. Einerseits liegen mit den Parametern „Eccentricity“ und „Centricity“ ordinalskalierte Graduierungen vor. Es ist per definitionem festgelegt, dass die Ausprägung eines Knochendefekts und der damit verbundene Mangel an Knochenvolumen in dem jeweiligen Parameter mit einer dementsprechend höheren Einteilung einhergehen. Im Gegensatz dazu sind die Parameter „Major Location“ und „Direction of the defect“ nominalskaliert und die Einstufungsmöglichkeiten geben lediglich Ausrichtungen an.

Für die korrekte Erfassung der Reliabilität des Klassifikationssystems wurden zunächst die Klassifizierungen der Observer als String Variablen dargestellt und anschließend durch eine gewichtete Reliabilitätsanalyse mit Bestimmung des gewichteten Cohen´s Kappa ausgewertet. Hierbei hat bei unterschiedlichen Typisierungen in der Bewertung der Computertomographien in den jeweiligen Parametern die Differenz der Angaben eine lineare Auswirkung auf den Übereinstimmungskoeffizienten Kappa. Das Klassifikationssystem sollte im optimalen Fall möglichst zuverlässig objektive Aussagen zur vorliegenden Defektsituation ermöglichen. Von großer Rolle im klinischen Setting ist das Defektvolumen, da geringfügige Glenoiddefekte mit weniger invasiven Therapiemöglichkeiten behandelbar sind und bessere postoperative Ergebnisse haben als größere Defekte. Eine möglichst exakte Einordnung des Defektausmaßes ist daher wichtig. Große Unterschiede zwischen den Bewertungen unterschiedlicher Observer in diesen Bereichen bringen klinische Negativeffekte mit sich, welche bei kleineren Differenzen unterschiedlicher Observer noch geringfügiger wären. Hier ist die Wertung der Typisierungsdifferenz folglich wichtig. Voraussetzung für die Verwendung des gewichteten Cohen´s Kappa sind maximal zwei Observer für eine Variable. Daher wurden bei der Auswertung der Bewertungsrunden jeweils zwei Observer miteinander verglichen. Anschließend wurde für eine bessere Überblickbarkeit der Durchschnitt der Übereinstimmungskoeffizienten ermittelt.

Um die nominalskalierten Lokalisationsparameter für eine gewichtete Reliabilitätsanalyse zugänglich zu machen, wurde für diese Parameter eine Kodierung erstellt, welche die Differenz der Ausrichtungen bewertet und diese damit in eine Ordinalskalierung umformt.

Für ein besseres Verständnis der Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse wurde anschließend eine Untersuchung der Reliabilität der einzelnen Parameter durchgeführt. Im Rahmen dessen wurde für jede Reliabilitätsanalyse ein Übereinstimmungskoeffizient Kappa für den Vergleich der jeweiligen Werte der einzelnen Parameter „Eccentricity“, „Centricity“, „Major Location“ und „Direction of the defect“ getrennt voneinander berechnet.

Um die Charakteristika der Parameter zu berücksichtigen, erfolgte die Analyse der graduierbaren Parameter „Eccentricity“ und „Centricity“ mithilfe des gewichteten Cohen´s Kappa.

Die Einteilungskategorien für die Parameter „Major Location“ und „Direction of the defect“ sind per se nominalskaliert. Ihre Einteilungstypen geben die primäre (vorrangige) und sekundäre (nachrangige) Ausrichtung des Knochendefekts am Glenoid an. Da hier keine Graduierung der Parametereinteilungen besteht, wurde der Übereinstimmungskoeffizient bei der Untersuchung der einzelnen Parameter des Klassifikationssystems mit dem einfachen Cohen´s Kappa bestimmt. Hier besteht folglich keine Gewichtung der Einteilungsdifferenzen unterschiedlicher Bewerter. Der Wert für Kappa adjustiert sich lediglich entsprechend des Vorliegens oder Fehlens einer Übereinstimmung zweier Beobachter, beziehungsweise der Bewertung eines Beobachters zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Um eine möglichst hohe Aussage über die Reliabilität zu treffen wurden die Einordnungen der unterschiedlichen Observer in den unterschiedlichen Bewertungsrounds jeweils wie folgt ausgewertet. Anschließend wurden Mittelwerte berechnet.

Interobserver Reliabilität:

Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2

Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1

*Tabelle 1: Tabellarische Veranschaulichung des Vorgehens für die Bestimmung der Interobserver Reliabilität*

Intraobserver Reliabilität:

Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2

*Tabelle 2: Tabellarische Veranschaulichung des Vorgehens für die Bestimmung der Intraobserver Reliabilität*

Für die Reliabilitätsanalyse und den Vergleich dieses Klassifikationssystems mit vergleichbaren Klassifikationen, welche in der Literatur beschrieben und validiert wurden, wurde die Reliabilität der Parameter in ihrer Kombination und getrennt voneinander bestimmt.

Landis und Koch stellten 1977 eine Methode vor, welche die Beurteilung von Interobserver und Intraobserver Übereinstimmungen erlaubt und heute als wissenschaftlicher Konsens bei der Auswertung medizinischer und soziologischer Daten gilt. Sie führten eine Übereinstimmungsskala ein, welche von 0 bis 1 reicht. Es wurde festgelegt, dass ein Übereinstimmungskoeffizient Kappa kleiner gleich 0 eine schlechte Übereinstimmung („poor agreement“) widerspiegelt, während ein Kappa 1,00 eine perfekte Übereinstimmung („perfect agreement“) zweier Beobachter anzeigt. Werte von 0,00 bis 0,20 wurden als leichte Übereinstimmung („slight agreement“) kategorisiert, 0,21 bis 0,40 als ausreichende Übereinstimmung („fair agreement“), 0,41 bis 0,60 als mittelmäßige oder moderate Übereinstimmung („moderate agreement“) und 0,61 bis 0,80 als beachtliche Übereinstimmung („substantial agreement“). Werte von 0,81 oder größer sprechen für eine sehr hohe, fast vollkommene oder fast perfekte Übereinstimmung („almost perfect agreement“) [95, 96]. Nach diesem Bewertungssystem wurde auch die Ergebnisse Reliabilitätsanalyse des hier überprüften Klassifikationssystems evaluiert.

## **2.3 Ergebnisse der statistischen Reliabilitätsanalyse:**

### **2.3.1 Interobserver Reliabilität:**

Die statistische Reliabilitätsanalyse erfolgte nach der im vorhergehenden Kapitel erläuterten Methodik. Die Ergebnisse der Analyse werden im Folgenden unterteilt in die jeweiligen Untersuchungen vorgestellt.

Bei der gewichteten Reliabilitätsanalyse des gesamten Klassifikationssystems durch Kodierung der Klassifizierungen in String Variablen und deren Analyse konnte im Durchschnitt ein Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,329 ermittelt werden. Entsprechend der Interpretation nach Landis und Koch zeigt dies eine ausreichende Übereinstimmung („fair agreement“) an. Die

Durchschnitte der Übereinstimmungskoeffizienten beider Bewertungsrunden der jeweiligen Observer sowie die Einzelwerte der Bewertungsrunden sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient: <b>0,329</b>	Observer B (Lediglich Bewertungsrunde 1)	Observer D (Bewertungsrunden 1 und 2)	Observer C (Bewertungsrunden 1 und 2)
Observer A  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,090</b>	<b>0,555</b>	<b>0,413</b>
Observer C  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,114</b>	<b>0,374</b>	
Observer D  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,072</b>		

Tabelle 3: Ergebnisse der gewichteten Interobserver Reliabilitätsanalyse der String Variablen

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Konfidenzintervall	
		Obergrenze	Untergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,625</b>	0,515	0,735

Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,659</b>	0,552	0,766
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,377</b>	0,267	0,487
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,419</b>	0,315	0,522
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,475</b>	0,371	0,579
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,460</b>	0,348	0,573
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,440</b>	0,347	0,532
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,417</b>	0,322	0,511
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,380</b>	0,268	0,493
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,396</b>	0,278	0,514
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,324</b>	0,206	0,441
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,395</b>	0,278	0,512
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,103</b>	0,050	0,156
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,077</b>	0,034	0,121
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,077</b>	0,034	0,120
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,067</b>	0,027	0,106
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,110</b>	0,057	0,164

Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,117</b>	0,063	0,172
---	--------------	-------	-------

Tabelle 4: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität der String Variablen berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Für den Parameter Eccentricity konnte durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,254 ermittelt werden. Gemäß der Interpretation nach Landis und Koch entspricht das einer ausreichenden Übereinstimmung ("fair agreement"). Die Einzelergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Bewertungen	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Unter-grenze	Ober-grenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,138</b>	0,073	0,202
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,739</b>	0,637	0,841
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,748</b>	0,640	0,856
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,218</b>	0,088	0,349
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,304</b>	0,168	0,440
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>-0,010</b>	-0,035	0,014
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,330</b>	0,212	0,449
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,277</b>	0,148	0,406

Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,079</b>	-0,004	0,161
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,086</b>	-0,003	0,174
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,118</b>	0,058	0,179
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,123</b>	0,058	0,188
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,175</b>	0,073	0,277
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,179</b>	0,077	0,280
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,221</b>	0,095	0,346
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,264</b>	0,134	0,393
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,249</b>	0,120	0,378
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,334</b>	0,200	0,468

*Tabelle 5: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa*

Für den Parameter „Centricity“ wurde das gewichtete Cohens Kappa bestimmt. Hier konnte ein durchschnittlicher Koeffizient Kappa von 0,284 festgestellt werden, was als ausreichende Übereinstimmung ("fair agreement") gemäß Landis und Koch gewertet werden kann. Die Einzelwerte sind im Folgenden abgebildet.

Bewertungen	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Unter-grenze	Ober-grenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,106</b>	0,043	0,168
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,616</b>	0,459	0,773
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,610</b>	0,461	0,760
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,296</b>	0,176	0,417
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,367</b>	0,250	0,484
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,127</b>	0,055	0,200
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,418</b>	0,274	0,562
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,443</b>	0,294	0,592
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,348</b>	0,247	0,448
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,364</b>	0,259	0,469
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,054</b>	0,018	0,089
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,045</b>	0,014	0,077
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,075</b>	0,030	0,121

Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,091</b>	0,042	0,140
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,301</b>	0,179	0,423
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,285</b>	0,167	0,404
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,232</b>	0,116	0,348
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,330</b>	0,211	0,450

*Tabelle 6: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa*

Die Interobserver Reliabilität des Parameters „Major Location“ wurde mithilfe des einfachen Cohens Kappa ermittelt. Da der Parameter im Gegensatz zu den obigen Parametern keine ordinalskalierten Graduierungsstufen aufweist, sondern nominalskaliert bestimmt wird, ist hier das einfache Cohens Kappa indiziert. Hierbei konnte ein durchschnittlicher Wert von 0,409 für den Übereinstimmungskoeffizienten Kappa bestimmt werden. Entsprechend der Interpretation nach Landis und Koch wird hier eine moderate Übereinstimmung („moderate agreement“) angenommen. Die präzisen Einzeldaten sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Bewertungsrunde	Wert Kappa	Asymptotischer Standardfehler	Näherungsweise t	Näherungsweise Signifikanz
Observer A/Bewertung 1 Observer B/Bewertung 1	<b>0,315</b>	0,081	5,111	0,000
Observer A/Bewertung 2 Observer B/Bewertung 1	<b>0,330</b>	0,066	6,015	0,000
Observer A/Bewertung 1 Observer D/Bewertung 1	<b>0,649</b>	0,072	9,365	0,000
Observer A/Bewertung 2 Observer D/Bewertung 1	<b>0,542</b>	0,079	7,320	0,000
Observer A/Bewertung 1 Observer D/Bewertung 2	<b>0,692</b>	0,074	9,948	0,000
Observer A/Bewertung 2 Observer D/Bewertung 2	<b>0,516</b>	0,080	7,138	0,000
Observer D/Bewertung 1 Observer B/Bewertung 1	<b>0,207</b>	0,065	3,614	0,000
Observer D/Bewertung 2 Observer B/Bewertung 1	<b>0,356</b>	0,074	5,987	0,000
Observer A/Bewertung 1 Observer C/Bewertung 1	<b>0,348</b>	0,070	6,141	0,000
Observer A/Bewertung 1 Observer C/Bewertung 2	<b>0,336</b>	0,068	5,911	0,000
Observer A/Bewertung 2 Observer C/Bewertung 1	<b>0,354</b>	0,072	5,979	0,000

Observer A/Bewertung Observer C/Bewertung 2	2	X	<b>0,366</b>	0,066	6,436	0,000
Observer C/Bewertung Observer B/Bewertung 1	1	X	<b>0,420</b>	0,071	6,928	0,000
Observer C/Bewertung Observer B/Bewertung 1	2	X	<b>0,474</b>	0,069	7,628	0,000
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 1	1	X	<b>0,318</b>	0,066	5,481	0,000
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 2	1	X	<b>0,328</b>	0,066	5,761	0,000
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 1	2	X	<b>0,404</b>	0,069	6,970	0,000
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 2	2	X	<b>0,412</b>	0,068	7,182	0,000

*Tabelle 7: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Major Location" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa*

Für den Vergleich der Bewertungen im Bereich des Parameters "Direction of the defect" wurde ebenfalls das einfache Cohen's Kappa ohne Gewichtung der Abweichungsdifferenz bestimmt. Hier konnte ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,201 festgestellt werden. Bei entsprechender Wertung gemäß dem System nach Landis und Koch, kann hier eine ausreichende Übereinstimmung ("fair agreement") angenommen werden. Die Einzelrechnungen sind in der folgenden tabellarischen Übersicht dargestellt.

Bewertungsrunde	Wert Kappa	Asymptotischer Standardfehler	Näherungsweise t	Näherungsweise Signifikanz
Observer A/Bewertung Observer B/Bewertung 1	1 X <b>0,141</b>	0,057	2,505	0,012
Observer A/Bewertung Observer B/Bewertung 1	2 X <b>0,197</b>	0,058	3,620	0,000
Observer A/Bewertung Observer D/Bewertung 1	1 X <b>0,479</b>	0,070	7,365	0,000
Observer A/Bewertung Observer D/Bewertung 1	2 X <b>0,269</b>	0,072	4,133	0,000
Observer A/Bewertung Observer D/Bewertung 2	1 X <b>0,635</b>	0,066	9,368	0,000
Observer A/Bewertung Observer D/Bewertung 2	2 X <b>0,231</b>	0,072	3,502	0,000
Observer D/Bewertung Observer B/Bewertung 1	1 X <b>0,126</b>	0,053	2,332	0,020
Observer D/Bewertung Observer B/Bewertung 1	2 X <b>0,259</b>	0,061	4,664	0,000
Observer A/Bewertung Observer C/Bewertung 1	1 X <b>0,099</b>	0,058	1,827	0,068
Observer A/Bewertung Observer C/Bewertung 2	1 X <b>0,092</b>	0,058	1,725	0,084
Observer A/Bewertung Observer C/Bewertung 1	2 X <b>0,118</b>	0,057	2,306	0,021

Observer A/Bewertung Observer C/Bewertung 2	2	X	<b>0,164</b>	0,058	3,184	0,001
Observer C/Bewertung Observer B/Bewertung 1	1	X	<b>0,143</b>	0,058	2,638	0,008
Observer C/Bewertung Observer B/Bewertung 1	2	X	<b>0,180</b>	0,056	3,547	0,000
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 1	1	X	<b>0,061</b>	0,056	1,191	0,234
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 2	1	X	<b>0,134</b>	0,059	2,567	0,010
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 1	2	X	<b>0,136</b>	0,060	2,543	0,011
Observer D/Bewertung Observer C/Bewertung 2	2	X	<b>0,153</b>	0,061	2,853	0,004

*Tabelle 8: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Direction of the defect" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa*

### **2.3.2 Intraobserver Reliabilität:**

Die statistische Auswertung der gewichteten Reliabilitätsanalyse des gesamten Klassifikationssystems durch Analyse der String Variablen zeigte einen durchschnittlichen Übereinstimmungskoeffizienten Kappa von 0,580 an. Dies ist nach Landis und Koch als moderate Übereinstimmung („moderate agreement“) zu werten. Die Einzelwerte der Analyse der Intraobserver Reliabilität sind folgender Tabelle zu entnehmen.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,441</b>	<b>0,321</b>	<b>0,560</b>
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,629</b>	<b>0,519</b>	<b>0,739</b>
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,670</b>	<b>0,580</b>	<b>0,760</b>

Tabelle 9: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität der String Variablen berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Die Analyse der Intraobserver Reliabilität für den Parameter "Eccentricity" wurde zunächst mithilfe des gewichteten Cohens Kappa durchgeführt, welches bei einer abweichenden Graduierung die Abweichungsdifferenz in linearem Maße in die Reliabilität miteinfließen lässt. Es zeigte sich ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,572. Dies entspricht einer moderaten Übereinstimmung ("moderate agreement") gemäß Landis und Koch. Die Einzelwerte werden in der nachfolgenden Tabelle aufgezeigt.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,265</b>	0,150	0,379
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,753</b>	0,652	0,854
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,699</b>	0,576	0,822

Tabelle 10: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Für die Analyse der Intraobserver Reliabilität des Parameters „Centricity“ wurde das gewichtete Cohens Kappa bestimmt. Hier zeigte sich ein Durchschnittswert von 0,581 für den Übereinstimmungskoeffizienten Kappa. Dies entspricht einer moderaten Übereinstimmung („moderate agreement“) gemäß Landis und Koch. Die Einzelwerte sind im Folgenden aufgezeigt.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,449</b>	0,297	0,600
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,687</b>	0,576	0,798
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,607</b>	0,435	0,779

Tabelle 11: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Für die Darstellung der Intraobserver Reliabilität im Parameter „Major Location“ wurde das einfach Cohens Kappa geschätzt. Dies weist einen durchschnittlichen Übereinstimmungskoeffizienten Kappa von 0,637 auf, was einer beachtlichen Übereinstimmung („substantial agreement“) nach Landis und Koch entspricht. Die einzelnen Werte werden in der folgenden Tabelle präsentiert.

Bewertungsrunden	Wert Kappa	Asymptotischer Standardfehler	Näherungsweise t	Näherungsweise Signifikanz
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,505</b>	0,079	6,828	0,000

Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,714</b>	0,061	11,097	0,000
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,693</b>	0,070	10,071	0,000

Tabelle 12: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Major Location" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa

Für den Parameter "Direction of the defect" konnte durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,445 ermittelt werden. Dieser Wert wurde als moderate Übereinstimmung („moderate agreement“) gewertet. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Einzelwerte der Auswertung.

Bewertungsrunden	Wert Kappa	Asymptotischer Standardfehler	Näherungsweise t	Näherungsweise Signifikanz
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,262</b>	0,073	3,980	0,000
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,610</b>	0,063	10,824	0,000
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,463</b>	0,071	7,122	0,000

Tabelle 13: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Direction of the defect" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa

### 2.3.3 Untersuchung der Auswirkung von Modifikationen des Klassifikationssystems auf die Ergebnisse der statistischen Reliabilitätsanalyse:

Das hier untersuchte dreidimensionale qualitative Klassifikationssystem ermöglicht eine präzise Beschreibung der vorliegenden gelenkigen Defektsituation unter anderem durch die graduelle Bewertung der Ausdehnung des Knochendefekts in den Parametern „Eccentricity“ und „Centricity“. Die Differenzierungsmöglichkeit besteht aus vier unterschiedliche Graden bei Betrachtung der „Centricity“ (C1-4, C0 ist definitionsgemäss kein Knochendefekt),

beziehungsweise fünf Grade bei Beobachtung der „Eccentricity“ (E1-4, E0 beschreibt einen rein zentralen Defekt).

Die Eigenschaft des Klassifikationssystems, eine besonders exakte Beschreibung des Glenoiddefekts zu ermöglichen geht auch mit Negativaspekten einher. Mit einer hohen Anzahl an Einteilungsmöglichkeiten und damit vielen möglichen Subtypen bringt diese Klassifikation auch die Eigenschaft einer höheren Streugröße und folglich geringerer Reliabilität mit sich. Dies kann negative Effekte auf den Nutzen der Klassifikation als Kommunikationsgrundlage und die verlässliche Anwendbarkeit als Basis für Therapieentscheidungen haben.

Um diese potentiell negativen Auswirkungen der graduierbaren Einteilbarkeit der Parameter „Eccentricity“ und „Centricity“ zu untersuchen, wurden die Datensätze der Bewertungsrunden retrospektiv verändert. Hierfür wurden Grade zusammengefasst und damit die Einteilungsmöglichkeit limitiert. Es resultierten zwei modifizierte Klassifikationssysteme, deren Interobserver und Intraobserver Reliabilität anschließend analysiert wurde.

### **2.3.3.1 Verringerung der Abstufungsmöglichkeiten in den Parametern "Eccentricity" und "Centricity" auf drei Kategorien ("leicht", "mittel", "schwer"):**

Zunächst wurde die Auswirkung einer Verringerung der Einteilungsgrade auf drei Stufen untersucht. Null- und erstgradige Bewertungen (E0 und E1) wurden als leichter Defekt („leicht“) zusammengefasst. Zweit- und drittgradig eingestufte Defekte wurden als mittlere Defektausprägung („mittel“) und viertgradig bewertete Defektsituationen als schwerer Defekt („schwer“) klassifiziert.

Zunächst wurde eine gewichtete Analyse der Interobserver Reliabilität modifizierten Klassifikationssystems in toto durchgeführt. Hierfür wurde ähnlich der Reliabilitätsanalyse der ursprünglichen Klassifikation eine String Variable erstellt. Hier konnte ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,278 bestimmt werden. Das entspricht einer ausreichenden Übereinstimmung („fair agreement“) nach Landis und Koch. In den folgenden Tabellen werden diese Ergebnisse veranschaulicht.

Durchschnittlicher Übereinstimmungs-koeffizient: <b>0,278</b>	Observer B (Lediglich Bewertungsrunde 1)	Observer D (Bewertungsrunden 1 und 2)	Observer C (Bewertungsrunden 1 und 2)
Observer A  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,083</b>	<b>0,543</b>	<b>0,280</b>
Observer C  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,116</b>	<b>0,288</b>	
Observer D  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,079</b>		

*Tabelle 14: Ergebnisse der gewichteten Interobserver Reliabilitätsanalyse der String Variable der dreistufig modifizierten Klassifikation*

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,597</b>	0,486	0,708
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,643</b>	0,534	0,751
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,271</b>	0,157	0,384
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,303</b>	0,193	0,413
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,113</b>	0,054	0,172
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,456</b>	0,349	0,563
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,476</b>	0,362	0,589
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,295</b>	0,189	0,400
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,253</b>	0,150	0,356
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,052</b>	0,018	0,087
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,309</b>	0,191	0,426
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,329</b>	0,219	0,438
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,080</b>	0,036	0,123
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,250</b>	0,138	0,361
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,265</b>	0,155	0,374
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,077</b>	0,034	0,121

Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,110</b>	0,052	0,167
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,121</b>	0,067	0,175

Tabelle 15: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität der String Variablen der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Die Interobserver Reliabilität wurde für den Parameter „Eccentricity“ durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa ermittelt, wodurch das Ausmaß der Abweichungsdifferenz bei inkongruenten Bewertungen Auswirkungen auf den Übereinstimmungskoeffizienten hat. Hier konnte ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,275 festgestellt werden. Entsprechend der Interpretation nach Landis und Koch liegt hier eine ausreichende Übereinstimmung („fair agreement“) vor. Im Folgenden sind die Einzelwerte der Reliabilitätsprüfung tabellarisch dargestellt.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,140</b>	0,064	0,216
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,718</b>	0,591	0,844
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,686</b>	0,548	0,824
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,228</b>	0,071	0,386
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,299</b>	0,142	0,456
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>-0,023</b>	-0,056	0,010
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,462</b>	0,304	0,620

Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,386</b>	0,218	0,555
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,182</b>	0,049	0,314
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,169</b>	0,037	0,301
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,113</b>	0,042	0,184
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,110</b>	0,042	0,178
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,155</b>	0,043	0,267
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,179</b>	0,069	0,290
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,228</b>	0,071	0,384
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,306</b>	0,152	0,461
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,270</b>	0,116	0,423
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,343</b>	0,190	0,495

*Tabelle 16: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa*

Die Interobserver Reliabilität des Parameters „Centricity“ wurde durch Ermittlung des gewichteten Cohens Kappa untersucht. Der Übereinstimmungskoeffizient Kappa nahm hier im Durchschnitt 0,180 an, was eine leichte Übereinstimmung („slight agreement“) nach Landis und Koch anzeigt. Einzelrechnungen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgezeigt.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,099</b>	0,021	0,177
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,546</b>	0,285	0,806
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,536</b>	0,259	0,814
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,162</b>	0,026	0,298
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,217</b>	0,082	0,351
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,071</b>	0,000	0,142
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,213</b>	-0,075	0,502
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,282</b>	-0,050	0,614
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,170</b>	0,026	0,313
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,196</b>	0,063	0,328
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,028</b>	-0,006	0,062
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,019</b>	-0,009	0,047
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,068</b>	0,017	0,118
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,081</b>	0,030	0,132

Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,159</b>	0,024	0,295
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,145</b>	0,029	0,260
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,099</b>	-0,016	0,213
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,146</b>	0,027	0,265

Tabelle 17: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Die Intraobserver Reliabilität dieser retrospektiv modifizierten Klassifikation wurde ebenfalls analysiert.

Zunächst wurde eine Untersuchung der String Variable durchgeführt. Hier zeigte sich im Durchschnitt ein Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,597. Dies entspricht einer moderaten Übereinstimmung nach Landis und Koch („moderate agreement“).

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	0,475	0,358	0,591
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	0,640	0,530	0,750
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	0,676	0,572	0,779

Tabelle 18: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität der String Variablen der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Hier wurde für die Intraobserver Reliabilität des Parameters „Eccentricity“ durch die Ermittlung des gewichteten Cohens Kappa ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von

0,609 festgestellt. Dies ist gemäß Landis und Koch als beachtliche Übereinstimmung („substantial agreement“) zu werten. Die Einzelergebnisse werden in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,386</b>	0,231	0,540
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,737</b>	0,618	0,856
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,703</b>	0,560	0,846

*Tabelle 19: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa*

Die Intraobserver Reliabilität der Einstufungen des Parameters „Centricity“ entsprechend der modifizierten Klassifikation wurde zunächst durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa ermittelt. Hier zeigte sich ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,568, wodurch eine moderate Übereinstimmung („moderate agreement“) nach Landis und Koch angezeigt wird. Einzelwerte sind im Folgenden tabellarisch dargestellt.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,444</b>	0,172	0,717
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,660</b>	0,515	0,806
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,600</b>	0,283	0,917

Tabelle 20: Einzelergebnisse der Intraobserver des Parameters "Centricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

### 2.3.3.2 Verringerung der Abstufungsmöglichkeiten in den Parametern "Eccentricity" und "Centricity" auf zwei Kategorien ("Major", "Minor"):

Eine weitere Modifikation des ursprünglichen Klassifikationssystems wurde auf ihre Reliabilität untersucht. Hierfür wurden retrospektiv die Datensätze der Bewertungsrunden bearbeitet und Bewertungsgrade der Parameter „Eccentricity“ und „Centricity“ zusammengeführt, um die Auswirkung dessen auf die Reliabilität der Klassifikation zu analysieren.

Null-, erst-, und zweitgradige Bewertungen wurden für diese Modifikation zusammengefasst und als Bewertungsgrad „Minor“ kategorisiert. Dritt- und viertgradig klassifizierte Bewertungen wurden als „Major“ zusammengeführt. Anschließend wurden die Interobserver und Intraobserver Reliabilität untersucht.

Die Interobserver Reliabilität des modifizierten Klassifikationssystems wurde durch eine Analyse der zusammengesetzten String Variablen bestimmt. Hier zeigte sich im Durchschnitt ein Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,340, was eine ausreichende Übereinstimmung nach Landis und Koch („substantial agreement“) anzeigt.

Durchschnittlicher Übereinstimmungs- koeffizient: <b>0,340</b>	Observer B  (Lediglich Bewertungsrunde 1)	Observer D  (Bewertungsrunden 1 und 2)	Observer C  (Bewertungsrunden 1 und 2)
Observer A  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,104</b>	<b>0,560</b>	<b>0,388</b>
Observer C  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,129</b>	<b>0,418</b>	
Observer D  (Bewertungsrunden 1 und 2)	<b>0,096</b>		

*Tabelle 21: Ergebnisse der gewichteten Interobserver Reliabilitätsanalyse der String Variable der zweistufig modifizierten Klassifikation*

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	0,651	0,537	0,766

Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	0,658	0,535	0,781
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	0,382	0,245	0,519
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	0,440	0,299	0,581
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	0,102	0,035	0,169
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	0,486	0,373	0,599
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	0,446	0,330	0,562
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	0,360	0,246	0,473
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	0,371	0,255	0,487
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	0,106	0,046	0,167
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	0,411	0,282	0,540
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	0,398	0,258	0,537
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	0,100	0,042	0,157
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	0,378	0,238	0,519
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	0,484	0,350	0,618
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	0,092	0,037	0,146
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	0,131	0,054	0,207

Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	0,127	0,054	0,200
---	-------	-------	-------

Tabelle 22: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität der String Variablen der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Um die Interobserver Reliabilität des Parameters „Eccentricity“ zu ermitteln, wurde das gewichtete Cohens Kappa bestimmt. Hierfür zeigte sich ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,259. Dies entspricht einer ausreichenden Übereinstimmung („fair agreement“) nach Landis und Koch. Die folgende Tabelle enthält die jeweiligen Einzelergebnisse.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,152</b>	0,062	0,243
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,816</b>	0,686	0,946
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,838</b>	0,715	0,962
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,292</b>	0,096	0,487
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,435</b>	0,243	0,628
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,003</b>	-0,048	0,055
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,156</b>	-0,028	0,339
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,118</b>	-0,075	0,311
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>-0,039</b>	-0,166	0,087

Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>-0,019</b>	-0,156	0,119
Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,145</b>	0,058	0,233
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,125</b>	0,047	0,202
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,167</b>	0,031	0,304
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,126</b>	0,005	0,246
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,314</b>	0,122	0,507
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,310</b>	0,108	0,512
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,288</b>	0,100	0,477
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,426</b>	0,235	0,617

*Tabelle 23: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa*

Für die Untersuchung der Interobserver Reliabilität des Parameters „Centricity“ in dieser modifizierten Klassifikation wurde das gewichtete Cohens Kappa bestimmt. Hier konnte ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient von 0,379 festgestellt werden, welcher eine ausreichende Übereinstimmung („fair agreement“) nach Landis und Koch anzeigt. Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Einzelergebnisse.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,083</b>	-0,002	0,168
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,632</b>	0,453	0,811
Observer A/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,625</b>	0,445	0,804
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,439</b>	0,234	0,645
Observer A/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,537</b>	0,344	0,730
Observer A/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,205</b>	0,085	0,325
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 1	<b>0,494</b>	0,326	0,661
Observer A/Bewertung 2 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,492</b>	0,329	0,655
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,518</b>	0,352	0,685
Observer A/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,545</b>	0,377	0,713

Observer D/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,082</b>	0,024	0,139
Observer D/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,072</b>	0,020	0,124
Observer C/Bewertung 1 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,087</b>	0,026	0,147
Observer C/Bewertung 2 X Observer B/Bewertung 1	<b>0,102</b>	0,033	0,172
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,473</b>	0,259	0,687
Observer D/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,467</b>	0,258	0,676
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 1	<b>0,393</b>	0,168	0,617
Observer D/Bewertung 2 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,575</b>	0,379	0,771

Tabelle 24: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Auch die Intraobserver Reliabilität wurde für die modifizierte Klassifikation analysiert.

Auch hier wurde zunächst eine Untersuchung der String Variablen durchgeführt. Es konnte ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,574 festgestellt werden. Gemäß Landis und Koch zeigt dies eine moderate Übereinstimmung („moderate agreement“) an.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,409</b>	0,276	0,541
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,683</b>	0,566	0,800
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,630</b>	0,512	0,748

Tabelle 25: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität der String Variablen der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Hier zeigte sich für den Parameter „Eccentricity“ bei Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa ein durchschnittlicher Übereinstimmungskoeffizient Kappa von 0,511. Dies entspricht auch dem einfachen Cohens Kappa. Gemäß der Interpretation nach Landis und Koch liegt hier eine moderate Übereinstimmung vor („moderate agreement“). Die Einzelergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,082</b>	-0,089	0,254
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,695</b>	0,544	0,847
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,755</b>	0,605	0,905

Tabelle 26: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

Auch für den Parameter „Centricity“ wurde die Intraobserver Reliabilität durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa ermittelt. Die Werte entsprechen bei dieser Rechnung dem einfachen Cohens Kappa. Der Übereinstimmungskoeffizient nimmt hier einen Durchschnittswert von 0,572 an, was gemäß Landis und Koch als moderate Übereinstimmung („moderate agreement“) gewertet werden kann. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Einzelergebnisse.

Bewertungsrunden	Gewichtetes Kappa	95% Asymptotisches Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Observer A/Bewertung 1 X Observer A/Bewertung 2	<b>0,428</b>	0,243	0,613
Observer C/Bewertung 1 X Observer C/Bewertung 2	<b>0,678</b>	0,504	0,853
Observer D/Bewertung 1 X Observer D/Bewertung 2	<b>0,609</b>	0,410	0,809

Tabelle 27: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa

### 3 Diskussion

Das hier untersuchte qualitative dreidimensionale Klassifikationssystem bietet die Möglichkeit, glenoidale Knochendefekte anhand der exzentrischen und zentrischen Ausrichtung als auch nach der Lokalisation des Knochenverlustes einzuteilen. Die Evaluation erfolgt an dreidimensionalen Rekonstruktionen von Computertomographien und ermöglicht eine sehr präzise Beschreibung der Glenoidmorphologie. Entsprechend der Einteilung wurden Empfehlungen bezüglich der Auswahl des geeigneten Therapieverfahrens zur Behandlung des Glenoiddefekts entwickelt.

Ziel dieser Studie war, die Klassifikation mittels Reliabilitätsanalyse zu validieren, die Ergebnisse diese Analyse in Relation zu anderen Klassifikationssystemen zu setzen und dadurch die Anwendbarkeit der Klassifikation im klinischen Alltag zu überprüfen.

#### 3.1 Zusammenfassung der statistischen Reliabilitätsprüfung

Von größter Relevanz für die Anwendbarkeit des Klassifikationssystems im klinischen Alltag ist die gewichtete Reliabilitätsanalyse des kompletten Klassifikationssystems in seiner Darstellung als String Variable. Hier konnten wir bei Überprüfung der Interobserver Reliabilität eine ausreichende Übereinstimmung nachweisen. Bei der Überprüfung der Intraobserver Reliabilität

zeigte sich bei der Auswertung aller Parameter in ihrer Kombination eine moderate Übereinstimmung.

Zum besseren Verständnis der Reliabilität erfolgte die Analyse der Einzelteile, aus denen sich die Klassifikation zusammensetzt. Für die Parameter "Eccentricity", "Centricity" und "Direction of the defect" zeigte sich in der Analyse der Interobserver Reliabilität eine ausreichende Übereinstimmung, für den Parameter "Major Location" sogar eine moderate Übereinstimmung. Durch die Überprüfung der Intraobserver Reliabilität konnte in den Parametern "Eccentricity", „Centricity“ und „Major Location“ eine moderate Übereinstimmung zwischen den Bewertungsrunden festgestellt werden, für den Parameter "Direction of the defect" zeigte sich eine ausreichende Übereinstimmung.

Die erste Modifikation des Klassifikationssystems in den Parametern „Eccentricity“ und „Centricity“ auf drei ordinalskalierte Einteilungsgrade beeinflusste Reliabilität der Klassifikation nur geringfügig. In der Analyse der String Variablen zeigte sich weiterhin eine ausreichende Übereinstimmung in der Interobserver Reliabilität und eine moderate Übereinstimmung in der Intraobserver Reliabilität.

Eine weitere Modifizierung der Parameter „Eccentricity“ und „Centricity“ auf zwei ordinalskalierte Einteilungsgrade hatte ebenfalls geringen Einfluss auf die Interobserver und Intraobserver Reliabilität des Klassifikationssystems.

Zusammenfassend lässt sich aus dieser Reliabilitätsanalyse sagen, dass das Klassifikationssystem bei fast allen Fragestellungen ausreichende bis moderate Übereinstimmungen zeigt. Der Aufbau des Klassifikationsmodells entspricht logischen Prinzipien und ist unabhängig der dem Glenoiddefekt zugrundeliegenden Ätiologie anwendbar. Eine wesentliche Stärke der Klassifikation ist die Möglichkeit, das geeignete Therapieverfahren auf der Grundlage der Einordnung eines Glenoiddefekt in diese Klassifikation auszuwählen. Ein weiterer positiver Aspekt dieses Klassifikationssystems ist, dass Defektsituationen am Glenoid durch die überdurchschnittlich vielen Einteilungsmöglichkeiten sehr präzise charakterisiert werden können. Ebenfalls positiv zu werten ist die Anwendbarkeit des Klassifikationssystems auf Glenoiddefekte unabhängig der Ätiologie in der Primär- und Revisionssituation. Dies stellt ein Alleinstellungsmerkmal für diese Klassifikation dar.

In dieser Reliabilitätsanalyse zeigte das Klassifikationssystem Schwächen vor allem in den Parametern „Eccentricity“ und „Centricity“. Hier könnte eine präzisere Definition der Einteilungsgrade in Zukunft Abhilfe schaffen. Dies müsste in weiteren Studien untersucht werden. Auffallend sind auch die unterschiedlichen Interobserver Reliabilitäten beim Vergleich der Observer A, C und D mit Observer B. Dies könnte Folge einer weniger routinierten Anwendung des Klassifikationssystems im klinischen Alltag des Observer B oder Kommunikationsschwierigkeiten bei der Festsetzung der Einteilungsvorgaben im Vorfeld der Bewertungsrunden sein.

## **3.2 Übersicht über die Ergebnisse der Reliabilitätsanalysen anderer Klassifikationen für Glenoiddefekte**

Vergleichbare Klassifikationssysteme für Knochendefekte am Glenoid wurden von Walch et al., Bercik et al., Sirveaux et al. Antuna et al., Page et al. Williams und Iannotti, Frankle et al. und Habermeyer et al. vorgestellt. Reliabilitätsanalysen wurden für die Klassifikation nach Walch et al., die modifizierte Walch-Klassifikation nach Bercik et al., die Klassifikation nach Frankle et al. und die Klassifikation nach Habermeyer et al. durchgeführt.

Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Reliabilitätsuntersuchungen bereits bekannter Klassifikationssysteme angeführt und anschließend in Relation zu den Reliabilitätsdaten der hier untersuchten Klassifikation gestellt werden.

### **3.2.1 Frankle et al.**

Die Analyse der Interobserver Reliabilität des Klassifikationsmodells nach Frankle et al. konnte eine beachtliche Übereinstimmung ( $\text{Kappa} = 0.67 - 0.80$ ) bei Einteilung in die Hauptgruppen „normal“ und „abnormal“ feststellen. Die Einordnung der Glenoiddefekte in die Subgruppen der Klassifikation ergab eine moderate Übereinstimmung ( $\text{Kappa} = 0.54$ ) zwischen den Bewertern [7].

Die Intraobserver Reliabilität konnte für die Einteilung in die Hauptgruppen mit einer beachtlichen bis sehr hohen Übereinstimmung ( $\text{Kappa} = 0.77 - 0.97$ ) bestimmt werden. Für die Einteilung der abnormalen Glenoide in die präziseren Subgruppen ergab sich eine sehr hohe Übereinstimmung ( $\text{Kappa} = 0.82$ ) [7].

### **3.2.2 Habermeyer et al.**

Bei Überprüfung der Interobserver Reliabilität der Klassifikation nach Habermeyer et al. zeigte sich eine sehr hohe Übereinstimmung bei der erkrankten Fallgruppe ( $\text{Kappa} = 0.952$ ) und bei der gesunden Fallgruppe ( $\text{Kappa} = 0.82$ ) [10].

### **3.2.3 Sirveaux et al.**

Kappe et al. haben die Reliabilität des Klassifikationsmodells nach Sirveaux und Favard untersucht. In dieser Studie konnte im Durchschnitt eine moderate Übereinstimmung ( $\text{Kappa} = 0.598$ ) für die Interobserver Reliabilität festgestellt werden. Für die Intraobserver Reliabilität wurde durchschnittlich eine beachtliche Übereinstimmung ( $\text{Kappa} = 0.727$ ) ermittelt [94].

### **3.2.4 Walch et al.**

Die ursprüngliche Klassifikation von Walch et al. erreichte in verschiedenen Reliabilitätsstudien eine ausreichende bis moderate Interobserver Übereinstimmung. Die Ergebnisse dieser Validierungsstudien waren sehr heterogen. Bercik et al. (Kappa = 0.391), Lowe et al. (Kappa = 0.23 – 0.34) und Scalise et al. (Kappa = 0.34) konnten eine ausreichende Übereinstimmung zwischen den unterschiedlichen Bewertern feststellen, Kidder et al. (Kappa = 0.6) und Nowak et al. (Kappa = 0.508) fanden eine moderate Übereinstimmung. Dies steht im Gegensatz zur Reliabilitätsprüfung der Walch-Klassifikation durch Walch et al. bei Vorstellung des Klassifikationssystems, bei welcher eine beachtliche Übereinstimmung der Interobserver Reliabilität gezeigt wurde (Kappa = 0.65 – 0.7). Hier ist allerdings anzumerken, dass Walch et al. bei dieser Validierung lediglich die Übereinstimmung der Einteilung der Defektsituationen in die Hauptgruppen der Walch-Klassifikation analysierten, nicht jedoch die präzise Typisierung des Defekts in die Unterkategorien des Klassifikationssystems. Kidder et al. überprüfte diese vereinfachte Version der Klassifikation nach Walch et al. ebenfalls und konnte eine moderate Übereinstimmung (Kappa = 0.548) in der Interobserver Reliabilität nachweisen [84] [3] [87] [85] [86] [97] [83].

Die Intraobserver Reliabilität der Walch Klassifikation wurde ebenfalls in mehreren Reliabilitätsstudien untersucht. Scalise et al. (Kappa = 0.37) stellte eine ausreichende Übereinstimmung fest. Lowe et al. (Kappa = 0.47-0.60) und Bercik et al. (Kappa 0.604) konnten eine moderate und Kidder et al. (Kappa = 0.866) eine exzellente Übereinstimmung zeigen. Walch et al. (Kappa 0.65 – 0.7) beschrieb bei Erstvorstellung des Klassifikationssystems eine beachtliche Übereinstimmung der Bewertungsrunden jeweils gleicher Bewerter. Allerdings wurde hier, wie auch bei der Interobserver Reliabilität, eine die vereinfachte Walch-Klassifikation ohne Einteilung der Defektsituation in die jeweiligen Untertypisierungen durchgeführt. Die vereinfachte Walch-Klassifikation wurde von Kidder et al. auch auf die Intraobserver Reliabilität untersucht, wobei eine exzellente Übereinstimmung (Kappa = 0.915) gezeigt werden konnte [3] [84] [86] [83] [87] [97] [85].

### **3.2.5 Bercik et al.**

Das modifizierte Walch-Klassifikationssystem nach Bercik et al. wurde im Jahr 2016 vorgestellt. Aufgrund der heterogenen Untersuchungsergebnissen in Reliabilitätsstudien zur ursprünglichen Walch-Klassifikation wurden Klassifizierungstypen präziser definiert und Einordnungsstufen ergänzt. Dies hatte Auswirkungen auf die Reliabilität dieser Klassifikation [3].

Bercik et al. konnten bei Überprüfung der Interobserver Reliabilität durchschnittlich eine beachtliche Übereinstimmung (Kappa = 0.703) feststellen [3]. Iannotti et al. analysierten dieses Klassifikationssystem im Jahr 2021 im Rahmen einer Multicenter-Studie mit insgesamt 23 Bewertern und berichteten über eine ausreichende bis moderate Übereinstimmung in der Interobserver Reliabilität. Überprüft wurden Fallgruppen, bei welchen alle Typen des Klassifikationssystems vertreten waren (Kappa = 0.43), und Fallgruppen, deren glenoidale

Pathologien sich auf das posteriore Glenoid beschränkten (Kappa = 0.38) [90]. In der von Shukla et al. durchgeführten Reliabilitätsanalyse zeigte sich für die modifizierte Walch-Klassifikation im Durchschnitt eine ausreichende Übereinstimmung im Rahmen der Interobserver Reliabilität bei Evaluation von Glenoiden anhand von Röntgenaufnahmen (Kappa = 0.55) und Computertomographien (Kappa = 0.52) [91]. Pajolli et al. konnten lediglich eine geringe Übereinstimmung nachweisen (Kappa = 0.132) [92].

Bei Analyse der Intraobserver Reliabilität durch Bercik et al. zeigte sich eine fast perfekte Übereinstimmung (Kappa = 0.882) [3]. Bei der Multicenter-Studie von Iannotti et al. 2021 konnte eine moderate bis beachtliche Übereinstimmung in der Intraobserver Reliabilität gezeigt werden. Auch hier wurde eine Fallgruppe, welche alle Defektsituationen am Glenoid widerspiegelte (Kappa = 0.63), und eine Fallgruppe, in welcher lediglich posteriore Glenoidpathologien vertreten waren (Kappa = 0.51), untersucht [90]. Shukla et al. konnten eine im Durchschnitt beachtliche Übereinstimmung (Kappa = 0.73) der Intraobserver Reliabilität bei Analyse von Röntgenaufnahmen und Computertomographien nachweisen [91]. Pajolli et al. stellten bei der Reliabilitätsanalyse eine moderate Übereinstimmung für die Intraobserver Reliabilität (Kappa = 0.456) fest [92].

### **3.3 Vergleich der Ergebnisse der statistischen Reliabilitätsprüfung**

Ein Vergleich der bereits bekannten Klassifikationen mit dem hier untersuchten Klassifikationssystem ist nur bedingt möglich. Die meisten Klassifikationsmodelle ordnen glenoidale Defektsituationen in fest vordefinierte Typen ein. Die hier untersuchte Klassifikation verfolgt einen anderen Ansatz und analysiert die Morphologie des Glenoiddefekts entsprechend der vier Parameter „Eccentricity“, „Centricity“, Major Location“ und „Direction of the defect“. Die letztendliche Klassifizierung setzt sich schließlich aus der Kombination der Werte in den Einzelparametern zusammen. Das Resultat ist eine präzisere Beschreibung der Morphologie des Knochendefekts mit einer großen Auswahl an möglichen Kombinationen.

#### **3.3.1 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Frankle et al.**

Der Vergleich des hier untersuchten Klassifikationssystems mit der Klassifikation nach Frankle et al. weist gewisse Limitationen auf. Die Interobserver und Intraobserver Reliabilität wurde von Frankle et al. zunächst für die Einteilung des Glenoids als physiologisches Glenoid oder pathologisches Glenoid mit Knochenerosion berechnet. Anschließend wurde die Reliabilität für die Klassifizierung der pathologischen Defektsituation entsprechend des Klassifikationssystems gemäß der vorliegenden Hauptlokalisation des Knochenverlusts analysiert. Es sind somit im Klassifikationsmodell nach Frankle et al. fünf mögliche Kombinationen zur Beschreibung der Glenoiderosion möglich. Die Klassifikation ist weiterhin lediglich unidimensional morphologisch orientierend. Das Ausmaß des Knochendefekts im dreidimensionalen Raum wird hier nicht bewertet. Das hier untersuchte Klassifikationssystem evaluiert neben der Hauptlokalisation des

Glenoiddefekts die dreidimensionale Ausdehnung des Knochenverlusts durch Bewertung der Defektfläche und –Tiefe und ferner auch die Sekundärlokalisierung der Erosion.

Die Interobserver Reliabilität für den ersten Klassifizierungsschritt entspricht einer beachtlichen Übereinstimmung gemäß Landis und Koch, die Reliabilität zwischen verschiedenen Bewertern im zweiten Klassifizierungsschritt der Klassifikation nach Frankle et al. dagegen ist geringer und weist eine moderate Übereinstimmung auf. Für das hier untersuchte Klassifikationsmodell konnte für die Interobserver Reliabilität bei Analyse der gesamten Klassifikation eine ausreichende Übereinstimmung und bei Untersuchung der Einzelparameter in drei von vier Parametern eine ausreichende Übereinstimmung und in einem Parameter eine moderate Übereinstimmung gezeigt werden. Folglich ist die Interobserver Reliabilität etwas niedriger als bei Frankle et al. Die untersuchte Klassifikation erlaubt allerdings eine wesentlich präzisere Beschreibung der individuellen Defektsituation mit mehr möglichen Einteilungskombinationen.

Vergleichsweise dazu besteht im Hinblick auf die Reliabilität ein größerer Unterschied beim Vergleich der Intraobserver Reliabilität der beiden Klassifikationssysteme. Für die Klassifikation nach Frankle et al. konnte eine sehr hohe Übereinstimmung für den ersten und zweiten Klassifizierungsschritt bemessen werden. Bei der hier überprüften Klassifikation wurde dagegen bei der Reliabilitätsanalyse der Parameter in ihrer Kombination eine moderate Übereinstimmung festgestellt. Bei der Untersuchung der einzelnen Parameter konnte in den Parametern „Eccentricity“, „Centricity“ und „Major Location“ eine ausreichende Übereinstimmung, im Parameter „Direction of the defect“ eine ausreichende Übereinstimmung bestimmt werden.

### **3.3.2 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Habermeyer et al.**

Das Klassifikationsmodell nach Habermeyer et al. wurde als Ergänzung zur Klassifikation nach Walch et al. entwickelt, bei welcher die Beurteilung der inferioren Defektsituation nur eine geringe Wichtung für die finale Einordnung der pathologischen Glenoidmorphologie in die vorgegebenen Klassifikationstypen hat. Der Zustand des inferioren Glenoids ist allerdings von großer Bedeutung für das postoperative Ergebnis der operativen Versorgung [10]. Für die Evaluation des inferioren Knochendefekts wird entsprechend des Schnittpunkts zweier Hilfslinien in Relation zu anatomischen Landmarken in anteroposterioren Röntgenaufnahmen eine Einteilung des Knochenverlusts in vier verschiedene Kategorien vorgenommen. Die Kriterien dieses Klassifikationssystems sind exakt definiert, was eine möglichst objektive Beurteilung der inferosuperioren Knochenerosion und die damit einhergehende Neigung der Glenoidfläche nach inferior ermöglicht. Im Vergleich zum hier untersuchten Klassifikationsmodell wird bei der Klassifikation von Habermeyer et al. glenoidaler Knochendefekt lediglich in einer Ebene bewertet. Das Vorgehen hierbei ist allerdings weitgehend standardisierbar. Diese Eigenschaften stehen im Gegensatz zu der dreidimensionalen Beurteilung und anschließenden Bewertung des Knochendefekts am gesamten Glenoid in vier Parametern mit vier Graduierungs- oder Kategorisierungsmöglichkeiten.

Die genannten Eigenschaften der Klassifikation von Habermeyer et al. spiegeln sich in einer sehr hohen Übereinstimmung bei Bestimmung der Interobserver Reliabilität wider. Hier ist zu beachten, dass die Interobserver Reliabilität von Habermeyer et al. durch Vergleich lediglich zweier Bewerter bemessen wurde. Die Interobserver Reliabilität des hier untersuchten Klassifikationsmodells ist mit einer ausreichenden Übereinstimmung insgesamt und einer ausreichenden Übereinstimmung in den Einzelparametern „Eccentricity“, „Centricity“ und „Direction of the defect“ und einer moderaten Übereinstimmung in dem Parameter „Major Location“ geringer als die Reliabilität der Klassifikation nach Habermeyer et al. Eine mögliche Begründung hierfür ist, dass die Einteilungskriterien der Klassifikation nach Habermeyer et al. auf radiologisch standardisierbaren, objektiven Definitionen beruhen. Die Einteilungskriterien des hier vorliegenden Klassifikationssystems lassen mehr Spielraum für subjektive Interpretation. Eine Nachdefinierung der Kriterien könnte hier die Reliabilität erhöhen. Dies muss in weiteren Studien geprüft werden.

Die Intraobserver Reliabilität wurde bei Vorstellung des Klassifikationssystems nach Habermeyer et al. nicht bestimmt.

### **3.3.3 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Sirveaux et al.**

Die Reliabilitätsanalyse des Klassifikationssystems nach Sirveaux und Favard durch Kappe et al. zeigte durchschnittlich eine moderate Übereinstimmung bei Untersuchung der Interobserver Reliabilität [94]. Die Interobserver Reliabilität des hier untersuchten Klassifikationssystems zeigte insgesamt eine ausreichende Übereinstimmung und in den Einzelparametern „Eccentricity“, „Centricity“ und „Direction of the defect“ eine ausreichende Übereinstimmung, im Parameter „Major Location“ eine moderate Übereinstimmung. Die Interobserver Reliabilität ist folglich als vergleichbar anzusehen.

Die Intraobserver Reliabilität zeigte bei der Untersuchung durch Kappe et al. im Durchschnitt eine beachtliche Übereinstimmung [94]. Im Vergleich hierzu wurde bei Analyse der Intraobserver Reliabilität des hier untersuchten Klassifikationsmodells insgesamt eine moderate Übereinstimmung, sowie bei der Einzelanalyse der Parameter eine moderate Übereinstimmung in den Parametern „Eccentricity“, „Centricity“ und „Major Location“ und eine ausreichende Übereinstimmung im Parameter „Direction of the defect“ gefunden. Die Intraobserver Reliabilität des Klassifikationssystems nach Sirveaux und Favard ist damit etwas höher als die der hier untersuchten Klassifikation.

### **3.3.3 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Walch et al.**

Das ursprüngliche Klassifikationssystem nach Walch et al. erlaubt die Einteilung der Glenoidmorphologie in fünf Kategorien. Die Hauptkategorien sind Typ A, Typ B und Typ C, die Kategorien Typ A und Typ B können präziser in die Subkategorien Typ A1, Typ A2 und entsprechend Typ B1 und Typ B2 unterteilt werden. Die Kategorien der Klassifikation wurden

deskriptiv definiert und an der Morphologie des Glenoids orientierend gestaltet. Dies unterscheidet die Klassifikation nach Walch et al. vom hier überprüften Klassifikationssystem, da die Defektsituation bei der hier untersuchten Klassifikation wesentlich präziser beschrieben werden kann. Die Bewertung des Glenoids orientiert sich dafür an der Fläche, Tiefe und Ausdehnung in zwei Richtungen des Knochenverlusts. Dadurch entstehen wesentlich mehr mögliche Kombinationstypen, was sich in der Reliabilitätsanalyse widerspiegelt. Das Klassifikationsmodell nach Walch et al. bietet die Möglichkeit, die Hauptkategorien Typ A und Typ B zu graduieren, wodurch die jeweiligen Subkategorien entstehen. Dies hat Auswirkung auf die Reliabilität, weshalb die Reliabilitätsanalyse von Walch et al., welche bei der Vorstellung der Klassifikation veröffentlicht wurde, in Kritik geraten war, da hierfür die vereinfachte Einteilung von Glenoiderosionen in die Hauptgruppen der Klassifikation verwendet wurde. Die Interobserver und Intraobserver Reliabilität des Klassifikationsmodells wurde anschließend von unterschiedlichen Autoren in mehreren verschiedenen Studien analysiert. Die Ergebnisse der Reliabilitätsüberprüfung dieser Klassifikation sind sehr heterogen und abhängig vom jeweiligen Studiendesign.

Die Interobserver Reliabilität der Klassifikation nach Walch et al. wurde in verschiedenen Studien überprüft. In diesen Validierungsstudien wurden ausreichende bis moderate Übereinstimmungen nach Landis und Koch nachgewiesen, wenn das Klassifikationssystem in der ursprünglichen Version angewandt wurde. Die Interobserver Reliabilität des hier untersuchten dreidimensionalen Klassifikationssystems war bei Untersuchung des gesamten Klassifikationssystems ausreichend und in den einzelnen Parametern „Eccentricity“, „Centricity“ und „Direction of the defect“ ausreichend und im Parameter „Major Location“ moderat. Folglich lässt sich sagen, dass die Klassifikationsmodelle in diesen Studien ein ähnliches Verhalten bei Untersuchung der Interobserver Reliabilität gezeigt haben.

Walch et al. und Kidder et al. überprüften das Klassifikationsmodell nach Walch et al. in einer vereinfachten Version. Dabei wurde auf die präzise Klassifizierung der Defektsituation in die Subtypen des Klassifikationssystems verzichtet. Hier zeigte sich eine beachtliche, beziehungsweise moderate Übereinstimmung bei Untersuchung der Interobserver Reliabilität. Auch das untersuchte Klassifikationsmodell wurde in einer vereinfachten Form untersucht. Hierfür wurden in den zwei graduierbaren Parametern „Eccentricity“ und „Centricity“ Graduierungsstufen zusammengefasst. Insgesamt wurden so zwei verschiedene Versionen gebildet, deren Reliabilität untersucht wurde. Hier zeigte sich für das dreistufige und das zweistufige modifizierte Klassifikationssystem für die Interobserver Reliabilität insgesamt eine ausreichende Übereinstimmung für die Parameter in Kombination und eine ebenfalls eine ausreichende Übereinstimmung für die Einzelanalyse der beiden Parameter „Eccentricity“ und „Centricity“. Die Interobserver Reliabilität des vereinfachten Klassifikationsmodells nach Walch ist folglich etwas höher als die der hier untersuchten Klassifikation.

Die Intraobserver Reliabilität der Klassifikation nach Walch et al. wurde auch in verschiedenen Reliabilitätsstudien analysiert. Die Untersuchungsergebnisse waren hier sehr heterogen. Die

Reliabilität variierte von ausreichenden bis exzellenten Übereinstimmungen. Die Intraobserver Reliabilitätsanalyse des hier untersuchten Klassifikationssystems zeigte insgesamt eine moderate Übereinstimmung, in den einzelnen Parametern „Eccentricity“, „Centricity“ und „Major Location“ eine moderate Übereinstimmung, im Parameter „Direction of the Defect“ wurde eine ausreichende Übereinstimmung festgestellt. Beim Vergleich der Reliabilitätsstudien der Walch-Klassifikation zum hier untersuchten Klassifikationssystem ist festzustellen, dass die Intraobserver Reliabilität der hier untersuchten Klassifikation innerhalb der Streubreite der Ergebnisse zahlreicher Reliabilitätsprüfungen des Klassifikationssystems nach Walch et al. liegt.

Walch et al. und Kidder et al. untersuchten die Walch-Klassifikation in einer vereinfachten Version mit Wertung lediglich der Einteilung der Defektsituationen in die Hauptgruppen des Klassifikationsmodells. Hier wurde für die Intraobserver Reliabilität von einer beachtlichen beziehungsweise exzellenten Übereinstimmung berichtet. In den modifizierten Versionen mit Zusammenführung der Einteilungsgrade in den Parametern „Eccentricity“ und „Centricity“ zeigte das hier untersuchte Klassifikationssystem bei Untersuchung des gesamten Systems und auch bei Analyse der Einzelparameter eine moderate Übereinstimmung.

### **3.3.4 Vergleich mit dem Klassifikationssystem nach Bercik et al.**

Das Klassifikationsmodell nach Walch et al. wurde überarbeitet und 2016 von Bercik et al. als die sogenannte modifizierte Walch-Klassifikation veröffentlicht. Die Modifikationen beinhalteten unter anderem die Einführung des Typ B3 und Typ D zum ursprünglichen Klassifikationssystem nach Walch et al. Ferner wurden die Definitionen der Einteilungsmöglichkeiten Typ A2 und Typ C präziser formuliert. Diese modifizierte Walch-Klassifikation wurde aufgrund der suboptimalen Ergebnisse der Reliabilitätsanalysen der ursprünglichen Walch-Klassifikation entwickelt. Das dadurch entstandene Klassifikationsmodell wird weltweit für die Klassifikation und Deskription von Glenoiddefekten verwendet.

Die Interobserver Reliabilität des modifizierten Klassifikationsmodells nach Bercik et al. wurde in mehreren Studien analysiert, welche heterogene Ergebnisse präsentierten. Es konnten geringe bis beachtliche Übereinstimmung nachgewiesen werden, wobei die Ergebnisse der Reliabilitätsuntersuchungen stark zwischen den Studien variierte. Das hier untersuchte Klassifikationssystem zeigt für die Interobserver Reliabilität für die Auswertung der gesamten Klassifikation insgesamt eine ausreichende Übereinstimmung, die Einzelanalyse der Parameter „Eccentricity“, „Centricity“ und „Direction of the defect“ zeigt eine ausreichende Übereinstimmung, der Parameter „Major Location“ eine moderate Übereinstimmung. Dies ist in der Streubreite der Ergebnisse der verschiedenen Reliabilitätsanalyse der modifizierten Walch-Klassifikation nach Bercik et al. enthalten.

Die Intraobserver Reliabilität der Walch-Klassifikation mit den Modifikationen nach Bercik et al. wurde ebenfalls in verschiedenen Studien geprüft. Es konnten moderate bis exzellente Übereinstimmungen gezeigt werden. Das hier untersuchte Klassifikationssystem wurde auch auf

die Intraobserver Reliabilität hin untersucht. Hier konnte insgesamt eine moderate Übereinstimmung festgestellt werden. Eine moderate Übereinstimmung konnte auch in der Einzelanalyse der Parameter „Eccentricity“, „Centricity“ und Major Location“ als auch eine ausreichende Übereinstimmung für den Parameter „Direction of the defect“ nachgewiesen werden. Die Intraobserver Reliabilität des hier untersuchten Klassifikationssystems ist folglich etwas geringer als die der Klassifikation nach Bercik et al., aber auch hier in der Streubreite der Ergebnisse verschiedener Reliabilitätsstudien zur Klassifikation nach Bercik et al. enthalten.

### **3.4 Konklusion**

Der Vergleich der Ergebnisse der Reliabilitätsuntersuchung des hier untersuchten Klassifikationssystems mit verschiedenen Klassifikationen für Knochendefekte am Glenoid aus der Literatur zeigte, dass die Interobserver und Intraobserver Reliabilität dieser Klassifikation durchaus vergleichbar ist. Sowohl höhere als auch niedrigere Reliabilitäten wurden für ähnliche Klassifikationen, welche im klinischen Alltag Anwendung finden, festgestellt.

Die einzelnen Parameter des untersuchten Klassifikationssystems sind in Hinsicht ihrer Reliabilität unter sich vergleichbar. Eine Modifikation der Klassifikation mit Verringerung der Einteilungsgrade zeigte keinen signifikanten Effekt auf die Reliabilität.

Das Alleinstellungsmerkmal dieser Klassifikation ist die Anwendbarkeit unabhängig der Ätiologie des Defekts, weshalb sowohl native Defekte als auch iatrogene Knochenverluste im Rahmen von Revisionen erfasst werden können. Dieser Aspekt ist bedeutend für die Anwendbarkeit im klinischen Alltag.

Die meisten bereits bestehenden Klassifikationen für knöcherne Defektsituationen am Glenoid ermöglichen lediglich eine ungenaue Einordnung des Knochendefekts in fest vordefinierte Typen. Beispielsweise bietet die Klassifikation von Walch et al. in ihrer ursprünglichen Variante fünf Einteilungsmöglichkeiten. Die im klinischen Alltag häufig verwendete modifizierte Walch-Klassifikation wurde nach Bercik et al. erweitert und kann sieben verschiedene Defektsituationen charakterisieren. Die Erfahrung aus dem klinischen Alltag zeigt allerdings, dass eine Einteilung von knochendefizienten Glenoiden in feste Typen oftmals der anatomischen Situation nicht in adäquatem Maße nachkommt und zahlreiche Borderline-Fälle aus dem klinischen Alltag nicht abgebildet werden. Glenoiddefekte können individuell große morphologische Unterschiede aufweisen und eine Einteilung in wenige vordefinierte Typen vor dem Hintergrund vieler verschiedener Therapieoptionen ist nicht ausreichend. Dies stellt einen wesentlichen Ansatzpunkt des hier untersuchten Klassifikationssystems dar. Glenoiddefekte können morphologisch qualitativ in ein dreidimensionales Klassifikationsmodell eingeordnet und durch zahlreiche Einteilungsmöglichkeiten präzise beschrieben werden. Die multiplen Einteilungsmöglichkeiten könnten negative Auswirkung auf die Reliabilität haben, was an den ordinalskalierten Parametern durch eine Modifizierung des Klassifikationssystems untersucht wurde. Hier zeigte sich eine lediglich geringfügige Verbesserung der Reliabilität bei Verringerung der möglichen

Einteilungsgrade. Das Angebot multipler Einteilungsmöglichkeiten scheint somit nur geringen Einfluss auf die Reliabilität der Klassifikation zu haben. Dies steht im Gegensatz zur Klassifikation nach Walch et al., welche bei Reliabilitätsprüfung der vereinfachten „Regroup-Klassifikation“ wesentlich bessere Reliabilitätsergebnisse zeigte.

Ein Ansatzpunkt für die Verbesserung der Interobserver und Intraobserver Reliabilität des hier untersuchten Klassifikationsmodells ist nun die härtere Definition der Einteilungskriterien in die Grade/Ausrichtungen bei den jeweiligen Parametern. Dies zeigte bei der Modifikation der ursprünglichen Klassifikation nach Walch et al. durch Bercik et al. eine wesentliche Optimierung der Reliabilität im Vergleich zur ursprünglichen Klassifikation nach Walch et al. Ob eine Nachschärfung der Einteilungskriterien eine signifikante Verbesserung der Reliabilitätsanalyse zeigt, bleibt zu untersuchen.

Abschließend lässt sich sagen, dass die geringfügig niedrigere Reliabilität den wesentlichen positiven Merkmalen des Klassifikationssystems, wie der Anwendbarkeit unabhängig der Ätiologie, der Möglichkeit einer präzisen Beschreibung der Defektmorphologie und der möglichen Empfehlung eines geeigneten Therapieverfahrens, gegenüberstehen. Bei einer Modifikation des Klassifikationssystems mit einer härteren Definition der Einteilungskriterien und damit womöglich besseren Reliabilitätsergebnissen, könnte diese Klassifikation die bisherigen Klassifikationsmodelle im klinischen Alltag ablösen.

Eine Limitation dieser Studie ist die Durchführung der Untersuchung der Intraobserver Reliabilität anhand der Datensätze lediglich zweier Beobachter.

Eine weitere Limitation besteht bei dieser Reliabilitätsanalyse in der Auswertung der Modifikationen des Klassifikationsmodells. Hier wurde eine retrospektive Veränderung des Datensatzes durchgeführt. Ob die prospektive Anwendung der modifizierten Klassifikationen abweichende Daten zur Reliabilität liefern würde, müsste gegebenenfalls in nachfolgenden Studien untersucht werden.

#### **4. Zusammenfassung der Studie**

Knöcherne Glenoiddefekte spielen bei der Implantation von inversen Schulterprothesen eine immer größer werdende Rolle. Es wurden diverse Klassifikationssysteme für Knochenverluste am Glenoid publiziert, welche sich in ihrer Anwendbarkeit, der statistischen Reliabilität und der klinischen Konsequenz unterscheiden.

Ziel dieser Studie war es, die statistische Interobserver und Intraobserver Reliabilität eines Klassifikationssystems zu bestimmen, das unabhängig von der vorliegenden Ätiologie einen knöchernen Defekt am Glenoid präzise beschreiben kann, wobei entsprechend der individuellen Klassifizierung Therapieempfehlungen für die Versorgung des Glenoiddefekts formuliert werden

können. Die Evaluation von Glenoiddefekten erfolgt bei dieser Klassifikation durch die Einordnung der Defektsituation in die vier Parameter „Centricity“, „Eccentricity“, „Major Location“ und „Direction of the defect“. Hierbei handelt es sich um jeweils zwei ordinalskalierte und zwei nominalskalierte Parameter [1].

Für die Reliabilitätsanalyse wurden 86 Computertomographien von 79 Patienten, welche im Rahmen einer Implantation einer inversen totalen Schulterprothese einen augmentierungsbedürftigen Glenoiddefekt hatten, von vier Observern unterschiedlichen Erfahrungsstands entsprechend des Klassifikationssystems in zwei Bewertungsrunden klassifiziert. Das Patientenkollektiv setzte sich zusammen aus Patienten des Zentrums für Orthopädie, Unfallchirurgie und Sportmedizin der MünchenKlinik Bogenhausen und des Greenslopes Private and Mater Public Hospital in Brisbane, Australien. Die Bewertungsrunden hatten einen zeitlichen Abstand von mindestens 6 Wochen.

Anschließend wurde eine String Variable erstellt, um die statistische Reliabilität der gesamten Klassifikation zu erfassen. Hierbei wurde ein mathematisches Konstrukt erstellt, welches die nominalskalierten Parameter „Major Location“ und „Direction of the defect“ in eine Ordinalskalierung umformuliert. Somit ist die Klassifikation einer Analyse durch Auswertung des gewichteten Cohens Kappa zugänglich.

Zusätzlich zur Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa der gesamten Klassifikation wurde die Reliabilität der einzelnen Parameter untersucht. Hierbei wurde entsprechend der Skalierungseigenschaften der jeweiligen Parameter das gewichtete oder einfache Cohens Kappa bestimmt. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgte dem wissenschaftlichen Konsens entsprechend den Vorgaben nach Landis und Koch [96].

Anschließend wurden noch mögliche Modifikationen der Klassifikation auf eine Veränderung der statistischen Ergebnisse hin untersucht. So wurden Abstufungen der ordinalskalierten Parameter „Centricity“ und „Eccentricity“, welche mit mehreren Graduierungsstufen eine detaillierte Erfassung des Glenoiddefekts ermöglichen, auf drei Einteilungsstufen beziehungsweise zwei Einteilungsmöglichkeiten reduziert.

Die Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse zeigten eine ausreichende Übereinstimmung für die Überprüfung der Interobserver Reliabilität und eine moderate Übereinstimmung für die Untersuchung der Intraobserver Reliabilität bei Auswertung des kompletten Klassifikationssystems mit einem gewichteten Cohens Kappa.

Bei der Analyse der Einzelergebnisse konnte für den Parameter „Eccentricity“, „Centricity“ und „Direction of the defect“ eine ausreichende Übereinstimmung und für „Major Location“ eine moderate Übereinstimmung für die Untersuchung der Interobserver Reliabilität bestimmt werden. Die Überprüfung der Intraobserver Reliabilität konnte für die Parameter „Eccentricity“, „Centricity“ und „Major Location“ eine moderate Übereinstimmung erfasst werden, für den Parameter „Direction of the defect“ eine ausreichende Übereinstimmung.

Die Modifizierung des Klassifikationssystems mit einer Reduktion der anwendbaren Graduierungsstufen in den Parametern „Eccentricity“ und „Centricity“ zeigte für beide

Modifikationen nur einen geringen Effekt auf die Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse. Eine Verbesserung der Interobserver und Intraobserver Reliabilität bei Auswertung aller Parameter in ihrer Kombination konnte nicht festgestellt werden.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Reliabilitätsanalyse des untersuchten Klassifikationssystems mit den Reliabilitätsuntersuchungen publizierter Klassifikationen anderer Autoren wurde durchgeführt. Hier offenbarte sich, dass die Ergebnisse des hier analysierten Klassifikationssystems innerhalb der Streubreite von Reliabilitätsanalysen anderer Klassifikationen, welche im klinischen Alltag Anwendung finden, liegen. Dieses Klassifikationssystem weist in seinem Aufbau gewisse Besonderheiten und Alleinstellungsmerkmale auf, welche bereits hervorgehoben wurden. Durch eine Optimierung der Klassifikation auf Grundlage dieser Reliabilitätsanalyse könnte eine weitere Verbesserung der Reliabilität ermöglicht werden, was in nachfolgenden Studien zu untersuchen ist.

## 5. Literaturverzeichnis

1. Gupta, A., et al., *Management of glenoid bone defects with reverse shoulder arthroplasty-surgical technique and clinical outcomes*. J Shoulder Elbow Surg, 2018. **27**(5): p. 853-862.
2. Sirveaux, F., et al., *Grammont inverted total shoulder arthroplasty in the treatment of glenohumeral osteoarthritis with massive rupture of the cuff. Results of a multicentre study of 80 shoulders*. J Bone Joint Surg Br, 2004. **86**(3): p. 388-95.
3. Bercik, M.J., et al., *A modification to the Walch classification of the glenoid in primary glenohumeral osteoarthritis using three-dimensional imaging*. J Shoulder Elbow Surg, 2016. **25**(10): p. 1601-6.
4. Wurzinger, L.J., *Bewegungssystem - Obere Extremität, in Duale Reihe Anatomie, G. Aumüller*. 2007, Thieme: Stuttgart.
5. Tischer T, A.H., Müller-Gerbl M et al., *Arthroskopisch relevante Anatomie der Schulterinstabilität*. Arthroscopie, 2004. **17**:133-138.
6. Walch, G., et al., *Morphologic study of the glenoid in primary glenohumeral osteoarthritis*. J Arthroplasty, 1999. **14**(6): p. 756-60.
7. Frankle, M.A., et al., *Glenoid morphology in reverse shoulder arthroplasty: classification and surgical implications*. J Shoulder Elbow Surg, 2009. **18**(6): p. 874-85.
8. Antuna, S.A., et al., *Glenoid revision surgery after total shoulder arthroplasty*. J Shoulder Elbow Surg, 2001. **10**(3): p. 217-24.
9. Williams, G.R., Jr. and J.P. Iannotti, *Options for glenoid bone loss: composites of prosthetics and biologics*. J Shoulder Elbow Surg, 2007. **16**(5 Suppl): p. S267-72.
10. Habermeyer, P., et al., *Three-dimensional glenoid deformity in patients with osteoarthritis: a radiographic analysis*. J Bone Joint Surg Am, 2006. **88**(6): p. 1301-7.
11. Seebauer, L. and A.L. Ekelund, *Management of glenoid bone loss in primary and revision reverse total shoulder arthroplasty*. Obere Extremität, 2017. **12**(1): p. 6-15.
12. Seebauer, L. and M. Goebel, *Management of glenoid defects in reversed shoulder arthroplasty, in SECEC-congress 2005*. 2005: Rome, Italy.
13. Levigne, C., et al., *Scapular notching in reverse shoulder arthroplasty*. J Shoulder Elbow Surg, 2008. **17**(6): p. 925-35.
14. Gohlke, F., *[Biomechanics of the shoulder]*. Orthopade, 2000. **29**(10): p. 834-44.
15. Reuther, D.F., *Anatomie, Biomechanik und Klassifikation der Schultergelenkverletzung, in Trauma und Berufskrankheit*  
*Ausgabe Sonderheft 3/2006*. 2006, Springer Verlag.

16. Halder, A.M., E. Itoi, and K.N. An, *Anatomy and biomechanics of the shoulder*. Orthop Clin North Am, 2000. **31**(2): p. 159-76.
17. Lugo, R., P. Kung, and C.B. Ma, *Shoulder biomechanics*. Eur J Radiol, 2008. **68**(1): p. 16-24.
18. Saha, A.K., *Dynamic stability of the glenohumeral joint*. Acta Orthop Scand, 1971. **42**(6): p. 491-505.
19. Howell, S.M. and B.J. Galinat, *The glenoid-labral socket. A constrained articular surface*. Clin Orthop Relat Res, 1989(243): p. 122-5.
20. Cuéllar, R., M.A. Ruiz-Ibán, and A. Cuéllar, *Anatomy and Biomechanics of the Unstable Shoulder*. Open Orthop J, 2017. **11**: p. 919-933.
21. Karduna, A.R., et al., *Kinematics of the glenohumeral joint: influences of muscle forces, ligamentous constraints, and articular geometry*. J Orthop Res, 1996. **14**(6): p. 986-93.
22. Veeger, H.E. and F.C. van der Helm, *Shoulder function: the perfect compromise between mobility and stability*. J Biomech, 2007. **40**(10): p. 2119-29.
23. Aumüller G, A.G., Conrad A, Engele J, Kirsch J, Maio G, Mayerhofer A, Mense S, Reißig D et al., *Duale Reihe Anatomie*. Vol. Hrsg. 4, aktualisierte Auflage. 2017, Stuttgart: Thieme.
24. Di Giacomo, G., L. Piscitelli, and M. Pugliese, *The role of bone in glenohumeral stability*. EFORT Open Rev, 2018. **3**(12): p. 632-640.
25. Lippert, W.C., et al., *The intrarater and interrater reliability of glenoid version and glenohumeral subluxation measurements in neonatal brachial plexus palsy*. J Pediatr Orthop, 2012. **32**(4): p. 378-84.
26. Weishaupt, D., et al., *Posterior glenoid rim deficiency in recurrent (atraumatic) posterior shoulder instability*. Skeletal Radiol, 2000. **29**(4): p. 204-10.
27. Edelson, J.G., *Localized glenoid hypoplasia. An anatomic variation of possible clinical significance*. Clin Orthop Relat Res, 1995(321): p. 189-95.
28. Inui, H., et al., *Glenoid shape in atraumatic posterior instability of the shoulder*. Clin Orthop Relat Res, 2002(403): p. 87-92.
29. Itoi, E., et al., *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): p. 35-46.
30. Burkhart, S.S., et al., *Quantifying glenoid bone loss arthroscopically in shoulder instability*. Arthroscopy, 2002. **18**(5): p. 488-91.
31. Moroder, P., et al., *Effect of glenoid concavity loss on shoulder stability- a case report in a professional wrestler*. BMC Musculoskelet Disord, 2016. **17**(1): p. 357.
32. Peltz, C.D., et al., *Differences in glenohumeral joint morphology between patients with anterior shoulder instability and healthy, uninjured volunteers*. J Shoulder Elbow Surg, 2015. **24**(7): p. 1014-20.
33. Maalouly, J., et al., *Is there an association between glenoid parameters and rotator cuff tears and the influence of gender: A retrospective study on a Middle Eastern population*. Int J Surg Case Rep, 2020. **68**: p. 74-82.
34. Walker, M., et al., *How reverse shoulder arthroplasty works*. Clin Orthop Relat Res, 2011. **469**(9): p. 2440-51.
35. Lippitt, S.B., et al., *Glenohumeral stability from concavity-compression: A quantitative analysis*. J Shoulder Elbow Surg, 1993. **2**(1): p. 27-35.
36. Neer, C.S., 2nd, E.V. Craig, and H. Fukuda, *Cuff-tear arthropathy*. J Bone Joint Surg Am, 1983. **65**(9): p. 1232-44.
37. Patzer, T., *[Reversed total shoulder arthroplasty in rotator cuff defect arthropathy]*. Orthopade, 2018. **47**(5): p. 390-397.
38. Rugg, C.M., M.J. Coughlan, and D.A. Lansdown, *Reverse Total Shoulder Arthroplasty: Biomechanics and Indications*. Curr Rev Musculoskelet Med, 2019. **12**(4): p. 542-553.
39. Seebauer, L., W. Walter, and W. Keyl, *Reverse total shoulder arthroplasty for the treatment of defect arthropathy*. Oper Orthop Traumatol, 2005. **17**(1): p. 1-24.

40. Seebauer, L. and M. Goebel, [*Treatment strategies for chronic glenoid defects following anterior and posterior shoulder dislocation*]. Oper Orthop Traumatol, 2008. **20**(6): p. 500-10.
41. Boileau, P., et al., *Grammont reverse prosthesis: design, rationale, and biomechanics*. J Shoulder Elbow Surg, 2005. **14**(1 Suppl S): p. 147S-161S.
42. Holschen, M.A., J. D., *Inverse Schulterprothese - Indikation, Operationstechnik und Ergebnisse*. Arthroskopie, 2014.
43. Friedman, R.J., D.A. Barcel, and J.K. Eichinger, *Scapular Notching in Reverse Total Shoulder Arthroplasty*. J Am Acad Orthop Surg, 2019. **27**(6): p. 200-209.
44. Malhas, A., et al., *Glenoid bone loss in primary and revision shoulder arthroplasty*. Shoulder Elbow, 2016. **8**(4): p. 229-40.
45. Gohlke, F. and B. Werner, [*Humeral and glenoid bone loss in shoulder arthroplasty : Classification and treatment principles*]. Orthopade, 2017. **46**(12): p. 1008-1014.
46. Lopiz, Y., et al., *Midterm outcomes of bone grafting in glenoid defects treated with reverse shoulder arthroplasty*. J Shoulder Elbow Surg, 2017. **26**(9): p. 1581-1588.
47. Walch, G., et al., *The Characteristics of the Favard E4 Glenoid Morphology in Cuff Tear Arthropathy: A CT Study*. J Clin Med, 2020. **9**(11).
48. Walker, K.E., et al., *Progression of Glenoid Morphology in Glenohumeral Osteoarthritis*. J Bone Joint Surg Am, 2018. **100**(1): p. 49-56.
49. Donohue, K.W., et al., *The Association Between Rotator Cuff Muscle Fatty Infiltration and Glenoid Morphology in Glenohumeral Osteoarthritis*. J Bone Joint Surg Am, 2018. **100**(5): p. 381-387.
50. Ozel, O., et al., *The implications of the glenoid angles and rotator cuff status in patients with osteoarthritis undergoing shoulder arthroplasty*. BMC Musculoskelet Disord, 2020. **21**(1): p. 668.
51. Weber M, H.N., *Knochenverluste in der Schulterendoprothetik, was tun?* OUP 2017, 2017.
52. Italia, K.R., et al., *Computed tomographic evaluation of glenoid joint line restoration with glenoid bone grafting and reverse shoulder arthroplasty in patients with significant glenoid bone loss*. J Shoulder Elbow Surg, 2021. **30**(3): p. 599-608.
53. Voos JE, P.A., Mattern CJ, Cordasco FA, Allen AA, Warren RF, *Outcomes of combined Bankart and Hill-Sachs shoulder instability repairs*. J Shoulder Elbow Surg, 2010: p. 87-97.
54. Bigliani, L.U., et al., *Tensile properties of the inferior glenohumeral ligament*. J Orthop Res, 1992. **10**(2): p. 187-97.
55. Burkhart, S.S., C.D. Morgan, and W.B. Kibler, *The disabled throwing shoulder: spectrum of pathology Part III: The SICK scapula, scapular dyskinesis, the kinetic chain, and rehabilitation*. Arthroscopy, 2003. **19**(6): p. 641-61.
56. Lanzetti, R.M. and M. Spoliti, *A new geometric model to quantify the area of glenoid bone defect and medialisation of the native joint line in glenohumeral arthritis*. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2019. **29**(6): p. 1211-1216.
57. Codsì, M.J. and J.P. Iannotti, *The effect of screw position on the initial fixation of a reverse total shoulder prosthesis in a glenoid with a cavitory bone defect*. J Shoulder Elbow Surg, 2008. **17**(3): p. 479-86.
58. Formaini, N.T., et al., *The effect of glenoid bone loss on reverse shoulder arthroplasty baseplate fixation*. J Shoulder Elbow Surg, 2015. **24**(11): p. e312-9.
59. Ernstbrunner, L., et al., *Glenoid bone grafting in primary reverse total shoulder arthroplasty*. J Shoulder Elbow Surg, 2017. **26**(8): p. 1441-1447.
60. Klein, S.M., et al., *Effects of acquired glenoid bone defects on surgical technique and clinical outcomes in reverse shoulder arthroplasty*. J Bone Joint Surg Am, 2010. **92**(5): p. 1144-54.

61. Paul, R.A., et al., *Glenoid bone grafting in primary reverse total shoulder arthroplasty: a systematic review*. J Shoulder Elbow Surg, 2019. **28**(12): p. 2447-2456.
62. Shapiro, T.A., et al., *Biomechanical effects of glenoid retroversion in total shoulder arthroplasty*. J Shoulder Elbow Surg, 2007. **16**(3 Suppl): p. S90-5.
63. Plessers, K., et al., *Automated quantification of glenoid bone defects using 3-dimensional measurements*. J Shoulder Elbow Surg, 2020. **29**(5): p. 1050-1058.
64. Scalise, J.J., et al., *The influence of three-dimensional computed tomography images of the shoulder in preoperative planning for total shoulder arthroplasty*. J Bone Joint Surg Am, 2008. **90**(11): p. 2438-45.
65. DEVECİ, A.D., YAHYA CAN; CILIZ, DENİZ SÖZMEN; ÖZDEMİR, GÜZELALİ; KILIÇ, ENVER; CEYHAN, ERMAN; KULAKOĞLU, BURAK; and TURAN, SUALP *Is the version angle of the glenoid different in bone and cartilage? An MRI study*. Turkish Journal of Medical Sciences, 2019. **Vol. 49: No. 5, Article 9**.
66. Smith, M.J., C.M. Loftis, and N.W. Skelley, *Eccentric Reaming for B2 Glenoids: History, Preoperative Planning, Surgical Technique, and Outcome*. J Shoulder Elb Arthroplast, 2019. **3**.
67. Mehta, N. and G.P. Nicholson, *Management of Glenoid Bone Loss in Primary Reverse Total Shoulder Arthroplasty*. Curr Rev Musculoskelet Med, 2023. **16**(8): p. 358-370.
68. Holt, A.M. and T.W. Throckmorton, *Reverse Shoulder Arthroplasty for B2 Glenoid Deformity*. J Shoulder Elb Arthroplast, 2019. **3**: p. 2471549219897661.
69. Gilot, G.J., *Addressing glenoid erosion in reverse total shoulder arthroplasty*. Bull Hosp Jt Dis (2013), 2013. **71 Suppl 2**: p. S51-3.
70. Sears, B.W., et al., *Glenoid bone loss in primary total shoulder arthroplasty: evaluation and management*. J Am Acad Orthop Surg, 2012. **20**(9): p. 604-13.
71. Scalise, J.J. and J.P. Iannotti, *Bone grafting severe glenoid defects in revision shoulder arthroplasty*. Clin Orthop Relat Res, 2008. **466**(1): p. 139-45.
72. Jones, R.B., T.W. Wright, and J.D. Zuckerman, *Reverse total shoulder arthroplasty with structural bone grafting of large glenoid defects*. J Shoulder Elbow Surg, 2016. **25**(9): p. 1425-32.
73. Boileau, P., et al., *Bony increased-offset reversed shoulder arthroplasty: minimizing scapular impingement while maximizing glenoid fixation*. Clin Orthop Relat Res, 2011. **469**(9): p. 2558-67.
74. Neyton, L., et al., *Glenoid bone grafting with a reverse design prosthesis*. J Shoulder Elbow Surg, 2007. **16**(3 Suppl): p. S71-8.
75. Boileau, P., et al., *Angled BIO-RSA (bony-increased offset-reverse shoulder arthroplasty): a solution for the management of glenoid bone loss and erosion*. J Shoulder Elbow Surg, 2017. **26**(12): p. 2133-2142.
76. Page RS, H.J., Trail I, *Impaction bone grafting in revision shoulder arthroplasty: classification, technical description and early results*. Shoulder Elbow 2009. **1: 81–8**.
77. Michael, R.J., et al., *Managing Glenoid Bone Deficiency-The Augment Experience in Anatomic and Reverse Shoulder Arthroplasty*. Am J Orthop (Belle Mead NJ), 2018. **47**(3).
78. Virani, S., et al., *Management of glenoid bone loss with impaction and structural bone grafting in reverse shoulder arthroplasty*. Musculoskelet Surg, 2023. **107**(2): p. 239-252.
79. Tashjian, R.Z., E. Granger, and P.N. Chalmers, *Structural glenoid grafting during primary reverse total shoulder arthroplasty using humeral head autograft*. J Shoulder Elbow Surg, 2018. **27**(1): p. e1-e8.
80. Kirsch, J.M., et al., *Early clinical and radiographic outcomes of an augmented baseplate in reverse shoulder arthroplasty for glenohumeral arthritis with glenoid deformity*. J Shoulder Elbow Surg, 2021. **30**(7S): p. S123-S130.

81. Burton, R., et al., *A review of custom implants for glenoid bone deficiency in reverse shoulder arthroplasty*. J Orthop, 2023. **36**: p. 65-71.
82. Seebauer, L., [*Bony glenoid reconstruction in revision arthroplasty*]. Orthopädie (Heidelb), 2023. **52**(2): p. 109-121.
83. Vo, K.V., et al., *Classifications in Brief: Walch Classification of Primary Glenohumeral Osteoarthritis*. Clin Orthop Relat Res, 2017. **475**(9): p. 2335-2340.
84. Kidder JF, R.D., DeFranco MJ, Pons-Villanueva J, Dynamidis S, *Revisited: Walch classification of the glenoid in glenohumeral osteoarthritis*. Shoulder Elbow, 2012. **2012**;4:11–15.
85. Scalise, J.J., et al., *Inter-rater reliability of an arthritic glenoid morphology classification system*. J Shoulder Elbow Surg, 2008. **17**(4): p. 575-7.
86. Nowak, D.D., et al., *Interobserver and intraobserver reliability of the Walch classification in primary glenohumeral arthritis*. J Shoulder Elbow Surg, 2010. **19**(2): p. 180-3.
87. Lowe, J.T., et al., *Magnetic resonance imaging is comparable to computed tomography for determination of glenoid version but does not accurately distinguish between Walch B2 and C classifications*. J Shoulder Elbow Surg, 2017. **26**(4): p. 669-673.
88. Kwon, Y.W., et al., *Use of three-dimensional computed tomography for the analysis of the glenoid anatomy*. J Shoulder Elbow Surg, 2005. **14**(1): p. 85-90.
89. Budge, M.D., et al., *Comparison of standard two-dimensional and three-dimensional corrected glenoid version measurements*. J Shoulder Elbow Surg, 2011. **20**(4): p. 577-83.
90. Ricchetti, E.T., et al., *Reliability of the modified Walch classification for advanced glenohumeral osteoarthritis using 3-dimensional computed tomography analysis: a study of the ASES B2 Glenoid Multicenter Research Group*. J Shoulder Elbow Surg, 2021. **30**(4): p. 736-746.
91. Shukla, D.R., et al., *Intraobserver and interobserver reliability of the modified Walch classification using radiographs and computed tomography*. J Shoulder Elbow Surg, 2019. **28**(4): p. 625-630.
92. Pajolli, L.J.R., et al., *Intra and Interobserver Agreement Regarding the Walch Classification System for Shoulder Joint Arthritis*. Rev Bras Ortop (Sao Paulo), 2019. **54**(6): p. 644-648.
93. Boileau, P., et al., *The reverse shoulder arthroplasty angle: a new measurement of glenoid inclination for reverse shoulder arthroplasty*. J Shoulder Elbow Surg, 2019. **28**(7): p. 1281-1290.
94. Kappe, T., et al., *Reliability of radiologic classification for cuff tear arthropathy*. J Shoulder Elbow Surg, 2011. **20**(4): p. 543-7.
95. Landis, J.R. and G.G. Koch, *An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers*. Biometrics, 1977. **33**(2): p. 363-74.
96. Landis, J.R. and G.G. Koch, *The measurement of observer agreement for categorical data*. Biometrics, 1977. **33**(1): p. 159-74.
97. Walch, G., et al., *Primary glenohumeral osteoarthritis: clinical and radiographic classification. The Aequalis Group*. Acta Orthop Belg, 1998. **64 Suppl 2**: p. 46-52.

## 6. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Schultergelenke [4].....	5
Abbildung 2: Schematische Aufsicht des rechten Glenoids[4].....	6
Abbildung 3: Knöcherner und ligamentäre Anatomie der Schulter [4].....	7
Abbildung 4: Bandapparat des Schultergelenks [4].....	10

Abbildung 5: Aufsicht auf das rechte Glenoid nach Entfernung des Humeruskopfes [5].....	11
Abbildung 6: Die Rotatorenmanschette [4] .....	12
Abbildung 7: Bewegungsumfang des Glenohumeralgelenks und Gesamtbeweglichkeit der Schulter [4] .....	14
Abbildung 8: Erstes Modell der inversen Prothese nach Grammont 1985 mit lediglich zwei Komponenten [41] .....	17
Abbildung 9: Biomechanik der inversen Schulterprothese: Erhöhung der Vorspannung und damit Verbesserung der Abduktionsfähigkeit durch Versatz des Drehzentrums nach kaudal und medial [42] .....	18
Abbildung 10: Finales Design einer inversen Prothese (Delta III) nach dem Prinzip von Grammont bestehend aus Metaglène, Glenosphäre, Polyethyleninlay, Epiphyse und Humerusschaft [41].....	19
Abbildung 11: Morphologische Einteilungsmöglichkeiten des Glenoids bei primärer Omarthrose gemäß des Klassifikationssystems nach Walch et al.[6] .....	30
Abbildung 12: Morphologische Einteilungsmöglichkeiten des Glenoids bei primärer Omarthrose gemäß des Klassifikationssystems nach Bercik et al. [3] .....	33
Abbildung 13: Die Einteilungsmöglichkeiten gemäß des Klassifikationssystems nach Sirveaux und Favard [2] .....	35
Abbildung 14: Einteilungsmöglichkeiten für glenoidale Knochendefekte nach Entfernung der Glenoidkomponente gemäß des Klassifikationssystems nach Antuna et al.[8] .....	36
Abbildung 15: Aufbau des physiologischen Glenoids in subchondrale Oberfläche (S), welche sich 5 mm lateral der Korakoidbasis befindet, Glenoidgewölbe (V) und Glenoidrand (R) [9] ...	38
Abbildung 16: Einteilungsmöglichkeiten für Glenoiddefekte gemäß des Klassifikationssystems nach Williams und Iannotti [9].....	38
Abbildung 17: Modifiziertes Klassifikationsmodell nach Williams und Iannotti [9] .....	39
Abbildung 18: Morphologische Einteilungsmöglichkeiten für das Glenoid gemäß des Klassifikationssystems nach Frankle et al.: normales Glenoid (A), posteriore Erosion (B), superiore Erosion (C), globale Erosion (D) und anteriore Erosion (E) [7] .....	40
Abbildung 19: Einteilungsmöglichkeiten der Glenoidinklination gemäß des Klassifikationssystems nach Habermeyer et al.: Typ 0 (A): Korakoidbasislinie und Glenoidlinie verlaufen parallel, Typ 1 (B): Treffpunkt der beiden Linien unterhalb des inferioren Glenoidrands, Typ 2 (C): Treffpunkt der beiden Linien zwischen dem inferioren Glenoidrand und dem Glenoidmittelpunkt, Typ 3 (D): Treffpunkt der beiden Linien oberhalb der Korakoidbasis [10].....	42
Abbildung 20: Centricity mit Graduierung C1-C4 [1].....	44
Abbildung 21: Eccentricity mit Graduierung E1-E4 [1].....	45
Abbildung 22: Einteilungsmöglichkeiten der Parameter "Major Location" und "Direction of the defect" [1] .....	46

## 7. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tabellarische Veranschaulichung des Vorgehens für die Bestimmung der Interobserver Reliabilität .....	51
Tabelle 2: Tabellarische Veranschaulichung des Vorgehens für die Bestimmung der Intraobserver Reliabilität.....	52
Tabelle 3: Ergebnisse der gewichteten Interobserver Reliabilitätsanalyse der String Variablen	53
Tabelle 4: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität der String Variablen berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa .....	55
Tabelle 5: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	56

Tabelle 6: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	58
Tabelle 7: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Major Location" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa .....	60
Tabelle 8: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Direction of the defect" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa .....	62
Tabelle 9: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität der String Variablen berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	63
Tabelle 10: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	63
Tabelle 11: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	64
Tabelle 12: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Major Location" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa .....	65
Tabelle 13: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Direction of the defect" berechnet durch Bestimmung des einfachen Cohens Kappa .....	65
Tabelle 14: Ergebnisse der gewichteten Interobserver Reliabilitätsanalyse der String Variable der dreistufig modifizierten Klassifikation.....	67
Tabelle 15: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität der String Variablen der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa .....	69
Tabelle 16: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	70
Tabelle 17: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	72
Tabelle 18: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität der String Variablen der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa .....	72
Tabelle 19: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	73
Tabelle 20: Einzelergebnisse der Intraobserver des Parameters "Centricity" der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa .....	74
Tabelle 21: Ergebnisse der gewichteten Interobserver Reliabilitätsanalyse der String Variable der zweistufig modifizierten Klassifikation.....	75
Tabelle 22: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität der String Variablen der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa .....	77
Tabelle 23: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	78
Tabelle 24: Einzelergebnisse der Interobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	80
Tabelle 25: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität der String Variablen der dreistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa .....	81
Tabelle 26: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Eccentricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	81
Tabelle 27: Einzelergebnisse der Intraobserver Reliabilität des Parameters "Centricity" der zweistufig modifizierten Klassifikation berechnet durch Bestimmung des gewichteten Cohens Kappa.....	82

## **8. Danksagung**

All den Personen, welche mich bei der Durchführung meiner Studie und der Niederschrift dieser Arbeit unterstützt haben, möchte ich im nachfolgenden Kapitel meinen herzlichsten Dank aussprechen.

Herrn PD Dr. med. Christian Suren und Herrn Dr. med. Ludwig Seebauer möchte ich großen Dank aussprechen für die Möglichkeit, diese Studie im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Sportorthopädie des Klinikums München Rechts der Isar mit dem Zentrum für Orthopädie, Unfallchirurgie und Sportmedizin der MünchenKlinik Bogenhausen durchzuführen.

Besonders hervorzuheben ist hier die herausragende Unterstützung durch meinen Betreuer Herrn PD Dr. med. Christian Suren, wofür ich mich ausdrücklich bedanken möchte. Herzlichen Dank, das werde ich nicht vergessen!

Herrn PD Dr. Benjamin Kleim möchte ich für die zahlreichen Hilfestellungen und die konstruktive Kritik vor allem im Bereich der statistischen Analyse meinen größten Dank aussprechen.

Herrn Prof. Nael Hawi möchte ich für die Mitbetreuung dieser Dissertation als Mentor danken.

Bei Herrn Dr. Sulaiman Alanazi möchte ich mich für die Unterstützung bei der Initiierung und Durchführung dieser Studie bedanken.

Ganz besonders möchte ich auch meiner Familie und meiner Freundin danken, welche mich im Rahmen meines Lebens, meiner medizinischen Ausbildung und damit auch dem Verfassen dieser Arbeit stets unterstützt haben und dies alles erst ermöglicht haben.