

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie,  
Muskuloskelettales Universitätszentrum München (MUM),  
Klinikum der Universität München, LMU München

Direktor: Prof. Dr. med. Boris Holzapfel, PhD  
Geschäftsführender Direktor: Prof. Dr. med. Wolfgang Böcker

## **Outcomedeterminanten operativer Rekonstruktionen proximaler Humerusfrakturen**

Kumulative Habilitationsschrift zur Erlangung der  
Venia Legendi für  
Orthopädie und Unfallchirurgie



Medizinische Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München

vorgelegt von  
Dr. med. Evi Fleischhacker

München 2025

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Einleitung und wissenschaftlicher Hintergrund.....	10
Zielsetzung.....	15
Liste der zur Habilitation beitragenden Publikationen.....	17
Teilprojekte der Habilitation – Ergebnisse, Diskussion und Bedeutung für das Fachgebiet .....	19
PUBLIKATION A .....	19
PUBLIKATION B .....	21
PUBLIKATION C .....	24
PUBLIKATION D .....	27
PUBLIKATION E.....	34
PUBLIKATION F.....	38
PUBLIKATION G .....	41
PUBLIKATION H .....	44
PUBLIKATION I.....	46
PUBLIKATION J .....	49
PUBLIKATION K.....	51
Ausblick.....	53
Literaturverzeichnis.....	54
Abbildungsverzeichnis.....	62
Abkürzungsverzeichnis .....	63
Eidesstattliche Versicherung.....	64
Anhang.....	65
VOLLSTÄNDIGES VERZEICHNIS DER WISSENSCHAFTLICHEN VERÖFFENTLICHUNGEN .....	65

## Zusammenfassung

Die proximale Humerusfraktur ist die dritthäufigste Fraktur bei älteren Menschen und mit Osteoporose assoziiert. [1] Angesichts der steigenden Lebenserwartung und des demografischen Wandels ist in den kommenden Jahrzehnten mit einer deutlichen Zunahme dieser Entität zu rechnen. [2] Während undislozierte Frakturen konservativ mit guten funktionellen Ergebnissen behandelt werden können, sind dislozierte Frakturen eine Indikation für die operative Therapie. [3] Für die offene Reposition und interne Osteosynthese haben sich winkelstabile, anatomisch vorgeformte Platten und Marknägel etabliert. Diese werden von unterschiedlichen Herstellern aus verschiedenen Materialien gefertigt. Während über Jahre Edelstahl den Markt dominierte, wurde es aufgrund seines potenziell allergieauslösenden Nickelgehaltes von Titanlegierungen verdrängt. Titan ist inert, enthält kein Nickel und zeigte auch im Hinblick auf Infektionen Vorteile gegenüber Edelstahl. [4] In den letzten Jahren sind außerdem Plattensysteme aus kohlefaserverstärktem (CFR) Polyetheretherketon (PEEK) erhältlich. [5, 6] Aufgrund der hydrophoben Eigenschaften des PEEKs liegt die Vermutung nahe, dass es zu weniger Verwachsungen des Implantats mit dem umgebenden Weichgewebe führt und so zu einem besseren postoperativen Bewegungsumfang beitragen kann. [7]

Entscheidend für das Ergebnis nach winkelstabiler Plattenosteosynthese des proximalen Humerus ist die anatomische Reposition der Frakturfragmente. [8] Trotz größter Sorgfalt wird diese jedoch nicht immer erreicht oder es kommt aufgrund anderer Faktoren zu einem sekundären Repositionsverlust, sodass Frakturen in Fehlstellungen verheilen. Dies kann weitere Komplikationen wie Pseudarthrosen, Implantatversagen oder eine avaskuläre Humeruskopfnekrose nach sich ziehen. [9-11] Nicht immer führt eine solche Malreposition jedoch zu einem schlechten funktionellen Ergebnis.

Entscheidend für das Gelingen einer Osteosynthese ist außerdem die sichere Verankerung des Osteosynthesematerials im Knochen. Gerade bei Osteoporose kann dies herausfordernd sein. Kanülierte und perforierte Schrauben, die eine Zementaugmentation ermöglichen, zeigten in biomechanischen Studien eine höhere Stabilität des Konstrukts. [12-14] Dabei kann durch die Schraube Knochenzement (Polymethylmethacrylat (PMMA) oder Calciumphosphat) eingespritzt werden, welcher durch die Perforationen an der Spitze austritt und so die Oberfläche der Schraube vergrößert, mit welcher sie im spongösen Knochen verankert. [13, 14]

Ein weiteres Problem nach Osteosynthese proximaler Humerusfrakturen ist das Auftreten einer posttraumatische Schultersteife, deren Pathogenese noch immer nicht geklärt ist. [15] Es ist davon auszugehen, dass sie multifaktoriell bedingt ist und sowohl intra- als auch extraartikuläre Faktoren eine Rolle spielen. [16] Einige Autoren gehen davon aus, dass erhöhte intraartikuläre Zytokin- und Wachstumsfaktorenlevel zur Entstehung dieser Schultersteife beitragen. [17, 18] Andere sehen die Ursache in der Gelenkkapsel bzw. in periartikulären Verwachsungen. [19, 20] Unabhängig von der Behandlung (konservativ oder operativ) oder dem Frakturtyp werden in den ersten sechs Wochen nach einer proximalen Humerusfraktur in der Regel Orthesen und Physiotherapie verordnet. Diese Therapien verlangen oft viel von den Patient\*innen ab, weswegen die Compliance nicht selten ein Problem darstellt. [21, 22]

Die vorliegende kumulative Habilitationsschrift hat zum Ziel diese Determinanten, die das funktionelle Ergebnis nach rekonstruktiver Behandlung proximaler Humerusfrakturen maßgeblich mitbestimmen, näher zu untersuchen und ihre Bedeutung für den Therapieerfolg herauszuarbeiten.

**Publikation A** setzte sich mit dem funktionellen Ergebnis nach offener Reposition und interner Fixierung (ORIF) mittels winkelstabiler Plattenosteosynthese proximaler Humerusfrakturen im mittelfristigen Verlauf auseinander. Die prospektive Untersuchung, schloss zwischen Februar 2002 und Dezember 2014 insgesamt 1047 Frakturen ein, von denen 557 Fälle mindestens 24 Monate nachbeobachtet und ausgewertet werden konnten. Das funktionelle Ergebnis wurde mit Hilfe des Constant Scores (CS), des alters- und geschlechtsnormierten Constant Scores (nCS), des Constant Scores im Vergleich zur Gegenseite (%CS), des Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand (DASH) Scores und des Short Form 36 (SF-36) erhoben. Dabei zeigten sich, rund vier Jahre nach der Operation, gute bis mäßige Ergebnisse, wobei auffiel, dass das mittelfristige Outcome signifikant mit den Ergebnissen ein Jahr postoperativ korrelierte. Desweiteren zeigte sich eine negative Korrelation zwischen den mittelfristigen funktionellen Ergebnissen und dem Auftreten von Komplikationen. Diese Komplikationen in ein neues Klassifikationssystem einzuordnen war das Ziel von **Publikation B**. Dazu wurden aus den 1047 erfassten Fällen 193 Komplikationen herausgefiltert und folgende Typen definiert: Komplikationstyp 1 weist eine leichte Varus- ( $< 20^\circ$ ) oder Valgusdislokation des Humeruskopfes auf ohne Schraubendislokation nach intraartikulär. Typ 2a ist definiert durch eine Varusdislokation ( $< 20^\circ$ ) des Humeruskopfes in Verbindung mit einer Schraubendislokation durch die Kortikalis des Humeruskopfes. Typ 2b weist eine Dislokation des Tuberculum majus,

des Tuberculum minus oder beider Tubercula auf. Komplikationen vom Typ 2c definieren sich durch eine starke Varusdislokation ( $> 20^\circ$ ) mit Ausschneiden der Schrauben nach intraartikulär. Komplikationen vom Typ 3 zeigen eine Plattendislokation am Schaft und Typ 4 ist durch das Auftreten einer avaskulären Humeruskopfnekrose (AVN) mit (Typ 4b) oder ohne (Typ 4a) Arrosion des Glenoids gekennzeichnet. Grundsätzlich zeigte sich außerdem, dass komplexere Frakturen eher einen komplikativen Verlauf nehmen. Das klinische Ergebnis verschlechterte sich vor allem bei Komplikationen vom Typ 2 - 4, wobei je nach Komplikationstyp auch unterschiedliche Revisionsstrategien in Betracht gezogen werden müssen. Erstaunlicherweise war das Verheilen in einer eigentlich ungünstigeren Varusfehlstellung aber nicht immer mit einem schlechteren funktionellen Ergebnis verbunden, weswegen sich **Publikation C** zum Ziel gesetzt hatte diesen Aspekt genauer zu beleuchten. Hierzu wurde in standardisierten Röntgenbildern von 685 Patient\*innen nach offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese einer proximalen Humerusfraktur über zwei Jahre der Grad der Varusdislokation bestimmt. Die Fälle ließen sich dann in drei Gruppen einteilen: Gruppe A die anatomische Kopf-Schaft-Winkel aufwies, eine Varusdislokation von  $< 10^\circ$  oder eine Valgusfehlstellung, Gruppe B mit  $10^\circ - 20^\circ$  Varusdislokation und Gruppe C mit  $> 20^\circ$  Varusfehlstellung. Die funktionellen Ergebnisse korrelierten mit dem Grad der Varusdislokation: Je höhergradig die Varusfehlstellung, desto schlechter waren die funktionellen Ergebnisse. Die Daten untermauern die Bedeutung der möglichst anatomischen Reposition bei rekonstruktiver Behandlung proximaler Humerusfrakturen und zeigen, dass bei  $> 20^\circ$  Varusfehlstellung eine Revision in Betracht gezogen werden sollte.

Osteosyntheseplatten sind häufig genutzte Implantate, nicht nur in der operativen Therapie proximaler Humerusfrakturen, sondern ubiquitär in der Behandlung traumatologischer und orthopädischer Krankheitsbilder. Umso erstaunlicher ist es, wie wenig über die Reaktion des humanen Organismus auf die Implantatmaterialien bekannt ist. **Publikation D** beschäftigte sich darum mit der inflammatorischen Gewebereaktion auf Osteosyntheseplatten aus Titanlegierung und CFR-PEEK. Es wurden die Platten und periimplantäre Weichgewebeprobe von 16 verheilten proximalen Humerusfrakturen untersucht ( $n = 8$  CFR-PEEK,  $n = 8$  Titan). Das Weichgewebe wurde mittels  $\mu$ CT und Immunhistochemie analysiert, wobei sich deutlich mehr Partikel im periimplantären Weichgewebe von CFR-PEEK-Platten als im Gewebe über Titanplatten fanden. Mit Hilfe der Elementenanalyse in der Rasterelektronenmikroskopie (EDX-SEM) und durch Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR), konnte nachgewiesen

werden, dass die Fremdkörper von den Osteosyntheseplatten stammten. Um einen Einblick in ihre Herkunft und ihren Entstehungsmechanismus zu erhalten, wurden explantierte und neue Platten mittels Rasterelektronenmikroskopie (SEM), Profilometrie und hochauflösender Computertomographie (HR-CT) untersucht. Im periimplantären Weichgewebe der CFR-PEEK-Platten wurde außerdem mit Hilfe immunhistochemischer Färbungen eine deutliche entzündliche Gewebereaktion festgestellt. Das Gewebe enthielt Fremdkörper, die als Tantaldrähte, Kohlefaserfragmente und PEEK-Partikel identifiziert werden konnten. Titanpartikel wurden auch im periimplantären Weichgewebe der Titanplatten gefunden, zeigten aber in der Immunhistochemie eine weniger intensive Inflammation des umgebenden Gewebes. Die Oberfläche der explantierten CFR-PEEK-Platten war in der HR-CT, Profilometrie und SEM rauer und wies freiliegende und gebrochene Kohlenstofffasern sowie hervorstehende und verformte Tantaldrähte auf, insbesondere in den benutzten Schraubenlöchern; während auf den Oberflächen der Titanplatten Kratzer festgestellt wurden. Letztlich bieten beide Plattensysteme Vor- und Nachteile, welches bei welchem Patienten zum Einsatz kommt bleibt eine individuelle Abwägung.

Eine für die Patient\*innen sehr einschränkende Komplikation nach proximaler Humerusfraktur ist die Entwicklung einer posttraumatischen Schultersteife, die neben der Bewegungseinschränkung oft auch mit Schmerzen verbunden ist. [15] Therapie der Wahl ist nach Ausschöpfen physiotherapeutischer Maßnahmen meist die Implantatentfernung mit oder ohne Arthrolyse. [23] Um zu untersuchen, ob periartikuläre Verwachsungen zwischen Platte und dem umgebenden Weichgewebe eine Rolle bei der Entstehung der posttraumatischen Schultersteife spielen, wurden in **Publikation E** 16 Patient\*innen untersucht, bei denen aufgrund eines persistierend eingeschränkten Bewegungsumfangs und/oder Schmerzen nach plattenosteosynthetischer Behandlung einer proximalen Humerusfraktur entweder mit einer Philos® aus Titan oder einer PEEKPower® humeral fracture plate aus CFR-PEEK, eine Implantatentfernung indiziert wurde. Verglichen wurden das Bewegungsausmaß vor und nach Implantatentfernung sowie der CS und der %CS ein Jahr nach dem zweiten Eingriff. Es gab keine signifikanten Unterschiede bei der Range of motion (ROM), dem CS und dem %CS in Bezug auf die Plattenmaterialien. Allerdings zeigten alle Patient\*innen in dieser Studie nach der Implantatentfernung verbesserte funktionelle Ergebnisse. Bei Patient\*innen mit persistierender postoperativer Schultersteife, sollte folglich eine Implantatentfernung in Erwägung gezogen werden. Auch **Publikation F** beschäftigte sich mit dem

Entstehungsmechanismus bzw. der Prävention der posttraumatischen Schultersteife. In dieser randomisierten, doppelt verblindeten Studie wurde davon ausgegangen, dass diese auch durch erhöhte intraartikuläre, inflammatorische Zytokinlevel bedingt ist. [16] Dazu wurden 86 Patient\*innen mit proximaler Humerusfraktur in die Versuchsgruppe (offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese mit anschließender Gelenkspülung) oder Kontrollgruppe (nur offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese) randomisiert und ein Jahr nachbeobachtet. Das funktionelle Ergebnis, welches mittels CS und ROM evaluiert wurde, unterschied sich zu den Beobachtungszeitpunkten zwischen den Gruppen nicht signifikant.

Besonders die Behandlung älterer Patient\*innen stellt Traumatolog\*innen noch immer vor Herausforderungen. Die reduzierte Knochenqualität erschwert die Reposition und führt zu erhöhten Komplikationsraten, weshalb Strategien notwendig sind, die die Stabilität von Osteosynthesen erhöhen. [11, 24] Hier ist vor allem die Schraubenspitzenaugmentation bei Plattenosteosynthesen zu erwähnen, durch die das Knochen-Implantat-Interface vergrößert wird. In biomechanischen Studien konnte so eine verbesserte Stabilität nachgewiesen werden. [13] **Publikation G** ist eine retrospektive Kohortenstudie, bei der 60 Patient\*innen mit proximaler Humerusfraktur über 65 Jahre mittels offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese mit Schraubenspitzenaugmentation therapiert wurden. Deren funktionelles Ergebnis wurde mit 60 gematchten Patient\*innen (Alter, Geschlecht, Frakturmuster, mittleres follow-up) verglichen, die aufgrund einer proximalen Humerusfraktur durch Implantation einer inversen Schulterprothese behandelt wurden. Erhoben wurden der CS, der %CS und die Komplikationsrate bei einem mittleren follow-up von 39 Monaten. Es zeigten sich ähnlich gute Ergebnisse in der Gruppe der Patient\*innen nach Rekonstruktion mit Schraubenspitzenaugmentation im Vergleich zu denen der Gruppe, die eine inverse Schulterprothese implantiert bekamen. Allerdings wurde eine niedrigere Komplikations- und Revisionsrate in der Vergleichsgruppe beobachtet, sodass geschlussfolgert wurde, dass die inverse Prothese bei Patient\*innen über 65 Jahren das zu bevorzugende Operationsverfahren darstellt. Auch **Publikation H** beschäftigt sich mit der Schraubenspitzenaugmentation. Mit dieser prospektiv randomisierten Studie, sollte geklärt werden, ob 2-Part-Frakturen im Bereich des Collum chirurgicum bei älteren Patient\*innen bessere Ergebnisse nach Marknagel- oder einer Plattenosteosynthese mit Schraubenspitzenaugmentation aufweisen. Zu den Untersuchungszeitpunkten nach 6 Wochen, 3 Monaten, 6 Monaten, 12 und 24 Monaten wurden der DASH-Score, der nCS, der American Shoulder and Elbow Score (ASES), der Oxford

Shoulder Score (OSS) und der SF-36 erhoben. Desweiteren wurden Komplikationen und Revisionseingriffe erfasst. Eingeschlossen wurden 60 Patient\*innen, alle  $\geq 60$  Jahre. Nach 2 Jahren zeigte nur der OSS einen signifikanten Unterschied zwischen den Vergleichsgruppen, alle anderen Scores wiesen ähnliche Ergebnisse auf. Auch in Bezug auf Komplikationen und Revisionseingriffe war kein signifikanter Unterschied festzustellen. Es bleibt also eine Einzelfallentscheidung, wann der Marknagel bzw. die zementaugmentierte Plattenosteosynthese zur Anwendung kommen.

Die (Nach-)Behandlung proximaler Humerusfrakturen umfasst unter anderem das Tragen einer Armschlinge oder Orthese sowie die physiotherapeutische Beübung. [25-27] Einige Patient\*innen, insbesondere ältere, haben aber Schwierigkeiten diese Rehabilitationsmaßnahmen einzuhalten. [21] Ziel der Studie in **Publikation I** war daher die Evaluation, ob das Nicht-Einhalten des Rehabilitationsprotokolls ein schlechteres funktionelles Ergebnis nach sich zieht. Hierzu wurden die Patient\*innen je nach Behandlung in vier Gruppen eingeteilt: konservativ mit Schlinge, operativ mit Schlinge, konservativ mit Abduktionsorthese und operativ mit Abduktionsorthese. Bei der 6-wöchigen Nachuntersuchung wurden die Compliance im Hinblick auf die Verwendung der Orthese, die Durchführung der physiotherapeutischen Maßnahmen sowie der CS und Komplikationen oder Revisionseingriffe abgefragt. Nach einem Jahr wurden nochmals der CS sowie die Komplikationen und Revisionseingriffe erhoben. Bei 149 Teilnehmenden mit einem Durchschnittsalter von  $73,9 \pm 7,2$  Jahren beendeten nur 37 % die Orthesenbehandlung wie empfohlen und nur 49 % führten die Physiotherapie wie verordnet durch. Die statistische Analyse ergab jedoch keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen in Bezug auf CS, Komplikationen und Revisionseingriffe, sodass die vorhandenen Nachbehandlungsprotokolle vor allem im Hinblick auf die Verordnung von Orthesen überarbeitet werden sollten.

Eine seltene, aber schwerwiegende Frakturart stellen Headsplit-Frakturen dar, bei denen der Bruch durch die knorpelige Gelenkfläche des Humeruskopfes zieht. [28, 29] Ältere Patient\*innen werden in der Regel mittels Gelenkersatz behandelt, bei jüngeren möchte man das native Gelenk jedoch erhalten und muss hierfür ein möglichst anatomisches Repositionsergebnis erzielen. Entscheidend ist dabei die Visualisierung, weshalb in **Publikation J** die offene Rekonstruktion und interne Osteosynthese über einen erweiterten, gelenkeröffnenden Zugang evaluiert wurde. Eingeschlossen wurden 37 Patient\*innen, wobei 17 eine Zugangserweiterung durch das Rotatorenintervall zwischen den Sehnen des

M. supraspinatus und M. subscapularis erhielten. Die Evaluation des Outcomes erfolgte mittels Röntgen sowie Erhebung des CS und DASH-Scores. In der Versuchsgruppe wurde in 71 % der Fälle eine anatomische Reposition erreicht, in der Vergleichsgruppe nur in 45 %. Damit ergab sich ein signifikant besseres Repositionsergebnis in der Gruppe derer, die über einen Zugang durch das Rotatorenintervall reponiert wurden. Der CS und der DASH-Score hingegen wiesen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen auf. Da grundsätzlich die möglichst anatomische Rekonstruktion anzustreben ist, sollte der erweiterte Zugang unter Eröffnung der Kapsel bei schweren Gelenkfrakturen immer in Erwägung gezogen werden.

Eine weitere Determinante bei der operativen Behandlung proximaler Humerusfrakturen ist der Operateur bzw. die Operateurin. **Publikation K** widmete sich darum der Fragestellung, ob die Erfahrung des Chirurgen/der Chirurgin einen Einfluss auf das Ergebnis von Patient\*innen nach offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese einer 2-Part-Fraktur im Bereich des Collum chirurgicum hat. Dabei wurden die Operateure in Fachärzte, erfahrene Fachärzte (> 2 Jahre nach Erwerb der Facharztqualifikation) und spezialisierte Schulterchirurgen ( $\geq 50$  Schulteroperationen pro Jahr) unterteilt. Beurteilt wurden die Qualität der Reposition mittels Röntgen sowie das funktionelle Ergebnis mittels nCS und die Komplikations- bzw. Revisionsrate. Bei der Evaluation der 278 Fälle zeigte sich eine signifikante Verbesserung des nCS sowie eine Abnahme der Komplikations- und Revisionsrate mit steigender Erfahrung, wobei der spezialisierte Schulterchirurg die besten Ergebnisse aufwies. Die Rekonstruktion proximaler Humerusfrakturen sollte also nach Möglichkeit immer von einem spezialisierten Team durchgeführt werden.

Alle genannten Determinanten tragen dazu bei, die Behandlung von Patient\*innen mit proximaler Humerusfraktur individueller auf die Bedürfnisse der Verletzten abzustimmen und so besser zu machen. Vor allem die Wahl des Implantats und Implantatmaterials sowie der Zugangsweg, können zukünftig besser an die Frakturen und Patient\*innen angepasst werden. Auch zeigte sich, dass komplexe Nachbehandlungsschemata oft nicht eingehalten werden. Rekonstruktive Operationen von proximalen Humerusfrakturen sind diffizile Eingriffe, die am besten von routinierten Spezialistinnen und Spezialisten durchgeführt werden sollten. Von besonderer Bedeutung ist jedoch die Erkenntnis, dass bei der Implantation von Plattenosteosynthesen Partikel entstehen, die immunologisch relevant sind und im humanen Organismus unterschiedliche Reaktionen auslösen können.

## Einleitung und wissenschaftlicher Hintergrund

Die proximale Humerusfraktur ist die dritthäufigste Fraktur des älteren Menschen und stellt etwa 5 – 6 % aller Frakturen des menschlichen Skeletts dar. [30, 31] Die Inzidenz nahm in Deutschland zwischen 2009 und 2019 um 10 % zu und lag zuletzt bei 91 pro 100.000 Einwohner. [32] Diese Entwicklung zeigt sich auch in Südeuropa und im außereuropäischen Ausland. [33, 34] So verzeichnete eine australische Arbeit im Jahr 2017 unter den über 85-jährigen Patientinnen eine Inzidenz von 711,8 pro 100.000 Einwohner. [34] Betroffen sind auch in Deutschland vor allem ältere Menschen über 70 Jahre; in dieser Gruppe lag die Inzidenz 2019 hierzulande bei 288,4 pro 100.000. [30, 32, 33] Diese Entwicklungen sind zum einen dem demographischen Wandel zuzuschreiben und andererseits darauf zurückzuführen, dass auch die proximale Humerusfraktur eine Indikatorfraktur für Osteoporose darstellt. [35] Nichtsdestotrotz ziehen sich auch jüngere Patient\*innen, meist im Rahmen von Hochenergietraumata, proximale Humerusfrakturen zu. [1, 30] Allgemein lassen sich diese nach Charles Neer in verschiedene Typen klassifizieren und Therapieempfehlungen ableiten, wobei die dislozierten Frakturfragmente für die Einordnung entscheidend sind. [36, 37] Als disloziert gelten Fragmente die mehr als 1 cm verschoben oder mehr als 45° abgekippt sind. [36] Charles Neer orientierte sich dabei an der Klassifikation nach Codman, die 1934 veröffentlicht worden war. [38] In dieser Originalpublikation teilte Codman den proximalen Humerus in vier anatomische Regionen, die er als „Parts“ bezeichnete: den Humerusschaft, die Gelenkfläche, das Tuberculum majus und das Tuberculum minus. [38] Neer ergänzte die Dislokation und unterteilte somit 6 Typen mit minimal 2 und maximal 4 Frakturfragmenten. [36, 37] Typ 1 umfasst alle nicht dislozierten Frakturen; Typ 2 stellt die Fraktur durch das Collum anatomicum und Typ 3 die durch das Collum chirurgicum dar. [36] Typ 4 umfasst Frakturen des Tuberculum majus und Typ 5 des Tuberculum minus. [36, 37] Bei all diesen genannten Frakturtypen, zeigt sich im Glenohumeralgelenk eine regelrechte Artikulation; hiervon wird der Typ 6, die Luxationsfraktur, unterschieden. [36]

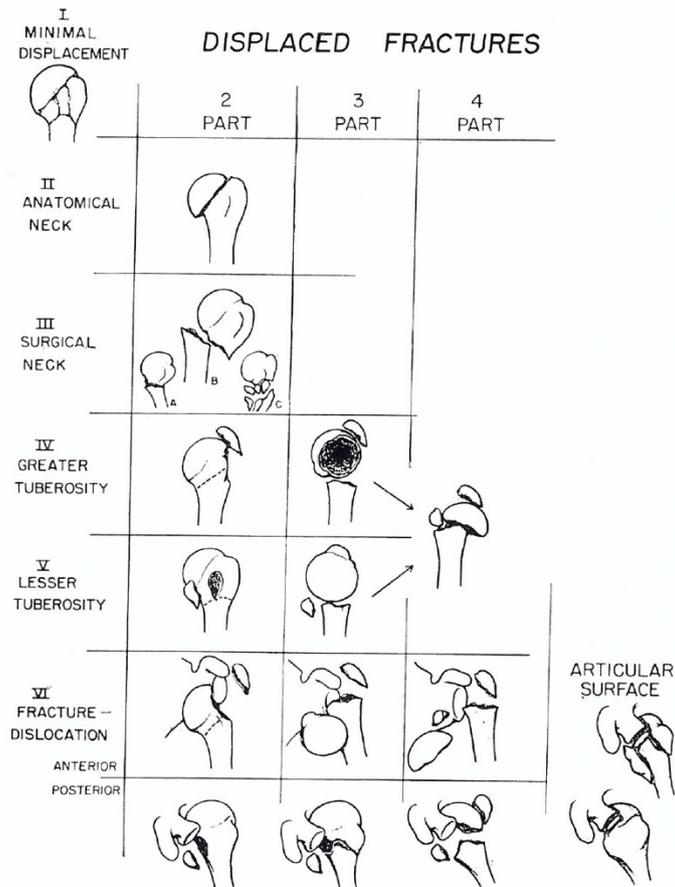


Abbildung 1

Die Klassifikation der proximalen Humerusfraktur nach Charles Neer. [36]

Als Sonderform ergänzte Neer die sogenannten Headsplit Frakturen, wobei die Bruchlinie durch die knorpelige Gelenkfläche des Humeruskopfes zieht. [36]

Die Neer-Klassifikation ist zusammen mit der AO-Klassifikation die weltweit wohl am weitesten verbreitete. Letztere ordnet dem proximalen Humerus die Ziffer 11 zu und unterteilt drei Typen: die unifokal extraartikulären A-Frakturen, bifokal extraartikuläre B-Frakturen und intraartikuläre C-Frakturen. [39]

Proximale Humerusfrakturen können grundsätzlich sowohl konservativ als auch operativ therapiert werden. Entscheidend für die optimale Behandlung der Patient\*innen sind neben dem Frakturtyp auch patientenspezifische Charakteristika wie das Alter, der funktionelle Anspruch, das Aktivitätsniveau und viele mehr. Nach den o. g. Neer-Kriterien sollten dislozierte Frakturen eher operativ und nicht dislozierte Frakturen konservativ therapiert werden. Wo genau die Grenze dieser beiden Behandlungsmodalitäten liegt, wird jedoch weiterhin kontrovers diskutiert. Verschiedene Arbeiten, zeigten weder eine klare Überlegenheit der

operativen noch der konservativen Behandlung. [40-43] Die randomisiert kontrollierte Studie PROFHER, in die 250 Patient\*innen mit proximaler Humerusfraktur eingeschlossen wurden, ergab keinen signifikanten Unterschied im Hinblick auf das funktionelle Outcome nach zwei Jahren. [40, 41] Launonen et al. veröffentlichten 2015 eine Metaanalyse, in der sie die funktionellen Ergebnisse nach operativer und konservativer Behandlung von proximalen Humerusfrakturen verglichen und ebenfalls keine signifikanten Unterschiede herausarbeiten konnten. [42] Allerdings stellten sie fest, dass die operative Therapie mit signifikant höheren Komplikations- und Reoperationsraten einhergeht. [42] Ebenso fand eine Metaanalyse aus 2018 keine signifikanten Unterschiede im funktionellen Outcome und dem Auftreten einer avaskulären Nekrose des Humeruskopfes im Vergleich von operativ und konservativ behandelten proximalen Humerusfrakturen, wobei die Revisionsrate unter operativ behandelten Patient\*innen auch hier signifikant höher war als unter konservativen. [43] Die Rate an Pseudarthrosen hingegen war in der Gruppe der konservativ behandelten Frakturen signifikant höher. [43]

Die konservative Therapie erfolgt in der Regel nach einem festen Schema, welches eine kurze Zeit der Ruhigstellung zur Schmerztherapie und anschließende frühfunktionelle Behandlung, mit konsequenten Bewegungsübungen umfasst. [44]

Bei der operativen Behandlung proximaler Humerusfrakturen gilt es grundsätzlich zu unterscheiden, ob eine Rekonstruktion und Osteosynthese oder gelenkersetzende Behandlung angestrebt wird. Zur Osteosynthese stehen unterschiedliche Implantate verschiedener Hersteller aus unterschiedlichen Materialien zur Verfügung. Grundsätzlich können intramedulläre Kraftträger wie Verriegelungsmarknägel und extramedulläre Kraftträger wie winkelstabile Plattenosteosynthesen unterschieden werden. [45] Um das Knochen-Implantat-Interface zu vergrößern und die Osteosynthese so, gerade in osteoporotischem Knochen, stabiler zu machen, bieten einige Implantate die Möglichkeit der Schraubenspitzenaugmentation mit PMMA oder Calciumphosphat. [12, 46, 47] Trotz aller Neuerungen im Bereich der Osteosynthesen in den vergangenen Jahren, ist die anatomische Reposition ein entscheidender Faktor für das funktionelle Ergebnis. Dabei sind zum einen der Kopf-Schaft-Winkel, ein eventuell vorhandener Kopf-Schaft-Versatz, die mediale Abstützung im Bereich der Kalkarregion und die Position des Tuberculum majus entscheidend. [8] Der Kopf-Schaft-Winkel  $\alpha$  variiert zwischen  $120^\circ$  und  $150^\circ$ ; unter  $120^\circ$  spricht man von einer Varus- und über  $150^\circ$  von einer Valgusfehlstellung. [8] Insbesondere Frakturen mit Beteiligung der

Gelenkfläche, sog. Headsplitfrakturen, stellen die Chirurgeninnen und Chirurgen bei der anatomischen Reposition und stabilen Retention vor Herausforderungen.

Implantate für die Osteosynthese von proximalen Humerusfrakturen werden aus Titanlegierungen, Stahl und CFR-PEEK hergestellt. Aufgrund einiger Nachteile wie Korrosion, allergische Reaktionen und Infektionen hat Stahl an Bedeutung verloren, so dass heute überwiegend Titanlegierungen verwendet werden. [4] In den letzten Jahren haben jedoch auch Kunststoffe wie PEEK zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die chemische Struktur dieses hydrophoben, polyaromatischen Ketons bewirkt eine hohe Hitzebeständigkeit (über 300 °C), eine Widerstandsfähigkeit gegen chemische und Strahlenschäden und eine höhere Festigkeit (pro Masse) als viele Metalle. [5, 6] Daher ist es auch inert und bietet aufgrund seiner Röntgendurchlässigkeit intraoperativ Vorteile bei der fluoroskopischen Kontrolle der Frakturposition. [5, 6] Darüber hinaus beschreiben Chirurg\*innen haptische und visuelle Unterschiede des Weichgewebes, welches sich im Laufe der Zeit um die Implantate bildet. So geht das Weichgewebe über einer Titanlegierung eine feste Bindung (d.h. es haftet an der Oberfläche) mit dem Implantat ein, während das Weichgewebe über Stahl eher dazu neigt, eine Kapsel zu bilden. [48] PEEK sollte aufgrund seiner hydrophoben Eigenschaften weniger Adhäsionen mit dem umgebenden Weichgewebe verursachen. [7]

Insbesondere bei älteren Patient\*innen zeigte sich, dass der primäre Gelenkersatz im Vergleich zur Osteosynthese gute Ergebnisse aufzuweisen scheint, wobei sich abzeichnet, dass die primäre Frakturoprothetik der Endoprothetik nach gescheiterter Osteosynthese im Hinblick auf das funktionelle Outcome überlegen ist. [49, 50]

Zur Nachbehandlung nach operativer Rekonstruktion und Osteosynthese erhalten die Patient\*innen häufig eine Orthese, welche sie nach einem festen Schema tragen sollen. [26] Gleichzeitig sind sie angehalten Physiotherapie durchzuführen, um in der Zeit der Rehabilitation die Funktion der Schulter zu üben. [26, 51] Entscheidend für den Erfolg der Behandlung ist damit auch die Patientencompliance. [21, 52] Hier zeigten verschiedene Studien, dass gerade diese zu wünschen übriglässt: So untersuchten Livesey et al. 66 Patient\*innen nach einer Schulteroperation mit Hilfe eines in die Orthese integrierten Temperaturfühlers und stellten fest, dass die Orthese von vielen nicht konsequent getragen wird. [52] Inwiefern Non-Compliance sich im Hinblick auf das Tragen einer Orthese und den regelmäßigen Physiotherapiebesuch wirklich negativ auf die Komplikationsrate und das funktionelle Ergebnis auswirkt bleibt aber offen.

Eine gefürchtete Komplikation nach proximaler Humerusfraktur ist das Auftreten einer avaskulären Humeruskopfnekrose. Je nach Publikation schwanken die Inzidenzen hier stark und sind abhängig vom Frakturtyp und der Dauer des Follow-ups. [53, 54] Darüber hinaus führt das Auftreten einer posttraumatischen Schultersteife, die laut einigen Arbeiten bis zu 50% der Patient\*innen nach proximaler Humerusfraktur betrifft, zu schlechten funktionellen Ergebnissen. [15] Der genaue Pathomechanismus dahinter ist jedoch weitestgehend unbekannt; insbesondere ob und inwiefern eine Kapsulitis bzw. perikapsuläre Vorgänge involviert sind, ist nicht geklärt. [19, 20] Genauso wurde bislang nicht untersucht ob die Implantate bzw. Implantatmaterialien einen Einfluss auf das Auftreten einer posttraumatischen Schultersteife haben. [48, 55, 56]

Zentrales und wichtigstes Instrument für die Erfassung des Therapieerfolgs sind sogenannte PROMs (patient-reported outcome measures). Zu den gängigsten für den proximalen Humerus zählt der Constant Score inklusive seiner Weiterentwicklungen nCS und %CS. In ihm werden die Händigkeit, Schmerzen, Einschränkungen in Beruf und Freizeit, die mögliche schmerzfreie Arbeitshöhe und die Schlafqualität abgefragt sowie der schmerzfreie Bewegungsumfang bestimmt und eine Kraftmessung durchgeführt. Alle Angaben werden dann in einen Punktwert übersetzt und addiert, sodass maximal 100 Punkte erreicht werden können. [57] Um das Alter und Geschlecht zu berücksichtigen, erhoben Katolik et al. neue Normdaten und etablierten die Möglichkeit der Umrechnung eines normalisierten Scores (nCS) aus dem ursprünglichen Score (CS). [58] Der %CS hingegen setzt den CS der betroffenen Seite ins Verhältnis zur gesunden Schulter.

Der DASH-Score ist ein Fragebogen aus 30 Fragen und zwei optionalen Modulen. Er dient der Beurteilung der gesamten oberen Extremität. [59] Weitere solcher PROMs sind der ASES, der OSS und der SF-36.[60-62]

## Zielsetzung

Das primäre Ziel dieses Habilitationsprojektes war es unterschiedliche Determinanten zu untersuchen, die alle das funktionelle Ergebnis von Patient\*innen mit rekonstruktiv behandelten proximalen Humerusfrakturen beeinflussen. So sollen einzelne Parameter herausgearbeitet werden, die das Ergebnis nach offener Reposition und interner Osteosynthese verbessern, bzw. helfen die individuell richtige Therapie für die Patient\*innen wissenschaftlich fundiert festzulegen und so Komplikationen und Revisionseingriffe zu vermeiden.

Zunächst sollte das mittelfristige funktionelle Ergebnis eines größeren Patientenkollektivs nach offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese dislozierter proximaler Humerusfrakturen untersucht werden (Publikation A). Hieraus leiteten sich weitere Fragestellungen ab, die zum Ziel hatten, die Komplikationen, insbesondere sekundäre (Varus-)Dislokationen, genauer zu betrachten, ihre Bedeutung für das Outcome herauszuarbeiten (Publikation B) und sie in ein neues Komplikationsklassifikationssystem einzuordnen (Publikation C).

Osteosyntheseplatten sind ein bewährtes Mittel, um nach Reposition der Frakturfragmente eine Retention zu erreichen, allerdings gibt es bislang kaum Daten wie sich der humane Organismus gegenüber diesen Implantaten verhält. In der Literatur zeichnete sich in ex-vivo und Tierexperimenten ab, dass eine immunologische Antwort auf die Fremdkörper erfolgt, wie diese im humanen Organismus ausfällt, wurde bislang jedoch nicht untersucht. Ziel zweier Teilprojekte (Publikation D und E) dieser Habilitation war es daher, die Hypothese zu erörtern, dass die Gewebereaktion auf unterschiedliche Plattenmaterialien auch unterschiedlich ausfällt und zu untersuchen, ob das Implantatmaterial bzw. das periimplantäre Weichgewebe einen Einfluss auf die Entstehung einer posttraumatischen Schultersteife haben könnte. Weiterhin sollten die intraartikulären Pathomechanismen der posttraumatische Schultersteife näher betrachtet und der Frage nachgegangen werden, ob eine Gelenklavage im Rahmen der Frakturversorgung die inflammatorischen Zytokinlevel absenkt und so der Entstehung dieser Komplikation entgegenwirkt (Publikation F).

Zwei weitere Teilprojekte (Publikation G und H) gingen der Frage nach, inwiefern die Schraubenspitzenaugmentation winkelstabiler Plattenosteosynthesen im klinischen Kontext bei älteren Patient\*innen einen Einfluss auf das Ergebnis hat. Zum einen wurde die Hypothese

aufgestellt, dass die Ergebnisse vergleichbar mit denen der inversen Schulterprothese nach proximaler Humerusfraktur wären und zum anderen, dass sie bei 2-Part-Frakturen im Bereich des Collum chirurgicum ein ähnliches Outcome liefert wie die Osteosynthese mittels Marknagel. Mit dem Outcome älterer Patient\*innen beschäftigte sich auch ein weiteres Teilprojekt, wobei es zum Ziel hatte, den Einfluss der Patientencompliance im Hinblick auf das Tragen von Orthesen bzw. Einhalten von Physiotherapieschemata zu untersuchen (Publikation I).

Je komplexer das Frakturmuster, desto wichtiger die anatomische Reposition und damit die Visualisierung der Fragmente; dies gilt vor allem, wenn die Gelenkfläche beteiligt ist. Darum wurde in einem weiteren Teilprojekt (Publikation J) der Hypothese nachgegangen, dass die Erweiterung des Zugangsweges durch das Rotatorenintervall unter Eröffnung des Gelenks bessere Ergebnisse bei der offenen Reposition und winkelstabilen Plattenosteosynthese von Headsplitfrakturen liefert, als der normale deltoideopektorale Zugang, ohne dabei höhere Komplikations- und Revisionsraten zu erzeugen.

Ziel eines anderen Teilprojektes war den Einfluss des Operateurs/der Operateurin auf das Ergebnis herauszuarbeiten. Dabei wurde die Hypothese erörtert, dass mit steigender Erfahrung der Chirurgin/des Chirurgen und Anzahl von Schulteroperationen pro Jahr sich das operative Ergebnis verbessert (Publikation K).

Liste der zur Habilitation beitragenden Publikationen

- A. Neudeck R, Daferner M P, **Fleischhacker E**, Helfen T, Gilbert F, Böcker W, Ockert B, Siebenbürger G.  
„Mid-term functional outcome (minimum 24 months, mean 4 years) after locking plate osteosynthesis for displaced fractures of the proximal humerus in 557 cases“  
Injury 2023 Mar 29;S0020-1383(23)00289-9. doi: 10.1016/j.injury.2023.03.033.  
(IF 2023 = noch nicht veröffentlicht; IF 2022 = 2,5)
- B. **Fleischhacker E\***, Siebenbürger G\*, Helfen T, Gleich J, Böcker W, Ockert B.  
“Varus malposition relates to functional outcomes following open reduction and internal fixation for proximal humeral fractures: A retrospective comparative cohort study with minimum 2 years follow-up”  
Injury. 2021 Mar;52(3):506-510. doi: 10.1016/j.injury.2020.09.003. Epub 2020 Sep 7. (\* Geteilte Erstautorenschaft, IF 2021 = 2.687)
- C. B Siebenbürger G, Neudeck R, Daferner M P, **Fleischhacker E**, Böcker W, Ockert B, Helfen T.  
„It Is Always the Same - A Complication Classification following Angular Stable Plating of Proximal Humeral Fractures“  
Journal of Clinical Medicine. 2023 Mar 28;12(7):2556. doi: 10.3390/jcm12072556.  
(IF 2023 = noch nicht veröffentlicht; IF 2022 = 3,9)
- D. **Fleischhacker E**, Sprecher CM, Milz S, Saller MM, Wirz R, Zboray R, Parrilli A, Gleich J, Siebenbürger G, Böcker W, Ockert B, Helfen T.  
“Inflammatory tissue response in human soft tissue is caused by a higher particle load near carbon fiber-reinforced PEEK compared to titanium plates”  
Acta Biomater. 2024 May;180:128-139. doi: 10.1016/j.actbio.2024.04.023.  
(IF 2024 = noch nicht veröffentlicht; IF 2022 = 9,7)
- E. **Fleischhacker E**, Sprecher C, Milz S, Saller M, Gleich J, Siebenbürger G, Helfen T, Böcker W, Ockert B.  
„Functional outcomes before and after implant removal in healed proximal humerus fractures: does implant material (PEEK vs. titanium) have an impact? – a pilot study”  
BMC Musculoskeletal Disorders. 2022 Jan 27;23(1):95. doi: 10.1186/s12891-022-05061-x.  
(IF 2022 = 2.3)
- F. Biermann N, Schirren M, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Helfen T, Böcker W, Ockert B.  
„Glenohumeral joint lavage does not affect clinical outcomes in open reduction and internal fixation of displaced intracapsular proximal humeral fractures: a prospective, randomized, double-blinded trial.”  
J Shoulder Elbow Surg. 2020 Sep;29(9):1758-1764. doi: 10.1016/j.jse.2020.04.026. Epub 2020 Jun 9. (IF 2020 = 3,019)

- G. Helfen T, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Gleich J, Böcker W, Ockert B.  
“Operative treatment of 2-part surgical neck type fractures of the proximal humerus in the elderly: Cement augmented locking plate PHILOS™ vs. proximal humerus nail multiloc®.”  
Injury. 2020 Oct;51(10):2245-2252. doi: 10.1016/j.injury.2020.06.026. Epub 2020 Jun 16. (IF 2020 = 2,586)
- H. Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Helfen T, Gleich J, Boehm E, Boecker W, Ockert B.  
„Screw-tip augmented locked plating versus primary reverse total shoulder arthroplasty in displaced proximal humeral fractures: a retrospective comparative cohort study with a mean follow-up of 39 months.”  
Geriatric and Orthopaedic Surgery and Rehabilitation. 2021 Oct 24;12:21514593211039026. doi: 10.1177/21514593211039026. eCollection 2021. (IF 2021 = 1.924)
- I. **Fleischhacker E**, Gleich J, Smolka V, Neuerburg C, Böcker W, Helfen T.  
“The Influence of Adherence to Orthosis and Physiotherapy Protocol on Functional Outcome after Proximal Humeral Fracture in the Elderly”  
Journal of clinical medicine. 2023 Feb 22;12(5):1762. doi: 10.3390/jcm12051762. (IF 2023 = noch nicht veröffentlicht; IF 2022 = 3,9)
- J. **Fleischhacker E**, Siebenbürger G, Gleich J, Helfen T, Böcker W, Ockert B.  
"Open reduction and internal fixation of displaced head-split type humeral fractures and role of the rotator-interval approach"  
Shoulder and Elbow. 2023 Apr;15(2):159-165. doi: 10.1177/17585732211065449. Epub 2021 Dec 15. (CiteScore (Scopus) 2021 = 2,600)
- K. Helfen T, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Biermann N, Böcker W, Ockert B.  
“Open reduction and internal fixation of displaced proximal humeral fractures. Does the surgeon's experience have an impact on outcomes?”  
PLoS One. 2018 Nov 6;13(11):e0207044. doi: 10.1371/journal.pone.0207044. eCollection 2018. (IF 2018 = 2,776)

## Teilprojekte der Habilitation – Ergebnisse, Diskussion und Bedeutung für das Fachgebiet

### **Publikation A**

Neudeck R, Daferner M P, **Fleischhacker E**, Helfen T, Gilbert F, Böcker W, Ockert B, Siebenbürger G. Mid-term functional outcome (minimum 24 months, mean 4 years) after locking plate osteosynthesis for displaced fractures of the proximal humerus in 557 cases. Injury 2023 Mar 29:S0020-1383(23)00289-9. doi: 10.1016/j.injury.2023.03.033. [63]

### Zusammenfassung

Wie die beste chirurgische Behandlung von dislozierten proximalen Humerusfrakturen aussieht, ist nach wie vor Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen. Um einen Überblick zu bekommen, wurden in dieser Studie zunächst die mittelfristigen funktionellen Ergebnisse (Median 4 Jahre) unseres Patientenkollektivs nach winkelstabiler Plattenosteosynthese evaluiert und die der Gruppe mit Komplikation denen der Gruppe ohne Komplikation gegenübergestellt. Hierzu wurden zwischen Februar 2002 und Dezember 2014 insgesamt 1031 Patient\*innen mit 1047 dislozierten proximalen Humerusfrakturen durch offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese mit einer Philos® (DePuy Synthes, Johnson & Johnson Medical, Raynham, Massachusetts, USA) behandelt und mindestens 24 Monate prospektiv nachuntersucht. Dazu wurden der CS, der DASH-Score und der SF-36 erhoben. Eine vollständiges follow-up konnte in 557 (53,2 %) Fällen erreicht werden, bei einer mittleren Nachbeobachtungszeit von  $4,0 \pm 2,7$  Jahren.

Diese 557 Patient\*innen (67 % Frauen; Durchschnittsalter zum Zeitpunkt der Osteosynthese:  $68,3 \pm 15,5$  Jahre) hatten  $4,0 \pm 2,7$  Jahre nach der Operation einen mittleren CS von  $68,4 \pm 20,3$  Punkten. Der nCS betrug  $80,4 \pm 23,8$  Punkte und der %CS  $87,2 \pm 27,9$  %. Der DASH-Score lag im Mittel bei  $23,8 \pm 20,8$  Punkten. Komplikationen (sekundäre Dislokation, Schraubenausriss, avaskuläre Nekrose) traten bei  $n = 117$  Patient\*innen auf und waren mit signifikant niedrigeren Punktzahlen bei den Scores verbunden. Hier lag der mittlere CS bei  $54,5 \pm 19,0$  Punkten ( $p < 0,001$ ); der mittlere nCS betrug  $64,5 \pm 22,9$  Punkte ( $p < 0,001$ ), der mittlere %CS  $71,2 \pm 25,0$  % ( $p < 0,001$ ) und der DASH-Score  $31,9 \pm 22,4$  Punkte ( $p < 0,001$ ). Der SF-36 lag in der Fallkohorte bei  $66,5$  Punkten; Patient\*innen mit einer Komplikation wiesen auch hier schlechtere Ergebnisse (mittlerer SF-36  $56,7$ ) auf.

Insgesamt zeigten die Patient\*innen dieses großen Kollektivs nach ORIF einer dislozierten proximalen Humerusfraktur gute bis mäßige Ergebnisse, die etwas schlechter, aber dennoch vergleichbar sind mit den zuvor in der Literatur beschriebenen. Dabei muss betont werden, dass die Kollektive der Vergleichsstudien deutlich kleiner waren. [64] Von besonderer Bedeutung scheint das erste postoperative Jahr zu sein, da hier die größte Verbesserung in Bezug auf die erhobenen PROMs auszumachen war. Die mittelfristigen funktionellen Ergebnisse korrelieren signifikant mit denen nach einem Jahr. Darüber hinaus zeigte sich eine signifikante negative Korrelation zwischen den mittelfristigen funktionellen Ergebnissen und dem Auftreten von Komplikationen.

## Publikation B

**Fleischhacker E\***, Siebenbürger G\*, Helfen T, Gleich J, Böcker W, Ockert B. Varus malposition relates to functional outcomes following open reduction and internal fixation for proximal humeral fractures: A retrospective comparative cohort study with minimum 2 years follow-up. *Injury*. 2021 Mar;52(3):506-510. doi: 10.1016/j.injury.2020.09.003. Epub 2020 Sep 7. (\*Geteilte Erstautorenschaft)

### Zusammenfassung

Bei proximalen Humerusfrakturen die durch offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese behandelt wurden, kommt es in ca. einem Viertel der Fälle zu einer Komplikation. Durch die Zugkräfte des M. deltoideus wird der Schaft cranialisiert und durch den Zug des M. supraspinatus der Kopf medialisiert; so resultieren häufig sekundäre Varusdislokation, wenn die Osteosynthese versagt. Wie diese Varusdislokationen sich auf das funktionelle Ergebnis auswirken ist Gegenstand dieser Untersuchung.

Dabei wurden retrospektiv die Daten von 685 Patient\*innen ausgewertet, die an einem Level-1-Traumazentrum aufgrund einer proximalen Humerusfraktur durch offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese operativ behandelt worden waren. Die Messung der Dislokation erfolgte anhand standardisierter Röntgenaufnahmen im anterior-posterioren Strahlengang über einen Beobachtungszeitraum von zwei Jahren. Die Messmethode orientierte sich dabei an der Arbeit von Schnetzke et al. aus 2016. [8] Der anatomische Kopf-Schaft-Winkel (KSW) wurde bei  $135^\circ$  festgesetzt. Das funktionelle Ergebnis wurde mittels CS, nCS und %CS erhoben. So konnten die Patient\*innen in drei Gruppen eingeteilt werden. 82,5 % (n = 565) der Patient\*innen wurden Gruppe A zugeordnet; bei ihnen lagen anatomische KSW bzw. Varus- oder Valgusfehlstellungen  $< 10^\circ$  vor. Sie gaben einen mittleren CS von  $72,5 \pm 18,8$  Punkten an, der mittlere nCS betrug  $84,7 \pm 21,7$  Punkte und der mittlere %CS  $87,2 \pm 24,1$  %. Gruppe B umfasste 54 Patient\*innen mit Varusfehlstellungen von  $10^\circ - 20^\circ$ . Bei ihnen lag der mittlere CS bei  $64,7 \pm 16,9$  Punkte, der mittlere nCS bei  $76,2 \pm 20,6$  Punkten und der mittlere %CS bei  $84,5 \pm 18,3$  %. In Gruppe C wurden 66 Patient\*innen mit Varusfehlstellungen  $> 20^\circ$  eingeordnet, die einen mittleren CS von  $54,1 \pm 19,5$  Punkten, einen mittleren nCS von  $64,8 \pm 23,8$  Punkten und einen mittleren %CS von  $72,3 \pm 26,4$  % angaben. Diese drei Gruppen unterschieden sich hinsichtlich des CS signifikant ( $p = 0,02$ ,  $p = 0,03$ ,  $p = 0,01$ ; Abb. 2).

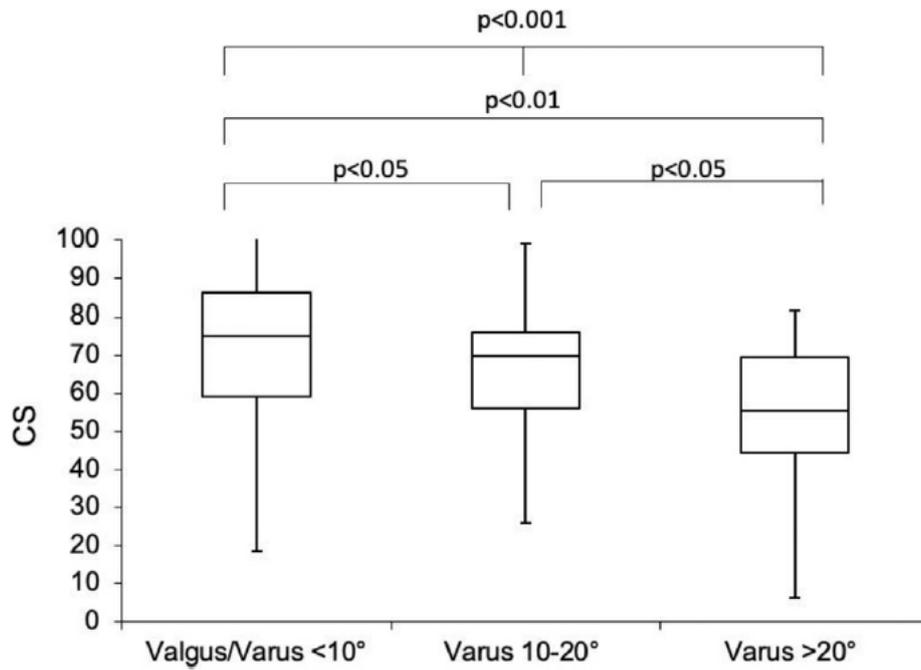


Abbildung 2

Vergleichende Darstellung der CS-Punktwerte zwischen den Gruppen.

Außerdem wiesen der CS und der Grad der Varusdislokation einen linearen Zusammenhang auf (Abb. 3).

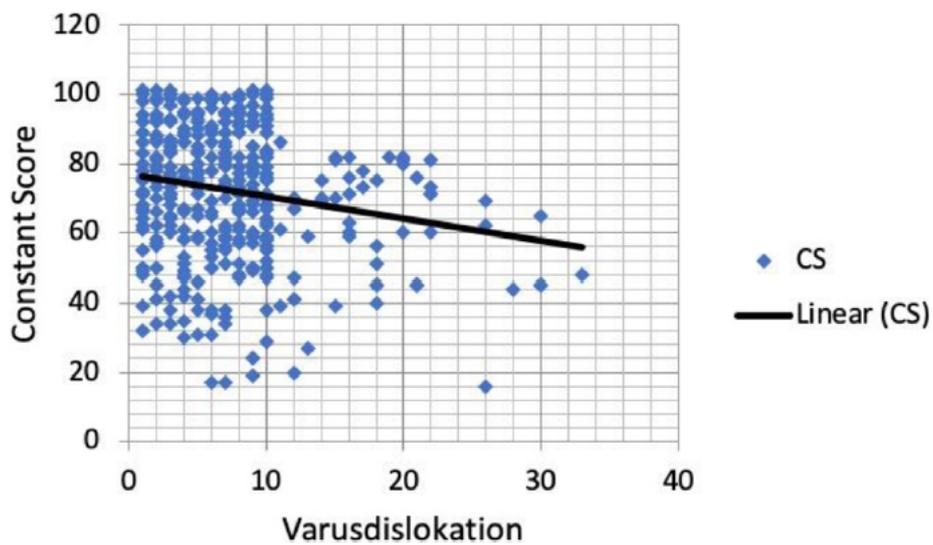


Abbildung 3

Lineare Korrelation zwischen Varusdislokation und funktionellem Ergebnis (CS).

159 Patient\*innen wurden aufgrund der Fehlstellung revidiert. Eine Implantatentfernung wurde in Gruppe A bei 19,8 % vorgenommen, in Gruppe B bei 25,9 % und in Gruppe C bei 50 %. In Gruppe C wurde außerdem bei 5 Patient\*innen eine frühe (< 3 Monate postoperativ)

Revisionsosteosynthese durchgeführt, 2 Patient\*innen erhielten aufgrund einer Nonunion eine Resektionsarthroplastie und bei 11 Patient\*innen erfolgte die Konversion auf eine Prothese. Die Arbeit zeigt, dass der postoperative KSW das funktionelle Ergebnis nach offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese einer proximalen Humerusfraktur mitbestimmt. Die Gründe hierfür sind unter anderem die veränderte Vorspannung der Rotatorenmanschette, ein reduzierter Bewegungsumfang wegen eines subacromiales Impingement und Schmerzen. [65] Die Studie untermauert damit die Ergebnisse von biomechanischen Arbeiten, die zeigten, dass bei Varusdislokation eine größere Kraft notwendig ist, um eine Flexions-, Elevations- oder Außenrotationsbewegung durchzuführen. [66] Außerdem unterstützt sie die Empfehlung vorangegangener Arbeiten, die die Brisanz der anatomischen Reposition betonen.

## Publikation C

Siebenbürger G, Neudeck R, Daferner M P, **Fleischhacker E**, Böcker W, Ockert B, Helfen T. It Is Always the Same - A Complication Classification following Angular Stable Plating of Proximal Humeral Fractures. Journal of Clinical Medicine. 2023 Mar 28;12(7):2556. doi: 10.3390/jcm12072556.

### Zusammenfassung

Die Komplikationsrate nach offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese ist mit 24,5 % nach wie vor hoch. Allerdings variiert sie in unterschiedlichen Studien, was auch an der uneinheitlichen Komplikationsdefinition und -klassifikation liegt. Die Gründe für das Auftreten von Komplikationen sind nicht abschließend geklärt; zum einen spielt sicher das Alter der Patient\*innen eine Rolle, welches in den vergangenen Jahren stetig gestiegen ist, zum anderen die damit verbundene reduzierte Knochenqualität. [32, 67] Ziel dieser Arbeit war es darum die Komplikationen genauer zu beleuchten und ein System zur Klassifizierung dieser nach winkelstabiler Plattenosteosynthese des proximalen Humerus zu etablieren. Weiterhin sollte der Einfluss dieser Komplikationen auf das klinische Ergebnis in Abhängigkeit von der Frakturmorphologie herausgearbeitet werden, um daraus Schlüsse für die Revisionsstrategie zu ziehen. Insgesamt wurden 1047 proximale Humerusfrakturen mit 193 Osteosynthese-assoziierten Komplikationen (24,5 %) eingeschlossen. Die Komplikationen ließen sich in sechs Typen unterscheiden. Komplikationstyp 1 ist definiert durch eine leichte Varus- (< 20°) oder Valgusdislokation des Humeruskopfes, ohne dass es zu einem Schraubenausschnitt durch die Humeruskopf kortikalis kommt. Typ 2a ist definiert durch eine Varusdislokation (< 20°) des Humeruskopfes in Verbindung mit einem Schraubenausbruch. Beim Typ 2b zeigt sich eine Dislokation des Tuberculum majus, des Tuberculum minus oder beider Tubercula. Der Typ 2c ist definiert durch eine schwere Varusdislokation (> 20°) des Humeruskopfes mit Schraubenausbruch nach intraartikulär. Typ 3 beschreibt eine Dislokation der winkelstabilen Platte im Bereich des Humerusschafts mit Schraubenausbruch, während die Position des Humeruskopfes stabil bleibt. Komplikationen vom Typ 4 kennzeichnet das Auftreten einer AVN, wobei unterschieden wird, ob der glenoidale Knorpel intakt ist (Typ 4a) oder durch die ausgebrochenen Schrauben beschädigt wurde (Typ 4b). Das klinische Ergebnis wurde mittels CS, nCS und %CS erhoben. Alle Komplikationstypen wiesen im Vergleich zur Kohorte ohne

Komplikation signifikant schlechtere Werte auf. Eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse des CS zeigt Abb. 4.

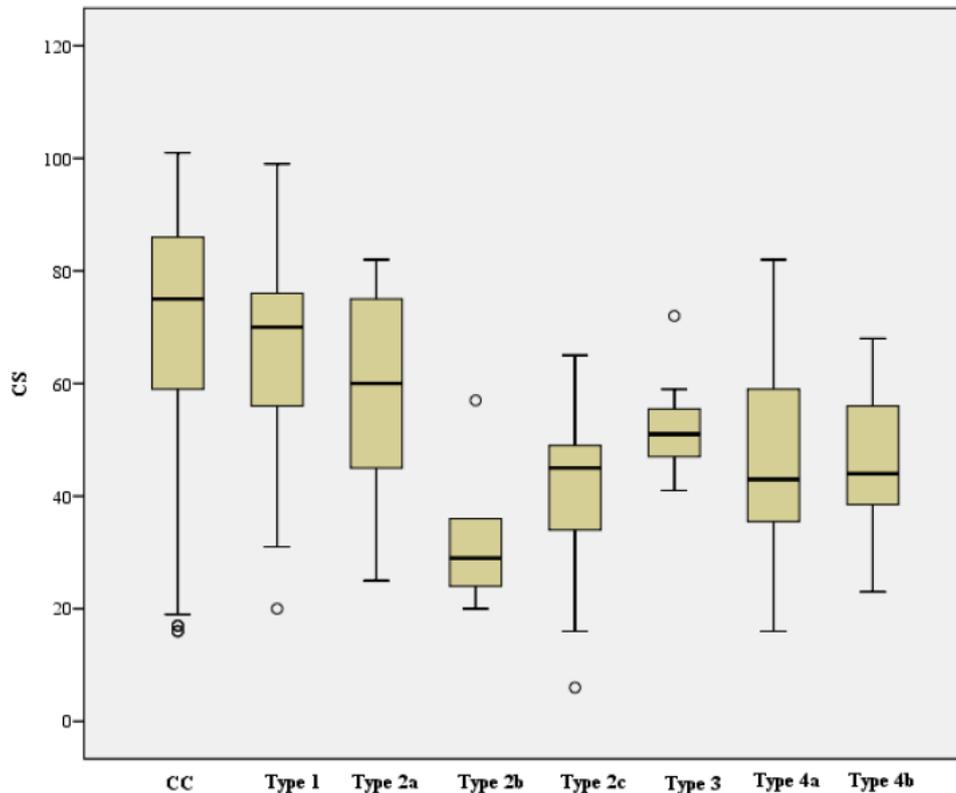


Abbildung 4

Boxplots der CS-Punktwerte sowie Vergleich zwischen der Gruppe ohne Komplikationen (CC) und den vorgestellten Komplikationstypen.

Insgesamt wurden 136 Revisionsoperationen durchgeführt, wobei wenige schwere Fälle mehrfach revidiert werden mussten. Komplikationen vom Typ 1 wurden nur in seltenen Fällen revidiert und wenn dann durch Implantatentfernung. Komplikationen vom Typ 2a wurden meist durch frühe Implantatentfernung (< 9 Monate nach Trauma) oder Schraubenneupositionierung bzw. -austausch revidiert. Die Revisionsstrategien für Typ 2b Komplikationen waren heterogener; hier dominierten die Reosteosynthese sowie der Gelenkersatz mit Implantation einer Hemiprothese oder inversen Schultertotalendoprothese. Komplikationen vom Typ 2c und Typ 4 wurden meist in einen Gelenkersatz konvertiert, wohingegen Typ 3 Komplikationen meist durch Reosteosynthese revidiert wurden. Die erhobenen PROMs wiesen im Mittel mit steigendem Komplikationstyp niedrigere Werte auf. Ebenso gingen komplexere Frakturmuster nach Neer und AO signifikant häufiger mit einer Komplikation bzw. Revision ( $p < 0,001$ ) einher.

Die Komplikationsraten nach winkelstabiler Plattenosteosynthese variieren in der Literatur und

hängen ganz wesentlich von der jeweiligen Komplikationsdefinition und -klassifikation ab. [9, 10] Betrachtet man die Gesamtkomplikationsrate im untersuchten Kollektiv, so entspricht sie im Wesentlichen den Zahlen aus Vorarbeiten. [9, 68] Das vorgestellte Klassifikationssystem ist dahingehend von Bedeutung, dass es hier die Möglichkeit der Vereinheitlichung in zukünftigen Untersuchungen bietet, wodurch diese Arbeiten vergleichbarer werden. Außerdem macht die Untersuchung des funktionellen Ergebnisses und Evaluation der Revisionseingriffe eine prognostische Aussage für Patient\*innen mit einer solchen Komplikation möglich.

## Publikation D

**Fleischhacker E**, Sprecher CM, Milz S, Saller MM, Wirz R, Zboray R, Parrilli A, Gleich J, Siebenbürger G, Böcker W, Ockert B, Helfen T. Inflammatory tissue response in human soft tissue is caused by a higher particle load near carbon fiber-reinforced PEEK compared to titanium plates. *Acta Biomater.* 2024 May;180:128-139. doi: 10.1016/j.actbio.2024.04.023.

### Zusammenfassung

Osteosyntheseplatten werden in verschiedenen medizinischen Fachbereichen für die Rekonstruktion von Knochenbrüchen und -defekten verwendet und sind daher für Unfallchirurgen, Mund-Kiefer-Gesichtschirurgen und viele andere unverzichtbar. Das führende Implantatmaterial sind Metalle wie Titan, in letzter Zeit drängten jedoch auch Implantate aus Polymeren wie kohlenstofffaserverstärktem Polyetheretherketon (CFR-PEEK) auf den Markt. Über die Reaktion des menschlichen Organismus und die Partikelbildung im Zusammenhang mit diesen neuen Implantatmaterialien ist jedoch nur wenig bekannt. Daher wurden in dieser Studie Osteosyntheseplatten und periimplantäre Weichgewebeproben von 16 verheilten proximalen Humerusfrakturen untersucht (n = 8 CFR-PEEK (PEEKPower® humeral fracture plate, Arthrex, Naples, Florida, USA), n = 8 Titan (PHILOS®, DePuy Synthes, Johnson & Johnson Medical, Raynham, Massachusetts, USA)). Beide Platten werden mit Schrauben aus Titanlegierungen am Knochen fixiert. Sie wurden im Rahmen von Implantatentfernungen entnommen, wobei die Patient\*innen den zweiten Eingriff aufgrund von persistierenden Bewegungseinschränkungen und/oder Schmerzen wünschten. Das Weichgewebe wurde mittels Immunhistochemie,  $\mu$ CT und HR-CT analysiert. Die eingeschlossenen Fremdkörper wurden außerdem mit Hilfe der FTIR auf ihre Materialzusammensetzung untersucht. Um einen Einblick in die Herkunft der Partikel und ihren Entstehungsmechanismus zu erhalten, wurden explantierte und neue Platten einer SEM, EDX, Profilometrie und HR-CT unterzogen. Die  $\mu$ CTs der Weichgewebeproben von beiden Materialien zeigten eingeschlossene Fremdkörper unterschiedlicher Form, Konfiguration und Größe (siehe Abb. 5).

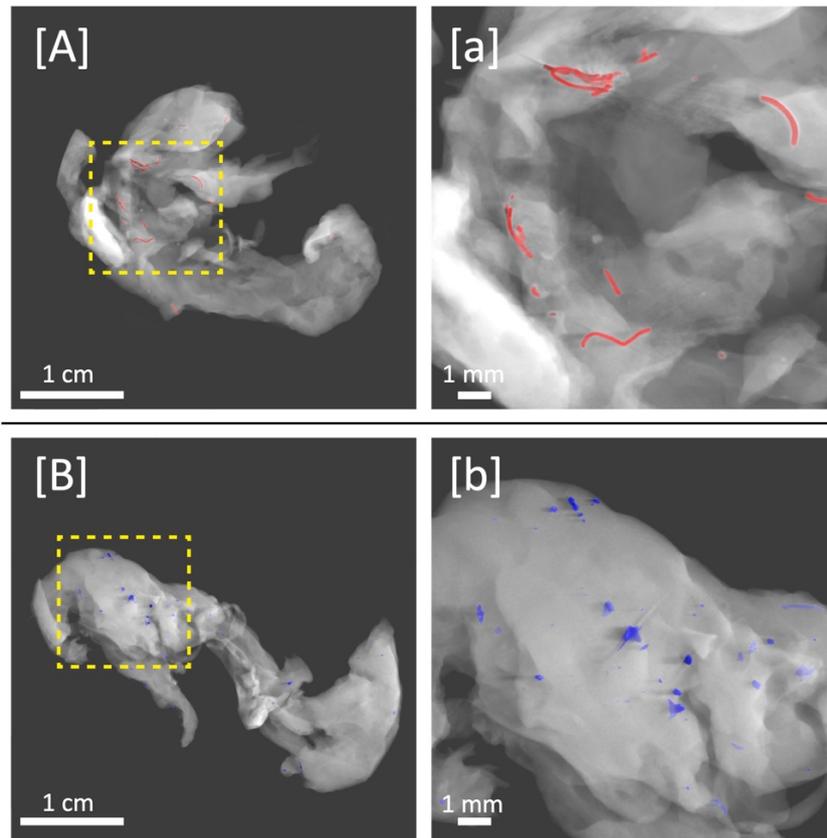


Abbildung 5

μCT-Aufnahmen der Weichgewebeproben von einer Patientin mit einer CFR-PEEK- ([A] und Zoom in [a]) bzw. einem Patienten mit einer Titanplatte ([B] und Zoom in [b]). In rot bzw. blau sind die eingeschlossenen Fremdkörper dargestellt.

Das periimplantäre Weichgewebe der CFR-PEEK-Platten wies in den immunhistochemischen Untersuchungen mit Antikörpern gegen CD68, CD163, MRP8/14 und 25F9 mehr positive Zellen auf als die Weichgewebe von den Titanplatten (siehe Abb. 6). Dabei waren die Unterschiede in der semiquantitativen Auswertung (siehe Abb. 7) für 25F9 ( $p = 0,038$ ) und MRP8/14 ( $p = 0,027$ ) auch statistisch signifikant. CD68 ist ein universeller Makrophagenmarker, CD163 hingegen wird vor allem auf anti-inflammatorisch wirkenden M2-Makrophagen exprimiert, 25F9 markiert vorwiegend gewebeständige reife Makrophagen und MRP8/14 Monozyten und Neutrophile.

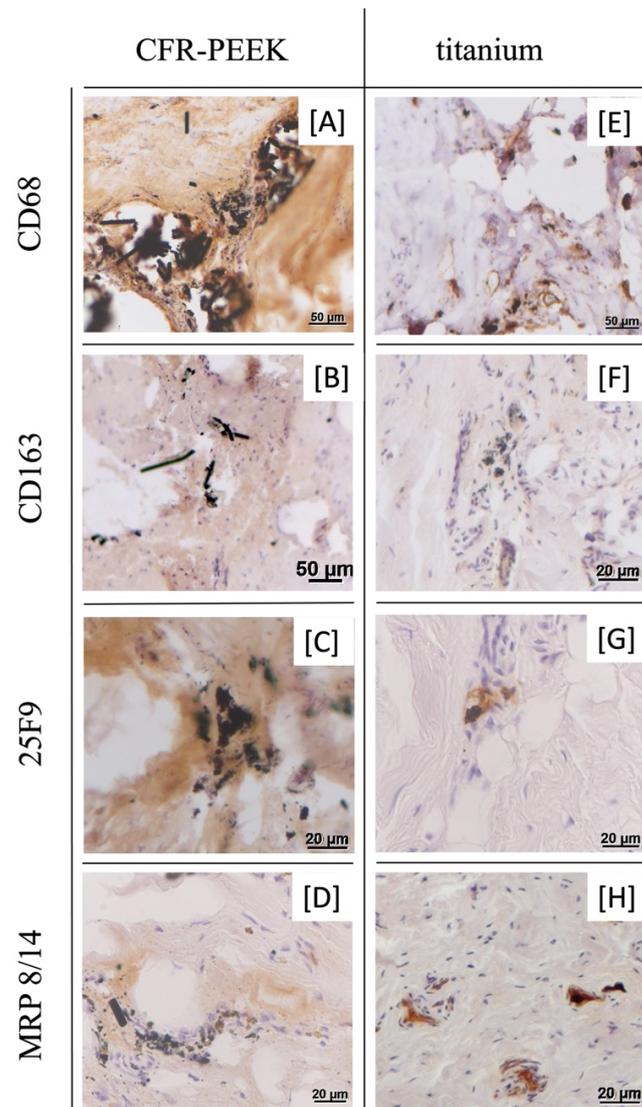


Abbildung 6

Aufnahmen der Weichgewebeproben nach immunhistochemischen Färbungen. [A] - [D] sind Proben von CFR-PEEK-Platten und [E] - [H] von Titanplatten. Die positiven Zellen sind braun, sie sind vor allem um kleine Partikel gruppiert.

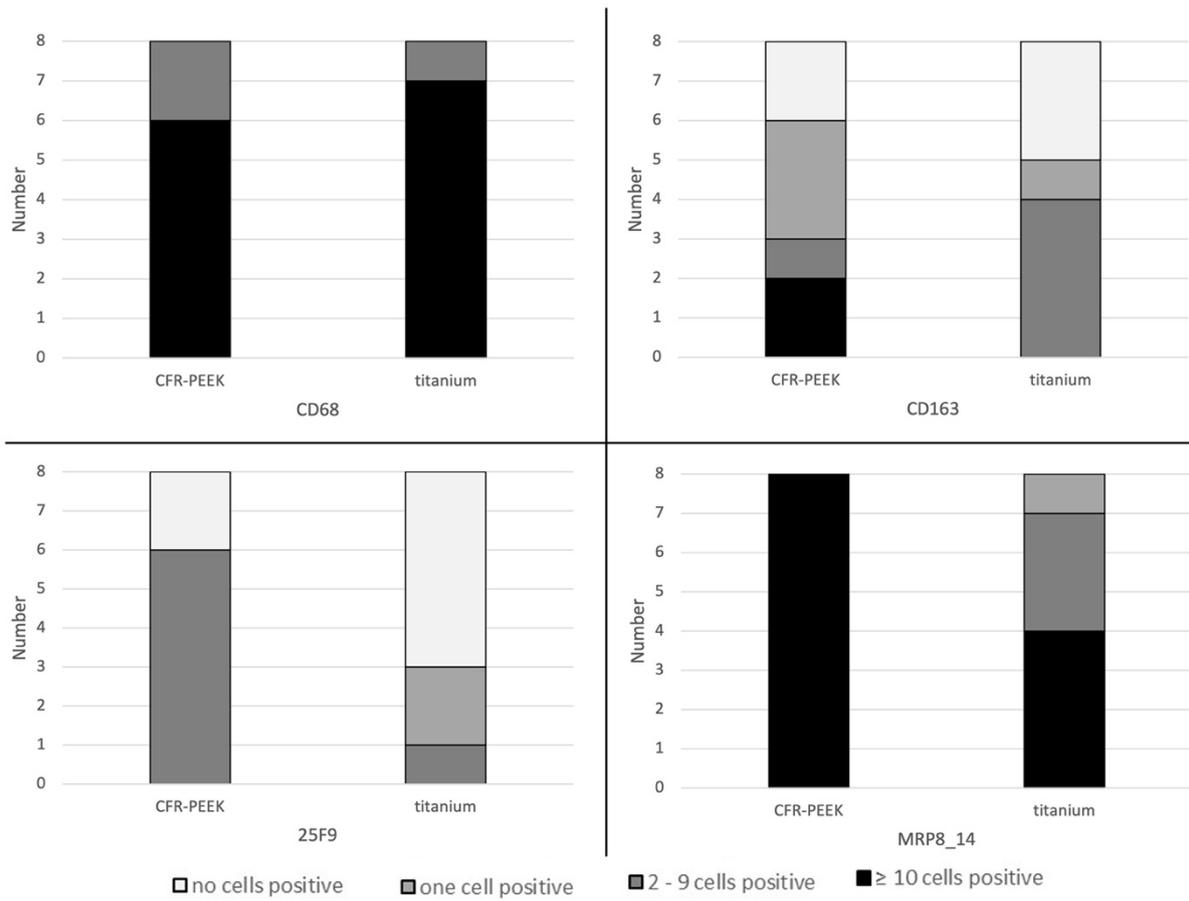


Abbildung 7

Grafische Darstellung der Ergebnisse der semiquantitativen Auswertung der immunhistochemischen Proben. Der linke Balken zeigt die Proben von CFR-PEEK-Platten und der rechte die der Titanplatten.

Die Fremdkörper im Gewebe über CFR-PEEK-Platten konnten mittels FTIR (siehe Abb. 8) und HR-CT als Tantaldrähte, Kohlefaserfragmente und PEEK-Partikel identifiziert werden. Im periimplantären Weichgewebe der Titanplatten hingegen wurden Titanpartikel gefunden.

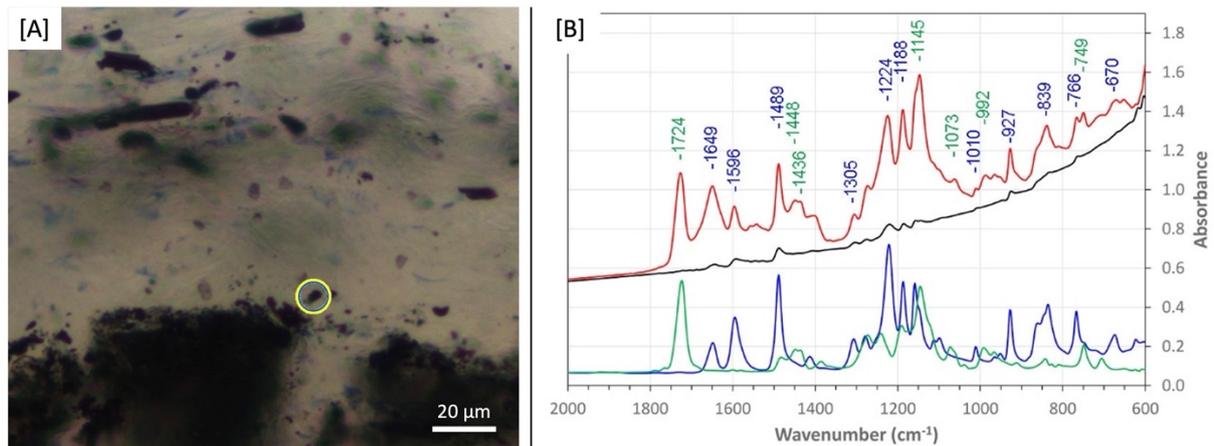


Abbildung 8

FTIR-Mikroskopie von in PMMA eingebettetem periimplantärem Gewebe nach Giemsa-Eosin-Färbung. Der untersuchte Fremdpartikel ist im optischen Bild [A] mit einem gelben Ring markiert. Das entsprechende FTIR-Spektrum ist in [B] als rote Linie dargestellt. Der Vergleich mit Referenzspektren von PEEK (blaue Linie), Kohlenstofffasern (schwarze Linie) und PMMA (grüne Linie) weisen den Partikel als Verbundwerkstoff aus PEEK und Kohlenstofffasern mit PMMA-Resten aus.

Die Oberfläche der explantierten CFR-PEEK-Platten war rauer und wies in der HR-CT bzw. SEM freiliegende und gebrochene Kohlenstofffasern sowie hervorstehende und deformierte Tantaldrähte auf, insbesondere in den benutzten Schraubenlöchern (siehe Abb. 9). Auf der Oberfläche der Titanplatten hingegen wurden Kratzer festgestellt (siehe Abb. 10).

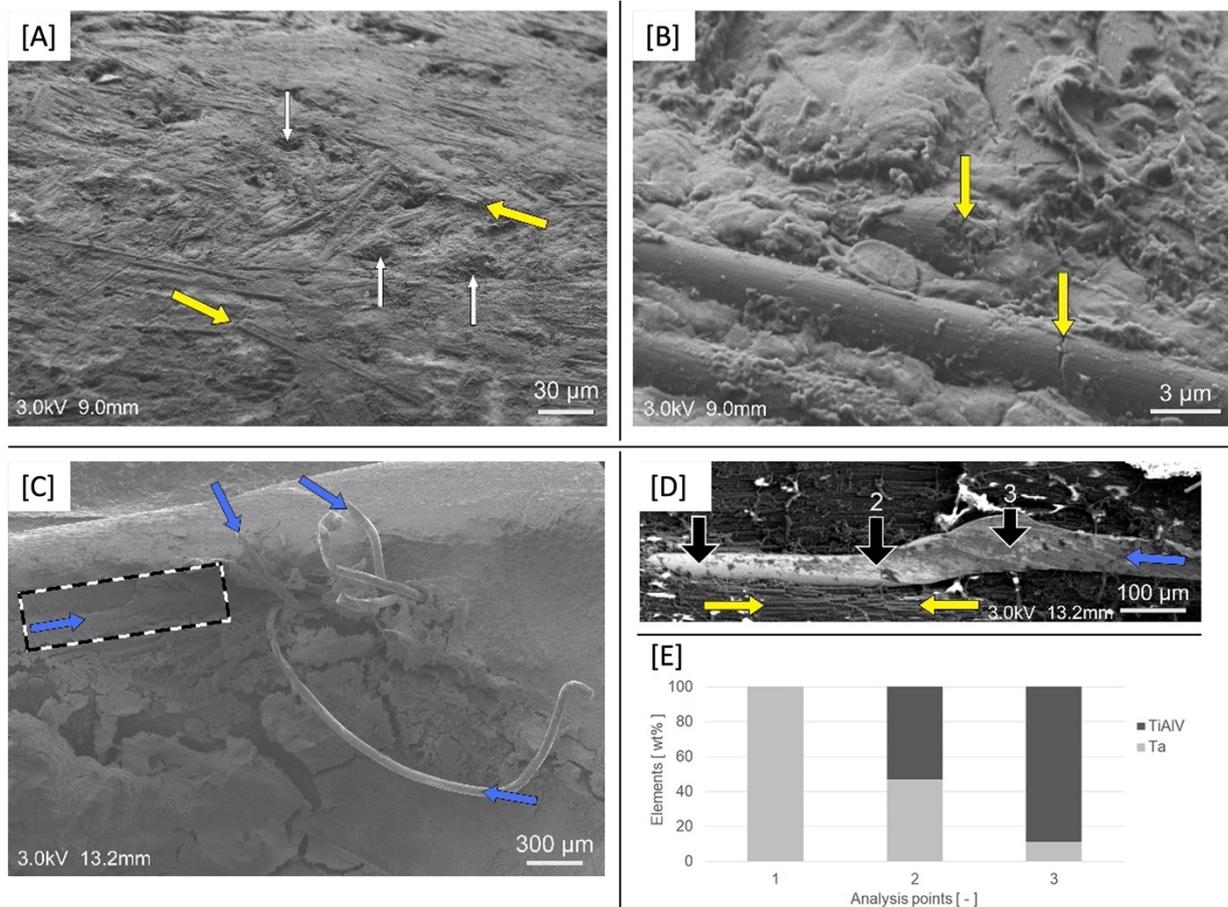


Abbildung 9

Bilder einer explantierten CFR-PEEK-Platte im SEM. Bei geringerer Vergrößerung in [A] erscheint die Oberfläche recht rau mit Vertiefungen (weiße Pfeile). Mehrere Kohlenstofffasern (gelbe Pfeile) liegen frei, andere sind mit PEEK bedeckt. Bei höherer Vergrößerung in [B] wurden Risse und Brüche von Kohlenstofffasern festgestellt. In einem benutzten Schraubenloch einer explantierten CFR-PEEK-Platte [C] fielen die mit blauen Pfeilen markierten, abstehenden, verdrehten und verbogenen Tantaldrähte auf. Bei näherer Betrachtung (Areal mit schwarz-weißer Markierung in [C]) und in [D] ist ein Tantaldraht zu sehen. Der Draht erscheint teilweise nicht rund, sondern plattgedrückt und verformt. [E] zeigt die Ergebnisse der EDX in diesem Bereich: Die dunkelgrauen Balken entsprechen dem Grad der Verformung sowie dem Gehalt an Titan-Aluminium-Vanadium (TiAlV, Schraubenmaterial) im Verhältnis zu Tantal (Ta). Die schwarzen Pfeile in [D] entsprechen den Balken des Diagramms in [E].

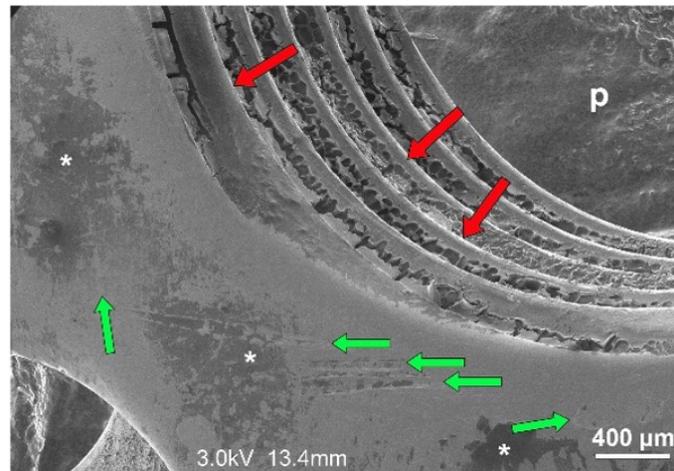


Abbildung 10

SEM-Aufnahme der Oberfläche und eines gebrauchten Schraubenlochs einer explantierten Titanplatte. Auf der Oberfläche sind einige kleinere Kratzer zu sehen (hellgrüne Pfeile), wobei das Gewinde intakt erscheint (rote Pfeile) und mit biologischen Rückständen bedeckt ist. Auch auf der glatten Oberfläche sind Rückstände als dunklere Bereiche zu finden (\*). p markiert das leitfähige Präparationsmaterial.

Dies ist zum Zeitpunkt der Veröffentlichung und nach dem Wissensstand der Autor\*innen die erste Arbeit, bei der humanes Gewebe aufgearbeitet wurde, welches sich über einer Osteosyntheseplatte aus CFR-PEEK bzw. Titanlegierung gebildet hatte. Zusammenfassend zeigt sie, dass im Weichgewebe der untersuchten CFR-PEEK-Platten deutlich mehr Partikel zu finden waren als über den Platten aus Titanlegierung. Diese Partikel induzieren zudem eine stärkere inflammatorische Gewebereaktion. Die Autorinnen und Autoren vermuten, dass sich die Partikel beim Eindrehen der Titanschrauben in die CFR-PEEK-Platten gebildet haben. Diese Hypothese wird durch die SEM- und HR-CT-Ergebnisse gestützt, die zeigten, dass sich Kohlenstofffasern und Tantaldrähte im Schraubenloch teilweise aus dem Plattenverbund gelöst haben und mit Rückständen des Schraubenmaterials belegt waren. Partikel aus beiden Plattenmaterialien verursachten eine nachweisbare Gewebeinflammation, wobei im Weichgewebe über CFR-PEEK-Platten mehr Entzündungszellen gefunden wurden als über Titanplatten. Die Ergebnisse werden von einer tierexperimentellen Arbeit gestützt, bei der um PEEK-Implantate in Mäusen ebenfalls eine stärkere Inflammation festgestellt werden konnte als um Titanimplantate. [69] Weiterhin zeigten Vorarbeiten, dass die Partikel von ca. 3 µm Größe durch Makrophagen aufgenommen werden können und die Polarisation vom M0- zum proinflammatorischen M1-Phänotyp stimulieren. [70] Hierdurch wird die Fibroblastenproliferation angeregt, welche wiederum im Verdacht steht Bewegungslimitationen zu begünstigen. [71] Weitere Untersuchungen sind notwendig, um die Mechanismen genauer zu untersuchen.

## Publikation E

**Fleischhacker E**, Sprecher C, Milz S, Saller M, Gleich J, Siebenbürger G, Helfen T, Böcker W, Ockert B. Functional outcomes before and after implant removal in healed proximal humerus fractures: does implant material (PEEK vs. titanium) have an impact? – a pilot study. BMC Musculoskeletal Disorders. 2022 Jan 27;23(1):95. doi: 10.1186/s12891-022-05061-x.

### Zusammenfassung

Eine gefürchtete Komplikation nach proximaler Humerusfraktur bleibt die Entwicklung einer posttraumatischen Schultersteife. Obwohl diese Frakturen sowohl bei konservativer als auch bei operativer Therapie gute Heilungsraten aufweisen, wird das funktionelle Ergebnis in einigen Fällen durch Bewegungseinschränkung und Schmerzen gemindert. In einigen Studien wird ein Auftreten in bis zu 50 % der Fälle beschreiben. [15] Die genauen Ursachen sind jedoch weiterhin nicht geklärt, insbesondere nicht inwiefern periartikuläre Verwachsungen eine Rolle spielen und ob diese bei unterschiedlichen Implantatmaterialien verschieden ausgeprägt auftreten. Dies ist die Fragestellung dieser klinischen Pilotstudie.

Eingeschlossen wurden n = 16 Patient\*innen, die nach proximaler Humerusfraktur entweder mit einer Platte aus CFR-PEEK (n = 8; PEEKPower® humeral fracture plate, Arthrex, Naples, Florida, USA) oder einer Platte aus Titanlegierung (n = 8; PHILOS®, DePuy Synthes, Johnson & Johnson Medical, Raynham, Massachusetts, USA) operativ behandelt worden waren und aufgrund von persistierenden Bewegungseinschränkungen und/oder Schmerzen die Implantatentfernung (IR) wünschten. Die Frakturheilung war zuvor röntgenologisch sichergestellt worden und der zweite Eingriff erfolgte über den gleichen Zugang wie der erste. Es wurden sowohl die Implantate als auch das periimplantäre Weichgewebe entfernt. Als primären Outcomeparameter wurde die Beweglichkeit vor und nach der Implantatentfernung bestimmt. Außerdem wurden der CS und der %CS ein Jahr postoperativ erhoben.

In der CFR-PEEK-Gruppe (PEEK) betrug die Elevation  $116,3^\circ \pm 19,2^\circ$  vor und  $129,4^\circ \pm 23,7^\circ$  nach IR ( $p = 0,027$ ). Die Außenrotation mit dem Oberarm in Neutralstellung lag vor IR bei  $35,0^\circ \pm 7,6^\circ$  und danach bei  $50,6^\circ \pm 21,8^\circ$  ( $p = 0,041$ ). Die Außenrotation bei um  $90^\circ$  abduziertem Oberarm betrug  $38,8^\circ \pm 18,1^\circ$  vor und  $52,5^\circ \pm 25,5^\circ$  nach IR ( $p = 0,024$ ). In der Titan-Gruppe (Ti) lag die Elevation vor IR bei  $110,0^\circ \pm 34,6^\circ$  und danach bei  $133,8^\circ \pm 31,1^\circ$  ( $p = 0,011$ ). Die Außenrotation mit dem Oberarm in Neutralstellung betrug vor IR  $33,8^\circ \pm 23,1^\circ$  und danach  $48,8^\circ \pm 18,7^\circ$  ( $p = 0,048$ ). Die Außenrotation bei  $90^\circ$  abduziertem Oberarm lag in dieser Gruppe vor IR bei  $40,0^\circ \pm$

31,6° und bei 52,5° ± 22,5° danach (p = 0.011). Der Vergleich der beiden Implantatmaterialien ergab im Hinblick auf den Bewegungsumfang in diesem kleinen Patientenkollektiv keinen signifikanten Unterschied (siehe Abb. 11). Allerdings ist in beiden Vergleichsgruppen eine deutliche Besserung des Bewegungsumfangs von prä- hin zu postoperativ nachweisbar. Diese objektive Verbesserung zeigte sich ebenso in den Zufriedenheitswerten der Patient\*innen: 87,5% berichteten auch von einer subjektiven Besserung und würden den zweiten Eingriff weiterempfehlen.

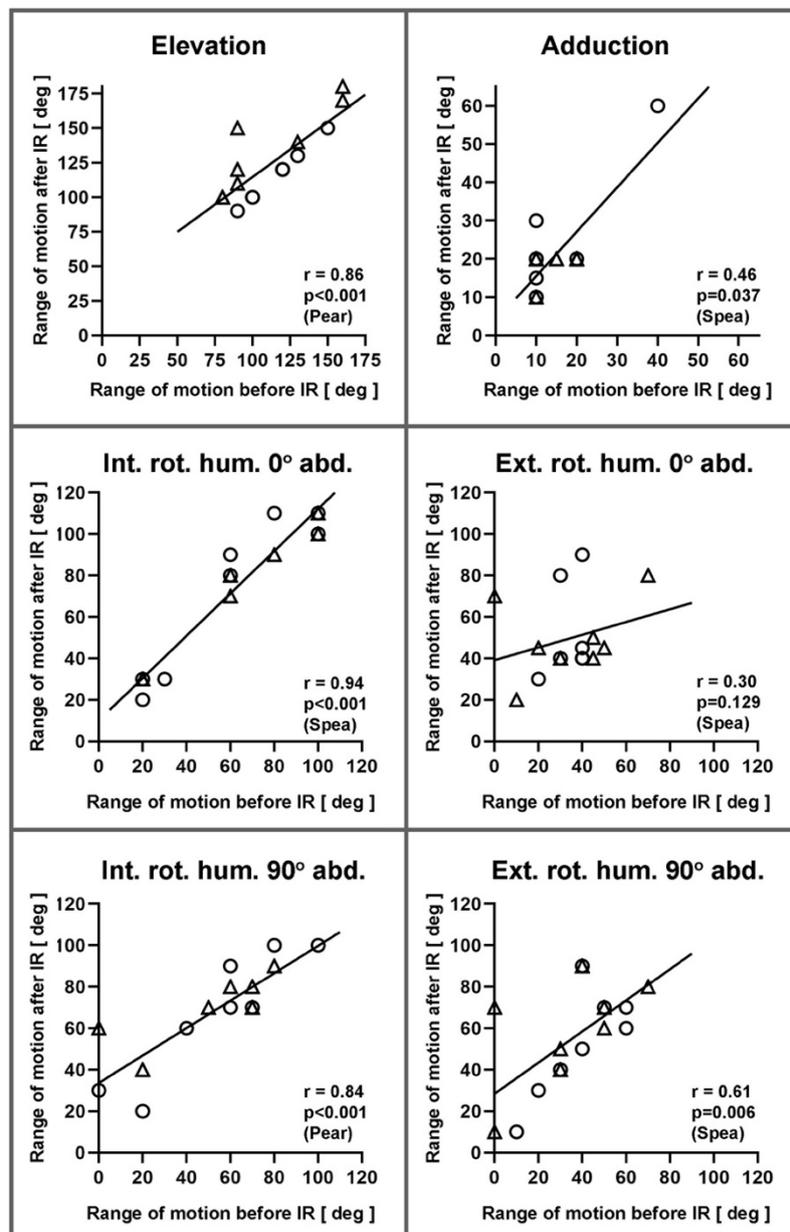


Abbildung 11

Korrelationsanalysen (Pearson und Spearman) des Bewegungsumfangs vor und nach IR. Die Kreise symbolisieren Patient\*innen mit PEEK-Implantaten und die Dreiecke die mit Implantaten aus Titanlegierung.

Ein Jahr postoperativ lag der CS im Mittel bei  $90,3 \pm 8,8$  Punkten und der %CS betrug  $91,8\% \pm 14,7\%$ . Zwischen den beiden Implantatmaterialgruppen gab es auch hier keinen statistisch signifikanten Unterschied (siehe Abb. 12).

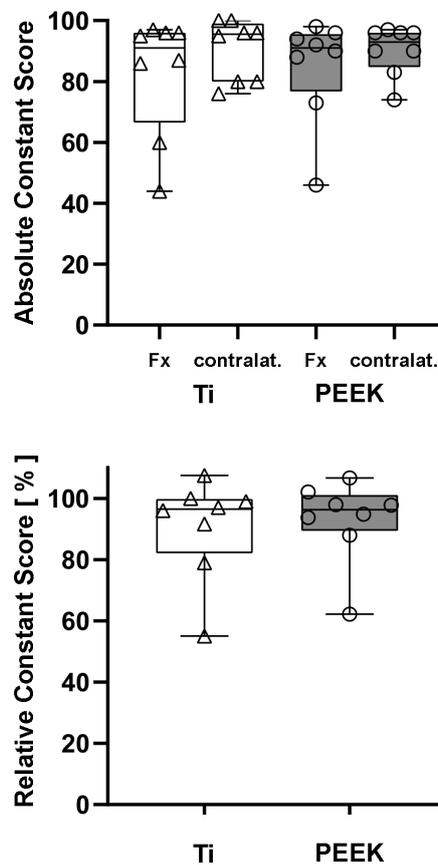


Abbildung 12

Vergleichende Darstellung des CS (oben) und %CS (unten) zwischen den Implantatgruppen.

Obwohl für das hydrophobe PEEK eine geringere Zelladhäsion berichtet wird [7], zeigte sich in dieser Pilotstudie im klinischen Ergebnis kein Unterschied zwischen der Vergleichsgruppen. Weder im Hinblick auf den Bewegungsumfang noch bezüglich des CS und %CS nach einem Jahr waren signifikante Unterschiede abgrenzbar. Allerdings wiesen alle Patient\*innen nach Implantatentfernung und Exzision der periimplantären Weichgewebes bessere funktionelle Ergebnisse auf. Diese Ergebnisse gehen einher mit denen von Vorarbeiten aus der Literatur. [72-74] Allerdings untersuchte bislang sonst niemand den Effekt des Implantatmaterials. Die meisten Publikationen beschäftigen sich vorwiegend mit dem Zeitpunkt bzw. der Art und Weise (z.B. arthroskopisch gestützt) des IR, Waszykowski et al. hingegen betonen auch einen positiven Effekt durch die Entfernung des periimplantären Weichgewebes. [72-74]

Als Fazit für die Klinik wird daher unabhängig vom Implantatmaterial bei Patient\*innen mit posttraumatischer Schultersteife nach ORIF einer proximalen Humerusfraktur die Implantatentfernung mit Exzision des darüberliegenden Weichgewebes empfohlen.

## Publikation F

Biermann N, Schirren M, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Helfen T, Böcker W, Ockert B. Glenohumeral joint lavage does not affect clinical outcomes in open reduction and internal fixation of displaced intracapsular proximal humeral fractures: a prospective, randomized, double-blinded trial. *J Shoulder Elbow Surg.* 2020 Sep;29(9):1758-1764. doi: 10.1016/j.jse.2020.04.026. Epub 2020 Jun 9.

### Zusammenfassung:

Die posttraumatische Schultersteife nach proximaler Humerusfraktur bleibt eine gefürchtete Komplikation, wobei die Ursachen noch immer nicht geklärt sind. [71] Eine Theorie beruht auf der Tatsache, dass im Rahmen der Fraktur und anschließenden intrakapsulären Hämatombildung vermehrt proinflammatorische Zytokine ausgeschüttet werden, die eine Inflammation der Kapsel bedingen und zur Schultersteife, ähnlich der idiopathischen frozen shoulder, führen. [18] Um das intrakapsuläre Zytokinlevel zu senken, wurde bei den Probandinnen und Probanden dieser prospektiv-randomisierten und doppelt verblindeten Studie intraoperativ eine Gelenklavage durchgeführt.

Zwischen Januar 2016 und April 2018 wurden dazu 72 Patient\*innen mit dislozierten intrakapsulären proximalen Humerusfrakturen eingeschlossen und durch offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese therapiert. Bei den Teilnehmenden in der Versuchsgruppe wurde außerdem eine glenohumerale Gelenklavage (siehe Abb. 13) durchgeführt. Dazu wurden mit Hilfe einer 15G Parazentesenadel, welche im anterioren Rotatorenintervall zwischen den Sehnen des M. supraspinatus und M. subscapularis platziert worden war, 50 ml sterile, isotonische Kochsalzlösung infundiert und anschließend durch Aspiration wieder entfernt. Um Koagel zu lösen und aspirabel zu machen, wurde zwischen den Spülgängen der Arm in der Schulter durchbewegt. Der Spülvorgang wurde beendet, wenn nur noch klare Flüssigkeit zu aspirieren war.

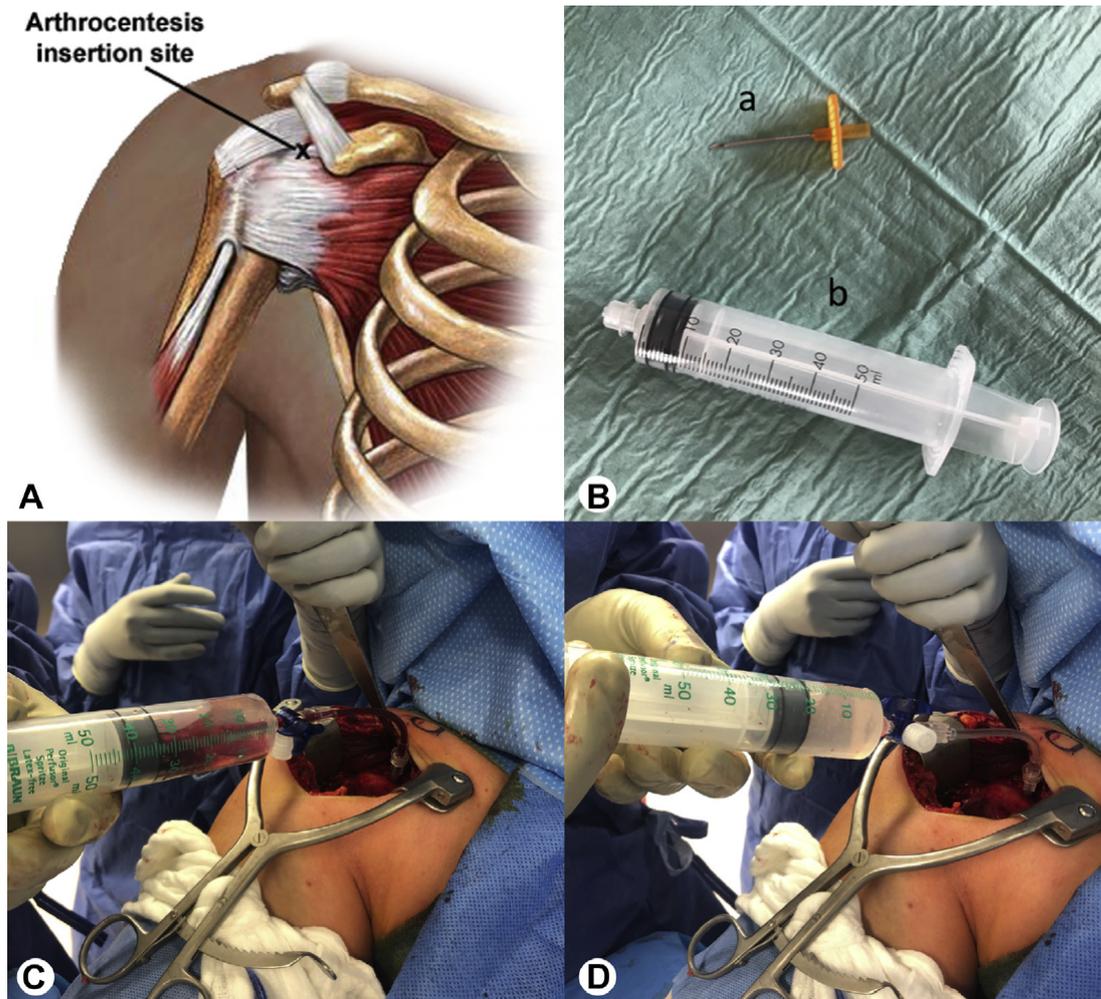


Abbildung 13

Bildtafel über den Ablauf der Gelenklavage: (A) zeigt die Einstichstelle der Nadel für die Lavage; (B) das hierfür verwendete Instrumentarium. Nach Platzieren der Nadel im Glenohumeralgelenk, wurde der Hämarthros zunächst abgesaugt und 50 ml Kochsalzlösung injiziert (C). Dann wurde die Schulter durchbewegt, um das Hämatom zu mobilisieren und die Flüssigkeit wieder aspiriert. Dieser Vorgang wurde wiederholt, bis sich nur noch klare Flüssigkeit aspirieren ließ (D).

Zehn Patient\*innen schieden im Verlauf des ersten Jahres aus, sodass die Daten von 62 Patient\*innen (n = 31 Gruppe L (Lavage); n = 31 Gruppe NL (No Lavage)) ausgewertet werden konnten. Primäre Outcomeparameter waren der Bewegungsumfang, die Kraft und der CS im verletzten Arm sowie auf der Gegenseite. Die Evaluation erfolgte jeweils nach 6 Wochen, 3 Monaten, 6 Monaten und 12 Monaten. Die Untersucher hatten im Hinblick auf die Gruppenzugehörigkeit, wie auch die Patient\*innen, keine Kenntnis.

Zum finalen Endpunkt nach 12 Monaten betrug der CS in Gruppe L  $70 \pm 14$  und in Gruppe NL  $73 \pm 14$  und unterschied sich damit nicht signifikant ( $p = 0,272$ ) (siehe Abb. 14). Auch im Hinblick auf den Bewegungsumfang waren keine Unterschiede abzugrenzen. Die Komplikationsrate lag im gesamten Kollektiv bei 9,6 % und unterschied sich zwischen den Gruppen nicht ( $p = 0,321$ ).

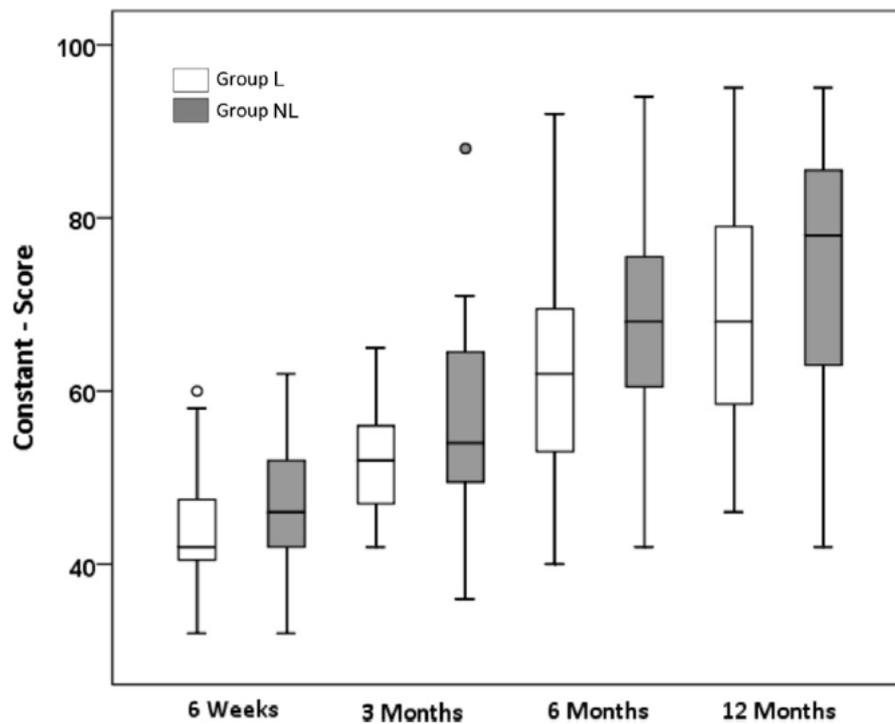


Abbildung 14

Boxplots der Constant Score Punkte für die beiden Untersuchungsgruppen 6 Wochen, 3 Monate, 6 und 12 Monate postoperativ.

Bis zu diesem Zeitpunkt gab es keine Studie, die sich mit der Prävention einer posttraumatischen Schultersteife durch Gelenklavage beschäftigte. Einige Vorarbeiten untersuchten lediglich die Behandlung der posttraumatischen Schultersteife. So zeigten Elhassan et al. und Levy et al., dass durch ein arthroskopisches Kapselrelease die Symptome gemildert und der Bewegungsumfang verbessert werden können. [16, 75] Eine andere Studie aus dem Bereich der Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie zeigte, dass durch Arthrozentese die intraartikulären Zytokinlevel gesenkt und der Bewegungsumfang des Kiefergelenks verbessert werden konnten. [76] Unsere Arbeit konnte diese Ergebnisse für das Glenohumeralgelenk nicht bestätigen: Eine Gelenklavage beeinflusste das postoperative funktionelle Ergebnis nicht positiv und das Risiko für das Auftreten einer posttraumatischen Schultersteife konnte so nicht gemindert werden kann.

## Publikation G

Helfen T, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Gleich J, Böcker W, Ockert B. Operative treatment of 2-part surgical neck type fractures of the proximal humerus in the elderly: Cement augmented locking plate PHILOS™ vs. proximal humerus nail multiloc®. Injury. 2020 Oct;51(10):2245-2252. doi: 10.1016/j.injury.2020.06.026. Epub 2020 Jun 16.

### Zusammenfassung:

2-Part-Frakturen im Bereich des Collum chirurgicum, sogenannte Neer III-2-Frakturen bzw. 11-A3 nach AO, haben aufgrund ihrer Konfiguration und der auf die Fragmente einwirkenden Muskelkräfte ein erhöhtes Risiko für sekundäre Dislokationen nach offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese. [77] Besonders ältere Patient\*innen mit eingeschränkter Knochenqualität sind hiervon betroffen, da bei ihnen aufgrund der geringeren Spongiosadichte die Möglichkeit der stabilen Impaktation in diesem Bereich herabgesetzt zu sein scheint. [77-79] Außerdem bietet der poröse ältere Knochen weniger Verankerungsstabilität für die Schrauben bei winkelstabilen Plattenosteosynthesen. [79] Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurden verschiedene Implantate und additive Verfahren wie die Zementaugmentation oder multiplanar verriegelbare Marknägel entwickelt. Eine klinische Überlegenheit dieser Implantate konnte bislang jedoch nicht nachgewiesen werden. Ziel dieser randomisiert kontrollierten Studie war es daher die zementaugmentierte winkelstabile Plattenosteosynthese mit einem multiplanar verriegelbaren Marknagel bei 2-Part-Frakturen zu vergleichen.

Eingeschlossen wurden 60 Patient\*innen mit einem Alter  $\geq 60$  Jahre und nachgewiesener 2-Part-Fraktur im CT. Jeweils  $n = 30$  von ihnen wurden entweder in die Gruppe LP, zementaugmentierte winkelstabile Plattenosteosynthese (PHILOS®, DePuy Synthes, Umkirch, Germany) oder die Gruppe IN (MultiLoc®, DePuy Synthes, Umkirch, Germany) randomisiert. Primärer Outcomeparameter war der DASH mit einem minimalen klinisch-relevanten Unterschied (minimal clinically important difference = MCID) von 15 Punkten. Außerdem wurden der CS, SF-36, ASES und OSS evaluiert. Alle Scores wurden 6 Wochen, 3 Monate, 6 Monate, 12 und 24 Monate postoperativ erhoben. Außerdem wurde zu allen Untersuchungszeitpunkten eine standardisierte Röntgenuntersuchung der Schulter in 2 Ebenen durchgeführt, um eine eventuelle sekundäre Dislokation zu erfassen und die Qualität der Reposition zu beurteilen. Desweiteren wurden das Auftreten von Komplikationen und

Revisionsoperationen evaluiert. Die Operation erfolgte durch die Autoren der Studie, erfahrene Unfallchirurgen mit  $\geq 50$  Schulteroperationen pro Jahr, die mit beiden Implantaten vertraut waren. In Gruppe LP wurden bei allen Patient\*innen sieben Schrauben im Bereich des Humeruskopfes platziert, von denen entweder die in Reihe A und E oder B und D mit jeweils 0,5ml Traumacem V+ (DePuy Synthes, Umkirch, Germany) augmentiert wurden. Der MultiLoc®-Nagel wurde bei allen Teilnehmenden in der Länge 160 mm implantiert und im Humeruskopf mit 4,5mm durchmessenden MultiLoc®-Schrauben fixiert. Optional wurden zwei 3,5 mm durchmessende screw-in-screw-Schrauben im Loch A und/oder B eingebracht.

Das mittlere Alter betrug  $75 \pm 9,8$  Jahre, 70 % (Gruppe LP) bzw. 66,7 % (Gruppe IN) der Teilnehmenden waren weiblich ( $p = 1$ ) und auch im Hinblick auf die anderen demographischen Variablen lag zwischen den Versuchsgruppen kein signifikanter Unterschied vor. 10 Patient\*innen ( $n = 5$  Gruppe LP,  $n = 5$  Gruppe IN) waren lost-to-follow up, sodass die Daten von insgesamt  $n = 50$  Teilnehmenden ausgewertet werden konnten. Signifikante Unterschiede wiesen der DASH-Score ( $32,6 \pm 9,7$  Gruppe LP vs.  $37,8 \pm 8,3$  Gruppe IN;  $p = 0,04$ ; siehe Abb. 15) und der OSS ( $43,7 \pm 8,1$  Gruppe LP vs.  $38,2 \pm 10$  Gruppe IN;  $p = 0,03$ ; siehe Abb. 16) nach 24 Monaten auf.

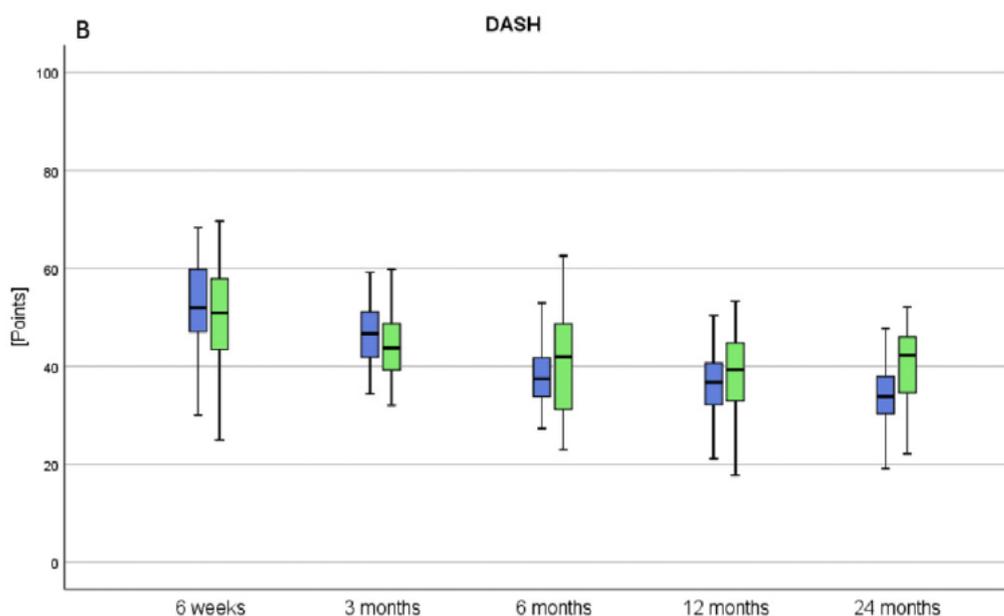


Abbildung 15

Boxplots der Versuchsgruppen in Bezug auf den erreichten Punktwert bei der Erhebung des DASH-Scores nach 6 Wochen, 3 Monaten, 6 Monaten, 12 und 24 Monaten. Blau hinterlegt sind die Ergebnisse der Gruppe LP und grün die der Gruppe IN.

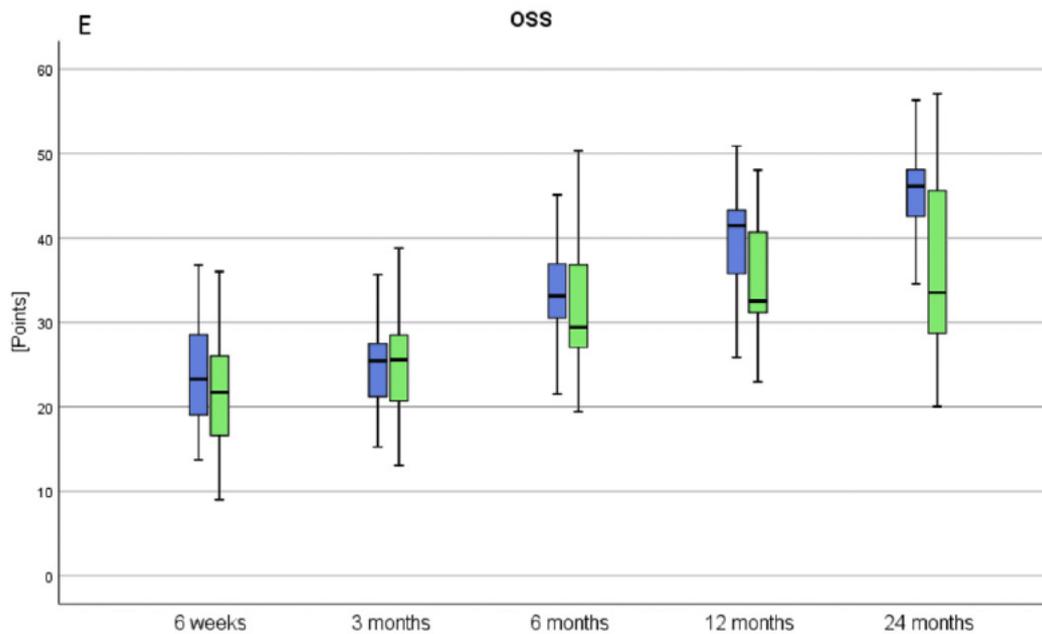


Abbildung 16

Boxplots der Versuchsgruppen in Bezug auf den erreichten Punktwert bei der Erhebung des OSS nach 6 Wochen, 3 Monaten, 6 Monaten, 12 und 24 Monaten. Blau hinterlegt sind die Ergebnisse der Gruppe LP und grün die der Gruppe IN.

Weder unmittelbar postoperativ noch nach 24 Monaten zeigten sich zwischen den Versuchsgruppen im Hinblick auf den CCD-Winkel signifikante Unterschiede, ebenso mit Blick auf sekundäre Dislokationen im Verlauf. 35,6 % aller Schrauben in Gruppe LP wurden zementaugmentiert und in 30 % der Fälle wurde in Gruppe IN eine screw-in-screw-Schraube eingebracht. In Gruppe IN wurde in zwei Fällen unmittelbar postoperativ eine Schraubenfehlage festgestellt, die in einem Fall zur Revision führte. In Gruppe LP trat in zwei Fällen im Verlauf ein Ausschneiden von Schrauben nach intraartikulär auf, was in einem Fall zur Revision führte.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass beide Implantate bei dislozierten 2-Part-Frakturen des proximalen Humerus die Schulterfunktion vergleichbar gut wiederherstellen. Beide Versuchsgruppen konnten zufriedenstellende klinische Ergebnisse erreichen, die mit den in der Literatur angegebenen Ergebnissen einhergehen. So erzielten zum Beispiel Zhu et al. vergleichbare Ergebnisse nach Marknagel bzw. winkelstabiler Plattenosteosynthese von 2-Part-Frakturen, allerdings ohne Zementaugmentation und bei einem wesentlich jüngeren Patientenkollektiv. [80] Die etwas besseren Repositionsergebnisse nach winkelstabiler Plattenosteosynthese in einer Arbeit von Plath et al. können durch die bessere Visualisierung bei der offenen Reposition erklärt werden, wurden in unserer Arbeit aber nicht bestätigt. [81]

## Publikation H

Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Helfen T, Gleich J, Boehm E, Boecker W, Ockert B. Screw-tip augmented locked plating versus primary reverse total shoulder arthroplasty in displaced proximal humeral fractures: a retrospective comparative cohort study with a mean follow-up of 39 months. *Geriatric and Orthopaedic Surgery and Rehabilitation*. 2021 Oct 24;12:21514593211039026. doi: 10.1177/21514593211039026. eCollection 2021.

### Zusammenfassung:

Die Inzidenz proximaler Humerusfrakturen nahm in den letzten Jahren vor allem unter den älteren Patient\*innen zu. [32] Diese stellen Traumatologinnen und Traumatologen, abgesehen von Multimorbidität, Polypharmazie uvm. auch vor das Problem der schlechten Knochenqualität. [67, 77] Aufgrund dessen zeigen die herkömmlichen winkelstabilen Plattenosteosynthesen in diesem Kollektiv schlechtere Ergebnisse und vor allem höhere Komplikationsraten. [67] Da diese Patient\*innen außerdem häufig Rupturen der Rotatorenmanschette aufweisen, steigen die Zahlen der Implantation inverser Schulterprothesen kontinuierlich. [50] Gleichzeitig sind Möglichkeiten zur Augmentation der Plattenosteosynthese auf den Markt gekommen. So lassen perforierte Schrauben das Einspritzen von Knochenzement zu, wodurch sich die Oberfläche vergrößert, mit welcher sie im Knochen verankert sind. Biomechanische Studien zeigten, dass sich so die Stabilität verbessern ließ. [13, 82] In dieser retrospektiven Kohortenstudie sollte nun das funktionelle Ergebnis zementaugmentierter Plattenosteosynthesen dem von inversen Schulterprothesen gegenübergestellt werden.

Prospektiv eingeschlossen wurden 60 Patient\*innen über 65 Jahre mit dislozierten proximalen Humerusfrakturen, die mittels offener Reposition und zementaugmentierter, winkelstabiler Plattenosteosynthese versorgt wurden (Gruppe STA). Ihnen wurden 60 Patient\*innen zugeordnet, die wegen einer proximalen Humerusfraktur eine inverse Schulterprothese implantiert bekamen (Gruppe RSA). Das Matching erfolgte im Hinblick auf Frakturmuster, Alter und Geschlecht. Als primäre Outcomeparameter wurden der CS, der %CS und der Bewegungsumfang erhoben. Außerdem erfolgten radiologische Kontrollen zu jedem Nachuntersuchungszeitpunkt (6 Wochen, 3 Monate, 6 Monate, 12 Monate, 24 Monate und 36 Monate). Das minimale follow-up wurde bei 24 Monaten festgesetzt. Die follow-up-Rate in Gruppe STA lag bei 41,7 % und bei 36,7 % in Gruppe RSA.  $40,4 \pm 8,6$  Monate postoperativ betrug

der CS in Gruppe STA  $68 \pm 18,8$  und der %CS  $81,6 \pm 19,8$ , bei einer Komplikationsrate von 32 %. Verglichen mit der Gruppe der Patient\*innen denen eine inverse Schulterprothese implantiert worden war, zeigte sich in Bezug auf den CS und %CS kein signifikanter Unterschied, wohl aber bezüglich der Komplikationsrate, welche in der Vergleichsgruppe RSA nur 4,5 % betrug. Mit 16 % war das Auftreten einer avaskulären Humeruskopfnekrose in Gruppe STA ungewöhnlich hoch. In der Regel ist die Verletzung der versorgenden Blutgefäße im Rahmen des Traumas ursächlich für eine AVN [53], wegen der bemerkenswerten Häufung im untersuchten Kollektiv, müssen aber auch andere Gründe in Erwägung gezogen werden. Obwohl Vorarbeiten in vitro keine negativen Effekte durch die Schraubenspitzenaugmentation zeigen konnten [83, 84], könnte eine AVN in unserer Arbeit auch Folge der hohen Temperatur oder aufgrund des hohen Drucks beim Einspritzen des Zements sein. Die avaskulären Humeruskopfnekrosen wurden alle in Fällen beobachtet, bei denen der Zement, aufgrund der Schraubenlänge, in den subchondralen Knochen eingespritzt wurde. Gegebenenfalls spielt auch dies eine Rolle, sodass empfohlen wird kürzere Schrauben zu verwenden. Außerdem sollte die maximale Zementmenge pro Schraube nicht mehr als 1 ml betragen und die korrekte Viskosität beim Einspritzen beachtet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die offene Reposition und zementaugmentierte, winkelstabile Plattenosteosynthese und die inverse Schulterprothese im evaluierten Kollektiv vergleichbar gute funktionelle Ergebnisse aufwiesen. Aufgrund der höheren Komplikationsrate in der STA-Gruppe, ist aber davon auszugehen, dass ältere Patient\*innen von der Implantation einer inversen Frakturprothese mehr profitieren.

## Publikation I

**Fleischhacker E**, Gleich J, Smolka V, Neuerburg C, Böcker W, Helfen T. The Influence of Adherence to Orthosis and Physiotherapy Protocol on Functional Outcome after Proximal Humeral Fracture in the Elderly. *Journal of clinical medicine*. 2023 Feb 22;12(5):1762. doi: 10.3390/jcm12051762.

### Zusammenfassung:

In der Nachbehandlung proximaler Humerusfrakturen kommen mittlerweile fast nur noch frühfunktionelle Protokolle zur Anwendung, die die zügige Bewegung der betroffenen Schulter erlauben und forcieren. [26] Nichtsdestotrotz enthalten viele dieser Protokolle, vor allem zu Anfang, oft noch das Tragen einer Orthese. [25] Außerdem wird den Patient\*innen geraten Physiotherapie durchzuführen, um Übungen zu erlernen, die das Wiedererlangen der Schulterfunktion zum Ziel haben. [27] Beides verlangt von den Patient\*innen jedoch ein hohes Maß an Mitarbeit und gerade im immer älter werdenden Kollektiv ist diese Compliance fraglich. [85] Allerdings scheint sie sich nicht unbedingt auf das Auftreten von Komplikationen und Revisionen auszuwirken. Um diesen Effekt zu untersuchen wurde die vorliegende prospektive Studie durchgeführt.

Die eingeschlossenen Patient\*innen wurden in vier Gruppen eingeteilt: Nachbehandlung mit einfacher Armschlinge unter konservativer Therapie [A], Nachbehandlung mit einfacher Armschlinge nach Operation [B]; Nachbehandlung mit Abduktionsorthese unter konservativer Therapie [C], Nachbehandlung mit Abduktionsorthese nach Operation [D]. Die Entscheidung welche Orthese verordnet wurde, erfolgte anhand der Beteiligung des Tuberculum majus; bei Fraktur desselbigen erhielten die Patient\*innen eine Abduktionsorthese. Primärer Endpunkt der Studie war nach 6 Wochen, dann wurde mit Hilfe eines Fragebogens die Compliance im Hinblick auf das Tragen der Orthese und das Durchführen der Physiotherapiesitzungen evaluiert. Außerdem wurden die Patient\*innen nach 3 und 12 Monaten nachuntersucht. Primärer Outcomeparameter war der CS; zu den genannten Nachuntersuchungszeitpunkten erfolgte jeweils auch eine radiologische Kontrolle durch standardisierte Röntgenbilder der Schulter in 2 Ebenen.

Zwischen August 2019 und Januar 2022 konnten n = 149 Teilnehmer\*innen eingeschlossen werden. In den Gruppen [AB] hielten sich 53,2 % strikt an das Nachbehandlungsprotokoll, 16,1 % legten entweder die Armschlinge früher als empfohlen ab oder beendeten die

physiotherapeutische Behandlung vorzeitig und 30,6 % beendeten beides früher. In den Gruppen [CD] hielten sich 44,8 % an das Nachbehandlungsschema, 26,4 % beendeten entweder die Orthesenbehandlung oder die Physiotherapie vorzeitig und 28,7 % beides. Der CS unterschied sich weder in den Gruppen [AB] noch in den Gruppen [CD] zwischen den Patient\*innen, die sich an das Nachbehandlungsprotokoll hielten und denen die eine oder beide untersuchten Therapien vorzeitig beendeten (siehe Abb. 17).

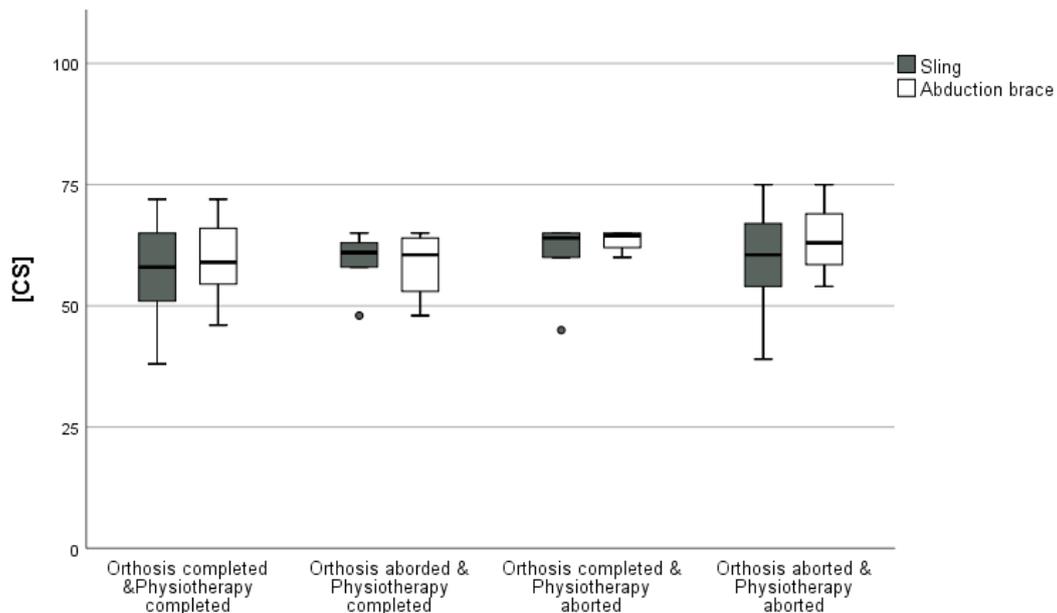


Abbildung 17

Boxplots der CS-Punktwerte entsprechend den unterschiedlichen Compliance-Kollektiven.

Insgesamt hatten  $n = 10$  Teilnehmer\*innen eine Komplikation mit sekundärer Varisierung des Humeruskopfes oder Dislokation des Tuberculum majus. Außerdem wiesen  $n = 3$  Patient\*innen im Verlauf eine Resorption des Tuberculum majus auf,  $n = 2$  hatten eine avaskuläre Humeruskopfnekrose und  $n = 1$  entwickelte eine posttraumatische Schultersteife. In zwei Fällen (Varusdislokation  $> 45^\circ$  und avaskuläre Humeruskopfnekrose) wurde die Indikation einer chirurgischen Revision gestellt, von den Patient\*innen jedoch abgelehnt. 87,9 % der Teilnehmenden vervollständigten den CS nach einem Jahr. Dabei zeigte sich weder in den Gruppen [AB] noch in den Gruppen [CD] signifikante Unterschiede zwischen den Compliance-Kollektiven. Interessant sind die Ergebnisse der Frage nach den Gründen der vorzeitigen Beendigung der Orthesenbehandlung, hier werden mit großem Abstand am häufigsten Druckstellen durch die Orthese und Angst vor erneuten Stürzen aufgrund fehlender Abstützmöglichkeiten angegeben. Eine Übersicht zeigt die folgende Abb. 18.

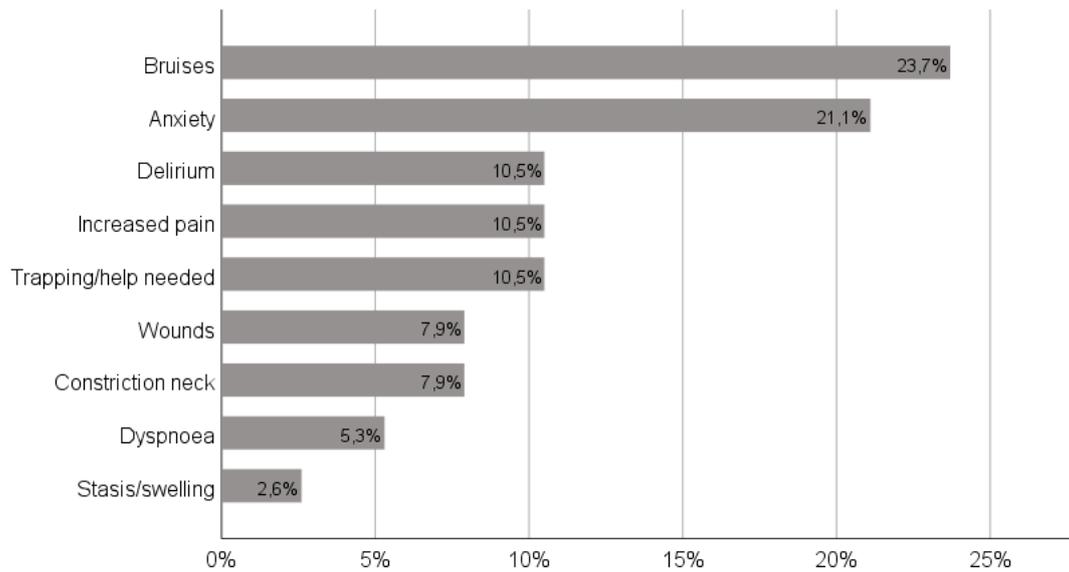


Abbildung 18

Übersicht über die Gründe des vorzeitigen Abbruchs der Orthesenbehandlung.

Mögliche Lösungsansätze, wie man die Compliance steigern könnte, wäre die Patient\*innen intensiver aufzuklären weshalb das Tragen der Orthese bzw. die Durchführung der Physiotherapie für sie von Vorteil sind. Weiterhin könnte eine bessere Einführung in den Gebrauch der Orthese Komplikationen wie Druckstellen vermeiden. Bestätigt werden diese Ansätze von einer US-amerikanischen Arbeit aus dem Jahr, in der genau diese Strategien zu einer besseren Compliance in Bezug auf das Tragen einer Orthese führten. Allerdings waren die dort untersuchten Patient\*innen mit  $59 \pm 13,4$  Jahren deutlich jünger. [52]

Zusammenfassend kann man sagen, dass weder nach konservativer noch nach operativer Therapie die korrekt durchgeführte Nachbehandlung mit Orthese und Physiotherapie einen funktionellen Vorteil brachte. Darüber hinaus zeigte sich in diesem Kollektiv auch bei Nichteinhalten der Protokolle kein negativer Einfluss auf das Auftreten von Komplikationen und Revisionen.

## Publikation J

**Fleischhacker E**, Siebenbürger G, Gleich J, Helfen T, Böcker W, Ockert B. Open reduction and internal fixation of displaced head-split type humeral fractures and role of the rotator-interval approach. *Shoulder and Elbow*. 2023 Apr;15(2):159-165. doi: 10.1177/17585732211065449. Epub 2021 Dec 15.

### Zusammenfassung:

Besonders herausfordernde proximale Humerusfrakturen aus chirurgisch-rekonstruktiver Sicht, sind solche mit Beteiligung der Gelenkfläche. Nach Mora Guix et al. und Resch et al. spricht man von echten Headsplit-Frakturen, wenn die Frakturlinie mehr als 5 mm vom knorpeligen Rand der Gelenkfläche verläuft und/oder mehr als 20 % der Gelenkfläche betroffen sind. [28, 29] Sie entwickeln im Verlauf gehäuft avaskuläre Humeruskopfnekrosen und die Kopffragmente sind oft schmal, sodass eine Schraubenfixierung erschwert ist. [11] Nichtsdestotrotz ist gerade bei diesen Frakturen die anatomische Reposition unerlässlich. Um hier eine bessere Übersicht zu erlangen, wurde in unserer Klinik die Erweiterung des Zugangsweges durch das Rotatorenintervall zwischen den Sehnen des M. supraspinatus und M. subscapularis etabliert. Diese retrospektive Studie untersuchte das klinische Ergebnis von Patient\*innen mit Headsplit-Fraktur des proximalen Humerus, die über die Erweiterung des Zugangs mittels offener Reposition und winkelstabiler Plattenosteosynthese versorgt wurden, im Vergleich zu solchen, bei denen die Erweiterung des Zugangsweges über das Rotatorenintervall nicht erfolgte.

Eingeschlossen wurden 37 Patient\*innen, die zwischen November 2006 und Dezember 2017 aufgrund einer Headsplit-Fraktur durch eine offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese behandelt worden waren. Dabei wurden n = 20 Patient\*innen lediglich über den deltoideopektoralen Zugang (DP) und n = 17 mit Erweiterung über das Rotatorenintervall (RI) versorgt. Im Hinblick auf die demographischen Merkmale und den Frakturtyp nach Scheibel wiesen die beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede auf. [86] Auch bezüglich der Verwendung zusätzlicher Augmentationsverfahren wie Knochentransplantate (autogen und allogene), synthetische Knochenersatzmaterialien und Schraubenspitzenaugmentation, war die Verteilung zwischen den untersuchten Gruppen gleich. In n = 22 Fällen wurden zusätzliche Schrauben von anterior nach posterior eingebracht, um die Stabilität zu erhöhen. Das klinische Ergebnis wurde mit Hilfe des CS, %CS und DASH-

Scores evaluiert. Außerdem erfolgte die radiologische Untersuchung durch Röntgen der Schulter in 2 Ebenen zur Beurteilung des Repositionsergebnisses und im Verlauf, um Komplikationen zu detektieren. Das Repositionsergebnis wurde nach Schnetzke et al. anhand der Röntgenbilder in „anatomisch“, „akzeptabel“ und „malreduction“ eingeteilt. [8]

In 76 % der Fälle konnte durch die Operation die Frakturheilung erfolgen, n = 2 Patient\*innen entwickelten eine Pseudarthrose und n = 7 eine avaskuläre Humeruskopfnekrose. Das Repositionsergebnis in Gruppe RI war signifikant ( $p = 0,04$ ) besser als in Gruppe DP. Weder der CS noch der %CS oder der DASH-Score wiesen jedoch statistisch signifikante Unterschiede zwischen der Untersuchungsgruppen auf. Allerdings zeigte der CS mit  $74,5 \pm 17,4$  Punkten in der RI-Gruppe und  $60,2 \pm 16,2$  Punkten in der DP-Gruppe ( $p = 0,07$ ) eine Tendenz zum besseren Ergebnis in bei den Patient\*innen, die durch den erweiterten Zugang operiert worden waren. Sekundäre Dislokationen, Pseudarthrosen und avaskuläre Humeruskopfnekrosen hingegen waren gleichmäßig verteilt ( $p = 0,71$ ).

Die Heilungsrate von 74 % in unserem Kollektiv ist vergleichbar mit Zahlen aus der Literatur für diese schwere Verletzung. [20] Eine verbesserte Visualisierung, im Vergleich zum deltoideopektoralen Zugang allein, bietet auch der Supraspinatus-Split-Zugang, bei dem die Fasern des M. supraspinatus in Verlängerung der langen Bizepssehne in Faserrichtung auseinandergedrängt werden. [87] Allerdings muss hier unbedingt darauf geachtet werden den anterolateralen Ast der A. circumflexa anterior zu schonen, da sonst das Risiko für das Auftreten einer avaskulären Humeruskopfnekrose zunimmt. [88] Um dem entgegenzuwirken erachten wir den Zugang durch das Rotatorenintervall für die bessere Variante, wenn dieser nicht tiefer als bis zum Ansatz der Supraspinatussehne reicht. [88] Die Repositionsergebnisse sprechen im direkten Vergleich für die Verwendung der Erweiterung des Zugangsweges durch das Rotatorenintervall, bei gleichbleibenden Komplikationszahlen. Dieses Ergebnis ist insofern nicht verwunderlich, als dass durch den erweiterten Zugangsweg eine sehr viel bessere Übersicht über die Gelenkfragmente erreicht wird und somit auch die Reposition direkt visualisiert werden kann. Im Hinblick auf die funktionellen Ergebnisse liegt zumindest eine Tendenz, wenn auch kein statistisch signifikanter Unterschied vor, dass der erweiterte Zugang ebenfalls die besseren Ergebnisse liefert.

## Publikation K

Helfen T, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Biermann N, Böcker W, Ockert B. Open reduction and internal fixation of displaced proximal humeral fractures. Does the surgeon's experience have an impact on outcomes? PLoS One. 2018 Nov 6;13(11):e0207044. doi: 10.1371/journal.pone.0207044. eCollection 2018.

### Zusammenfassung:

Die operative Rekonstruktion proximaler Humerusfrakturen ist eine herausfordernde Aufgabe für Unfallchirurg\*innen mit Komplikationsraten von bis zu 30 %. [24] Setzt man sich mit den Faktoren auseinander, die diese Zahlen und das funktionelle Ergebnis beeinflussen, so muss man sich auch mit den Operateurinnen und Operateuren beschäftigen. Unseres Wissens, war diese Studie die erste Arbeit, die sich mit dem Einfluss der Erfahrung des Chirurgen bzw. der Chirurgin auf das Outcome von 2-Part-Frakturen des proximalen Humerusfrakturen auseinandergesetzt hat, die durch offene Reposition und winkelstabile Plattenosteosynthese therapiert worden waren.

Eingeschlossen wurden n = 278 Patient\*innen. Alle Operationen wurden mit demselben Implantat (PHILOS®, DePuy Synthes, Umkirch, Germany) in Beach-Chair-Position unter Allgemeinanästhesie durchgeführt. Alle Patient\*innen erhielten eine perioperative Antibiotikaphylaxe und wurden über einen deltoideopektoralen Schulterzugang operiert. Additive Verfahren wie Knochentransplantate oder Zementaugmentationen wurden nicht verwendet. Das Erfahrungsniveau der Chirurg\*innen wurden wie folgt eingeteilt:

1. Fachärzte/Fachärztinnen für Orthopädie und Unfallchirurgie [TS]
2. Fachärzte/Fachärztinnen mit mehr als zwei Jahren Berufserfahrung nach Erwerb des Facharztes [STS]
3. Fachärzte/Fachärztinnen, die > 50 Schulteroperationen im Jahr durchführen [SS]

Die Qualität der Reposition wurde im Röntgen von zwei verblindeten Untersuchern evaluiert und nach Schnetzke et al. eingeteilt. [8] Um sekundäre Dislokationen und Komplikationen im Verlauf zu erfassen wurden außerdem die Röntgenbilder 6 Wochen, 3, 6 und 12 Monate postoperativ ausgewertet. Das funktionelle Ergebnis wurde mit Hilfe des nCS erfasst.

27,7 % der Operationen wurden von [TS] durchgeführt, 41,7 % von [STS] und 30,6 % von [SS]. Insgesamt konnte in 95,3 % der Fälle ein anatomisches oder akzeptables Repositionsergebnis erreicht werden. Primär schlecht reponierte Frakturen wurden in 6,8 % von [TS], in 5,5 % von

[STS] und in 1,2 % von [SS] operiert. Der mittlere nCS lag über alle Gruppen hinweg bei  $85,3 \pm 19,6$ ; statistisch signifikant unterschieden sich hier nur die Ergebnisse der Schulterchirurgen [SS] im Vergleich zu den jüngeren Fachärzten ( $p = 0,01$ ). Die Werte zwischen [TS] und [STS] unterschieden sich nicht signifikant ( $p = 0,6$ ), ebenso wie zwischen [SS] und [STS] ( $p = 0,05$ ). Die Komplikationsraten unterschieden sich nur in Bezug auf sekundäre Dislokationen, wobei [SS] signifikant weniger aufwiesen als [TS] ( $p = 0,01$ ) und [STS] ( $p = 0,04$ ). In Bezug auf das Auftreten avaskulärer Humeruskopfnekrosen, posttraumatischer Schultersteife und Hämatome zeigte sich zwischen den Gruppen kein signifikanter Unterschied. Allerdings mussten von [SS] operierte Patient\*innen signifikant ( $p < 0,001$ ) weniger häufig revidiert werden als in den anderen Gruppen.

Diese Studie war nach unserem Wissen die erste, die nachwies, dass die Erfahrung des Operators/der Operateurin einen Einfluss auf das Repositionsergebnis und das funktionelle Outcome von 2-Part-Frakturen des proximalen Humerus hat. Des Weiteren kommt es bei Schulterchirurg\*innen mit  $> 50$  Schulteroperationen pro Jahr signifikant weniger zu Komplikationen und Revisionen. Vergleichbare Arbeiten wurden zuvor nur für Hüftendoprothesenimplantationen publiziert; auch sie zeigten, dass mit steigender Erfahrung die Komplikations- und Revisionsraten zurückgingen. [89] Die anatomische Reposition von Frakturen ist technisch oft anspruchsvoll und nicht selten haben auch erfahrene Chirurg\*innen Probleme sie zu erreichen. Das Sammeln von Erfahrungen stärkt das Wissen um spezifische Frakturmuster, typische Probleme und spezielle Repositionsmanöver und ist insofern unerlässlich.

## Ausblick

Aufgrund der zuvor beschriebenen Forschungsarbeiten konnten umfassende Einblicke in vielfältige Determinanten des funktionellen Ergebnisses proximaler Humerusfrakturen erlangt werden. Basierend auf diesen Erkenntnissen konnte die rekonstruktiv-operative Behandlung von Patient\*innen mit proximalen Humerusfrakturen verbessert werden. Insbesondere die Wahl des Implantates, des Implantatmaterials und des Zugangsweges konnten so an die Situation der Patient\*innen angepasst werden. Diese Individualisierung der Behandlung trägt zu besseren funktionellen Ergebnissen und höherer Patientenzufriedenheit bei. Andererseits konnte auch gezeigt werden, dass wissenschaftlich fundierte Nachbehandlungsschemata den Alltagstest nur bedingt bestehen und die Patientencompliance in vielen Fällen nicht ausreicht, um solche komplexen Protokolle in den Alltag der Patient\*innen zu integrieren. Die erlangten Erkenntnisse in Bezug auf die humane Immunreaktion auf unterschiedliche Implantate stellt ein besonderes Novum dar, weil nicht nur nachgewiesen werden konnte, dass auch bei Plattenosteosynthesen Partikel entstehen, sondern auch, dass diese eine Immunreaktion auslösen. Ob letztere durch die Anzahl, Größe oder das Material der Fremdkörper beeinflusst wird, müssen zukünftige Arbeiten zeigen. Des Weiteren ist bislang nicht bekannt wie die weitere Prozessierung der Partikel abläuft, wohin sie transportiert werden und ob es einen Abbaumechanismus gibt, bzw. ob sie ausgeschieden oder eingelagert werden.

Nichtsdestotrotz gibt es viele weitere Aspekte in der Behandlung proximaler Humerusfrakturen, die bisher noch nicht ausreichend beleuchtet wurden. Alles in allem stehen wir in Zukunft vor allem vor der großen Aufgabe die generierte Datenflut zu fokussieren und aus den Messwerten für unsere Patient\*innen relevante Informationen zu extrahieren.

## Literaturverzeichnis

1. Launonen, A.P., et al., Epidemiology of proximal humerus fractures. Arch Osteoporos, 2015. 10: p. 209.
2. Curtis, E.M., et al., The impact of fragility fracture and approaches to osteoporosis risk assessment worldwide. Bone, 2017. 104: p. 29-38.
3. Olsson, C., A. Nordquist, and C.J. Petersson, Long-term outcome of a proximal humerus fracture predicted after 1 year: a 13-year prospective population-based follow-up study of 47 patients. Acta Orthop, 2005. 76(3): p. 397-402.
4. Thomsen, M. and P. Thomas, [Compatibility and allergies of osteosynthesis materials]. Unfallchirurg, 2017. 120(2): p. 116-121.
5. Kurtz, S.M. and J.N. Devine, PEEK biomaterials in trauma, orthopedic, and spinal implants. Biomaterials, 2007. 28(32): p. 4845-69.
6. Li, C.S., et al., The Use of Carbon-Fiber-Reinforced (CFR) PEEK Material in Orthopedic Implants: A Systematic Review. Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord, 2015. 8: p. 33-45.
7. Ding, R., et al., Mixed Modification of the Surface Microstructure and Chemical State of Polyetheretherketone to Improve Its Antimicrobial Activity, Hydrophilicity, Cell Adhesion, and Bone Integration. ACS Biomater Sci Eng, 2020. 6(2): p. 842-851.
8. Schnetzke, M., et al., Quality of Reduction Influences Outcome After Locked-Plate Fixation of Proximal Humeral Type-C Fractures. J Bone Joint Surg Am, 2016. 98(21): p. 1777-1785.
9. Ockert, B., et al., Long-term functional outcomes (median 10 years) after locked plating for displaced fractures of the proximal humerus. J Shoulder Elbow Surg, 2014. 23(8): p. 1223-31.
10. Sudkamp, N., et al., Open reduction and internal fixation of proximal humeral fractures with use of the locking proximal humerus plate. Results of a prospective, multicenter, observational study. J Bone Joint Surg Am, 2009. 91(6): p. 1320-8.
11. Jost, B., et al., Locking plate fixation of fractures of the proximal humerus: analysis of complications, revision strategies and outcome. J Shoulder Elbow Surg, 2013. 22(4): p. 542-9.

12. Hengg, C., et al., Cement augmentation of the proximal humerus internal locking system in elderly patients: a multicenter randomized controlled trial. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2019. 139(7): p. 927-942.
13. Schliemann, B., et al., Screw augmentation reduces motion at the bone-implant interface: a biomechanical study of locking plate fixation of proximal humeral fractures. *J Shoulder Elbow Surg*, 2015. 24(12): p. 1968-73.
14. Roderer, G., et al., Biomechanical in vitro assessment of screw augmentation in locked plating of proximal humerus fractures. *Injury*, 2013. 44(10): p. 1327-32.
15. Zyto, K., M. Kronberg, and L.A. Brostrom, Shoulder function after displaced fractures of the proximal humerus. *J Shoulder Elbow Surg*, 1995. 4(5): p. 331-6.
16. Elhassan, B., et al., Arthroscopic capsular release for refractory shoulder stiffness: a critical analysis of effectiveness in specific etiologies. *J Shoulder Elbow Surg*, 2010. 19(4): p. 580-7.
17. Haller, J.M., et al., Intraarticular Matrix Metalloproteinases and Aggrecan Degradation Are Elevated After Articular Fracture. *Clin Orthop Relat Res*, 2015. 473(10): p. 3280-8.
18. Haller, J.M., et al., Inflammatory cytokine response following acute tibial plateau fracture. *J Bone Joint Surg Am*, 2015. 97(6): p. 478-83.
19. Le, H.V., et al., Adhesive capsulitis of the shoulder: review of pathophysiology and current clinical treatments. *Shoulder Elbow*, 2017. 9(2): p. 75-84.
20. Agudelo, J., et al., Analysis of efficacy and failure in proximal humerus fractures treated with locking plates. *J Orthop Trauma*, 2007. 21(10): p. 676-81.
21. Swinnen, E. and E. Kerckhofs, Compliance of patients wearing an orthotic device or orthopedic shoes: A systematic review. *J Bodyw Mov Ther*, 2015. 19(4): p. 759-70.
22. Sood, A., et al., An accurate method of measuring shoulder sling compliance: a validation study. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021. 22(1): p. 524.
23. Kirchhoff, C., et al., Outcome analysis following removal of locking plate fixation of the proximal humerus. *BMC Musculoskelet Disord*, 2008. 9: p. 138.
24. Haasters, F., et al., Complications of locked plating for proximal humeral fractures-are we getting any better? *J Shoulder Elbow Surg*, 2016. 25(10): p. e295-303.
25. Wendt, K.W., et al., ESTES recommendations on proximal humerus fractures in the elderly. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 2021. 47(2): p. 381-395.

26. Hodgson, S., Proximal humerus fracture rehabilitation. *Clin Orthop Relat Res*, 2006. 442: p. 131-8.
27. Hodgson, S.A., et al., Rehabilitation of two-part fractures of the neck of the humerus (two-year follow-up). *J Shoulder Elbow Surg*, 2007. 16(2): p. 143-5.
28. Mora Guix, J.M., J.S. Pedros, and A.C. Serrano, Updated classification system for proximal humeral fractures. *Clin Med Res*, 2009. 7(1-2): p. 32-44.
29. Resch, H., et al., Classification of proximal humeral fractures based on a pathomorphologic analysis. *J Shoulder Elbow Surg*, 2016. 25(3): p. 455-62.
30. Baker, H.P., et al., Management of Proximal Humerus Fractures in Adults-A Scoping Review. *J Clin Med*, 2022. 11(20).
31. Patel, A.H., et al., Trending a decade of proximal humerus fracture management in older adults. *JSES Int*, 2022. 6(1): p. 137-143.
32. Rupp, M., et al., The Incidence of Fractures Among the Adult Population of Germany-an Analysis From 2009 through 2019. *Dtsch Arztebl Int*, 2021. 118(40): p. 665-669.
33. Iglesias-Rodriguez, S., et al., Epidemiology of proximal humerus fractures. *J Orthop Surg Res*, 2021. 16(1): p. 402.
34. McLean, A.S., et al., Nationwide trends in management of proximal humeral fractures: an analysis of 77,966 cases from 2008 to 2017. *J Shoulder Elbow Surg*, 2019. 28(11): p. 2072-2078.
35. Siris, E.S., et al., The clinical diagnosis of osteoporosis: a position statement from the National Bone Health Alliance Working Group. *Osteoporos Int*, 2014. 25(5): p. 1439-43.
36. Neer, C.S., 2nd, Displaced proximal humeral fractures. I. Classification and evaluation. *J Bone Joint Surg Am*, 1970. 52(6): p. 1077-89.
37. Neer, C.S., 2nd, Displaced proximal humeral fractures. II. Treatment of three-part and four-part displacement. *J Bone Joint Surg Am*, 1970. 52(6): p. 1090-103.
38. Codman, E.A., *The Shoulder: Rupture of the Supraspinatus Tendon and Other Lesions in or about the Subacromial Bursa*. 1934, Arlington, TX, USA: T. Todd Company.
39. Müller, M.E.K., P.; Nazarian, S.; Schatzker, J., *The Comprehensive Classification of Fractures of Long Bones*. 1990, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
40. Handoll, H., et al., The ProFHER (PROximal Fracture of the Humerus: Evaluation by Randomisation) trial - a pragmatic multicentre randomised controlled trial evaluating the clinical effectiveness and cost-effectiveness of surgical compared with non-surgical

- treatment for proximal fracture of the humerus in adults. *Health Technol Assess*, 2015. 19(24): p. 1-280.
41. Rangan, A., et al., Surgical vs nonsurgical treatment of adults with displaced fractures of the proximal humerus: the PROFHER randomized clinical trial. *JAMA*, 2015. 313(10): p. 1037-47.
  42. Launonen, A.P., et al., Treatment of proximal humerus fractures in the elderly: a systemic review of 409 patients. *Acta Orthop*, 2015. 86(3): p. 280-5.
  43. Beks, R.B., et al., Operative versus nonoperative treatment of proximal humeral fractures: a systematic review, meta-analysis, and comparison of observational studies and randomized controlled trials. *J Shoulder Elbow Surg*, 2018. 27(8): p. 1526-1534.
  44. Martinez-Catalan, N., Conservative Treatment of Proximal Humerus Fractures: When, How, and What to Expect. *Curr Rev Musculoskelet Med*, 2023. 16(2): p. 75-84.
  45. Mellstrand Navarro, C., et al., Treatment of humerus fractures in the elderly: A systematic review covering effectiveness, safety, economic aspects and evolution of practice. *PLoS One*, 2018. 13(12): p. e0207815.
  46. Biermann, N., et al., Augmentation of plate osteosynthesis for proximal humeral fractures: a systematic review of current biomechanical and clinical studies. *Arch Orthop Trauma Surg*, 2019. 139(8): p. 1075-1099.
  47. Egol, K.A., et al., Fracture site augmentation with calcium phosphate cement reduces screw penetration after open reduction-internal fixation of proximal humeral fractures. *J Shoulder Elbow Surg*, 2012. 21(6): p. 741-8.
  48. Hayes, J.S. and R.G. Richards, The use of titanium and stainless steel in fracture fixation. *Expert Rev Med Devices*, 2010. 7(6): p. 843-53.
  49. Dillon, M.T., et al., The increasing role of reverse total shoulder arthroplasty in the treatment of proximal humerus fractures. *Injury*, 2019. 50(3): p. 676-680.
  50. Ockert, B., et al., [Reverse shoulder arthroplasty for primary fracture treatment. Displaced three and four part fractures of the proximal humerus in the elderly patient]. *Unfallchirurg*, 2013. 116(8): p. 684-90.
  51. Rohun, J., P. May, and C. Littlewood, Rehabilitation following proximal humeral fracture in the UK National Health Service: A survey of publicly facing information. *Musculoskeletal Care*, 2021. 19(2): p. 193-198.

52. Livesey, M.G., et al., The Effect of Patients' Understanding of Sling Necessity and Home Assistance on Sling Wear After Shoulder Surgery. *Am J Sports Med*, 2023. 51(1): p. 179-186.
53. Large, T.M., et al., Posttraumatic Avascular Necrosis After Proximal Femur, Proximal Humerus, Talar Neck, and Scaphoid Fractures. *J Am Acad Orthop Surg*, 2019. 27(21): p. 794-805.
54. Patel, S., et al., Post-traumatic osteonecrosis of the proximal humerus. *Injury*, 2015. 46(10): p. 1878-84.
55. Joeris, A., et al., [Titanium or steel as osteosynthesis material : Systematic literature search for clinical evidence]. *Unfallchirurg*, 2017. 120(2): p. 96-102.
56. Goldberg, B.A., M.M. Scarlat, and D.T. Harryman, 2nd, Management of the stiff shoulder. *J Orthop Sci*, 1999. 4(6): p. 462-71.
57. Constant, C.R. and A.H. Murley, A clinical method of functional assessment of the shoulder. *Clin Orthop Relat Res*, 1987(214): p. 160-4.
58. Katolik, L.I., et al., Normalization of the Constant score. *J Shoulder Elbow Surg*, 2005. 14(3): p. 279-85.
59. Beaton, D.E., et al., Measuring the whole or the parts? Validity, reliability, and responsiveness of the Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand outcome measure in different regions of the upper extremity. *J Hand Ther*, 2001. 14(2): p. 128-46.
60. Ashton, M.L., et al., What Are We Measuring? A Systematic Review of Outcome Measurements Used in Shoulder Surgery. *Arthrosc Sports Med Rehabil*, 2020. 2(4): p. e429-e434.
61. Angst, F., et al., Measures of adult shoulder function: Disabilities of the Arm, Shoulder, and Hand Questionnaire (DASH) and its short version (QuickDASH), Shoulder Pain and Disability Index (SPADI), American Shoulder and Elbow Surgeons (ASES) Society standardized shoulder assessment form, Constant (Murley) Score (CS), Simple Shoulder Test (SST), Oxford Shoulder Score (OSS), Shoulder Disability Questionnaire (SDQ), and Western Ontario Shoulder Instability Index (WOSI). *Arthritis Care Res (Hoboken)*, 2011. 63 Suppl 11: p. S174-88.
62. Jenkinson, C., A. Coulter, and L. Wright, Short form 36 (SF36) health survey questionnaire: normative data for adults of working age. *BMJ*, 1993. 306(6890): p. 1437-40.

63. Neudeck, R., et al., Mid-term functional outcome (minimum 24 months, mean 4 years) after locking plate osteosynthesis for displaced fractures of the proximal humerus in 557 cases. *Injury*, 2023.
64. Hirschmann, M.T., et al., Clinical longer-term results after internal fixation of proximal humerus fractures with a locking compression plate (PHILOS). *J Orthop Trauma*, 2011. 25(5): p. 286-93.
65. Benegas, E., et al., Surgical treatment of varus malunion of the proximal humerus with valgus osteotomy. *J Shoulder Elbow Surg*, 2007. 16(1): p. 55-9.
66. Voigt, C., et al., How does a varus deformity of the humeral head affect elevation forces and shoulder function? A biomechanical study with human shoulder specimens. *J Orthop Trauma*, 2011. 25(7): p. 399-405.
67. Brunner, F., et al., Open reduction and internal fixation of proximal humerus fractures using a proximal humeral locked plate: a prospective multicenter analysis. *J Orthop Trauma*, 2009. 23(3): p. 163-72.
68. Schuetze, K., et al., Feasibility and Radiological Outcome of Minimally Invasive Locked Plating of Proximal Humeral Fractures in Geriatric Patients. *J Clin Med*, 2022. 11(22).
69. Avery, D., et al., Immune cell response to orthopedic and craniofacial biomaterials depends on biomaterial composition. *Acta Biomater*, 2023. 161: p. 285-297.
70. Schoenenberger, A.D., et al., Macrophage Polarization by Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Particles: Size Matters. *ACS Biomater Sci Eng*, 2016. 2(6): p. 908-919.
71. Tauro, J.A., R. L., The shoulder. *AANA Advanced Arthroscopy Series*, ed. R.K.N. Ryu. 2010: Elsevier. 10.
72. Katthagen, J.C., et al., [Arthroscopic implant removal after fixed-angle plate osteosynthesis of the proximal humerus. Technique and initial results in comparison to open implant removal]. *Unfallchirurg*, 2012. 115(1): p. 47-54.
73. Acklin, Y.P., C. Michelitsch, and C. Sommer, Elective implant removal in symptomatic patients after internal fixation of proximal humerus fractures improves clinical outcome. *BMC Musculoskelet Disord*, 2016. 17: p. 119.
74. Waszczykowski, M. and J. Fabis, Selective Glenohumeral external rotation deficit - sequelae of post-ORIF deltoid adhesions after treatment of the proximal humerus fracture. *BMC Musculoskelet Disord*, 2020. 21(1): p. 625.

75. Levy, O., et al., Arthroscopic capsular release for posttraumatic shoulder stiffness. *J Shoulder Elbow Surg*, 2008. 17(3): p. 410-4.
76. Nogami, S., et al., Clinical comparison between arthrocentesis and conventional conservative treatment with maxillomandibular fixation for unilateral high condylar fractures. *J Oral Rehabil*, 2014. 41(2): p. 141-7.
77. Haasters, F.K., J.; Siebenbürger, G.; Mutschler, W.; Ockert, B., Osteoporose als Risikofaktor für das Versagen der winkelstabilen Plattenosteosynthese am proximalen Humerus. *Osteologie*, 2014. 23: p. 16-21.
78. Helfen, T., et al., High-Resolution Tomography-Based Quantification of Cortical Porosity and Cortical Thickness at the Surgical Neck of the Humerus During Aging. *Calcif Tissue Int*, 2017. 101(3): p. 271-279.
79. Haasters, F., et al., [Prevalence and management of osteoporosis in trauma surgery. Implementation of national guidelines during inpatient fracture treatment]. *Unfallchirurg*, 2015. 118(2): p. 138-45.
80. Zhu, Y., et al., Locking intramedullary nails and locking plates in the treatment of two-part proximal humeral surgical neck fractures: a prospective randomized trial with a minimum of three years of follow-up. *J Bone Joint Surg Am*, 2011. 93(2): p. 159-68.
81. Plath, J.E., et al., Locking nail versus locking plate for proximal humeral fracture fixation in an elderly population: a prospective randomised controlled trial. *BMC Musculoskelet Disord*, 2019. 20(1): p. 20.
82. Katthagen, J.C., et al., Cement augmentation of humeral head screws reduces early implant-related complications after locked plating of proximal humeral fractures. *Obere Extrem*, 2018. 13(2): p. 123-129.
83. Windolf, M., [Biomechanics of implant augmentation]. *Unfallchirurg*, 2015. 118(9): p. 765-71.
84. Blazejak, M., et al., In vitro temperature evaluation during cement augmentation of proximal humerus plate screw tips. *Injury*, 2013. 44(10): p. 1321-6.
85. Campbell, R., et al., Why don't patients do their exercises? Understanding non-compliance with physiotherapy in patients with osteoarthritis of the knee. *J Epidemiol Community Health*, 2001. 55(2): p. 132-8.
86. Scheibel M, P.P., Moro F, Moroder P, Head-split fractures of the proximal humerus. *Obere Extremität*, 2019. 14: p. 93-102.

87. Jaeger Martin, L.F., Li Wilson. Proximal humerus 11-C3.3 Open reduction; plate fixation. 2011 [cited 2018 04/03/2018]; Available from: [https://www2.aofoundation.org/wps/portal/!ut/p/a1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOKN\\_A0M3D2DDbz9\\_UMMDRyDXQ3dw9wMDAwCTYEKlvEocDQnTr8BDuBoQEh\\_QW5oKABaevup/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmlFL1o2XzJPMDDBHSVMws09PVDEwQV NFMUdWRjAwMFE1/?approach=&bone=Humerus&classification=11-C3.3&implantstype=&method=Open%20reduction%3B%20plate%20fixation&redfix\\_url=&segment=Proximal&showPage=redfix&treatment=operative](https://www2.aofoundation.org/wps/portal/!ut/p/a1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOKN_A0M3D2DDbz9_UMMDRyDXQ3dw9wMDAwCTYEKlvEocDQnTr8BDuBoQEh_QW5oKABaevup/dl5/d5/L2dJQSEvUUt3QS80SmlFL1o2XzJPMDDBHSVMws09PVDEwQV NFMUdWRjAwMFE1/?approach=&bone=Humerus&classification=11-C3.3&implantstype=&method=Open%20reduction%3B%20plate%20fixation&redfix_url=&segment=Proximal&showPage=redfix&treatment=operative).
88. Hettrich, C.M., et al., Quantitative assessment of the vascularity of the proximal part of the humerus. *J Bone Joint Surg Am*, 2010. 92(4): p. 943-8.
89. Palm, H., et al., Influence of surgeon's experience and supervision on re-operation rate after hip fracture surgery. *Injury*, 2007. 38(7): p. 775-9.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.....	11
Abbildung 2.....	22
Abbildung 3.....	22
Abbildung 4.....	25
Abbildung 5.....	28
Abbildung 6.....	29
Abbildung 7.....	30
Abbildung 8.....	31
Abbildung 9.....	32
Abbildung 10.....	33
Abbildung 11.....	35
Abbildung 12.....	36
Abbildung 13.....	39
Abbildung 14.....	40
Abbildung 15.....	42
Abbildung 16.....	43
Abbildung 17.....	47
Abbildung 18.....	48

## Abkürzungsverzeichnis

%CS	Constant Score im Vergleich zur Gegenseite
ASES	American Shoulder and Elbow Score
AVN	avaskuläre Humeruskopfnekrose
CFR	kohlevaserverstärkt
CS	Constant Score
DASH	Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand
EDX-SEM	energie-dispersive Röntgenspektroskopie im Rasterelektronenmikroskop
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
HR-CT	hochauflösende Computertomographie
IR	Implantatentfernung
KSW	Kopf-Schaft-Winkel
nCS	alters- und geschlechtsnormierter Constant Score
ORIF	offene Reposition und interne Fixierung
OSS	Oxford Shoulder Score
PEEK	Polyetheretherketon
PMMA	Polymethylmethacrylat
PROM	patient-reported outcome measures
ROM	Bewegungsumfang
SEM	Rasterelektronenmikroskopie
SF-36	Short Form 36

## Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich, Dr. med. Evi Fleischhacker, dass ich die vorliegende schriftliche Habilitationsleistung selbständig verfasst und die Herkunft des verwendeten oder zitierten Materials ordnungsgemäß kenntlich gemacht habe. Zudem erkläre ich, dass ich außer dem derzeitigen, kein weiteres Habilitationsgesuch für das Fach Orthopädie und Unfallchirurgie oder ein anderes Fach an der Ludwig-Maximilians-Universität München oder einer anderen Hochschule eingereicht habe und mir bisher kein akademischer Grad entzogen wurde. Weiterhin ist kein Verfahren gegen mich anhängig, welches die Entziehung eines akademischen Grades zur Folge haben könnte.

München, den 22.07.2024

Dr. med. Evi Fleischhacker

## Anhang

### Vollständiges Verzeichnis der wissenschaftlichen Veröffentlichungen

Kumulativer Impactfactor Originalarbeiten: 53,349

#### *Originalarbeiten als Erst- oder Letztautorin*

**Fleischhacker E**, Trentzsch H, Kuppinger D, Meigel F, Beyer F, Hartl WH. Long-term changes of patient-reported quality of life after major trauma: The importance of the time elapsed after injury. *Injury*. 2018 Feb;49(2):195-202. doi: 10.1016/j.injury.2017.10.020. Epub 2017 Oct 12. (IF 2018 = 1,834)

**Fleischhacker E**, Trentzsch H, Kuppinger D, Piltz S, Beyer F, Meigel F, Kammerer T, Rehm M, Hartl WH. Fluid resuscitation after severe trauma injury : U-shaped associations between tetrastarch dose and survival time or frequency of acute kidney failure. *Med Klin Intensivmed Notfmed*. 2020 Oct;115(7):591-599. doi: 10.1007/s00063-019-00625-7. Epub 2019 Nov 6. (IF 2020 = 0,850)

**Fleischhacker E\***, Siebenbürger G\*, Helfen T, Gleich J, Böcker W, Ockert B. Varus malposition relates to functional outcomes following open reduction and internal fixation for proximal humeral fractures: A retrospective comparative cohort study with minimum 2 years follow-up. *Injury*. 2021 Mar;52(3):506-510. doi: 10.1016/j.injury.2020.09.003. Epub 2020 Sep 7. (\* Geteilte Erstautorenschaft, IF 2021 = 2,687)

Die Habilitandin war bei dieser Arbeit maßgeblich an der Erhebung und Auswertung der Daten beteiligt. Außerdem hat sie in gemeinschaftlicher Arbeit mit dem zweiten Erstautor das Manuskript verfasst.

Gleich J\*, **Fleischhacker E\***, Rascher K, Friess T, Kammerlander C, Böcker W, Bücking B, Liener U, Drey M, Höfer C, Neuerburg C. Increased Geriatric Treatment Frequency Improves Mobility and Secondary Fracture Prevention in Older Adult Hip Fracture Patients—An Observational Cohort Study of 23,828 Patients from the Registry for Geriatric Trauma (ATR-DGU). *J. Clin. Med*. 2021, 10(23), 5489; doi: 10.3390/jcm10235489 (registering DOI) - 23 Nov 2021

(\* Geteilte Erstautorenschaft, IF 2021 = 4,964)

Die Habilitandin war bei dieser Arbeit maßgeblich an der Studienimplementierung sowie der Erhebung und Auswertung der Daten beteiligt. Sie hat weiterhin in gemeinschaftlicher Arbeit mit dem zweiten Erstautor das Manuskript verfasst.

**Fleischhacker E**, Siebenbürger G, Gleich J, Helfen T, Böcker W, Ockert B. Open reduction and internal fixation of displaced head-split type humeral fractures and role of the rotator-interval approach. *Shoulder Elbow*. 2023 Apr;15(2):159-165. doi: 10.1177/17585732211065449. Epub 2021 Dec 15.

(CiteScore (Scopus) 2021 = 2,6)

**Fleischhacker E**, Sprecher C, Milz S, Saller M, Gleich J, Siebenbürger G, Helfen T, Böcker W, Ockert B. Functional outcomes before and after implant removal in healed proximal humerus fractures: does implant material (PEEK vs. titanium) have an impact? *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2022 Jan 27;23(1):95. doi: 10.1186/s12891-022-05061-x.

(IF 2022 = 2,3)

**Fleischhacker E**, Siebenbürger G, Gleich J, Helfen T, Böcker W, Gilbert F, Helfen T. The Accuracy of Distal Clavicle Fracture Classifications-Do We Need an Amendment to Imaging Modalities or Fracture Typing? *Journal of Clinical Medicine*. 2022 Sep 24;11(19):5638. doi: 10.3390/jcm11195638.

(IF 2022 = 3,9)

**Fleischhacker E**, Gleich J, Smolka V, Neuerburg C, Böcker W, Helfen T. The Influence of Adherence to Orthosis and Physiotherapy Protocol on Functional Outcome after Proximal Humeral Fracture in the Elderly. *Journal of clinical medicine*. 2023 Feb 22;12(5):1762. doi: 10.3390/jcm12051762.

(IF 2023 = 3,0)

Gleich J, Neuerburg C, Schöneberg C, Knobe M, Böcker W, Rascher K, **Fleischhacker E**, Working Committee on Geriatric Trauma Registry of the German Trauma Society (DGU), Berlin, Germany. Time to surgery after proximal femur fracture in geriatric patients depends on

hospital size and provided level of care: analysis of the Registry for Geriatric Trauma (ATR-DGU). *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. 2023 Aug;49(4):1827-1833. doi: 10.1007/s00068-023-02246-4. Epub 2023 Mar 16.

(IF 2023 = 1,9)

**Fleischhacker E**, Sprecher CM, Milz S, Saller MM, Wirz R, Zboray R, Parrilli A, Gleich J, Siebenbürger G, Böcker W, Ockert B, Helfen T. Inflammatory tissue response in human soft tissue is caused by a higher particle load near carbon fiber-reinforced PEEK compared to titanium plates. *Acta Biomater*. 2024 May:180:128-139. doi: 10.1016/j.actbio.2024.04.023. Epub 2024 Apr 16.

(IF 2023 = 9,4)

#### *Originalarbeiten als Koautorin*

Högel F, Hoffmann S, Hungerer S, **Fleischhacker E**, Ullmann T, Betz OB, Augat P. Bone healing of critical size defects of the rat femur after the application of bone marrow aspirate and two different rh-BMP7 concentrations. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2015 Oct;41(5):557-63. doi: 10.1007/s00068-014-0473-9. Epub 2014 Nov 22.

(IF 2014 = 0,346)

Helfen T, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Biermann N, Böcker W, Ockert B. Open reduction and internal fixation of displaced proximal humeral fractures. Does the surgeon's experience have an impact on outcomes? *PLoS One*. 2018 Nov 6;13(11):e0207044. doi: 10.1371/journal.pone.0207044. eCollection 2018.

(IF 2018 = 2,776)

Helfen T, Jansen S, **Fleischhacker E**, Böcker W, Wirth S, Ockert B. Injuries of the sternoclavicular region indicate concomitant lesions and need distinguished imaging. *Eur J Trauma Emerg Surg*. 2019 Jul 1. doi: 10.1007/s00068-019-01178-2. Online ahead of print.

(IF 2019 = 2,139)

Helfen T, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Gleich J, Böcker W, Ockert B. Operative treatment of 2-part surgical neck type fractures of the proximal humerus in the elderly: Cement augmented locking plate PHILOS™ vs. proximal humerus nail multiloc®. *Injury*. 2020 Oct;51(10):2245-2252. Doi: 10.1016/j.injury.2020.06.026. Epub 2020 Jun 16.

(IF 2020 = 2,586)

Biermann N, Schirren M, Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Helfen T, Böcker W, Ockert B. Glenohumeral joint lavage does not affect clinical outcomes in open reduction and internal fixation of displaced intracapsular proximal humeral fractures: a prospective, randomized, double-blinded trial. *J Shoulder Elbow Surg*. 2020 Sep;29(9):1758-1764. doi: 10.1016/j.jse.2020.04.026. Epub 2020 Jun 9.

(IF 2020 = 3,019)

Siebenbürger G, **Fleischhacker E**, Gleich J, Helfen T, Böcker W, Ockert B. Supraspinatus Tenotomy in Reverse Shoulder Arthroplasty for Fractures: A Comparative Cohort Study. *Geriatric and Orthopaedic Surgery and Rehabilitation*. 2021 Jul 7;12:21514593211019973. doi: 10.1177/21514593211019973. eCollection 2021.

(IF 2021 = 1.924)

Siebenbuerger G, **Fleischhacker E**, Helfen T, Gleich J, Boehm E, Boecker W, Ockert B. Screw-tip augmented locked plating versus primary reverse total shoulder arthroplasty in displaced proximal humeral fractures: a retrospective comparative cohort study with a mean follow-up of 39 months. *Geriatric and Orthopaedic Surgery and Rehabilitation*. 2021 Oct 24;12:21514593211039026. doi: 10.1177/21514593211039026. eCollection 2021.

(IF 2021 = 1.924)

Neuerburg, Carl; **Fleischhacker, Evi**; Keppler, Alexander M.; Knobe, Matthias; Liener, Ulrich C.; Kammerlander, Christian und Böcker, Wolfgang (2021): Alterstraumatologische Netzwerke. In: *Osteologie*, Vol. 30, Nr. 2: S. 145-151

(2021: kein IF)

Neudeck R, Daferner M P, Fleischhacker E, Helfen T, Gilbert F, Böcker W, Ockert B, Siebenbuerger G. Mid-term functional outcome (minimum 24 months, mean 4 years) after locking plate osteosynthesis for displaced fractures of the proximal humerus in 557 cases. *Injury* 2023 Mar 29:S0020-1383(23)00289-9. doi: 10.1016/j.injury.2023.03.033.

(IF 2023 = 2,2)

Siebenbuerger G, Neudeck R, Daferner M P, **Fleischhacker E**, Böcker W, Ockert B, Helfen T. It Is Always the Same - A Complication Classification following Angular Stable Plating of Proximal Humeral Fractures. *Journal of Clinical Medicine*. 2023 Mar 28;12(7):2556. doi: 10.3390/jcm12072556.

(IF 2023 = 3,0)

#### *Kasuistiken/Case Reports*

**Fleischhacker E**, Ehrl D, Fürmetz J, Meller R, Böcker W, Zeckey C. [Reconstruction of large osteochondral defects of the distal femur and proximal tibia : Adaptation of fresh frozen allografts using 3D-printed models]. *Unfallchirurg*. 2021 Jan;124(1):74-79. doi: 10.1007/s00113-020-00846-y. (IF 2021 = 0,981)

#### *Übersichtsartikel/Reviews*

**Fleischhacker E**, Gleich J, Hesse E, Bücking B, Liener UC, Neuerburg C. [Individual aspects in elderly patients with fragility fractures]. *Radiologe*. 2021 Nov 12. doi: 10.1007/s00117-021-00928-x. (IF 2021 = noch nicht veröffentlicht; IF 2020 = 0.638)

*Buchkapitel*

Keppler A, **Fleischhacker E**, Fürmetz J, Böcker W, Neuerburg C. “Challenges in Geriatric Patients with Fractures around the Knee”, erschienen in “Knee fractures”, Seite 233 – 244; Herausgeber: Marc Hanschen, Peter Biberthaler, James P. Wadell. 1. Auflage; Springer Verlag

Neuerburg C, Keppler AM, **Fleischhacker E**, Gleich J, Kammerlander C. Part 4: Fracture Care Service Models – Building a Senior Trauma Centre. In: Senior Trauma Patients – An integrated approach / (Editors: Pape H-C, Kates SL, Hierholzer C, Bischoff-Ferrari HA) Springer Verlag 2022. ISBN 978-3-030-91482-0, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91483-7>

**Fleischhacker E**, Helfen T. “Akutes Kompartmentsyndrom des Unterschenkels”, erschienen in “Referenz Orthopädie und Unfallchirurgie - Knie”, Seite 352 – 357; Herausgeber: Andreas Roth, Julian Fürmetz, Wolfgang Böcker. 1. Auflage; Georg Thieme Verlag

**Evi Fleischhacker**, Johannes Gleich, Eric Hesse, Benjamin Bücking, Ulrich C. Liener, Carl Neuerburg. „Spezieller Aspekte bei Frakturen des fragilen Knochens“ erschienen in „Kompendium bildgebende Frakturdiagnostik“, Seite 47 - 67; Herausgeber: Marc-Andre Weber, Thomas Mittlmeier. 1. Auflage. Springer Verlag.

*Sonstige Veröffentlichungen (z.B. Letters to the Editor)*

**Fleischhacker E**, Bücking B, Liener UC, Neuerburg C. [Hüftfraktur]. Sportärztezeitung. 2019 Apr. (Ø IF)