

**Aus der Klinik für Chirurgie des Stütz- und Bewegungsapparates
der Universität zu Lübeck
Direktor: Prof. Dr. Ch. Jürgens
und dem
BG Klinikum Hamburg
Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. Ch. Jürgens**

Versagensmechanismen von Osteosynthesen des Humerusschaftes

Inauguraldissertation

zur
Erlangung des Grades eines Doktors
der Zahnmedizin
der Universität zu Lübeck
- Aus der Sektion Medizin -

vorgelegt von
Lars Wagenmann
aus Frechen

Lübeck 2020

1. Berichterstatter/Berichterstatterin:

Priv.-Doz. Dr. med. Sven Hirschfeld

2. Berichterstatter/Berichterstatterin:

Prof. Dr. med. Dr. dent. Dirk Hermes

Tag der mündlichen Prüfung: 23.09.2020

Zum Druck genehmigt. Hamburg, den 23.09.2020

Promotionskommission der Sektion Medizin

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	vi
1. EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG	1
1.1 Einleitung	1
1.2 Ätiologie und Inzidenz der Humerusschaftfrakturen	1
1.3 Anatomische Grundlagen des Humerus	2
1.4 Frakturen des Humerusschaftes	3
1.5 Störungen in der Frakturheilung	5
1.6 Pseudarthrose	5
1.7 Operative und konservative Versorgungen von Frakturen im Humerusschaft	7
1.7.1 Operationsindikationen	8
1.7.3 Konservative Versorgung	9
1.7.4 Chirurgische Versorgung	10
1.7.4.1 Versorgung durch die Marknagelung	11
1.7.4.2 Versorgung durch Osteosyntheseplatten	12
1.7.4.3 Versorgung durch den Fixateur externe	14
1.7.5 Allgemeine Komplikationen	14
1.7.6 Therapie der Pseudarthrose	15
1.8 Fragestellung	17
2. MATERIAL UND METHODE	18
2.1 Patientenkollektiv	18

2.2 Informationsbeschaffung	18
2.3 Definition der erfassten Versagensmechanismen	19
2.4 Bestimmung der Frakturspaltbreite	21
2.5 Statistik	22
3. ERGEBNISSE	23
3.1 Patientenkollektiv	23
3.1.1 Geschlechtsverteilung	23
3.1.2 Altersverteilung bei Ersteingriff	23
3.1.3 Altersverteilung bei 1. Revision	24
3.1.4 Behandlungsdauer bis 1. Revision	25
3.1.5 Behandlungsdauer bis finale Versorgung	25
3.1.6 Voroperationen vor finaler Versorgung	26
3.1.7 Lokalisation der Pseudarthrose am Humerusschaft	27
3.1.8 Art der Pseudarthrose	28
3.1.9 Unfallart	30
3.1.10 Raucher	30
3.1.11 Frakturtyp	31
3.1.12 AO-Klassifikation	32
3.1.13 Frakturspaltbreite	33
3.1.14 Zugang	33
3.1.15 Anzahl der Verfahrenswechsel	34
3.1.16 Anzahl der Revisionen	35

3.1.17 Entwicklung von Parästhesien	36
3.1.18 Keimnachweis	36
3.1.19 Erstversorgung	37
3.1.20 Versagensmechanismus 1. Versorgung	38
3.1.21 Versagensmechanismus 1. Versorgung Zusammenfassung	38
3.1.22 Versagensmechanismus Revision	39
3.1.23 Finale Versorgung	41
3.1.24 Zusammenhang Versagensmechanismus und AO-Klassifikation	42
3.1.25 Zusammenhang AO-Klassifikation und Frakturspaltbreite	43
3.1.26 Zusammenhang Frakturspaltbreite und Versagenstyp	44
4. FALLBEISPIELE	46
4.1 Fallbeschreibung 1	46
4.2 Fallbeschreibung 2	47
4.3 Fallbeschreibung 3	48
4.4 Fallbeschreibung 4	49
4.5 Fallbeschreibung 5	50
5. DISKUSSION	52
5.1 Patientenkollektiv	52
5.2 Analyse der Versagensmechanismen	54
5.3 Revision	60
5.4 Keimnachweis	62
5.5 Limitierungen der Studie	62

5.6 Schlussfolgerungen	63
6. ZUSAMMENFASSUNG	65
7. LITERATURVERZEICHNIS	67
8. DANKSAGUNG	75
9. LEBENSLAUF	76

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
et al.	und andere
i.d.R.	in der Regel
OP	Operation
PSA	Pseudarthrose
S.	Seite
s.	siehe
sog.	sogenannt
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Oberarmknochen des Menschen. (Quelle: [98]).....	3
Abb. 2: AO-Klassifikation Humerusschaftfrakturen. (Quelle: [99])	4
Abb. 3 Bestimmung der Frakturspaltbreite	21
Abb. 4 Geschlechtsverteilung	23
Abb. 5 Altersverteilung bei Ersteinriff	24
Abb. 6 Altersverteilung bei 1. Revision.....	24
Abb. 7 Erstversorgung bis Erstrevision	25
Abb. 8 Erstversorgung bis finale Versorgung	26
Abb. 9 Voroperationen vor finaler Versorgung	26
Abb. 10 Humerus mit Einteilung Segmenteinteilung	27
Abb. 11 Lokalisation der Pseudarthrose.....	27
Abb. 12 Pseudarthrose nach Weber & Czech	28
Abb. 13 Pseudarthrose nach Weber & Czech Vitalität	29
Abb. 14 Art der Pseudarthrose.....	29
Abb. 15 Unfallart	30
Abb. 16 Raucher	31
Abb. 17 Frakturtyp	31
Abb. 18 AO-Klassifikation	32
Abb. 19 Frakturspaltgröße in Prozent	33
Abb. 20 Zugang Nagelung	34

Abb. 21 Anzahl Verfahrenswechsel	34
Abb. 22 Anzahl Revisionen	35
Abb. 23 Parästhesien.....	36
Abb. 24 Keimnachweis	37
Abb. 25 Erstversorgung	37
Abb. 26 Versagensmechanismus 1. Versorgung	38
Abb. 27 Versagensmechanismus 1. Versorgung Zusammenfassung	39
Abb. 28 Versagensmechanismus der ersten Revision (n=17)	40
Abb. 29 Anzahl der jeweiligen Versorgungen bei finaler Versorgung	41
Abb. 30 Versagenstyp in Abhängigkeit der AO-Klassifikation.....	43
Abb. 31 Frakturspaltbreite und AO-Klassifikation.....	44
Abb. 32 Versagenstyp in Abhängigkeit der Frakturspaltbreite in Prozent	45
Abb. 33 a) 6 Mon. nach Trauma: Pseudarthrose nach Nagelosteosynthese, b) 18 Mon. nach Trauma: Revision mit Plattenosteosynthese, c) Konsolidierung 24 Mon. nach Trauma/ 6 Mon. nach Plattenosteosynthese	46
Abb. 34 a) 4 Mon. nach Trauma: Pseudarthrose nach Nagelosteosynthese, b) 14 Mon. nach Trauma: Revision mit Plattenosteosynthese und Fraktur der Platte, c) Konsolidierung 30 Mon. nach Trauma/ 15 Mon. nach Plattenosteosynthese	47
Abb. 35 a) 4 Monate nach Trauma, Pseudarthrose nach Plattenosteosynthese, b) 12 Monate nach Trauma bzw. 5 Monate nach Revision, Konsolidierung nach Re- Plattenosteosynthese.....	48
Abb. 36 a) Fraktur am Tag des Trauma, b) 16 Monate nach Trauma, Fraktur der Osteosyntheseplatte und Fehlstellung des Humerus	49
Abb. 37 16 Monate post Trauma mit finaler Osteosyntheseplatte sowie knapp 1 Monat post Revision	50

Abb. 38 Ausgeprägte Osteolyse um Marknagel sowie Verriegelungsschrauben 25 Monate post OP.....	51
Abb. 39 Re-Osteosynthese durch winkelstabile Platte nach Entfernung des Marknagels 25 Monate post OP, ap und seitlich	51
Abb. 40 Übersicht Versagensmechanismen nach Erstversorgung.....	56

1. Einleitung und Fragestellung

1.1 Einleitung

Als längster, stark exponierter sowie kräftigster Röhrenknochen der oberen Extremität stellt der Humerus einen besonderen Teil des menschlichen Skelettes dar. Der Anteil der Humerusschaftfrakturen, auf die Gesamtheit aller Frakturen des menschlichen Skelettes, liegt bei 1-3 % [10,41,85] und tritt damit verglichen mit den proximalen Humerusfrakturen eher in den Hintergrund [27]. Die Inzidenz liegt bei 15/100000 mit zwei Maxima zwischen 20 und 30 Jahren sowie bei Patienten jenseits der 60 Jahre [27,52].

Die Versorgung der Humerusschaftfraktur mittels Marknagelung, Plattenosteosynthese oder in besonderen Fällen dem Fixateur Externe stellen derzeit die operativen Standardverfahren zur Heilung der verschiedenen Frakturen im Bereich des Humerusschaftes dar [90] und gewährleisten in der Regel in kürzest möglicher Zeit die maximale schmerzfreie Mobilisierung für den Patienten mit der Rückkehr in sein gewohntes Tätigkeitsfeld.

Trotz Forschung und kontinuierlicher Weiterentwicklung der Implantate kommt es dennoch zum Versagen der Osteosynthesen und zum Ausbilden von Pseudarthrosen in einem relevanten Prozentsatz [8,15,43,54,60,70,80,83].

Während die Häufigkeit der Diagnosestellung einer Pseudarthrose nach Humerusschaftfrakturen in der Literatur vielfach dargestellt ist, konnte keine zahlenmäßige Aufschlüsselung der zugrundeliegenden Versagensmechanismen gefunden werden.

In dieser Arbeit liegt deshalb der Fokus auf den Versagensmechanismen von Versorgungen der Humerusschaftfrakturen.

1.2 Ätiologie und Inzidenz der Humerusschaftfrakturen

Die Frakturen des Oberarmschaftes betreffen die mittlerem 3/5 des Humerus und befinden sich zu 60 % im mittleren Schaftdrittel, 30 % im proximalen Drittel und 10 % im distalen Drittel. Die Oberarmschaftfraktur liegt in bis zu 3 % aller Frakturen des menschlichen Skelettes vor [41]. Betroffen sind junge und ältere Menschen zu etwa

gleichen Teilen, wobei Kinder die Ausnahme bilden [5]. In etwa 50 % der Fälle handelt es sich um einfache, im mittleren Diaphysendrittel befindliche Frakturen vom Typ A der AO-Klassifikation mit geringem Weichteilschaden [62]. Ursächlich werden die direkte Gewalteinwirkung für Quer-, Biegungs- und Stückfrakturen benannt sowie indirekte Gewalteinwirkung für Spiralfrakturen. Pathologische Frakturen finden ihre Ursachen häufig in einem Tumorleiden oder Osteoporose [3,6].

1.3 Anatomische Grundlagen des Humerus

Der Humerus stellt einen typischen Röhrenknochen dar und gliedert sich in ein langes, zylindrisches Mittelstück, das Corpus Humeri, und ein proximales sowie distales Stück. Im Inneren befindet sich ein Markkanal und an seiner Außenseite umgibt ihn das Periost. An seinem proximalen Ende steht der halbkugelförmige Gelenkkopf namens Caput Humeri, welcher durch die Einziehung Collum Anatomicum von dem restlichen Teil abgesetzt ist. Die lange Sehne des Bizeps verläuft durch den Sulcus intertubercularis, der wiederum die zwei Muskelhöcker, das Tuberculum majus sowie Tuberculum minus trennt. Distal der Tuberculi verjüngt sich der Humerus und bildet mit dem Collum Chirurgicum die Stelle des Humerus mit maximaler Frakturgefährdung. Weiterhin ist die Einsenkung Sulcus Nervi Radialis zu nennen, die den gleichnamigen Nerven N. Radialis beheimatet.

Von den Rändern seiner Furche entspringen die seitlichen Köpfe des M. triceps brachii. Nach distal wird der Knochenkörper dreiseitig prismatisch. Die beiden vorderen Flächen, Facies anterior lateralis und Facies anterior medialis werden nur durch eine flache, kantenartige Erhebung getrennt, während die dorsale Fläche, die Facies posterior, durch zwei Kanten, Margo lateralis und Margo medialis begrenzt wird. Der distale Teil flacht kontinuierlich ab und mündet in den Epicondylus lateris und Epicondylus medialis mit der angrenzenden Einkerbung mit dem N. Ulnaris. Distal endet der Knochen mit dem Condylus Humeri mit den Vertiefungen Fossa coronoidea sowie Fossa radialis und der gegenüberliegenden Fossa olecrani [4].

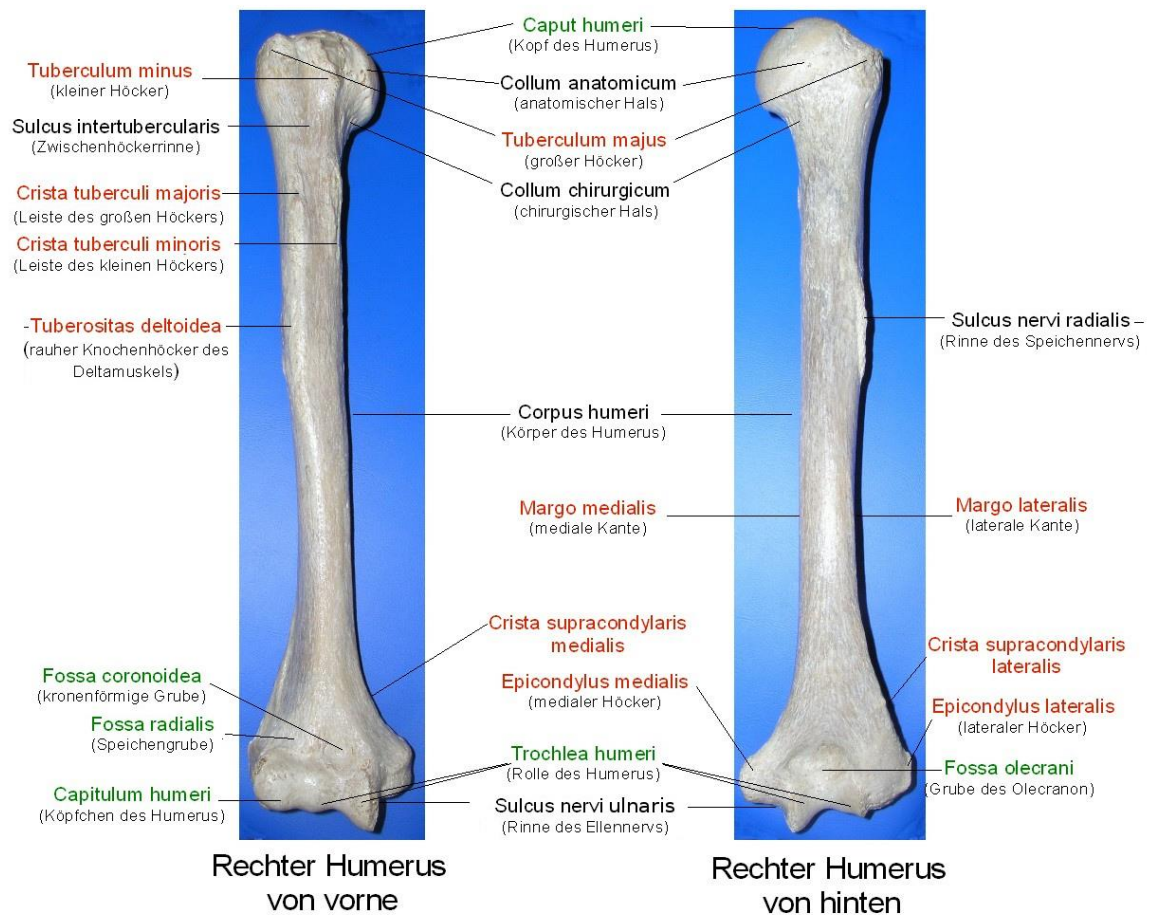


Abb. 1: Oberarmknochen des Menschen. (Quelle: [98])

1.4 Frakturen des Humerusschaftes

Trotz geringer Beteiligung des Humerusschaftes an der Gesamtheit der Humerusfrakturen, bietet auch der Schaft eine gewisse Bandbreite an verschiedenen Frakturformen. Die Einteilung findet entsprechend der AO-Klassifikation in einfache Frakturen, Keilfrakturen und komplexe Frakturen statt [62]. Die genau Bestimmung der Art der Fraktur und die korrekte Einordnung in die Klasse der Fraktur bildet die Grundlage für das weitere Verfahren, die Prognose und entsprechende nervalen und vaskulären Schädigungen. Die Einteilung der Frakturen des Humerusschaftes belaufen sich auf die folgenden Werte; 65 % der Frakturen des Schaftes bestehen aus Typ A (einfache Fraktur), 25 % Typ B (Keilfraktur) und 10 % Typ C (Komplexe Fraktur) [99]. Klinisch stellen sich verschiedene Symptome ein. Häufig treten Blutergüsse und Schwellungen in

Kombination mit einer meist schmerzhaften Bewegungseinschränkung auf. Die Komplikation der Verletzung des den Humerusschaft begleitenden Nerven N. Radialis äußert sich durch die Symptomatik der Fallhand und Sensibilitätsstörungen.

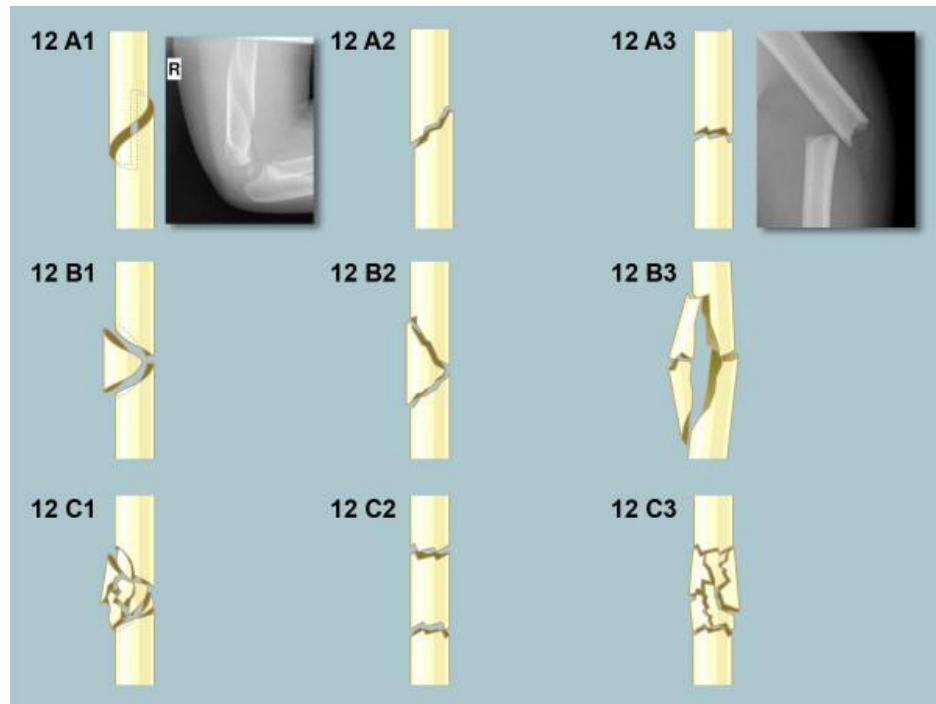


Abb. 2: AO-Klassifikation Humerusschaftfrakturen. (Quelle: [99])

AO-Klassifikation (Die 12 steht gemäß AO-Klassifikation für den Humerusschaft) [99]

Die AO-Klassifikation von 2018 verändert B1 sowie C1 zu jeweils B2 und C2. Die vorherige zusätzliche Einteilung entfällt.

12 A: Einfache Fraktur:

- 12 A1: spiralförmig
- 12 A2: schräg (>30°, Verlauf der Frakturlinie bezogen auf die Horizontale)
- 12 A3: quer (<30°)

12 B: Keilfraktur:

- 12 B1: mit intaktem Drehkeil
- 12 B2: mit intaktem Biegungskeil
- 12 B3: fragmentiert

12 C: Komplexe Fraktur:

- 12 C1: spiralförmig
- 12 C2: etagenförmig
- 12 C3: irregulär

1.5 Störungen in der Frakturheilung

Die Heilung einer Fraktur ist ein Prozess, bei dem mehrere Faktoren eine Rolle spielen. Es finden sich mechanische und biologische Faktoren, die eine Rolle bei der Konsolidierung der Fraktur aufweisen. Das Ausbilden einer Pseudarthrose beruht auf einer Vielzahl von Faktoren [1,28,64]. Die Hauptgründe für die Ausbildung einer Pseudarthrose sind Bewegung innerhalb der Fraktur (inadäquate Frakturstabilität), Störungen im biologischen Milieu wie Avaskularität (besonders bei offenen Frakturen), verbleibender Frakturspalt (Knochenverlust, Nagelung mit Distraction) sowie das Auftreten einer Infektion sowie Kombinationen aus genannten Faktoren [1,23,53,72].

1.6 Pseudarthrose

Unter dem Begriff der Pseudarthrose (PSA) werden in der Medizin schwere Komplikationen im Heilungsprozess des Knochens beschrieben. Die Verzögerung sowie das Ausbleiben der vollständigen knöchernen Konsolidierung sowie die pathologische bewegliche Verbindung zwischen zwei oder mehreren Knochenfragmenten, bilden die Grundproblematik der PSA. Die Ursachen für die Pseudarthrose ist in der Regel eine mangelnde Ruhigstellung der Bruchstelle, eine Infektion, eine nicht ausreichende osteosynthetische Versorgungen sowie Durchblutungsstörungen [23,83].

Die Definition der Pseudarthrose ist nicht einheitlich. In der Literatur werden unterschiedliche, teilweise unspezifische klinische und radiologische Kriterien herangezogen und es besteht kein Konsens, ab wann eine Frakturkonsolidierung vorliegt [13,33,42,70]. Die Diagnose der Pseudarthrose wird in Deutschland in der Regel radiologisch gestellt [24,83].

Die Unterscheidung zwischen den beiden Pseudarthroseformen, der vitalen, reaktiv hypertrophen und der avitalen, atrophen Pseudarthrose, ist für das weitere therapeutische Vorgehen entscheidend. Radiologisch zeichnet sich die durch mechanische Instabilität entstehende vitale Pseudarthrose durch vermehrte Sklerose der Knochenenden und überschießende Kallusbildung aus, wohingegen sich die avitale, oftmals Infekt bedingte Pseudarthrose durch ein Fehlen jeglicher Knochenreaktion oder sogar ein Knochenverlust darstellt [13,83]. Zur diagnostischen Entscheidung kann auch die mittels Power-Doppler darstellbare bessere Vaskularisierung der vitalen Pseudarthrose herangezogen werden [74].

Die Entstehung der Pseudarthrose durchläuft verschiedene Phasen. Die ersten sechs Monate mit ausbleibender Knochenheilung werden als „Verzögerte Frakturheilung“ beschrieben (engl. delayed-union). Sobald nach diesen sechs Monaten die Heilung des Knochens weiterhin ausbleibt, spricht man von einer Pseudarthrose (engl. non-union). Die Infektpseudarthrose beschreibt hingegen das Ausbleiben der Knochenheilung nach einer Infektion. Die Pseudarthrose kann weitergehend genauer differenziert werden. Es lassen sich die hypertrophe sowie die atrophe Pseudarthrose klassifizieren. Die hypertrophe Pseudarthrose ist charakterisiert durch eine gute Vaskularisierung und eine breite Zone von Faserknorpel. Es liegen keine Knochenbildungsstörungen vor. Diese Art der PSA kann durch die Ruhigstellung durch Marknägel oder Osteosyntheseplatten erfolgen. Die atrophe oder devitale Pseudarthrose ist durch die nekrotischen Fragmente im Frakturspalt sowie eine Minderdurchblutung gekennzeichnet. Die Revision durch chirurgische Entfernung von nekrotischem Knochenmaterial sowie ein Knochenaufbau mittels Spongiosaplastik sind hier die Mittel der Wahl.

Des Weiteren sind extrinsische sowie intrinsische Faktoren für die Bildung der PSA verantwortlich. Intrinsische Faktoren sind beispielsweise Lebererkrankungen, Mangel durchblutung, Diabetes, Immundefekte, Adipositas und allgemeine Immundefekte [23].

Extrinsische Faktoren, die die PSA begünstigen, ist die Interposition von Weichteilen im Frakturspalt, mangelnde Stabilisierung, nicht ausreichende Kompression des Frakturspalt, Nekrosen und eine ungenügende Compliance des Patienten durch nicht ausreichende Schonung sowie zu früh beginnende Mobilisierung [23].

Die Symptomatik einer PSA wird durch langanhaltende Schmerzen, abnorme Bewegungen der Skelettregion im Bereich der Fraktur sowie Funktionseinschränkungen dargestellt. Die Diagnostizierbarkeit der PSA ist durch radiologische Verfahren gegeben [10]. Radiologisch lässt sich der verbleibende Bruchspalt sowie eine Sklerosierung durch ein Röntgenbild, CT sowie MRT darstellen.

Therapeutisch folgt der diagnostizierten PSA in der Regel eine operative Revision mit einer Resektion von Gewebe innerhalb des Bruchspaltes oder Entfernung von infiziertem Gewebe. Die Versorgung zur mechanischen Stabilisierung des Bruchspaltes erfolgt durch die Osteosynthese mittels Marknagelung oder Platte. Die Entnahme von Spongiosa aus dem Beckenkamm ist oftmals Standard bei Revisionen der Pseudarthrose, da der Knochendefekt durch Spongiosa aufgefüllt und weitergehend durch die Osteoinduktivität der autologen Spongiosa zur Heilung angeregt werden kann [82].

1.5 Faktoren der gestörten Knochenkonsolidierung

Hauptsächlich werden drei Faktoren im Hinblick auf die gestörte Konsolidierung einer Fraktur genannt. Diese sind die fehlende und unzureichende Gefäßversorgung, Instabilität zum falschen Zeitpunkt sowie mangelnder Kontakt der einzelnen Fragmente [91].

Die unzureichende Gefäßversorgung, verursacht durch beispielsweise offene Frakturen oder durch Zerstörung medullärer Gefäße bei intramedullären Nagelungen kann dazu führen, dass es zu Problemen bei der Ausheilung kommt und Knochennekrosen entstehen können.

Instabilität während der Ausheilung ist ein weiterer Faktor, der das Ausheilen einer Fraktur beeinflussen kann. Mechanisch wird die Knochenkonsolidierung maßgeblich durch die Stabilität der Osteosynthese oder Frakturfixation sowie die Weite des Frakturspaltens beeinflusst [4,19]. Im Allgemeinen kann eine axiale Belastung das Ausheilen einer Fraktur fördern, wo hingegen Zug und Scherkräfte eher der Heilung entgegenwirken [4]. Liegt zur übermäßigen Bewegung eine ausreichende Vaskularität vor, kann hieraus eine hypertrophe Pseudarthrose entstehen, die durch überschießende Kallusbildung charakterisiert ist [53].

Zusätzlich können bakterielle Infektionen eine Verschlechterung der Frakturheilung bewirken [79]. Eine Infektion kann durch eine offene Fraktur sowie durch eine operative Therapie entstehen. Bei einer primär geschlossenen Fraktur kann es postoperativ nach der offenen Reposition zu bakterieller Keimverschleppung und Infektion kommen [79].

1.7 Operative und konservative Versorgungen von Frakturen im Humerusschaft

Um die knöcherne Konsolidierung des frakturierten Humerusschaftes zu erzielen, kommen verschiedene Methoden je nach Verletzungsausmaß, Allgemeinzustand des Patienten und der Präferenzen des behandelnden Arztes oder der Klinik zur Anwendung [69]. Viele Frakturen können durch konservative Methoden wie den Oberarmbrace zum Ausheilen gebracht werden [27,45,80]. Sofern allerdings eine offene Fraktur, eine neurovaskuläre Verletzung, eine Fehlstellung, Polytrauma oder eine bereits bestehenden Pseudoarthrose vorliegt, sollte eine chirurgische Behandlung erfolgen [27,45,73].

Bei unkomplizierten Brüchen bietet sich die konservative Versorgung, mit einem Anteil von circa 50 % [69], mittels Reposition der Fraktur und anschließender Ruhigstellung im Desault-Verband und folgend mit dem Oberarmbrace an, wobei nach Kallusbildung eine Mobilisierung und Beübung nach ca. 6 Wochen stattfinden kann.

Für die operative Behandlung der Humerusschaftfraktur finden die Marknagelung, aufgebohrt und unaufgebohrt, die der Plattenosteosynthese, in vielen Fällen mittels winkelstabilem Implantat, sowie der Fixateur Externe ihre Anwendung.

Diese operativen Methoden finden hauptsächlich bei komplexen Brüchen, Schädigungen des N. Radialis, bei Fehlstellungen, bei offenen sowie instabilen Frakturen und Verletzungen der Gefäße oder bei vorliegender Pseudarthrose ihre Anwendung [11,16].

Der Fixateur ist besonders geeignet, um infizierte Frakturen zum Ausheilen zu bringen oder polytraumatisierte Patienten vorerst zu stabilisieren, um anschließend eine mögliche Plattenosteosynthese an die Behandlung des Fixateurs anzuschließen. Die Marknagelung findet auf Grund des geschlossenen Vorgehens, der geringeren postoperativen Komplikationen sowie der kürzeren Operationsdauer ihren immer häufiger werdenden Einsatz [69]. Die Plattenosteosynthese erlaubt es, durch ihr offenes Vorgehen die Fraktur darzustellen, bei Bedarf eine Sequestrektomie sowie Debridement durchzuführen und Spongiosa anzulagern [13]. Die genaue Reposition der Frakturteile kann unter Sicht optimal verlaufen. Die optionale Winkelstabilität kann eine zur Ausheilung nötige, dauerhafte mechanische Stabilität erzeugen.

1.7.1 Operationsindikationen

Wie bereits in vorangegangenem Punkt erwähnt, stellen einige Formen der Frakturierung des Humerus absolute Operationsnotwendigkeit dar. Die starke Dislokation, erhebliche Funktionsstörungen und die primäre und sekundäre Radialisschädigung sind als absolute Operationsindikationen anzusehen. Des Weiteren muss die Operationsentscheidung individuell auf den Patienten in Hinblick auf das Operationsrisiko, die Rekonvaleszenzzeit, das Erlangen der vollen Beweglichkeit, der maximalen Kraft und Schmerzfreiheit sowie das Erreichen der höchstmöglichen Lebensqualität im Sinne des Patienten abgestimmt sein.

Neben der in der Literatur klar zu findenden Indikationen zur operativen Behandlung der Pseudarthrose findet man auch einige Kontraindikationen [63]. Diesbezüglich finden sich allgemeine Risiken, lokale entzündliche Veränderungen, besonders alte vorliegenden Pseudarthrosen sowie Patienten, die die Aufklärung nicht klar verinnerlicht haben [63].

Eine besonders kontraindizierte Gruppe stellen Alkoholiker dar. Es wurde beobachtet, dass insbesondere bei Alkoholikern ein osteoporotischer Knochen vorliegt und demnach bei Plattenosteosynthese vermehrt ein Ausriss des Osteosynthesematerials zu beobachten war [63].

1.7.3 Konservative Versorgung

Die konservative Behandlung der Frakturen wird heutzutage durch antike Schriften sowie Ausgrabungen und Auswertungen alter menschlicher Skelette auf circa 2500 Jahre zurückverfolgt. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts wurden Frakturen maßgeblich konservativ behandelt. Als eine der essentiellen Vorgaben durch Hippokrates um 460 v. Christus wurde bereits formuliert, dass die exakte Reposition der Frakturenden eine wichtige Voraussetzung für das korrekte Ausheilen der Fraktur ist. Heutzutage wird das Ausheilen der Fraktur durch verschiedene konservative Konzepte gewährleistet. Eine konservative Versorgung geht mit einigen Vorteilen gegenüber der operativen Versorgung einher, wird allerdings in der Literatur als weniger komfortabel gegenüber der komplikationslosen operativen Versorgung beschrieben [78]. Die diskutierten Vorteile der konservativen Behandlung sind gute Heilungsraten mit über 95 % wegen der guten anatomischen Voraussetzungen, niedrige Komplikationsraten in Kombination mit kurzen Krankenhausaufenthalten, geringen Kosten sowie gute ästhetische Ergebnisse. Als Nachteile werden Pseudarthrosenraten von 0 bis zu 30 % beschrieben [25,52,55,80]. Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten der Reposition bei geschlossener Repositionierung bei verschobenen Frakturen können Fehlstellungen verbleiben. Eine eingeschränkte Beweglichkeit über Wochen sowie die eingeschränkte Hygienefähigkeit verschlechtern den Behandlungskomfort für den Patienten.

Die in der Literatur genannten Voraussetzungen für die konservative Behandlung sind Frakturen im mittleren Drittel bei jungen Patienten mit gutem Muskelmantel und geringen Schmerzen [78]. Enge physiotherapeutische Behandlung und ambulante Betreuung der Patienten sowie schmerzadaptierte Analgesie sollen gewährleistet sein. Eine exzellente Compliance der Patienten inklusive des Wunsches und Einverständnis der Patienten

bezüglich der gewählten Therapievariante sollte vorhanden sein. Die erweiterte Behandlungsdauer gegenüber der komplikationslosen operativen Versorgung sollte gewährleistet sein [78]. Eine beispielsweise konservative Versorgung kann mittels einer 1-2wöchigen Ruhigstellung in einem Gilchrist-Verband erfolgen. Im Anschluss erfolgt die funktionelle Nachbehandlung mit einem beispielsweise Sarmiento-Brace ohne Belastung für 6 Wochen [78]. Klestil et al. finden, dass bei korrekter Anwendung die konservative Therapie der operativen ebenbürtig ist [44].

1.7.4 Chirurgische Versorgung

Die chirurgische Versorgung von Frakturen entwickelte sich im Allgemeinen erst circa 1895 nach Entdeckung der Röntgenstrahlung durch Konrad Röntgen und der Entwicklung und Einführung der komplexen Anästhesieverfahren. In vielen Fällen wurde die Plattenosteosynthese bei entsprechender Indikation als Mittel der Wahl gewählt [97]. In späteren Jahren entwickelte sich die Marknagelung als gängige Alternative zu Osteosynthese. Der verriegelte Marknagel ist heute gemeinsam mit der Osteosyntheseplatte, auch winkelstabil, zum Standard der operativen Versorgung der Frakturen am Humerusschaft geworden. Als absolute Operationsindikationen werden die folgenden Punkte formuliert: Polytrauma, offene Frakturen, Gefäßläsionen, Kettenverletzungen, beidseitige Frakturen, Radialisläsionen [33,78]. Als relative Operationsindikationen werden die folgenden Faktoren in der Literatur genannt: kurze Quer- und Schrägbrüche, proximale und distale Frakturen, persönliche Begleitumstände, Patientenwünsche sowie eine vorliegende Pseudarthrose [78]. Es stehen, wie weiter oben im Text bereits erwähnt, die Osteosynthese mittels Platten, bei Indikation auch winkelstabil, sowie die Marknagelung, die entweder antegrad oder retrograd durchgeführt werden kann [78]. Abschließend wurden bereits 1962 durch Maurath et al. [56] die folgenden Bedingungen beschrieben, um eine erfolgreiche Knochenbruchheilung, mit besonderem Augenmerk auf die Marknagelung, gewährleisten zu können:

- I. Die Fragmente müssen an der Bruchstelle ohne Hilfe äußerer Kräfte und Momente gegeneinander fixiert sein.
- II. Das System Knochen-Nagel muss einer Verschiebung, Verdrehung oder Abknickung der Fragmente gegeneinander, hervorgerufen durch das Einwirken äußerer Kräfte oder Momente, Widerstand entgegensetzen.

III. Reicht der Widerstand des Systems nicht aus, um eine Verschiebung, Verdrehung oder Abknickung der Fragmente zu verhindern, so müssen die Fragmente nach Beendigung der Kraft- oder Momenteinwirkung wieder in die Ausgangslage zurückkehren.

1.7.4.1 Versorgung durch die Marknagelung

Die Versorgung durch die intramedulläre Nagelung stellt eine operative Alternative zur Versorgung mittels Osteosyntheseplatten dar. Der Ursprung der Nagelung liegt im Jahr 1940 durch die Vorstellung des langgeschlitzten Marknagels durch Küntscher. Einige Jahre später, etwa 1942, wurde zusätzlich das Aufbohren des Markraumes durch Maatz entwickelt. Eine weitere Entwicklung stellten die Rush-Pins dar. Ab 1955 wurde diese Methode eingeführt. Letztere Weiterentwicklung zeigte dennoch einige Schwächen, die durch Maurath et. al. 1962 beschrieben wurde [56]. Diese beschrieben, dass das Ausheilen der Fraktur deutlich länger dauerte und kein genügender Kallus ausgebildet wurde und zusätzlich deutlich länger in seiner Ausbildung benötigt. Weiterhin wurden häufig Distractionen der Frakturen entdeckt, sodass die Rush-Pins in ihrer Anwendung an Bedeutung verloren [56]. Eine weitere Entwicklung fand 1980 statt. Der damalige Marknagel wurde häufig als aufgebohrter Nagel angewandt, der nach und nach durch den unaufgebohrten Marknagel ersetzt wurde [34].

Allgemein gilt die Marknagelung als geeignetes Verfahren und Therapie der Wahl bei Frakturen der unteren Extremitäten [21]. Ihre Anwendung im Bereich des Humerus, insbesondere des Humerusschaftes, bedarf einer differenzierten Betrachtung, da die Ergebnisse verglichen mit der etablierten Osteosynthese mittels Platten und Schrauben Vor- und Nachteile haben. Als Vorteile werden die geringere Zugangsmorbidität, die „biologische“ Knochenbruchheilung und das geringere Risiko einer intraoperativen N.-radialis-Schädigung beschrieben [7]. Als Nachteile werden in der Literatur Zusatzfrakturen und höhere Pseudarthrosenrate genannt [7]. Die erhöhte Pseudarthrosenrate (0-23 %) gilt auch als ein wesentlicher Nachteil der Marknagelung [10,47,77]. Diese ist bedingt durch die teilweise mangelnde Rotationsstabilität und fehlende axiale Kompression [2]. Weitere Nachteile sind Infektionen (0-5 %), iatrogene Frakturen bei Aufbohren, Impingementsyndrom durch überstehenden Nagel bedingt durch Nagelwanderung oder nicht exakte Positionierung des Nagels, Verletzungen der Nerven und Gefäßen bei Einbringung der Verriegelungsschrauben [12].

Die optionale Wahl Zugangsart der Marknagelung, antegrad oder retrograd, bringt neuen Spielraum und Verbesserungsmöglichkeiten bei dem Behandlungsergebnis. Die Wahl der retrograden Oberarmnagelung ist seit über 50 Jahren bekannt. Die neu entwickelten Verriegelungsmarknägel lassen, je nach Frakturlokalisation, eine Option beider Zugangswege zu. Als Alternative zur antegraden Nagelung erweitert die Retrogradnagelung das Indikationsspektrum auf weit proximale Frakturen, eine zugangsbedingte Läsion der Schulter entfällt, weswegen die funktionellen Ergebnisse insgesamt besser sind. Das Risiko einer Zusatzfraktur am Eintrittspunkt beträgt 5 % [7].

1.7.4.2 Versorgung durch Osteosyntheseplatten

Lange Zeit, genauer bis zum Ende des 19. Jahrhunderts und den Anfängen des 20. Jahrhunderts, wurden Frakturen mittels konservativer Behandlungsmethoden versorgt. Frühe Versuche mit Implantaten führten zunächst zu Misserfolgen. Das strikte Einhalten der aseptischen Operationen konnte nicht vollständig gewährleistet werden, so dass die Anfänge der Osteosynthesen zunächst keine große Beachtung und Erfolgsaussichten mit sich brachten, da sie mit hohen Infektionsraten behaftet waren.

Mit der Einführung der Asepsis änderte sich dies. Durch Volkmann, Bircher und Gluck wurden erstmalige Erfolge erzielt. Elfenbeinstifte und Elfenbeinschienen wurden als erste Implantatmaterialien verwendet und durch Heine 1875 erstmals genutzt und beschrieben. 1897 beschrieb Lossen das Einbringen von Elfenbeinzapfen in die Markhöhle. Gluck erweiterte gegen Ende des 19. Jahrhunderts mit der Forderung von Knochentransplantaten zur Knochenregenerierung die bestehende Chirurgie um einen wichtigen Faktor [96]. Lambotte, der bereits die ersten extramedullären Verfahren von Langenbeck bereits um 1900 modifizierte, prägte auch gleichzeitig erstmals den Begriff der Osteosynthese [48]. Circa 1950 wurde die Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen ins Leben gerufen, die sich zur Aufgabe machte, Standards für die Behandlung von Frakturen zu erarbeiten. Maßgeblich gab es dazu die folgenden Punkte:

1. Anatomische Rekonstruktion der Frakturfragmente, insbesondere bei Gelenkbrüchen.
2. Stabile innere Fixation durch interfragmentäre Kompression, um den lokalen biomechanischen Anforderungen gerecht zu werden.

3. Erhaltung der Blutversorgung von Knochen und Weichteilen durch atraumatische Operationstechnik.

4. Frühe aktive Mobilisation der verletzten Extremität sowie des Patienten zur Vermeidung der sog. Frakturkrankheit.

Zu Beginn des 19. Jahrhundert begann man, Frakturen mit Metallplatten zu Schienen und somit den Frakturspalt zu überbrücken. Hansmann stellte beispielsweise aus Aluminium und Bronze eine Schiene her, welche bereits verschraubt werden konnte [35]. Lambotte entwickelte einige Zeit später eine Platte, die Schrauben zur direkten Fixierung der Platte unterhalb der Haut besaß. Im Verlauf wurden weitere Formen der Platten entwickelt. Diese waren gerade und gewinkelt, um Frakturen im Bereich der Gelenke mit ihnen behandeln zu können. Es wurden Rundlochplatten entwickelt, die schmale, runde und einige Jahre später, um 1960, ovale Löcher aufwiesen. 1969 entwickelten Allgöwer, Perren, Russenberger et al. die auch heute noch relevante DCP-Platte (dynamische Kompressionsplatte), mit der durch ein Gleiten der Schraube durch das Gleitloch eine Kompression der Fraktarenden erzielt werden konnte. 1980 erweiterte sich das Bestreben um eine Osteosynthese, die möglichst schonend durch geringe Auflagefläche auf dem Knochen und dem Frakturspalt selbst war. Dieses Ziel wurde mit der LC-DCP Platte (Limited Contact Dynamic Compression Plate) gewährleistet [29]. Mit dieser Konstruktion konnte die Auflagefläche auf dem Knochen um bis zu 50 % gesenkt werden [22]. Das Resultat der Reduktion der Kontaktfläche war fortan die Schonung der Gefäße des Periosts und der intrakortikalen Perfusion. Seit vielen Jahren werden ergänzend winkelstabile Plattenosteosynthesen verwendet und weiterentwickelt [95]. Der Mehrwert dieses Systems liegt in der stabileren und durch den Einbringungswinkel vorgegebenen Befestigungswinkel der Fraktur sowie die verringerte Disklokationsgefahr. Einer der häufig verwendeten Systeme hierfür ist die LCP (locking compression plate) und ihre Erweiterung mit der LC-DCP (limited contact-dynamic compression plate) [29]. Diese folgt dem bekannten Prinzip der reduzierten Auflage- und Kontaktfläche zum Knochen kombiniert mit der dynamischen Kompression. Technisch basiert die Winkelstabilität auf einem in den Plattenlöchern integrierten Gewinde [86]. Ebenfalls befindet sich in den Schrauben ein zusätzliches Gewinde. Mit diesem Gewinde können die Schraubenköpfe in die Platte eingedreht werden und inklusive des Kopfes in derselben versenkt werden. Dieser Mechanismus verringert das Risiko der Plattenlockerung. Eine weitere Ergänzung findet sich bei der LCP Platte der aktuellen Generation. Es finden sich hier Löcher für die dynamische Kompression sowie Löcher, die eine winkelstabile Verschraubung

ermöglichen, womit die Funktion als normale Platte mit Kompression sowie die Funktion als interner Fixateur gegeben ist [84].

1.7.4.3 Versorgung durch den Fixateur externe

Die ursprünglichste krallenartige Vorrichtung zur operativen Behandlung von Frakturen wurde 1848 durch Malgaigne beschrieben, die zur Behandlung einer Patella-Fraktur eingesetzt wurde. Folgend entwickelte Langenbeck 1851 einen am Knochen fixierten Schraubenapparat, welcher eine extramedulläre Fixation ermöglichte [48]. Die Anfänge der operativen Versorgung von Frakturen durch einen Fixateur Externe, wie man ihn heute kennt, gehen auf das Jahr 1897 zurück. Parkhill bot zu dieser Zeit den ersten gewerblichen Fixateur externe an, der mit Holzschrauben und zu verklebenden Flügelplatten ausgestattet war. Es wurden offene Frakturen und Pseudarthrosen mit dieser Konstruktion behandelt. Weiterhin wurden durch Freeman um 1909 diverse Artikel über die Erweiterung des Fixateur Externe durch Pins veröffentlicht. Lambotte beschrieb ebenfalls bereits 1902 die Biomechanik des externen Fixateurs sowie die Montagemöglichkeiten, bei der er technisch auf dem Knochenschraubenapparat nach Langenbeck aufbaute [48]. 1912 beschrieb Majana die unilaterale Fixateurmontage. Das damals beschriebene Prinzip ist bis heute gültig und ähnelt stark den heutigen Fixateuren [36]. Das System des externen Fixateurs funktioniert durch die stabile Verankerung der Konstruktion mit den Knochenfragmenten durch Pins und Stifte. Es ist uni- sowie bilateral anbringbar und kann in bestimmten Fällen auch als Ringfixateur vorliegen.

Zum Einsatz kommt dieses Verfahren häufig bei polytraumatisierten Patienten mit offenen Frakturen, bei denen eine zeitnahe und zügige Stabilisierung der Fraktur nötig ist [2,38].

Generell sind größere Weichteilverletzungen sowie Gelenkübergreifenden Frakturen und Verletzungen Indikationen zur Montage eines externen Fixateurs [38].

1.7.5 Allgemeine Komplikationen

Im Verlauf der konservativen Behandlung sowie bei der chirurgischen Versorgung können verschiedene Komplikationen auftreten.

Die konservative Versorgung basiert wesentlich auf der Compliance und Geduld des Patienten. Eine zu nennende Komplikation der konservativen Behandlung ist das Kompartmentsyndrom [46]. Dies beschreibt Zirkulationsstörungen des Blutes auf Grund von Hämatomen und Ödemen unterhalb des geschlossenen Gipses oder Verbandes. Zudem werden Druckschäden der Haut sowie tieferliegender Gewebe beobachtet [46]. Weiterhin wird in der Literatur das Risiko der Ausbildung eines Thrombus sowie einer Embolie beschrieben [46]. Bei der Marknagelung sind ebenso Komplikationen in der Literatur zu finden. Beschrieben durch Weller sind bestehen bereits bei Einbringen des Marknagels Risiken. Bei einem zu schmalen und zu kurzen Marknagel die fehlende Stabilität der Fraktur und zum anderen bei Einbringung eines eventuell zu dicken Nagels eine Verklemmung im Markraum [93]. Um dies zu lösen, entwickelte Küntscher 1952 eine Methode, um den Markraum zu erweitern, in dem er diesen aufbohrte. Dies führte allerdings zu teilweise schwerwiegenden Durchblutungsstörungen. Technische Schwierigkeiten wurden ebenso in der Literatur genannt [93]. Aktuell finden sich bei Patienten Osteolysen im Bereich der Verriegelungsschrauben. Diese Osteolysen bewirken eine fehlende Verriegelung und damit den Verlust der starren Verriegelung und Rotationsstabilität. Weiterhin birgt der Marknagel auch Risiken wie Infektionen sowie Fehlstellungen der Frakturrenden. Die Wanderung des Implantates bis hin zum überstehenden Nagel kann als eine weitere Komplikation des Marknagels genannt werden. Als Komplikation hierzu kommt es zu Beschwerden auf Grund des überstehenden Nagels in die umgebenden Weichteile sowie zur möglichen Ausbildung eines Impingementsyndroms. Weiterhin finden sich Komplikationen wie Instabilitäten, Pseudarthrosen und iatrogene Frakturen [51].

Eine weitere Komplikation der Humerusschaftfraktur stellt die Nervus radialis Parese dar, welche durch intraoperative Läsion auftreten kann. Die Häufigkeit dieser zur klinischen Ausbildung einer Fallhand führenden Lähmung ist in der Literatur mit 8-12 % angegeben, bei Spiral- und Transversalfrakturen im mittleren Schaftdrittel ist der Nervus radialis auf Grund seines anatomischen Verlaufs besonders gefährdet [11,27,45,87].

1.7.6 Therapie der Pseudarthrose

Eine Pseudarthrose bezeichnet eine Fraktur, die nach 6 Monaten nicht vollständig ausgeheilt ist. Patientenspezifisch und therapieunabhängig wirken sich ein hohes Alter,

weibliches Geschlecht, die Einnahme von NSAR, Steroiden oder Zytostatika, Alkohol-, Drogen- oder Nikotinabusus aus. Weiterhin können sich Systemerkrankungen, die die Durchblutung oder den Knochenstoffwechsel negativ beeinflussen (Diabetes mellitus, pAVK, Osteoporose, Mangelernährung), ungünstig auf die Knochenheilung auswirken [13,23,83].

Patientenunabhängig tragen mechanische Faktoren wie eine ungünstige Frakturstellung mit ausgeprägter Dislokation oder Distraction der Fragmente oder einer Interposition von Weichteilen, begleitend auftretende große Weichteilschäden oder Gefäßverletzungen sowie Infektionen zur Pseudarthrosenentstehung bei. Es wird innerhalb der Pseudarthrosen in verschiedene Typen unterteilt. Diese möglichen Unterteilungen sind aseptische sowie infizierte Pseudarthrosen und vitale sowie avitale Pseudarthrosen. Die Behandlung einer Pseudarthrose ist maßgeblich davon abhängig, worin die Ursache liegt. Diese können biologische, mechanische oder eine Kombination aus beiden als Ursache haben. Um die jeweils korrekte Therapiemaßnahme zu wählen, erfolgt eine radiologische Untersuchung in 2 Ebenen. Weiterhin kann auch ein CT, MRT oder eine Szintigraphie angefertigt werden [79].

In vielen Fällen erfolgt die Therapie einer Pseudarthrose durch einen operativen Eingriff. Sofern eine konservative Methode gewählt wird, stehen Verfahren wie Stoßwellentherapie, Ultraschalltherapie sowie Elektrostimulation zur Wahl. Sofern es sich um eine avitale Pseudarthrose handelt, erfolgt die Beseitigung selbiger mittels ORIF. Allgemein kann die Stabilisierung der Fraktur allerdings auch durch ein geeignetes Verfahren wie die Marknagelung oder den Fixateur externer erfolgen [24]. Als Voraussetzung für ein erfolgreiches Ergebnis muss es sich um eine vitale Pseudarthrose handeln. Sofern eine avitale Pseudarthrose vorliegt, wird eine Resektion der Pseudarthrose nötig. Das Anfrischen der Frakturrenden mit einer Sequestromie ist obligat. Idealerweise erfolgt eine autologe Knochentransplantation mit Spongiosa [79]. Dieses Vorgehen kann auch in einer zweizeitigen Methode erfolgen, bei der auch eine Zwischenstabilisierung mittels Fixateur Externe erfolgen kann. Ebenfalls kommt der Segmenttransport zur Schließung des Defektes zum Tragen. Eine Misserfolgsquote von circa 20 % wird in der Literatur diskutiert [13,83].

1.8 Fragestellung

Die Zielstellung dieser Arbeit ist die Erfassung und Auswertung der retrospektiv erhobenen Daten von Patienten, bei denen im Zeitraum von 2004 bis 2014 im BG Klinikum Hamburg Revisionsoperationen nach einer vorangegangenen Humerusschaftfraktur durchgeführt wurden.

Es gilt zu untersuchen, welche relative Anzahl, Ursachen, Faktoren und Zusammenhänge die Versagensmechanismen haben. Wichtige Parameter sind Datum des Ersteingriffes, Frakturort, Alter bei Ersteingriff, Zeitraum und Dauer der Revisionen, Frakturart im Hinblick auf aktuelle AO-Klassifikation, Unfallart, Bewertung und Einteilung der Pseudarthrosen im Hinblick auf die Klassifikation nach Weber und Czech, Größe des Frakturspaltes, Nervenläsionen, Infektion, Raucher, Zugangsmethode, Art des Versagensmechanismus, Art der Erstversorgung sowie der Revision und Verfahrenswechsel.

Im Vergleich mit der Literatur soll Aufschluss über die Ursachen sowie Möglichkeiten zur Vermeidung von Versagensmechanismen gegeben werden.

2. Material und Methode

2.1 Patientenkollektiv

Am BG Klinikum Hamburg wurden in der Zeit von 01.10.2004 bis 31.03.2014 die Versagensmechanismen der Osteosynthesen von Humerusschaftfrakturen retrospektiv untersucht und ausgewertet. Für die systematische Auswertung wurden sämtliche Fälle, die die folgenden Kriterien erfüllten, einbezogen:

- Einweisung wegen einer Pseudarthrose des Humerusschaftes oder Versagen der Osteosynthese nach vorangegangener Fraktur
- Durchgeführte operative Revision
- Männliche und weibliche erwachsene Patienten ab 18 Jahren

Entsprechende Kriterien wurden von 57 Patienten in diesem Zeitraum erfüllt.

Bei Patienten, die nach einem Polytrauma oder ausgedehnten Verletzungen vorübergehend mittels eines Fixateurs externe versorgt worden waren, wurden als Erstversorgung die definitive Versorgung mit Osteosyntheseplatte oder Marknagel mit in die statistische Auswertung aufgenommen.

2.2 Informationsbeschaffung

Es wurden zur Beschaffung der Patientendaten die digitalen Krankenakten ausgewertet und pseudonomisiert.

Die zur statistischen Auswertung relevanten Daten wurden tabellarisch in Microsoft Excel anhand systematischer Kategorien gesammelt und ausgewertet.

Die benötigten Röntgenbilder konnten zu einem Teil aus der digitalen Krankenakte, zum anderen Teil aus dem Röntgenarchiv des BG Klinikums Hamburg beschafft werden.

2.3 Definition der erfassten Versagensmechanismen

Die Auswertung und Einteilung der einzelnen Versagensmechanismen erfolgten durch die Auswertung der Operationsberichte sowie die Analyse der vorliegenden Röntgenbilder.

Neben einem Fall von konservativer Behandlung wurden zwei übergeordnete Kategorien untersucht. Zum einen die Gruppe der Patienten, die primär durch Marknagelung, und zum anderen die Patienten, die primär durch Plattenosteosynthese, versorgt wurden.

Die Gruppe der Patienten, die mit Nägeln versorgt wurde, wurde in verschiedene Unterkategorien eingeteilt. Diese sind:

- Nagellockerung mit Lyse
- Nagellockerung mit Schraubenbruch
- Nagellockerung mit Schraubenbruch und Lyse
- Nagellockerung mit Schraubenlockerung
- Nagellockerung mit Schraubenlockerung und Lyse
- Nagellockerung mit Schraubenlockerung und überstehendem Nagel
- Nagellockerung ohne Schraubenlockerung
- Nagellockerung ohne nähere Angaben
- Weiter Frakturspalt ohne Nagellockerung

Die Untergruppe Nagellockerung mit Lyse beschreibt radiologische Anzeichen einer Osteolyse im Bereich der Verriegelungsschrauben, des Markraumes oder allgemein im Bereich des Osteosynthesematerials, die auf eine Bewegung und Instabilität Selbigen schließen lassen.

Die Kategorien Nagellockerung mit Schraubenbruch, mit und ohne Lyse, zeigen radiologisch frakturierte Verriegelungsschrauben mit und ohne Lysen, die teilweise frei ins umliegende Gewebe gewandert sind.

Die Kategorie der gelockerten Schrauben, mit und ohne Lyse, beschreibt die radiologisch gelockerten Schrauben, die keinen direkten Kontakt mehr zum Verriegelungsnagel haben.

Die Kategorie des überstehenden Nagels mit Nagellockerung und Schraubenlockerung äußerte sich radiologisch durch den überstehenden Nagel an der Eintrittspforte sowie klinisch subjektiv wahrgenommen Beschwerden des Patienten, die aus den Arztbriefen entnommen werden konnten.

Die Nagellockerung ohne Schraubenlockerung bezieht sich auf radiologische Befunde, die keinen Hinweis auf eine Nagellockerung lieferten. Durch Sichtung der Operationsberichte konnte in diesen Fällen dennoch nachgewiesen werden, dass intraoperativ Anzeichen für eine Nagellockerung gefunden werden konnte.

Die Gruppe der Nagellockerungen ohne nähere Angaben beinhaltet Pseudarthrosen mit gelockerten Nägeln, bei denen Bilder nicht auffindbar waren oder bei denen innerhalb der Arztbriefe und Operationsberichten keine Angaben hierzu gefunden werden konnte.

Die Kategorie der Patienten mit „Instabilitäten ohne Lockerungszeichen“ zeichnete sich durch ihr klinisches Beschwerdebild aus, beispielsweise durch Beschwerden und Instabilitätsgefühle bei alltäglichen Handlungen.

Die weitere Kategorie der „fehlenden Durchbauung ohne Lockerungszeichen“ definiert sich über das Fehlen von radiologischen Lockerungszeichen wie Lysen um die Verriegelungsschrauben oder um das eingebrachte Osteosynthesematerial, bei der dennoch keine knöcherne Konsolidierung der Fraktur stattgefunden hat und keine Beschwerden durch den Patienten geäußert wurden.

Das Kollektiv, das primär mittels Osteosyntheseplatte versorgt wurde, wurde ebenfalls in verschiedene Gruppen eingeteilt. Diese sind:

- Plattenausriss
- Plattenbruch
- Plattenlockerung mit Schraubenbruch
- Plattenlockerung mit Schraubenbruch und Lyse
- Plattenlockerung mit Schraubenlockerung
- Plattenlockerung mit Schraubenlockerung und Lyse
- Weiter Frakturspalt ohne Plattenlockerung

Der Plattenausriss definiert sich über eine klinisch und radiologisch deutlich vom Knochen entfernte und ausgerissene Osteosyntheseplatte, bei der teilweise Schrauben frakturiert sind und ins umliegende Gewebe ausgewandert sind. Der Plattenbruch ist durch eine teilweise oder vollständige Fraktur der Platte definiert. Weiterhin fanden sich gelockerte Platten, die durch ebenfalls gelockerte, von der Platte gelösten Schrauben oder vollständig frakturierte Schrauben radiologisch auffielen. Die Kategorie des weiten Frakturspalt ohne Plattenlockerung äußerte sich ebenfalls radiologisch durch einen

teilweise deutlich vergrößerten Frakturspalt, ohne radiologische Anzeichen einer gelockerten Osteosyntheseplatte.

Bei allen diagnostizierten und folglich operativ revidierten Pseudarthrosen konnte intraoperativ der fehlenden Durchbau der Fraktur sowie die Pseudarthrose bestätigt werden.

2.4 Bestimmung der Frakturspaltbreite

Die Auswertung des Frakturspaltes erfolgte anhand der Röntgenbilder durch die Auswertung der Bildschirmmillimeter mit dem Messprogramm „PixelStick“. Dazu wurden jeweils pro Patient zwei Nativröntgenbilder aus verschiedenen Ebenen insgesamt 4 Stellen der Kortikalis am Humerusschaft bemessen und daraus ein Mittelwert gebildet (Abb. 3). Zusätzlich wurde der Humerusschaftdurchmesser frakturnah gemessen. Aus dem Mittelwert der Frakturspaltbreiten und dem Humerusschaftdurchmesser wurde das Verhältnis ermittelt. Aus diesem Verhältnis wurde eine Prozentzahl gebildet. Diese Zahl stellt das Verhältnis von Frakturspaltbreite zum Durchmesser des Humerusschaftes dar.

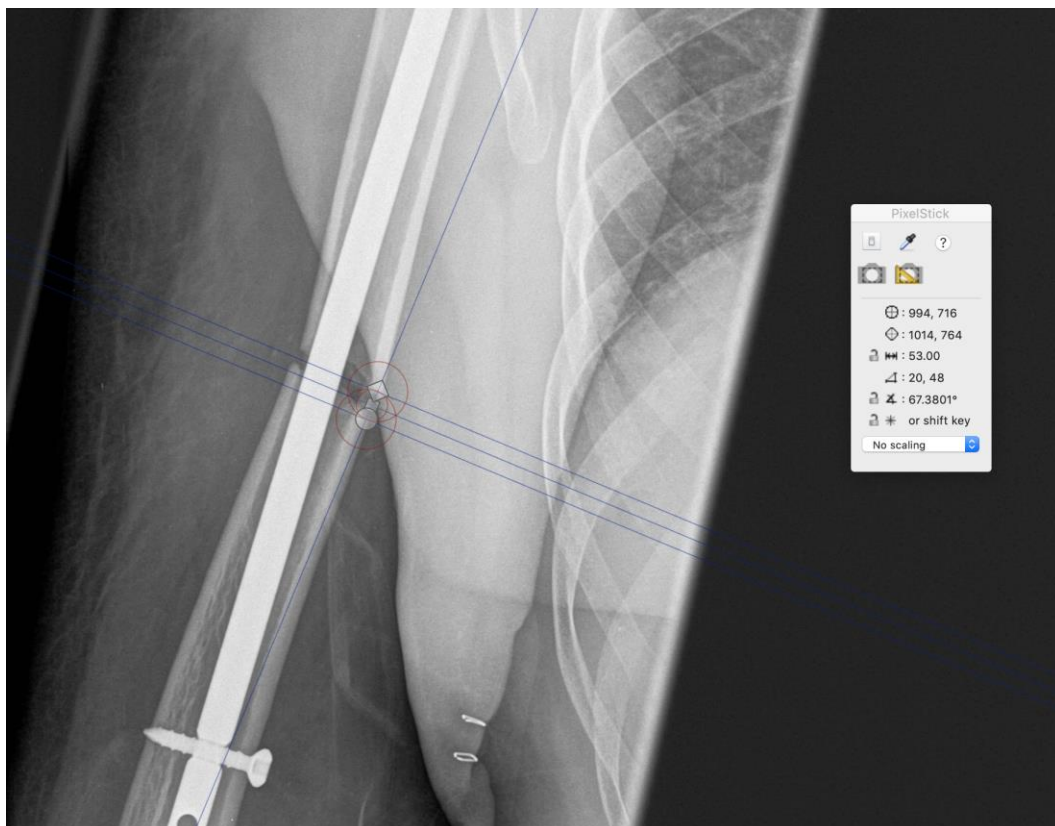


Abb. 3 Bestimmung der Frakturspaltbreite

2.5 Statistik

Die statistischen Auswertungen erfolgten mit der Software SAS 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Um Zusammenhänge qualitativer Merkmale aufzuzeigen, wurde der exakte Test von Fisher durchgeführt. Das statistische Signifikanzniveau wurde auf 0,05 festgelegt.

Von den erhobenen Daten wurden der Mittelwert, Standardabweichung, Median, 1. Quartil und 3. Quartil sowie das Minimum und Maximum beschreibend berechnet.

Die Grafiken wurden mit Excel (Microsoft, Redmond, USA) erstellt. Boxplots wurden mit Hilfe der Software SAS 9.2 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) erstellt.

3. Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

3.1.1 Geschlechtsverteilung

Die Ausbildung einer Humerusschaftpseudarthrose findet sich bei Männern als auch bei Frauen innerhalb des Patientenkollektivs. Die Geschlechterverteilung lag bei 38 männlichen Patienten (66,7 %) sowie bei 19 weiblichen Patienten (33,3 %) (Abb. 4).

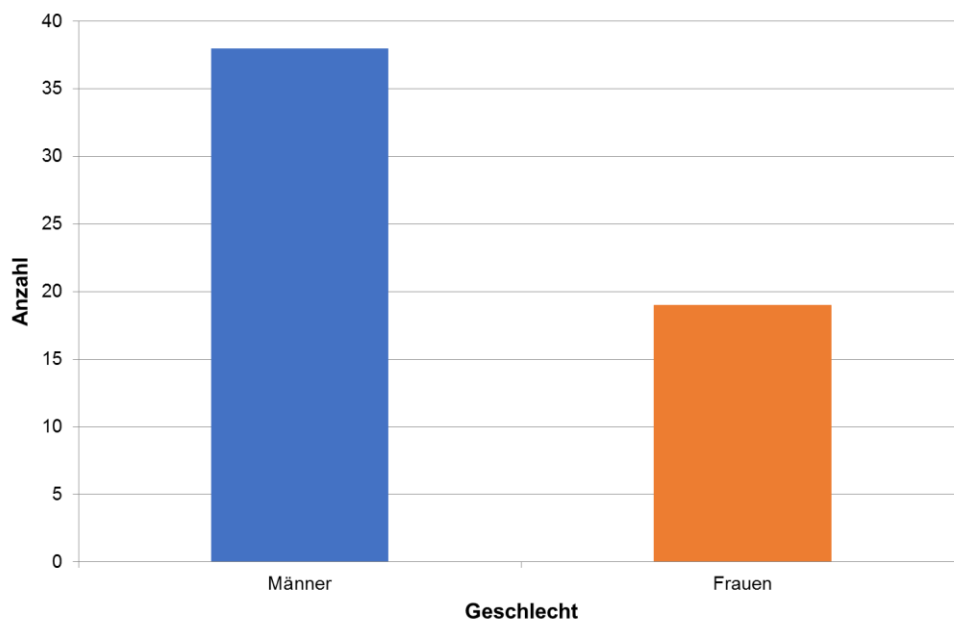


Abb. 4 Geschlechtsverteilung

3.1.2 Altersverteilung bei Ersteingriff

Es handelte sich tendenziell bei den 57 Patienten mit Humerusschaftpseudarthrosen zum Zeitpunkt der Erstversorgung um Patienten mittleren bis höheren Alters. Im Median lag das Alter bei 51 Jahren. Der jüngste Patient war zum Zeitpunkt der Erstversorgung 18 Jahre alt, der älteste Patient 87 Jahre alt. Die Gruppe mit der höchsten Anzahl an Patienten lag bei 40-49 Jahren. Der Mittelwert lag bei 50 Jahren (Abb. 5).

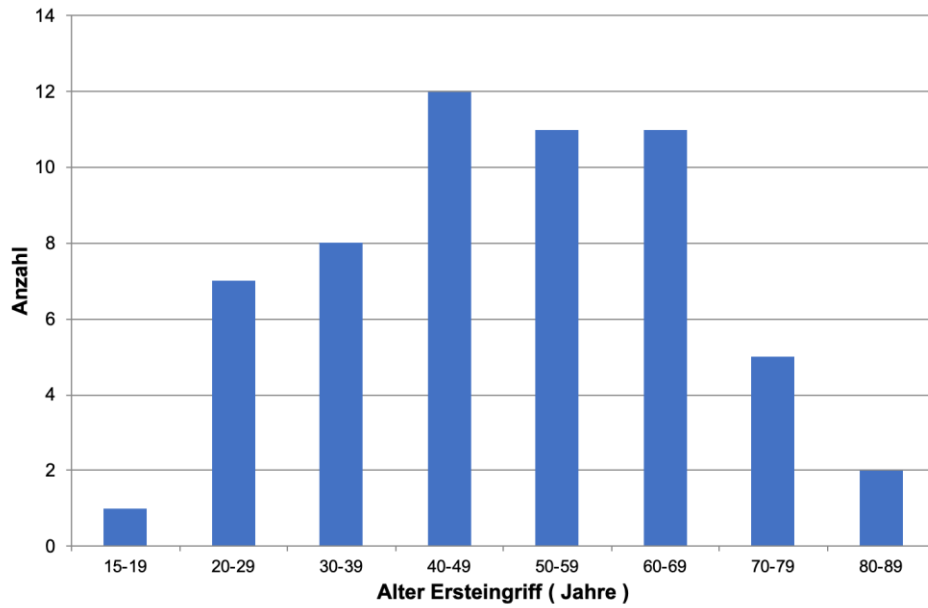


Abb. 5 Altersverteilung bei Ersteingriff

3.1.3 Altersverteilung bei 1. Revision

Abbildung 6 zeigt das Alter des Patientenkollektivs zum Zeitpunkt der 1. Revision. Es lag hauptsächlich im mittleren Alter zwischen 40 und 59 Jahren. Der jüngste Patient war 18 Jahre alt, der älteste Patient war 87 Jahre alt. Der Median lag bei 52 Jahren. Der Mittelwert bei 51 Jahren (Abb. 6).

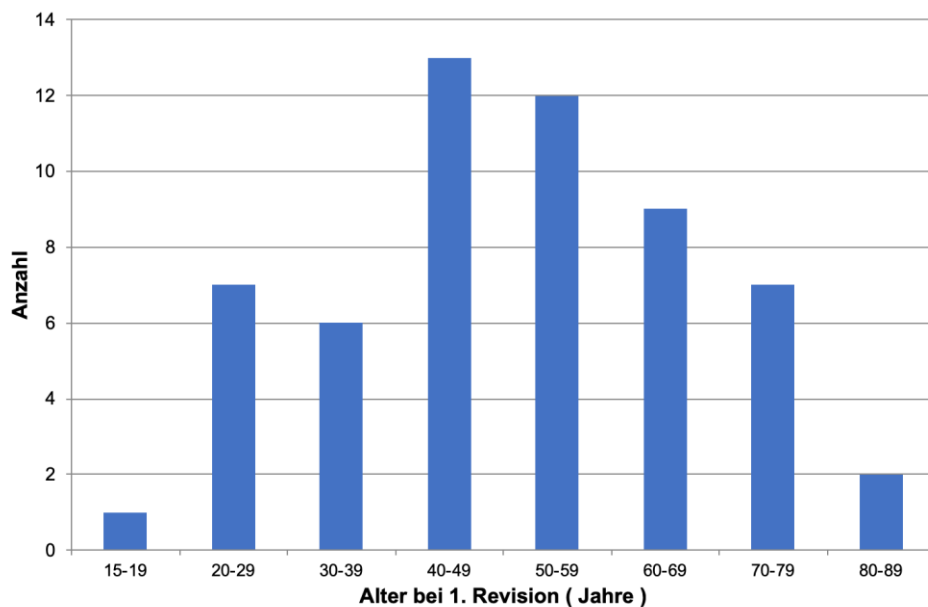


Abb. 6 Altersverteilung bei 1. Revision

3.1.4 Behandlungsdauer bis 1. Revision

Die Behandlungsdauer zwischen der Erstversorgung und der 1. Revision liegt zu einem Großteil zwischen 6-10 Monate. Das Minimum beträgt 0 Monate und das Maximum 74 Monate. Der Median beträgt 8 Monate. Durchschnittlich vergingen 9,6 Monate vom Tag der Verletzung bis hin zur primären Revision (Abb. 7).

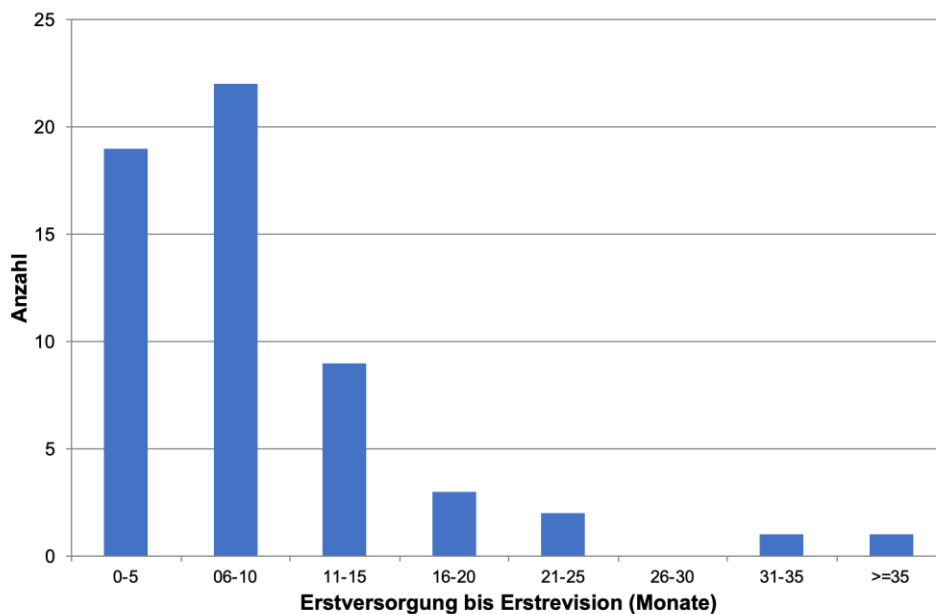


Abb. 7 Erstversorgung bis Erstrevision

3.1.5 Behandlungsdauer bis finale Versorgung

Die Behandlungsdauer zwischen Erstversorgung und der finalen Versorgung belief sich hauptsächlich auf den Zeitraum zwischen 6 und 15 Monaten. Die kürzeste Behandlungsdauer bis zur finalen Versorgung betrug 1 Monat, die längste betrug 94 Monate. Der Median betrug 11 Monate. Der Mittelwert vom Tag der Verletzung bis hin zur finalen Versorgung betrug 16 Monate (Abb. 8).

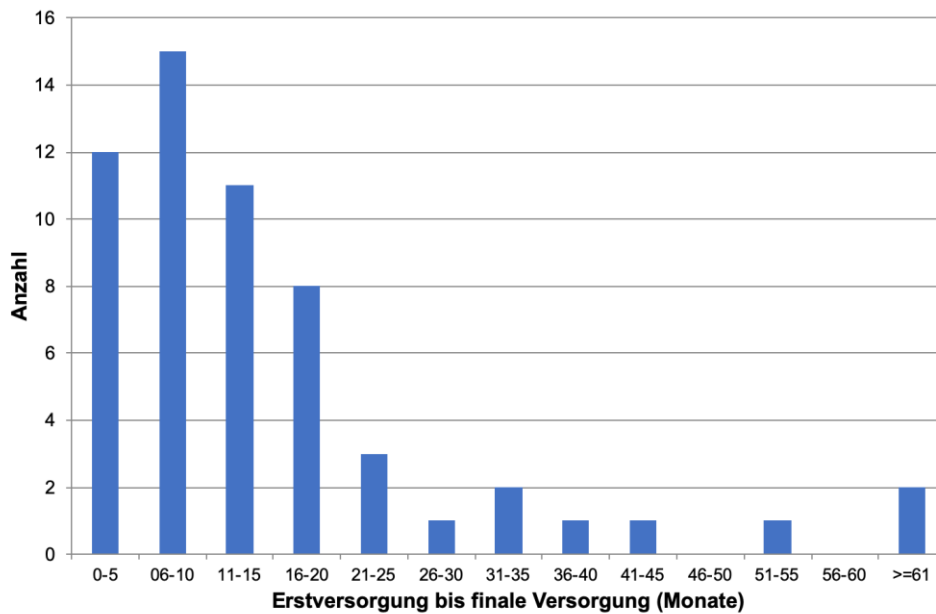


Abb. 8 Erstversorgung bis finale Versorgung

3.1.6 Voroperationen vor finaler Versorgung

Überwiegend lagen im Patientenkollektiv 34 Patientenfälle (59,6%) vor, die eine Voroperation aufweisen (Abb. 9). Es fanden sich 14 (24,6 %) Patienten, die zweifach voroperiert werden mussten.

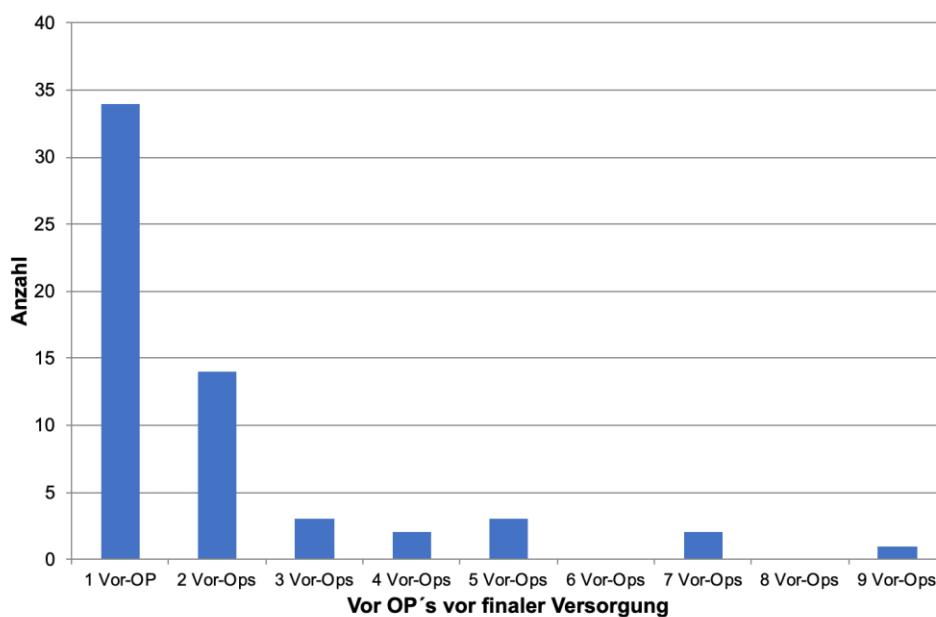


Abb. 9 Voroperationen vor finaler Versorgung

Weitere 11 Patienten (19,3 %) wurden drei oder mehrfach voroperiert. Das Maximum liegt bei 9 Voroperationen.

3.1.7 Lokalisation der Pseudarthrose am Humerusschaft

Der Humerusschaft wurde in 3 Segmente gegliedert (Abb. 10). Die Lokalisation der vorliegenden Pseudarthrosen wurde entsprechend der Segmente eingeteilt (Abb. 11).

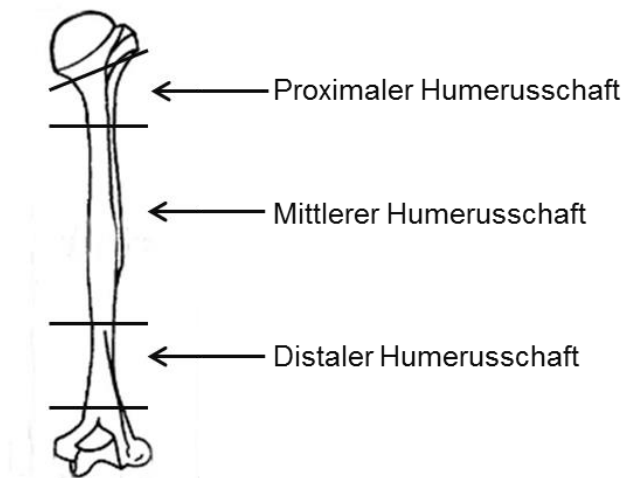


Abb. 10 Humerus mit Einteilung Segmenteinteilung

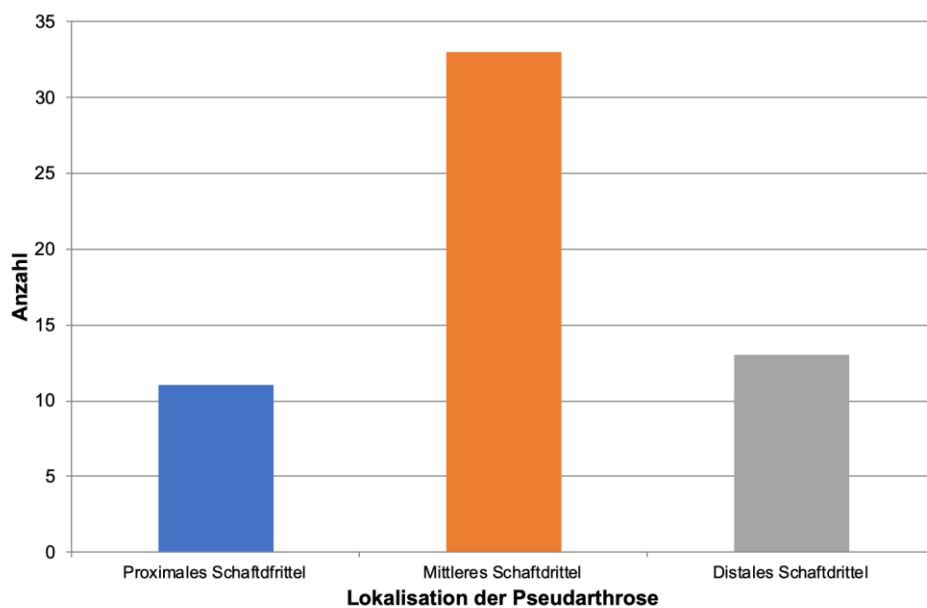


Abb. 11 Lokalisation der Pseudarthrose

Bei 33 Patienten (57,9 %) und damit bei dem Großteil des Kollektivs fand sich die Pseudarthrose am proximalen Humerusschaft. Am mittleren Schaftbereich fanden sich 11 (19,3 %) und im distalen Schaftbereich 13 Pseudarthrosen (22,8 %).

3.1.8 Art der Pseudarthrose

Der hauptsächliche Anteil der Pseudarthrose nach Weber und Czech liegt bei dem areaktiv atrophem Typ (24 von 57, 42,1 %). Die zweitgrößte Gruppe sind die reaktiven hypertrophen Typen „Elefantenfuß“ mit 19,3 % (Abb. 12). Dabei wurden die Befunde bei Verläufen von weniger als 6 Monaten wie Pseudarthrosen klassifiziert.

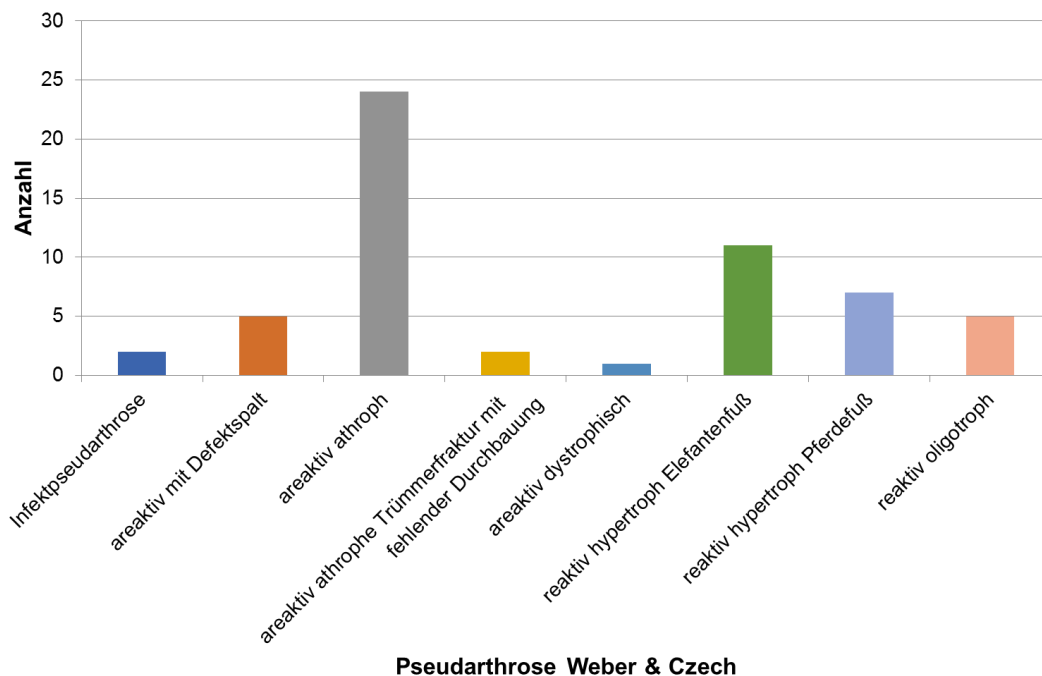


Abb. 12 Pseudarthrose nach Weber & Czech

Bei der Einteilung nach Weber und Czech in vital und avital ist die Gruppe Avital D mit 18 von 57 Patienten (31,6 %) die Größte. Weitere 34 Patienten finden sich im Bereich Vital A bis Vital C wieder (Abb. 13).

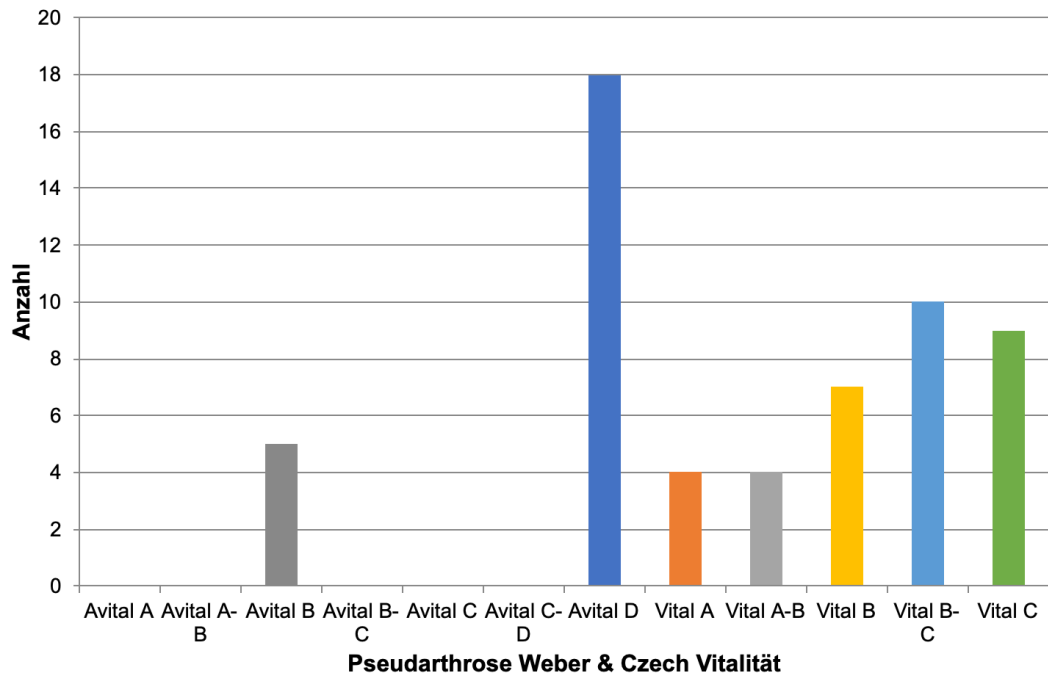


Abb. 13 Pseudarthrose nach Weber & Czech Vitalität

Die größte Gruppe besteht aus Patienten mit einer atrophen Pseudoarthrose (31, 54,4 %). Die zweitgrößte Gruppe mit 24 Patienten (42,1 %) bilden die hypertrophen Pseudarthrosen. Infektpseudarthrosen sind in 2 Fällen vertreten (3,5 %) (Abb. 14).

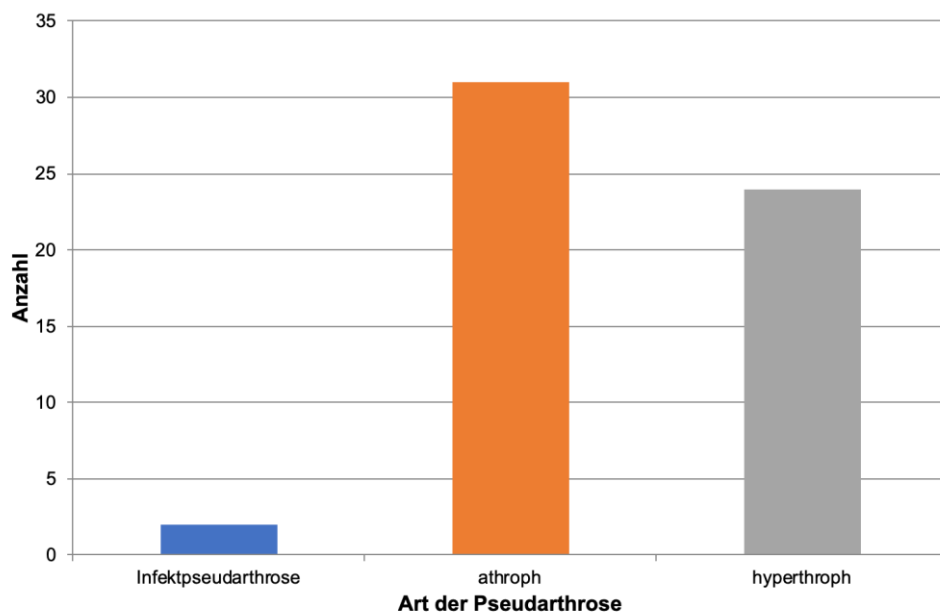


Abb. 14 Art der Pseudarthrose

3.1.9 Unfallart

In 38 Fällen (66,7 %) fand sich ein Sturz als Unfallursache. Die zweitgrößte Gruppe fand sich bei Verkehrsunfällen. Verkehrsunfall mit Polytrauma beläuft sich auf 6 (10,5 %) sowie ohne Polytrauma auf 7 (12,3 %). Es fanden sich weiterhin 2 Fahrradunfälle (3,5 %), 1 Schlittenunfall (1,8 %), 2 (3,5 %) Fließbandunfälle sowie 1 Pferdetritt (1,8 %) (Abb. 15).

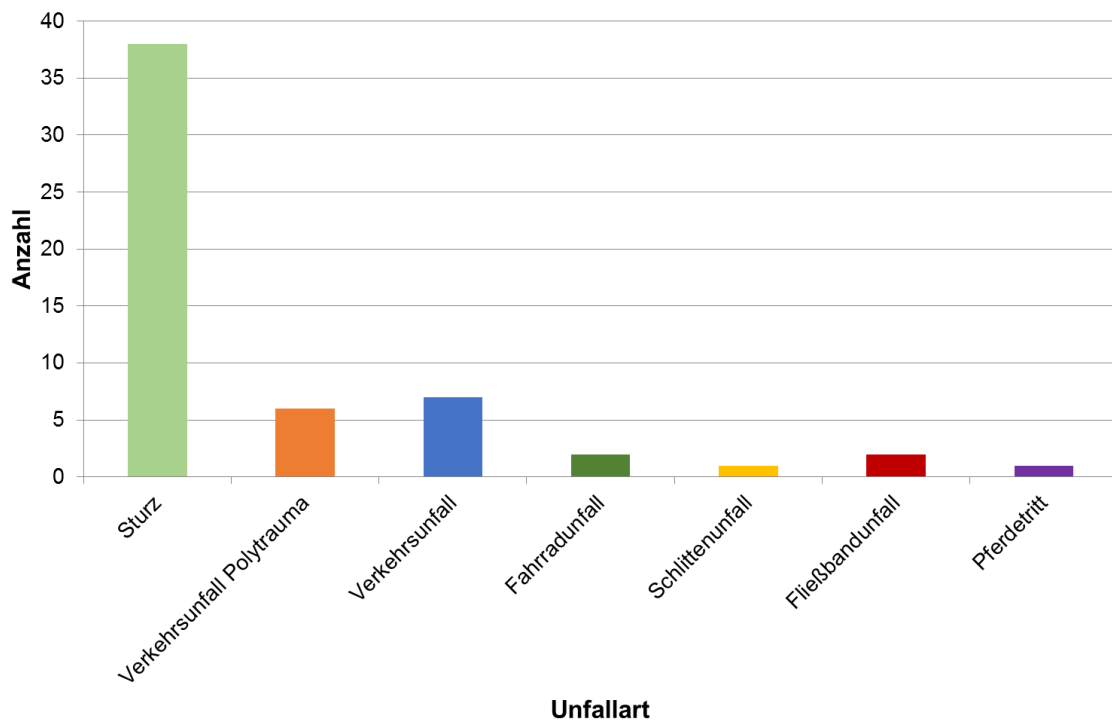


Abb. 15 Unfallart

3.1.10 Raucher

Innerhalb des untersuchten Patientenkollektivs fanden sich 16 Raucher (28,1 %), 26 Nichtraucher (45,6 %) sowie 15 Patienten (26,3 %) ohne Angaben (Abb. 16).

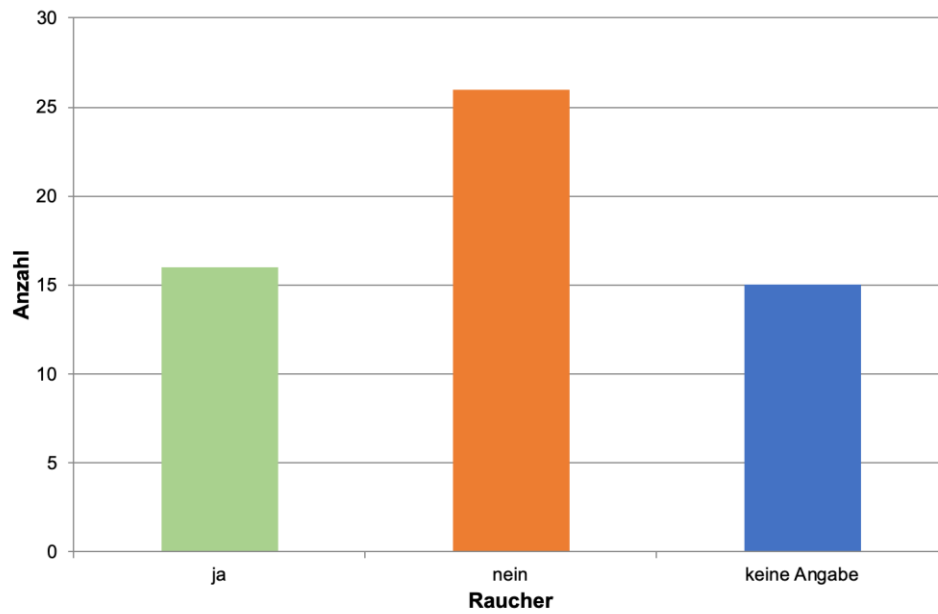


Abb. 16 Raucher

3.1.11 Frakturtyp

Die Querfraktur bildete mit 30 Fällen (52,6 %) den größten Anteil (Abb. 17).

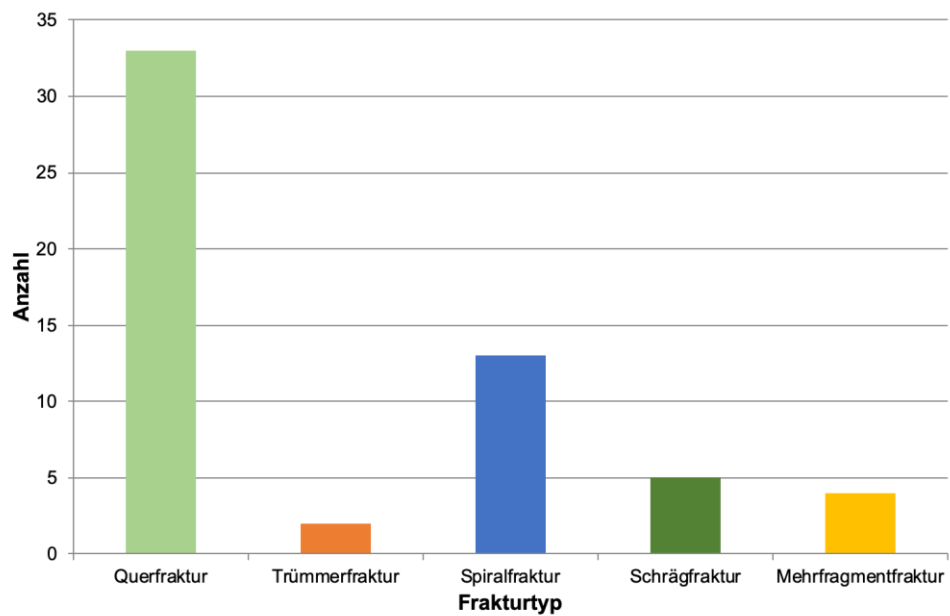


Abb. 17 Frakturtyp

Die zweitgrößte Gruppe mit 13 Fällen (22,8 %) bildete die Spiralfaktur. Die Trümmerfraktur ist in 2 Fällen (3,5 %) vertreten, sowie die Schrägfraktur mit 8 (14,0 %). Die Mehrfragmentfraktur ist mit 4 Fällen (7,0 %) vertreten (Abb. 17).

3.1.12 AO-Klassifikation

Hauptsächlich fanden sich Fälle, die innerhalb der AO-Klassifikation A3 entsprachen (31, 54,4 %). Weitere 13 fanden sich bei A1 (22,8 %), 6 Weitere bei A2 (10,5 %). B2 waren 3 (5,3 %), B3 ebenfalls 3 (5,3 %) sowie 1 C3 (1,8 %) (Abb. 18).

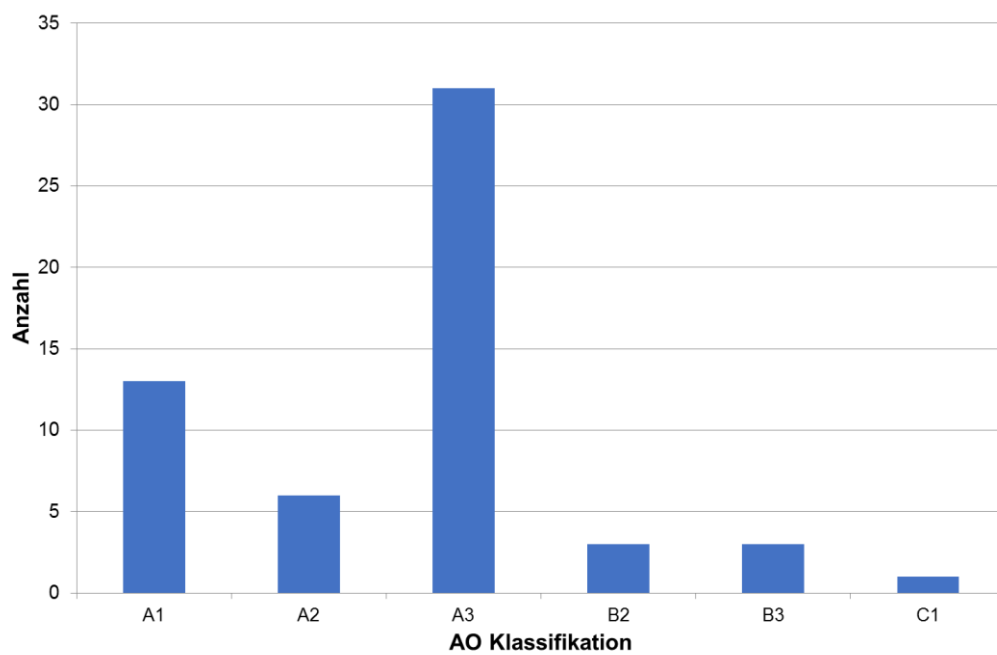


Abb. 18 AO-Klassifikation

3.1.13 Frakturspaltbreite

Die größte Gruppe des Patientenkollektivs befand sich im Bereich von 20-29,9 % des Oberarmdurchmessers (20 Personen, 35,1 % des Oberarmdurchmessers). Der Mittelwert befand sich bei 30,1 % des Oberarmdurchmessers, das Maximum bei 78,2 % des Oberarmdurchmessers sowie das Minimum bei 8,9 % des Oberarmdurchmessers. Der Median lag bei 28,7 %, der Mittelwert bei 30,1 % (Abb. 19).

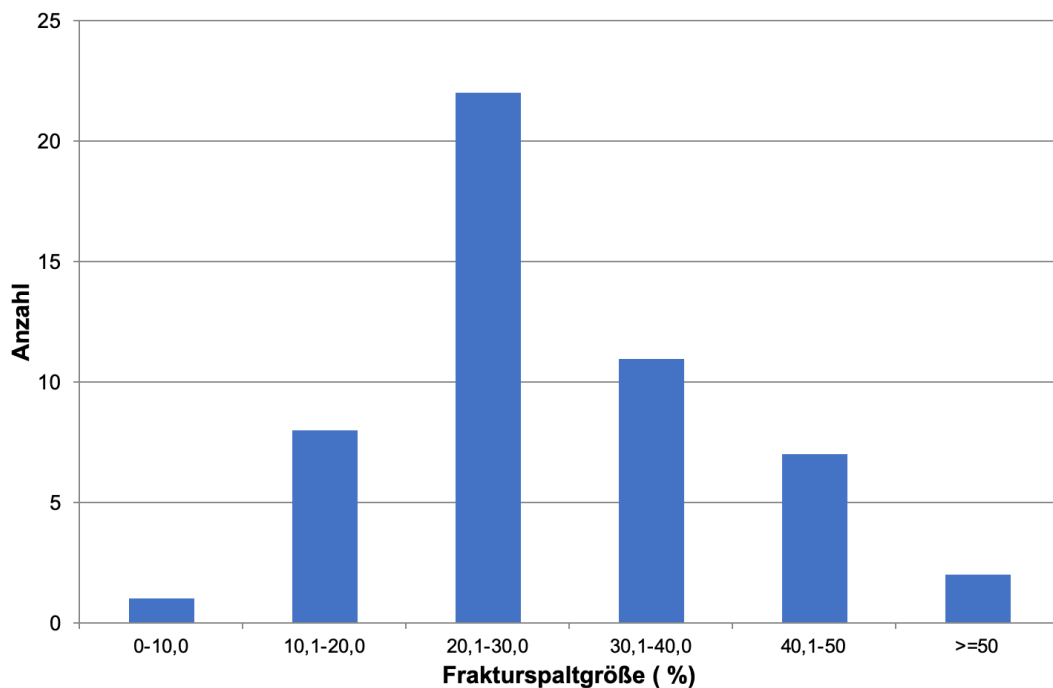


Abb. 19 Frakturspaltgröße in Prozent

3.1.14 Zugang

Überwiegend waren Marknägel antegrad eingebracht worden (32 Fälle, 56,1 %). Die retrograde Methode war in 9 Fällen gewählt worden (15,8 %) und zwei Fälle (3,5 %) waren ohne Angaben (Abb. 20). Bei den Platten war entsprechend der Lokalisation der Fraktur einmal proximal ein ventraler Zugang (1,8 %), einmal distal ein radio-ulnarer Zugang (1,8 %) und in den anderen 11 Fällen ein dorsaler Zugang (19,3 %) dokumentiert worden. Ein Patient war konservativ vorbehandelt (1,8 %).

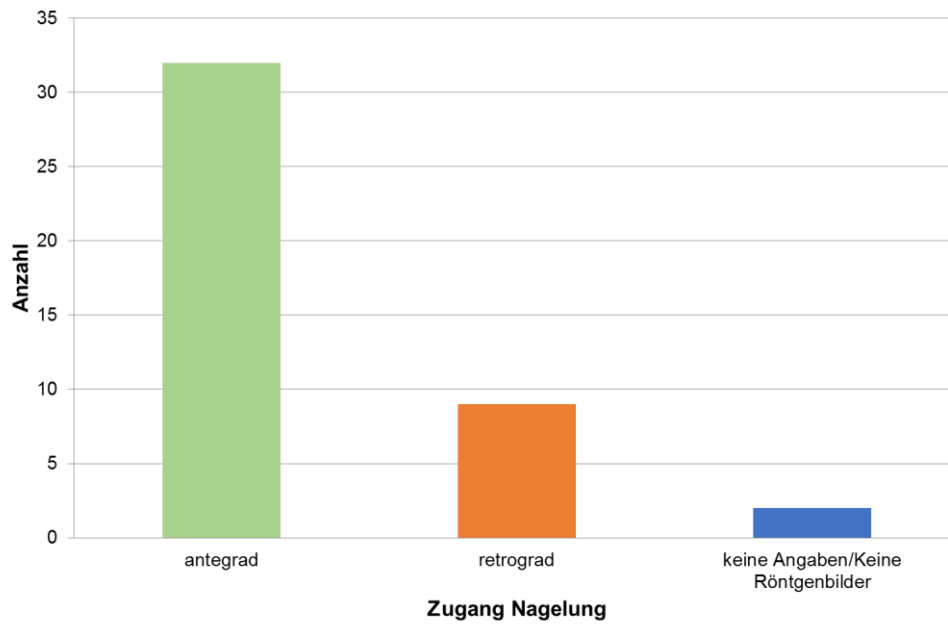


Abb. 20 Zugang Nagelung

3.1.15 Anzahl der Verfahrenswechsel

45 Patienten (79,0 %) des Gesamtkollektivs erhielten einen Verfahrenswechsel (Abb. 21).

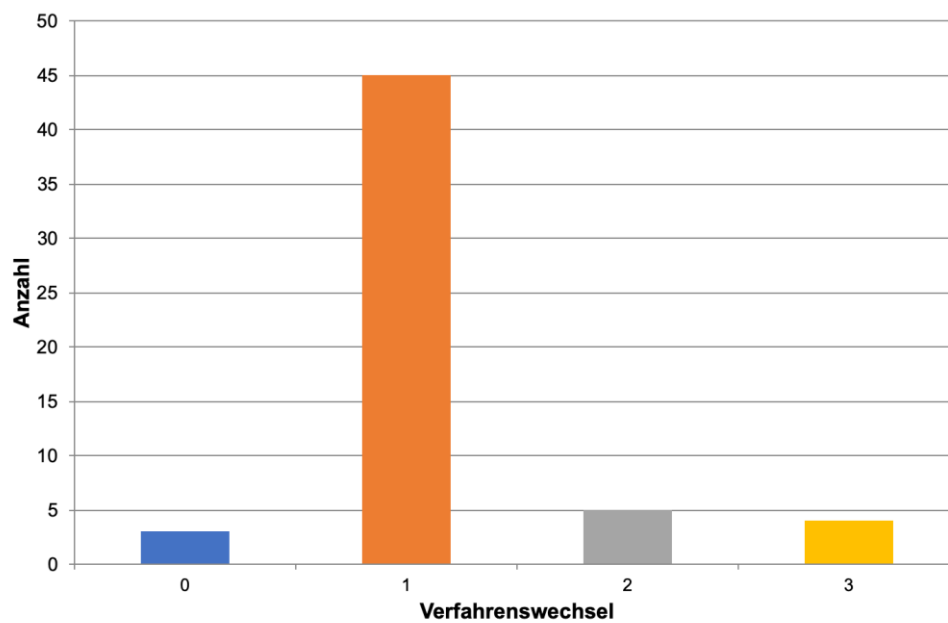


Abb. 21 Anzahl Verfahrenswechsel

Bei 3 Patienten wurde kein Verfahrenswechsel durchgeführt (5,3 %). 5 Patienten erhielten zwei Verfahrenswechsel (8,8 %) sowie 4 Patienten (7,0 %) drei Verfahrenswechsel. Der Median betrug 1 Verfahrenswechsel, der Mittelwert 1,2 Verfahrenswechsel.

3.1.16 Anzahl der Revisionen

40 Patienten erhielten eine Revision (70,2 %) und stellen damit die größte Gruppe dar.

Der Anteil der Patienten, die mehr als eine Revision erhielt, beläuft sich auf 17 Patienten (29,8 %). Der Median der Anzahl der Revision betrug 1, der Mittelwert 1,93, die Standardabweichung 1,91 sowie das Minimum 1 und Maximum 9 (Abb. 22).

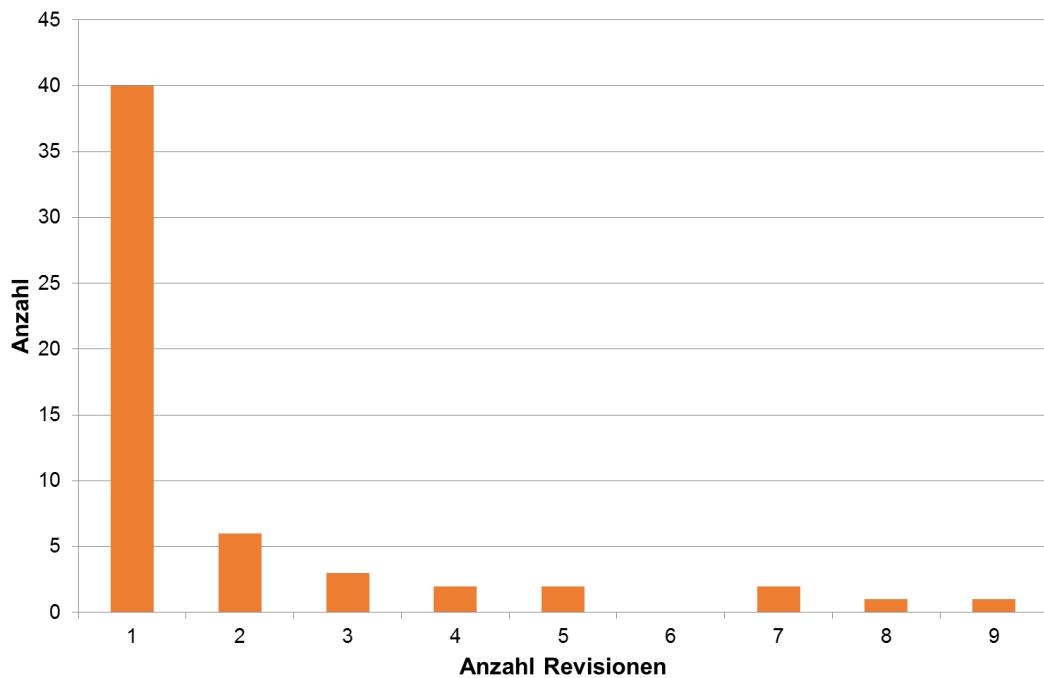


Abb. 22 Anzahl Revisionen

3.1.17 Entwicklung von Parästhesien

Innerhalb des Patientenkollektivs entwickelte sich innerhalb des Behandlungszeitraumes bei 29 Patienten (50,9 %) eine Parästhesie. Bei 19 Patienten (33,3 %) konnte keine Parästhesie festgestellt werden und bei 9 Patienten fanden sich keine Angaben (15,8 %) (Abb. 23).

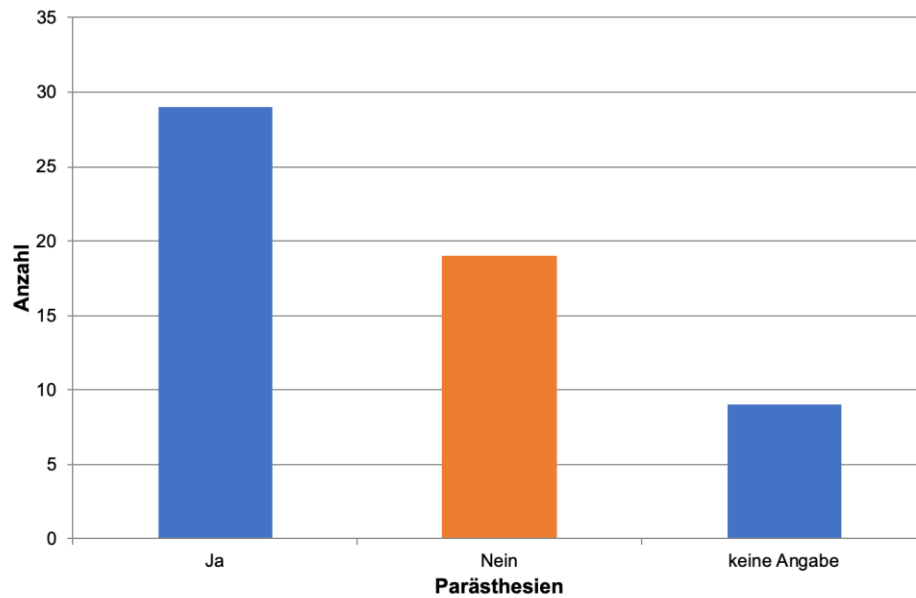


Abb. 23 Parästhesien

3.1.18 Keimnachweis

Von den insgesamt 57 Patienten konnte bei 16 (28,1 %) ein Keim nachgewiesen werden. Bei den restlichen 41 Patienten (71,9 %) wurden keine Keime nachgewiesen (Abb. 24).

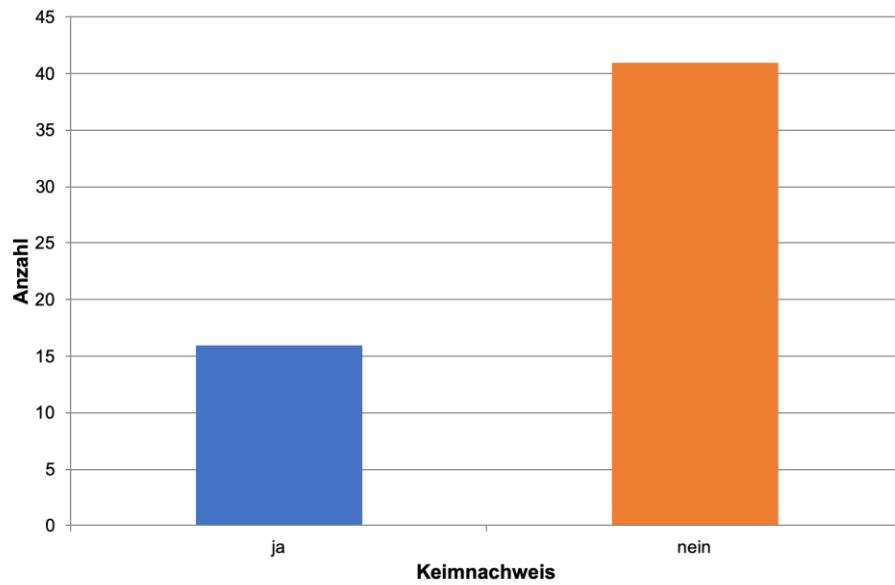


Abb. 24 Keimnachweis

3.1.19 Erstversorgung

43 Patienten (75,4 %) des Gesamtkollektives waren primär mit einem Marknagel versorgt worden. 13 Patienten (22,8 %) waren mittels einer Platte primär versorgt worden. Ein Patient erhielt eine konservative Versorgung (1,8 %) (Abb. 25).

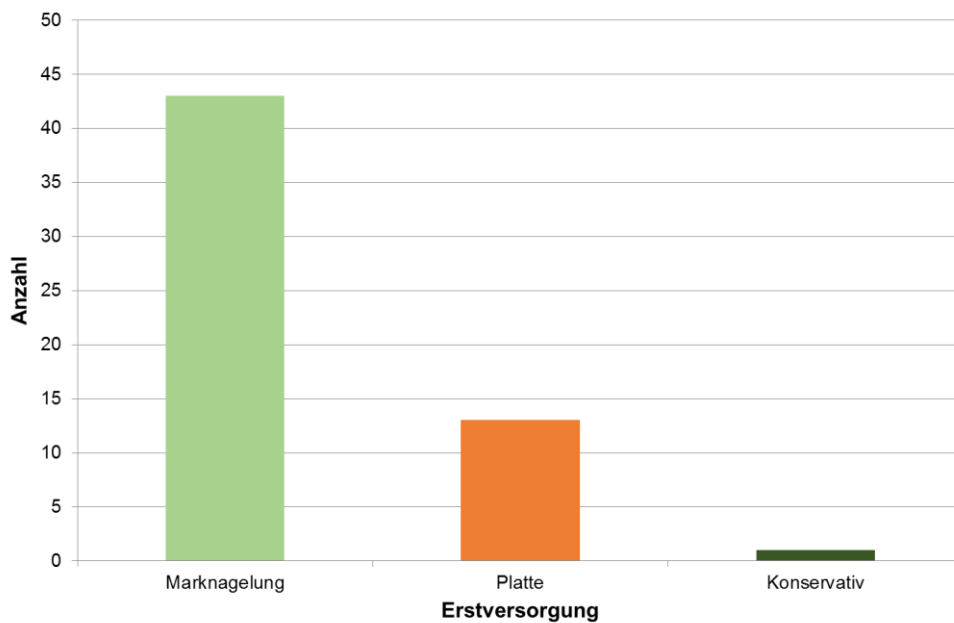


Abb. 25 Erstversorgung

3.1.20 Versagensmechanismus 1. Versorgung

Die untenstehende Tabelle zeigt die Verteilung der genauen Versagensmechanismen, die zur Ausbildung einer Pseudarthrose geführt haben. Gezeigt werden die einzelnen Mechanismen der 1. Versorgung der Fraktur (Abb.26).

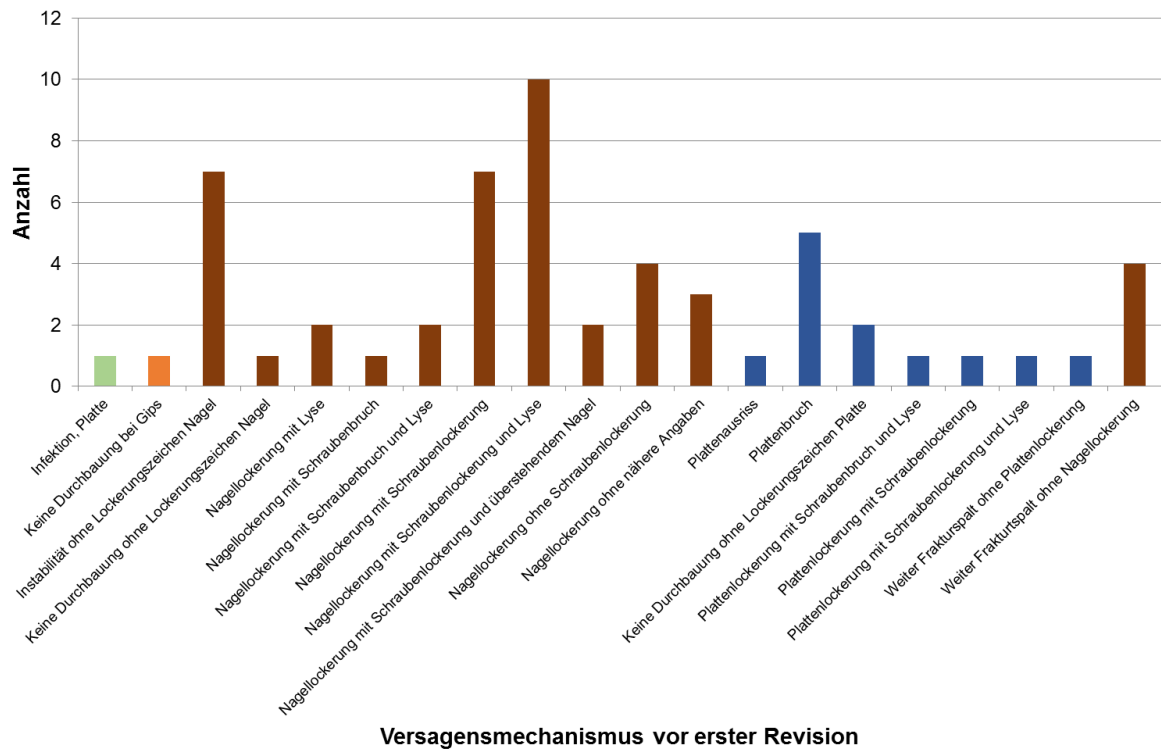


Abb. 26 Versagensmechanismus 1. Versorgung

3.1.21 Versagensmechanismus 1. Versorgung Zusammenfassung

Eine Infektion konnte in 1 Fall (1,8 %) festgestellt werden. Kein Durchbau bei Gips fand bei 1 Person statt (1,8 %). Bei 12 Patienten (21,1 %) fand kein Durchbau ohne Lockerung des Nagels statt. Bei 3 Patienten (5,3 %) fand ohne Lockerung der Platte kein Durchbau statt. Eine Nagellockerung fand sich bei 31 Patienten (54,4 %). Eine Plattenlockerung oder ein Plattenbruch fand sich bei 9 Patienten (15,8 %) (Abb. 27).

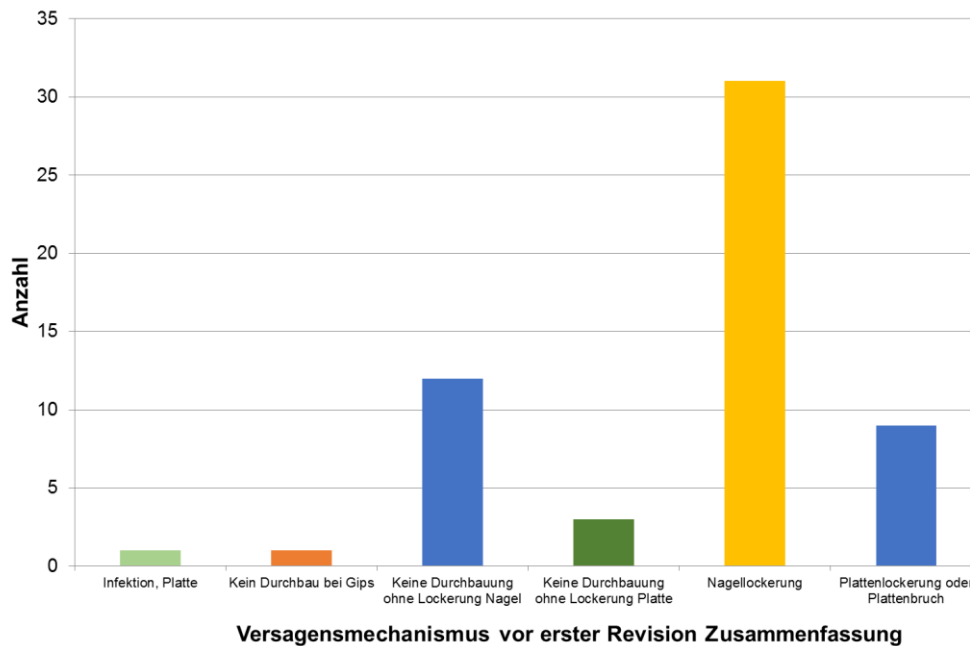


Abb. 27 Versagensmechanismus 1. Versorgung Zusammenfassung

3.1.22 Versagensmechanismus Revision

Abbildung 28 zeigt die Mechanismen des Versagens der ersten Revision. Innerhalb des Patientenkollektives kam es in 17 Fällen zu einer Re-Revision. Ursächlich hierzu fanden sich verschiedene Versagensmuster der jeweiligen Osteosynthese.

Es fand sich allgemein auch in dem Revisionskollektiv Nagellockerungen bei revidierten Nägeln, Plattenlockerungen und Plattenbrüche. Eine Nagellockerung fand bei zuvor bereits gelockertem Nagel statt, bei dem auch nach Revision keine mechanische Stabilität erzielt werden konnte. Bei Plattenlockerungen und Plattenbrüchen konnte eine größere Anzahl von 7 Fällen der Revision festgestellt werden. Auch kam es in 2 Fällen zu einer Infektion der revidierten Pseudarthrose. Ebenfalls fand sich in 2 Fällen eine mechanische Lockerung des anliegenden Fixateurs Externe bzw. seiner Pins, mit dem eine Ausheilung bezweckt werden sollte und auf Grund eingetretener Instabilität eine weitere Revision nötig wurde. In weiteren 3 Fällen wurde ein Ausriss der bereits revidierten Platte festgestellt. Zudem fand sich eine Refraktur kurz oberhalb der eingebrachten Osteosyntheseplatte, die eine Revision und Wechsel der Osteosynthese nötig machte.

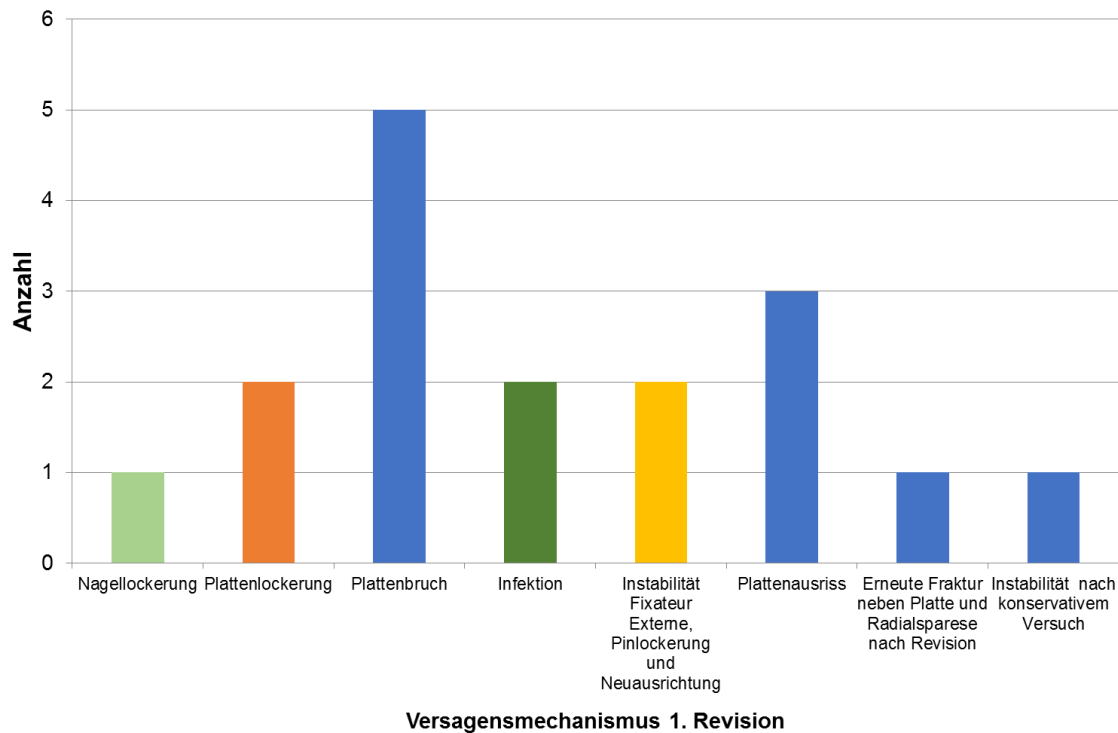


Abb. 28 Versagensmechanismus der ersten Revision (n=17)

Ein Fall, der konservativ ausgeheilt werden sollte, wurde auf Grund von ausbleibender Stabilität und fehlender Durchbauung erneut revidiert.

In einigen Fällen kam es zudem zu gehäuften Revisionen. In einem Fall wurde auf Grund von Infektionen des Frakturbereichs sowie der Eintrittsstellen der Pins sowie Stabilitätsproblemen des Fixateurs insgesamt 7mal revidiert. Weiterhin trat ein Fall mit andauernder Infektion auf, der nach Nagelloockerung und einer Plattenlockerung auf Grund einer Infektion im Fixateur behandelt wurde, um abschließend erneut mit einer Plattenosteosynthese eine Ausheilung erzielen zu können. Ein weiterer Fall wurde mit einer Platte versorgt, die nach Fraktur gegen eine neue Platte getauscht wurde. Auf Grund einer Infektion wurde dabei ein Fixateur angelegt. Dieser wurde dann im Laufe der Behandlung nach Abklingen der Infektion durch eine Platte ergänzt, sodass Fixateur und Platte in situ waren. Ausgeheilt wurde dann abschließend konservativ. Ein weiterer Fall wurde auf Grund multipler Plattenbrüche sowie Instabiler Fixateure durch Pinlockerung und Infektionen insgesamt 9-mal revidiert und final konservativ zum Ausheilen gebracht. Weitere 7 Revisionen fanden sich in einem Fall, der durch multiple Ermüdungsbrüche der Osteosyntheseplatten sowie durch Osteitis und Markraumplegmone erst nach langjähriger Therapie ausgeheilt werden konnte. Ein weiterer Fall war ein infizierter Nagel,

der nach Lockerung der Pins des Fixateurs und ausbleibender Heilung 5mal revidiert wurde.

3.1.23 Finale Versorgung

2 Patienten erhielten als finale Versorgung einen Marknagel (3,5 %). Der Großteil mit 50 Patienten wurde final mit einer Platte versorgt (87,7 %). Es fanden sich 1 Fixateur Externe als finale Versorgung (1,8 %) sowie 4 (7 %) konservativ versorgte Patienten (Abb. 29).

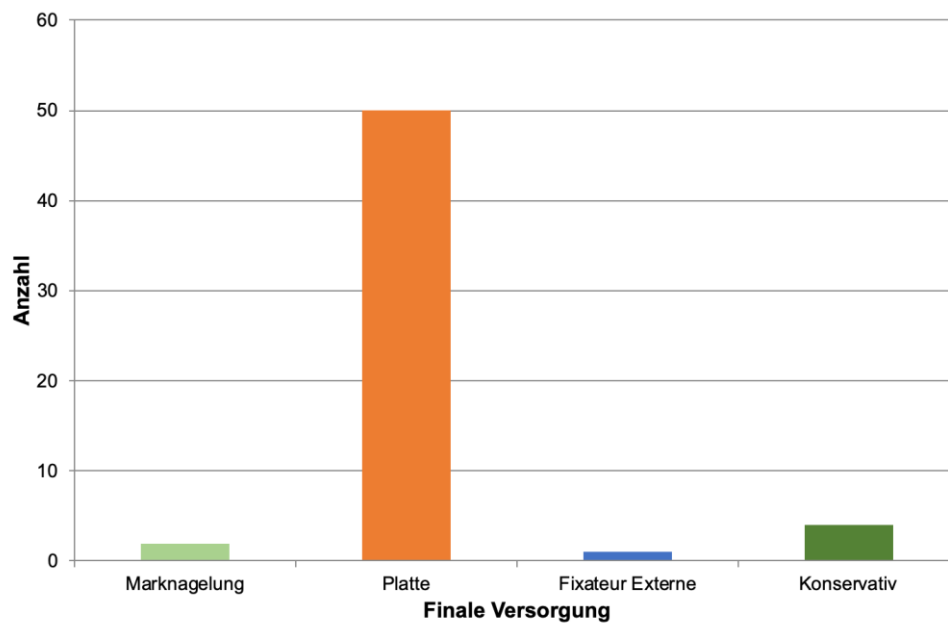


Abb. 29 Anzahl der jeweiligen Versorgungen bei finaler Versorgung

3.1.24 Zusammenhang Versagensmechanismus und AO-Klassifikation

Die Tabelle 1 zeigt die Zusammenhänge zwischen Versagensmechanismus und der AO-Klassifikation [42].

Um eventuelle Zusammenhänge zwischen beispielsweise Versagensmechanismus und AO-Klassifikation herauszustellen, wurden Korrelationstabellen erstellt. Es kann festgestellt werden, dass die Nagellockerung bei 31 Patienten der am stärksten ausgeprägte Versagensmechanismus ist (54,4 %), der mit 17 Fällen (30 %) am häufigsten in Kombination mit einer Querfraktur (A3) auftrat. Die zweitgrößte Gruppe (12 Patienten) sind die Patienten, die ohne Lockerungszeichen keine Durchbauung bei einliegendem Nagel erreicht haben (21,1 %). Ebenfalls lag hier hauptsächlich eine A3 Querfraktur vor. 9 Patienten (15,8 %) erlitten eine Plattenlockerung oder einen Plattenbruch, welcher ebenfalls meist mit einer A3 Fraktur einherging. Zudem wird deutlich, dass die Querfraktur nach AO-Klassifikation, insbesondere die A3 Fraktur, mit 31 Fällen (54,4 %) am häufigsten vorkam.

Tabelle 1: Versagensmechanismus in Abhängigkeit der AO-Klassifikation

Versagensmechanismus	AO-Klassifikation						Summe
	A1	A2	A3	B2	B3	C3	
Infektion	0	0	1	0	0	0	1
Keine Durchbauung bei Gips	1	0	0	0	0	0	1
Keine Durchbauung ohne Lockerungszeichen Nagel	3	1	6	1	1	0	12
Keine Durchbauung ohne Lockerung Platte	0	2	0	0	0	3	3
Nagellockerung	8	4	17	2	0	0	31
Plattenlockerung oder Bruch	1	1	5	0	2	0	9
Summe	13	6	31	3	3	1	57

Die nachfolgende Abbildung 30 zeigt die Zusammenhänge zwischen AO-Klassifikation und dem Versagenstyp. Es ergab sich kein signifikanter Zusammenhang (Exakter Test von Fisher, $p=0,4342$).

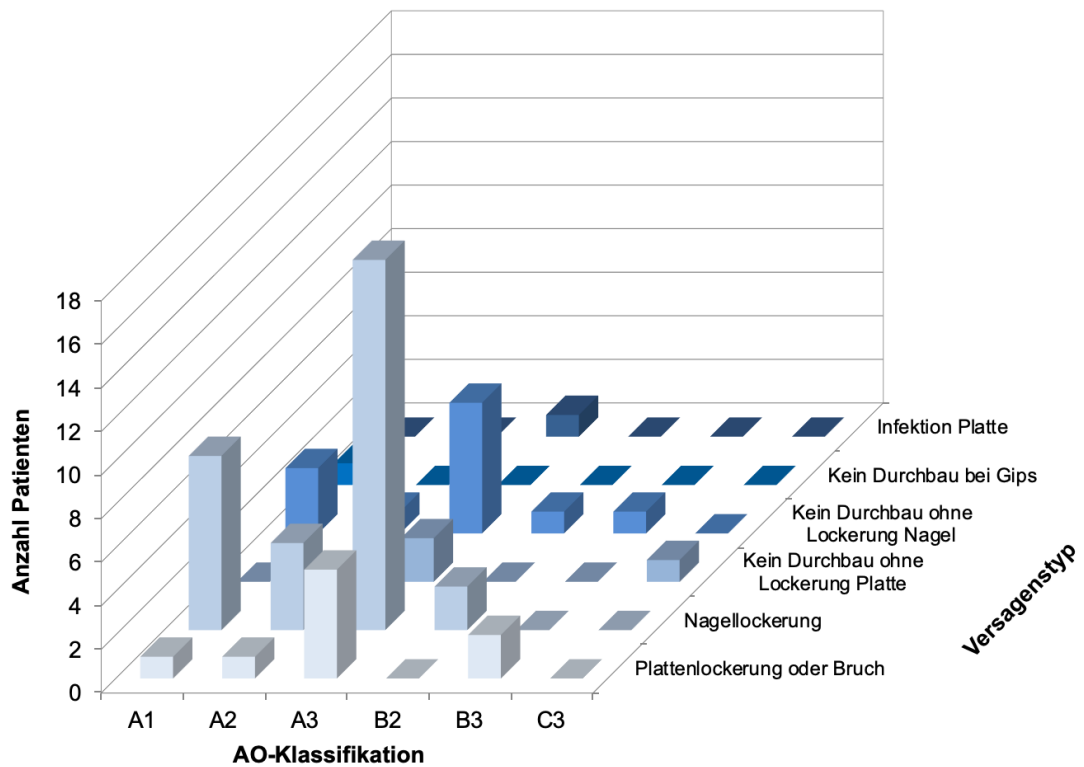


Abb. 30 Versagenstyp in Abhängigkeit der AO-Klassifikation

3.1.25 Zusammenhang AO-Klassifikation und Frakturspaltbreite

Die nachfolgende Abbildung 31 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Kombinationen zwischen neuer [42] AO-Klassifikation und Frakturspaltbreite. Ein statistisch signifikanter Zusammenhang ergab sich nicht (Exakter Test von Fisher $p=0,6929$).

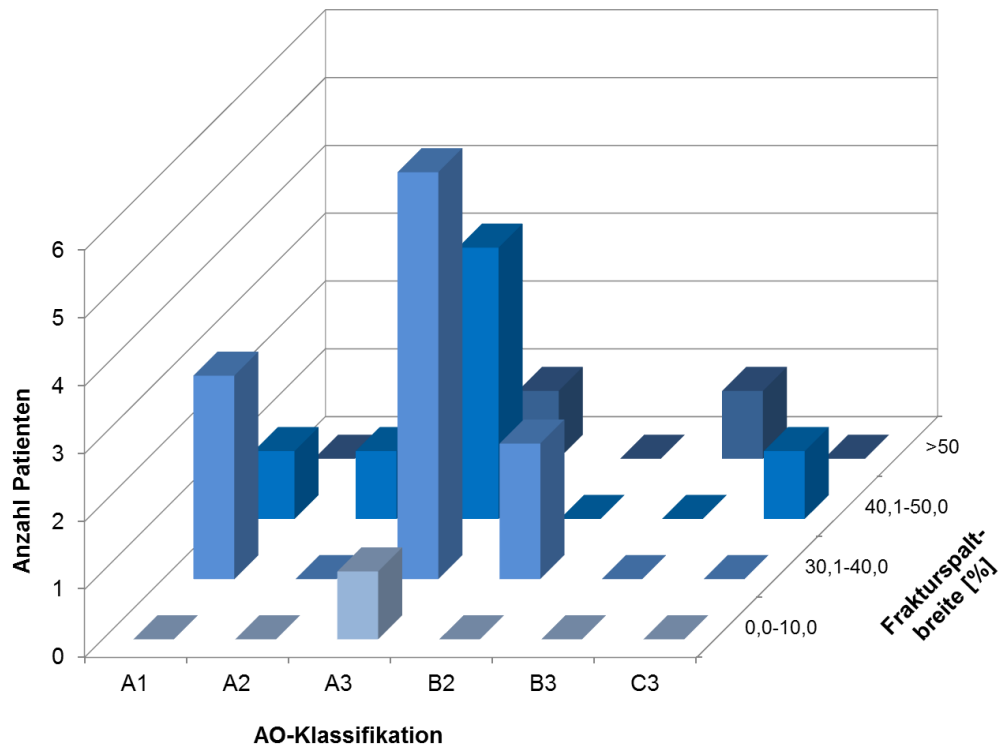


Abb. 31 Frakturspaltbreite und AO-Klassifikation

3.1.26 Zusammenhang Frakturspaltbreite und Versagenstyp

Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt Zusammenhänge zwischen der Frakturspaltbreite und dem Versagenstyp. Es fand sich bei Frakturspaltbreiten zwischen 20,1 % - 40,0 % die größte Ausprägung bei der Nagellockerung. Bei Frakturspaltbreiten zwischen 20,1 % - 30,0 % fand sich die zweitgrößte Ausprägung im Bereich der Plattenlockerung oder des Plattenbruches. Für den Zusammenhang der Frakturspaltbreite in Prozent und des Versagensmechanismus wurde ein p-Wert kurz oberhalb des Signifikanzniveaus gefunden ($p=0,0755$), sodass bei einem größeren Kollektiv ein signifikanter Zusammenhang gefunden werden könnte.

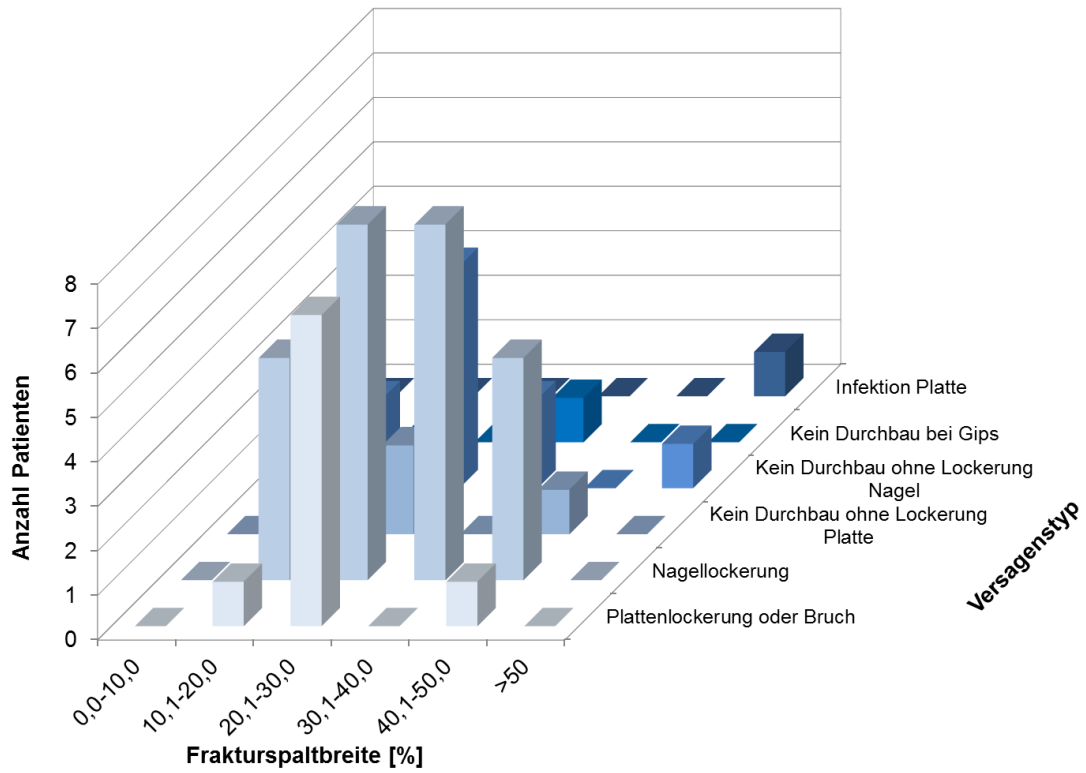


Abb. 32 Versagenstyp in Abhängigkeit der Frakturspaltbreite in Prozent

4. Fallbeispiele

4.1 Fallbeschreibung 1

Eine 40jährige Landwirtin zog sich eine komplexe Verletzung der rechten oberen Extremität inklusive Humerusschaftquerfraktur zu, als sie mit dem rechten Arm in ein Förderband geraten war. Die Fraktur wurde als A3 nach neuer AO-Klassifikation eingeordnet. Die initiale Versorgung erfolgte mittels Marknagelosteosynthese, die Fraktur hatte eine Frakturspaltbreite von 23,9% des Humerusschaftdurchmessers. Bei ausbleibender Frakturkonsolidierung (Abb. 33a) erfolgte zunächst eine Revision der distalen Verriegelung. 18 Monate post Trauma erfolgte dann, nachdem auch hierunter und unter begleitender Exogen-Ultraschallbehandlung keine Heilung erreicht werden konnte, ein Verfahrenswechsel auf eine Plattenosteosynthese (Abb. 33b). 24 Monate nach Trauma/ 6 Monate nach Plattenosteosynthese erfolgte die Konsolidierung (Abb. 33c).



Abb. 33 a) 6 Mon. nach Trauma: Pseudarthrose nach Nagelosteosynthese, b) 18 Mon. nach Trauma: Revision mit Plattenosteosynthese, c) Konsolidierung 24 Mon. nach Trauma/ 6 Mon. nach Plattenosteosynthese

Zeitgleich wurde eine Spongiosaplastik vom ipsilateralen Beckenkamm eingebracht (Abb.33b). Im Verlauf kam es zur Konsolidierung der Pseudarthrose (Abb.33c).

4.2 Fallbeschreibung 2

Ein 60jähriger Mann zog sich bei einem Stolpersturz eine Spiralfaktur der linken oberen Extremität zu. Die Fraktur wurde als A1 nach neuer AO-Klassifikation eingeordnet. Die initiale Versorgung erfolgte mittels Marknagelosteosynthese, die Fraktur hatte eine Frakturspaltweite von 22,4 % des Humerusschaftdurchmessers. Bei ausbleibender Frakturkonsolidierung (Abb.35a) sowie Auswanderung des Nagels um 15 mm erfolgte eine Revision mittels Osteosyntheseplatte 4 Monate nach der Primärversorgung. Nach Fraktur der Osteosyntheseplatte der Revision erfolgte 11 Monate später eine Re-Revision. Beide Revisionen wurden mittels Spongiosaplastik vom ipsilateralen Beckenkamm behandelt (Abb.35b). Im weiteren Verlauf der Re-Revision kam es dann erfreulicherweise zur Konsolidierung der Pseudarthrose (Abb.35c).

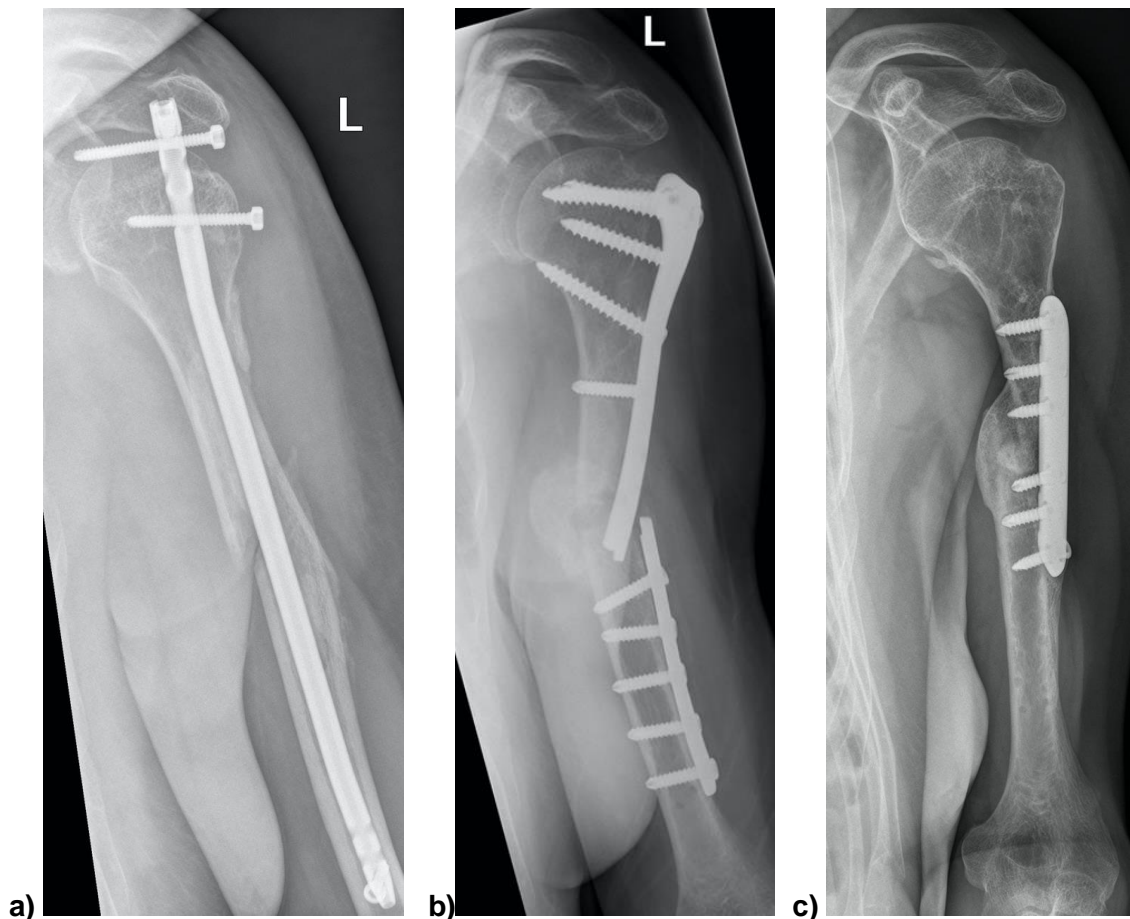


Abb. 34 a) 4 Mon. nach Trauma: Pseudarthrose nach Nagelosteosynthese, b) 14 Mon. nach Trauma: Revision mit Plattenosteosynthese und Fraktur der Platte, c) Konsolidierung 30 Mon. nach Trauma/ 15 Mon. nach Plattenosteosynthese

4.3 Fallbeschreibung 3

Ein 40jähriger Patient zog sich bei einem Sturz eine Fraktur des Humerusschaftes mit begleitender Nervenschädigung des posterioren Faszikels des Plexus brachialis zu. (AO-Klassifikation C3). Die Fraktur wurde initial plattenosteosynthetisch versorgt, im Verlauf machte eine Wundheilungsstörung einen erneuten stationären Aufenthalt und eine iv antibiotische Therapie notwendig. Nach 6 Monaten erfolgte dann eine Re-Plattenosteosynthese mit Spongiosaplastik bei Pseudarthrose. Auffällig ist eine primär verbliebene Frakturspaltbreite von 48,5 % des Humerusschaftdurchmessers (Abb.35a). Nachfolgend konnte eine Frakturkonsolidierung erreicht werden (Abb.35b).



Abb. 35 a) 4 Monate nach Trauma, Pseudarthrose nach Plattenosteosynthese, b) 12 Monate nach Trauma bzw. 5 Monate nach Revision, Konsolidierung nach Re-Plattenosteosynthese

4.4 Fallbeschreibung 4

Ein 64-jähriger Patient zog sich bei einem Fahrradunfall eine erstgradig offene, dislozierte Querfraktur des Humerusschaftes (AO-Klassifikation A3) ohne Läsion der Nerven (Abb.36a). Die Fraktur wurde initial plattenosteosynthetisch (Abb. 36b) versorgt. Im Verlauf machte ein Versagen des Osteosynthesematerials nach 16 Monaten eine Re-Plattenosteosynthese mit Spongiosaplastik bei Pseudarthrose nötig (Abb.37).



Abb. 36 a) Fraktur am Tag des Trauma, b) 16 Monate nach Trauma, Fraktur der Osteosyntheseplatte und Fehlstellung des Humerus



Abb. 37 16 Monate post Trauma mit finaler Osteosyntheseplatte sowie knapp 1 Monat post Revision

4.5 Fallbeschreibung 5

Eine zum Unfallzeitpunkt 80jährige Patientin zog sich bei einem Fahrradunfall eine Querfraktur des Humerusschaftes, ohne Angaben zur Läsion der Nerven oder Infektionen, zu. Massive Osteolysen um die Verriegelungsschrauben sowie den Marknagel selbst, zeigt eindringlich die fehlende mechanische Stabilität des Marknagel sowie die deutliche Schädigung am Humerusschaft selbst (Abb. 38). Es liegt die AO-Klassifikation A3 mit einer Frakturspaltbreite von 39 % des Humerusschaftdurchmessers vor. Mittels einer Re-Plattenosteosynthese mit Spongiosaplastik wurde die Faktur zum Ausheilen gebracht (Abb.39).

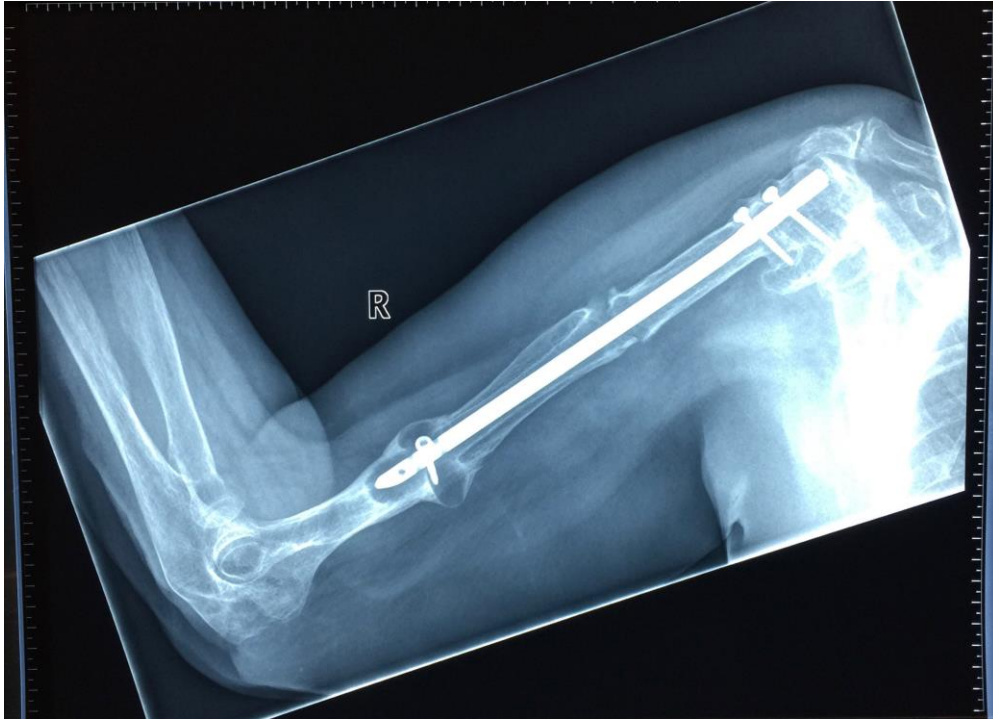


Abb. 38 Ausgeprägte Osteolyse um Marknagel sowie Verriegelungsschrauben 25 Monate post OP

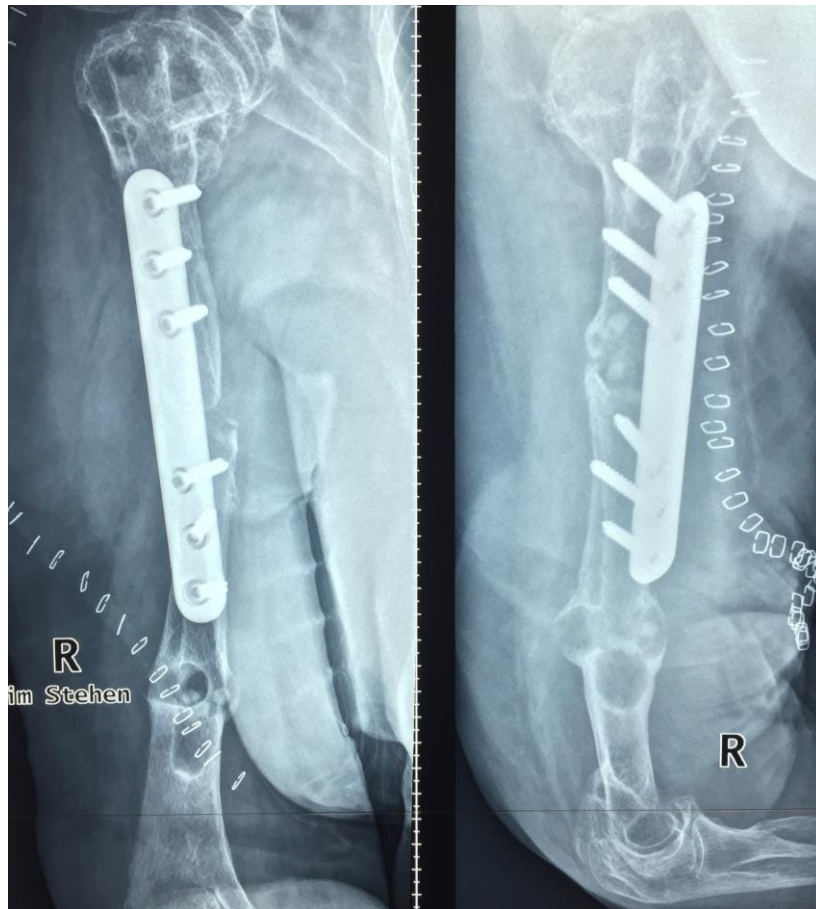


Abb. 39 Re-Osteosynthese durch winkelstabile Platte nach Entfernung des Marknagels 25 Monate post OP, ap und seitlich

5. Diskussion

5.1 Patientenkollektiv

Die Geschlechtsverteilung von Patienten mit einer Humerusschaftpseudarthrose im untersuchten Patientenkollektiv zeigt mit 66,7 % im Vergleich mit der in der Literatur erwähnten Patientenverteilung nach Bernard de Domsure et al. 2010 von 52 % männlichen zu 48 % weiblichen Patienten einen größeren Anteil männlicher Patienten [6]. Die Studie von Putnam et al. aus dem Jahr 2019 über 2009 Patienten berichtet von 62,1 % weiblichen Patienten [69]. Andere Studien zeigen einen geringeren Anteil an weiblichen Patienten mit 17 % [14], 37 % [15], 61 % [27], 43 % [43], 5,9 % [70], 49 % [89].

Das Alter der analysierten Patienten beinhaltet eine weite Spannweite von 18 bis zu 87 Jahren. Das durchschnittliche Alter lag bei 50 Jahren bei einem Median von 51 Jahren. Dieses unterstützt, dass die Patientengruppe annähernd repräsentativ ist. Der Mittelwert des Alters beträgt in anderen Studien: 37 [14], 33,5 [15], 42,5 [43], 37,6 [70], 51,3 [89], 46 [58], 43,2 [93] Jahre.

Die durchschnittliche Zeit von der Verletzung bis zur ersten Revision betrug im analysierten Patientenkollektiv 9,6 Monate. In der Literatur werden folgende Zeiten von der Verletzung bis zur Pseudarthrosenversorgung angegeben: 40 Monate [5], 16,2 Monate [17], 17 Monate [73]. Der Vergleich mit der Literatur zeigt, dass in unserem Patientenkollektiv diese Zeit deutlich kürzer ist. Die durchschnittlichen 9,6 Monate bis hin zur ersten Revision bei ausgebildeter Pseudarthrose entsprechen den in der Literatur beschriebenen 6-9 Monaten, in denen eine vollständige Konsolidierung der frakturierten Knochen stattgefunden haben sollte [24,57]. Teilweise ist aufgrund von Materialbrüchen, radiologischen Osteolysen durch Materiallockerung, Fehlstellungen oder großen Frakturspaltbreiten auch vor den üblichen 6 Monaten revidiert worden. Das Kollektiv umfasst somit Pseudarthrosen gemäß Definition [57] einerseits und frühe Komplikationen der Behandlung bzw. Folgen operationstechnischer Probleme andererseits.

Es fiel verstärkt die Ausprägung der Pseudarthrose im mittleren Schaftdrittel mit 57,9 % auf. In der Literatur wird allerdings angegeben, dass im mittleren Schaftdrittel die häufigste Lokalisation der Frakturen vorliegt [10]. Insofern entspricht die Häufung der Zusammensetzung der Grundgesamtheit aller behandelten Humerusschaftfrakturen.

In diesem Kollektiv fanden sich 3,5 % Infektpseudarthrosen, 54,4 % atrophe Pseudarthrosen sowie 42,1 % hypertrophe Pseudarthrosen. Ein vergleichbares Verhältnis

lag in einer ähnlichen Studie vor, bei der Pseudarthrosen nach Versorgung mittel intramedullärem Nagel durch Osteosyntheseplatte revidiert wurden [17].

Die Frakturen am Humerusschaft werden häufig durch niedrig energetische Stürze im Alltag bei Patientengruppen höheren Alters sowie durch Unfälle im Straßenverkehr verursacht [69,27]. Diese Werte können anhand des Patientenkollektivs bestätigt werden. Hauptsächlich konnten auch hier 66,7 % der Ursachen der Fraktur des Humerusschaftes auf einen einfachen, gering energetischen Sturz zurückgeführt werden, 26,3 % wurden in einem Verkehrsunfall, teils auch als Polytrauma, verursacht sowie 7,1 % bei sportlichen Aktivitäten wie Fahrradfahren, Reiten oder Schlittenfahren und 3,5 % als Arbeitsunfälle.

In der Literatur wird das Vorkommen von Rauchern in Frakturheilungsstudien mit bis zu 55 % [5,54] angegeben. Darüber hinaus werden dem Rauchen negative Effekte auf die Knochenheilung zugesprochen. Dies wird durch durch Vasokonstriktion, Hypoxie, und Demineralisierung des Knochens sowie verlangsamte Revaskularisierung erklärt [3,39,49,65,88]. Zum Zeitpunkt des Unfalles fand sich innerhalb des Kollektivs ein knappes Drittel mit (28,1 %) Rauchern. Die Intensität bzw. die Menge des Nikotinkonsums konnte innerhalb der Arztbriefe und Patientenakten nicht nachvollzogen werden. Es wurde lediglich mit ja, nein oder keine Angaben angegeben. Da es bei 15 Patienten (26,3 %) keine Angaben gab, können noch einige weitere Patienten mit ausgebildeter Pseudarthrose Raucher zum Zeitpunkt der Behandlung gewesen sein.

Im Bereich des Humerusschaftes sind verschiedene Frakturtypen zu beobachten. Die Häufigkeit einzelnen AO-Klassen wird bei Studien über operativ versorgte Humerusschaftfrakturen in der Literatur nicht immer angegeben. Es wurden 5 entsprechende Artikel gefunden. Leiblein et al. [50] beschreiben 13 A, 4 B, 6 C und 3 andere (z.B. Schußwunden) Fälle, Tytherleigh-Strong et al. [92] 63,3 % Typ A, 26,2 % Typ B und 10,4 % Typ C-Frakturen, Ekholm et al. [27] 61,0 % A, 29,6 % B und 9,4 % C-Frakturen, wobei die A-Frakturen unterteilt werden in 9,7 % A 3.2, 18,8 % A1.2 und 11,4 % A1.1. Mendes et al. [60] hatten im Kollektiv für MIPO 15 A, 12 B und 4 C Frakturen. Putti et al. [70] zählten 1 A1, 6 A2, 12 A3, 6 B1 und 9 B2 -Frakturen. Bei Gonsalves et al. [32] ergaben sich 34 A, 7 B und 10 C -Frakturen. Im untersuchten Kollektiv der revidierten Patienten entsprachen die relative Häufigkeiten mit 50 von 57 (87,7 %) Typ A, 6 von 57 (10,5 %) Typ B und 1 von 57 (1,8 %) Typ C-Frakturen, somit etwa den ersten beiden Publikationen entsprechend, während gegenüber den anderen Publikationen mehr der Klasse A vorlagen. A3 Frakturen fanden sich mit 31 von 57 (54,4 %) besonders häufig. A-Frakturen, d.h. Brüche, die aus maximal 2 Frakturanteilen

bestehen, werden auch als sog. einfache Brüche bezeichnet [27]. Innerhalb dieser einfachen Frakturen war die Querfraktur die mit Abstand häufigste vorkommende Fraktur. Frakturen der Kategorien B und C, die jeweils keil- und komplexe Frakturen beinhalten, kamen in unserem Kollektiv nur in geringer Anzahl (12,3 %) vor.

In dem vorliegenden Kollektiv aus 57 Patienten wurden hauptsächlich Marknägel in 43 Fällen (75,4 %) sowie in 13 Fällen (22,8 %) eine Platte zur Primärversorgung verwendet. Nach Putnam et al. aus 2019 werden insbesondere Patienten mit erhöhter Komorbidität und erhöhtem Alter vornehmlich mittels einer Marknagelung behandelt [69]. Allgemein wurden dennoch in der Studie von Putnam et al. von insgesamt 2009 Patienten 70,6 % mittels Platte primär versorgt, was zeigt, dass die Osteosyntheseplatte derzeit eine große Bedeutung in der Wahl der Erstversorgung hat [69,81].

Es ist davon auszugehen, dass das untersuchte Kollektiv im Hinblick auf Alter, Geschlecht, Unfallursache, und Fraktur repräsentativ ist, jedoch mehr Nägel vertreten sind, als anhand der Literatur zu Erstversorgungen zu erwarten gewesen wären.

5.2 Analyse der Versagensmechanismen

Während die Häufigkeit der Diagnosestellung einer Pseudarthrose nach Humerusschaftfrakturen in der Literatur vielfach dargestellt ist, konnte keine zahlenmäßige Aufschlüsselung der zugrundeliegenden Versagensmechanismen gefunden werden. Die vorliegende Arbeit ergänzt somit diesen neuen Aspekt.

Anhand der festgestellten Versagensmechanismen lassen sich mehrere grundsätzliche Aspekte erkennen. Bei den Nägeln gibt es insbesondere die Nagellockerung einerseits, hier definiert als Lockerung beschrieben im Operationsbericht, und den fehlenden Durchbau ohne Lockerungszeichen andererseits. Weitere Kriterien sind die klinisch vom Patienten angegebene Instabilitätsgefühl oder -beschwerden, radiologische Befunde wie Lysen um den Nagel, Schraubenlockerung oder -bruch. Die Nagellockerung kann auch mit einem proximal überstehenden Nagel kombiniert sein.

Bei den Platten lassen sich drei Grundmechanismen unterscheiden, der anhaltend nachweisbare Frakturspalt ohne Plattenlockerung, die Plattenlockerung, auch hier über den intraoperativen Befund definiert, sowie der Plattenbruch. Zahlenmäßig überwiegt der

Plattenbruch mit 50 % der Plattenversagen. In Einzelfällen findet sich ein Schraubenbruch oder eine Schraubenlockerung aus der Platte.

Es stellt sich die Frage, wie diese Versagensmechanismen entsprechenden Ursachen zuzuordnen sind. Bei den Ursachen sind die mechanische Instabilität und biologische Faktoren zu unterscheiden (z.B. Diamond concept [30,31]). Die Instabilität kann dabei theoretisch primär, z.B. bei einer schwierigen Fraktursituation oder durch die Wahl des Implantats oder sekundär z. B. durch erneuten Sturz, bedingt sein. In den Fällen, in denen bei der Revision intraoperativ keine Lockerungszeichen nachgewiesen wurden, ist davon auszugehen, dass im Bereich des neu gebildeten Kallus eine verzögerte Kalzifizierung stattfand entweder aufgrund fehlender biologischer Faktoren [30,57] oder auch aufgrund einer verbleibenden Mikrobewegung im Frakturspalt [66]. Insbesondere verhindert auch ein breiter verbliebener Frakturspalt die Konsolidierung [4].

Die hier durchgeführte Auswertung der Versagensmechanismen von Patienten, die im Zeitraum von 10 Jahren im BG Klinikum Hamburg nach einer Humerusschaftfraktur revidiert wurden, ergab, dass sowohl die Osteosynthese mittels nichtwinkelstabiler oder winkelstabiler Platte als auch die intramedulläre Nagelung die Ausbildung einer Pseudarthrose zulassen (Abb.40). Bei 57 Patienten waren Marknägel in 43 Fällen (75,4 %) sowie Platten in 13 Fällen (22,8 %) verwendet worden. Ein Patient hatte eine konservative Versorgung (1,8 %) erhalten. Die Methode der Arbeit ermöglicht die Erfassung einer relativ großen Zahl zugewiesener versagter Osteosynthesen, lässt allerdings dadurch keine Feststellung der Häufigkeit von Nagel- oder Plattenanwendung im Grundkollektiv der primär versorgten Humerusschaftfrakturen zu. Es stellt sich somit die Frage, ob über die Auswertung der Literatur indirekt Schlüsse zum Grundkollektiv gezogen werden können. Geht man von der Zusammenstellung und Schlussfolgerung von Bhandari [9] aus, dass für die Platte die Häufigkeit der Pseudarthrose um 74 % geringer ist als für den Nagel, so müssten beispielhaft im Falle einer Gleichverteilung der Primärversorgungen 43 Nägeln $43 \times (100\% - 74\%) = 43 \times 26\% = 11,2$ Platten entsprechen, also etwa die Anzahl Platten, die sich in der vorliegenden Untersuchung fanden. Es ist also, selbstverständlich mit einer Unsicherheit, wahrscheinlich, dass der hohe Anteil von Nagelosteosynthesen im untersuchten Kollektiv nicht ausschließlich darauf zurückzuführen ist, dass im betrachteten Zeitraum eventuell wesentlich häufiger Nägel als Primärimplantate eingesetzt wurden, sondern auch unterschiedliche Komplikationsraten widerspiegelt.

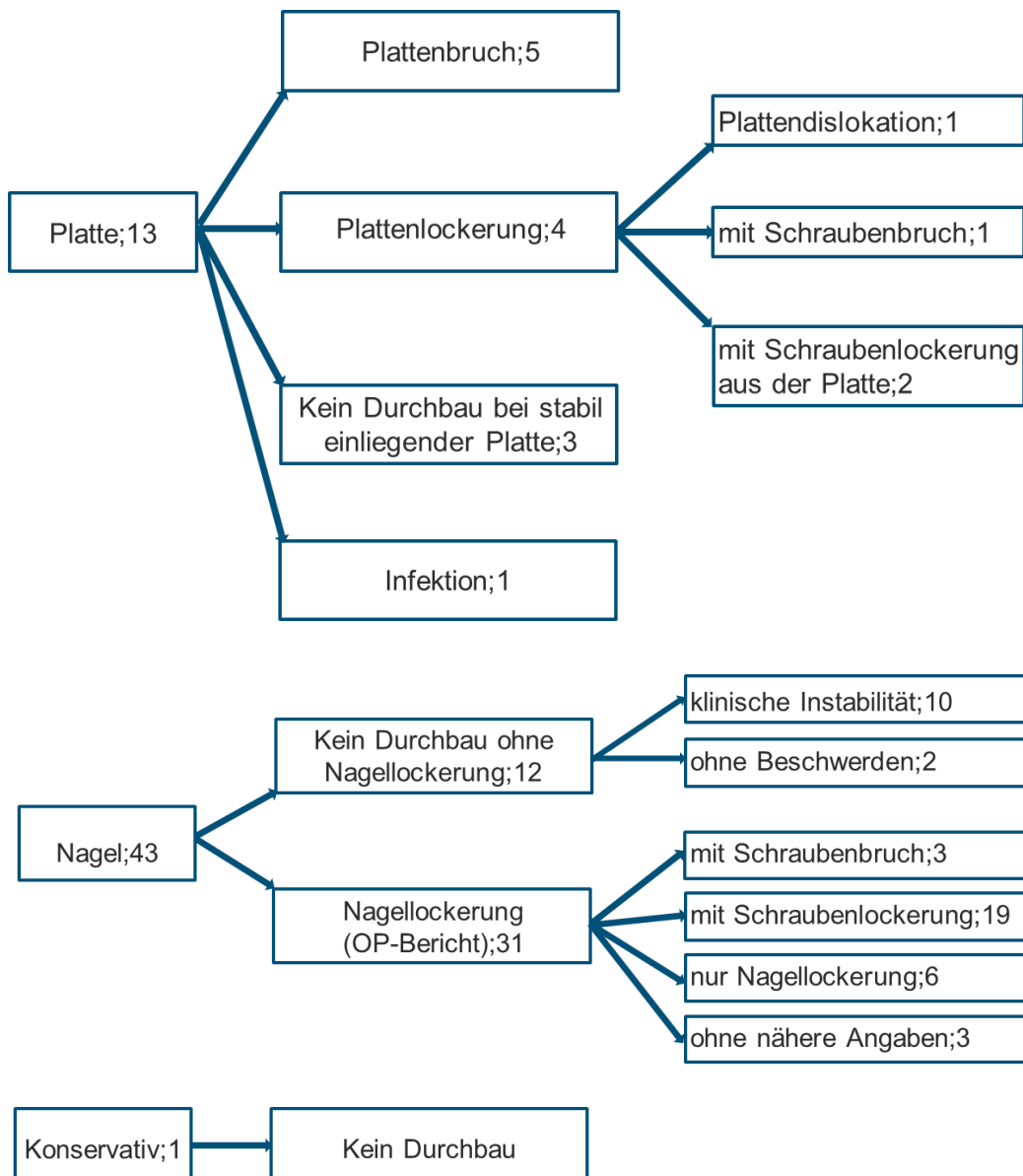


Abb. 40 Übersicht Versagensmechanismen nach Erstversorgung

Ein wesentliches Ergebnis der Arbeit ist, dass es sich bei 75 % der versagten Humerusschaft-Osteosynthesen um gelockert einliegende Marknägel handelt. Die in etwa der Hälfte dieser Fälle gefundene Lyse um den Nagel spricht für teilweise massive Bewegungen in Knochen-Implantat-Interface. In einem weiteren großen Prozentsatz resultiert die Implantatlockerung zusätzlich in einer radiologisch sichtbaren Lockerung der Verriegelungsschrauben. Es ist zu schließen, dass offensichtlich Art und Dimensionierung des Implantates für die entsprechenden Frakturen nicht geeignet waren. Wie durch Beickert et al. [8] gezeigt wurde, kann ein zu gering dimensioniertes Implantat zur fehlenden mechanische Stabilität und damit zum Ausbleiben der Konsolidierung führen.

Dujardin et al. [26] stellten heraus, dass die Marknagelosteosynthese anfällig gegen Rotations- und Scherkräfte sei, und bei zusätzlichen biologischen Faktoren die Entstehung der Pseudarthrose vorprogrammiert sei. Auch wurde bereits von der AO eine breite (Oberschenkel) DC-Platte wegen der höheren Rotationsstabilität gegenüber einer schmalen Platte empfohlen [85]. Durch Winkelstabilität können Platten darüber hinaus insbesondere mehr Rotationsmoment aufnehmen [86].

Ein Versagensmechanismus ist der des gelockerten Nagels ohne radiologisch sichtbare Schraubenlockerung. Insgesamt waren hiervon 6 von 57 Patienten (10,5 %) betroffen. Intraoperativ zeigte sich in diesen Fällen der Befund eines nicht rotationsstabilen Marknagels durch Bewegung zwischen Nagel und Verriegelungsschrauben.

Ein weiteres wesentliches Ergebnis der Arbeit war, dass bei den untersuchten Nagelosteosynthesen die vermessenen Frakturspalte außergewöhnlich weit waren. So resultierten in den untersuchten Patienten Dislokationen bzw. Frakturspaltweiten von - im Mittel! - 40 % des Schaftdurchmessers. Diese entspricht bei einem mittleren Schaftdurchmesser des Humerus von 25 mm [40] einem mittleren Abstand zwischen den Knochenfragmenten von 10 mm. In der Literatur ist eine höhergradige Dislokation oder Distraction der Fraktarenden als Risiko zur Ausbildung einer Pseudarthrose beschrieben [13,83]. Durch Claes und Augat [19,20] wurde in grundlegenden Arbeiten an Schafstibiae festgestellt, dass ab ca. 5 mm die Heilung ausblieb. Bei einem durchschnittlichen Durchmesser des Humerusschaftes von 25 mm, entspricht dies einer Frakturspaltweite von 20 %. Frakturspaltweiten von bis zu 10 % des Schaftdurchmessers kamen im untersuchten Kollektiv nahezu nicht vor (1 Patient). Es ist somit davon auszugehen, dass derartige Fälle in der Regel heilten. Während bei den Fällen mit gelockertem Nagel sowohl eine primäre unvollständige Reposition (siehe Fallbeispiel neu 4.2) als auch ein sekundäres Verschieben der Fragmente in Frage kommen, ist bei den nicht gelockerten Nägeln die primäre Reposition mit entsprechender Frakturspaltweite durchgeführt worden.

Bei den Nagelosteosynthesen war ebenfalls auffällig (siehe z.B. Fallbeispiel 2), dass auf Grund der weit proximalen und weit distalen Verriegelung eine deutliche Dislokationen im mittleren Schaftbereich nicht sicher vermieden oder der Nagel nicht zentral im trompetenförmigen Schaft positioniert werden konnte. Aufgrund eines geringen Durchmessers fand sich der Nagel nur an einer Kortikalis anliegend, verbunden mit Verschiebungen und Achsabweichungen.

Der optimale Zugang des Marknagels, retrograd oder antegrad [18], hängt von verschiedenen Faktoren der Fraktursituation sowie dem Ermessen des Operateurs ab. In

dem untersuchten Kollektiv überwiegt zwar der antegrade Zugang des Nagels mit 56,1 %. Mit 15,8 % fand sich der retrograde Nagel jedoch ebenfalls nicht selten. Die retrograde Einbringung ist nach Beickert [7] mit einem höheren Risiko der Ausbildung einer Pseudarthrose verbunden. Allerdings konnte in der Studie von Putnam et al. nicht bestätigt werden, dass die Anzahl der Komplikationen direkt mit der Art der Versorgung in einem Zusammenhang steht [69].

Lediglich eine relativ kleine Anzahl von 12 Nagel-Patienten zeigten keine Lockerungszeichen. In 12 Fällen wurde die Revisionsoperation durchgeführt, wobei keine klaren Lockerungszeichen oder Anzeichen einer Dislokation des Nagels oder der Verriegelungsschrauben radiologisch erkennbar waren, jedoch das klinische Bild der Patienten, mit dem Gefühl der Instabilität sowie Beschwerden bei Abduktion und Rotation und alltäglichen Arbeiten zur OP-Indikation führte. 2 Fälle fielen rein radiologisch auf, wobei klinisch keine Beschwerden der Patienten geäußert wurden.

Bei den Platten ist demgegenüber vor allem der Plattenbruch als Versagen festzustellen. In 5 Fällen kam es zu Plattenbrüchen. Ein Plattenbruch bedeutet eine dynamische zyklische Überbeanspruchung [66]. Dieses kann vor allem auftreten, wenn eine mediale Abstützung gegenüber der Platte fehlt [4], entweder durch primär verbliebenen Frakturspalt oder auch durch biologische Resorption im Heilungsverlauf [66]. Grundsätzlich sind Platten aufgrund der asymmetrischen Lage bruchgefährdet, wenn in angemessener Zeit kein Durchbau stattfindet [59]. Demgegenüber waren Lockerungen, d.h. Probleme im Implantat-Knochen-Interface mit der Anzahl 2 seltener.

In einem extremen Fall handelte es sich um einen zum Unfallzeitpunkt 29jährigen Patienten. Dieser wurde bis zur knöchernen Konsolidierung dreimal revidiert, da es in zwei Fällen zu einem Plattenbruch sowie in einem Fall zu einem Plattenausriss kam. Da der Patient unter Epilepsie leidet, ist in diesem Fall nicht klar, worin die Ursache der Frakturen und des Ausrisses der Platte liegt, eine stärkere Einwirkung im Zuge eines epileptischen Anfalls ist nicht auszuschließen. In solchen besonderen Fällen könnte die Versorgung durch einen Marknagel mit seiner durch die zentrale Lage großen axialen Festigkeit ggf. eine sinnvolle Alternative zu der angewendeten Plattenosteosynthese darstellen.

Bei 3 Patienten wurde trotz fehlender Lockerung oder Fraktur der Platte keine knöcherne Durchbauung erreicht. Es sind hier im Gegensatz zu den vorbeschriebenen klar mechanisch bestimmten Situationen eher biologische Störfaktoren der Heilung zu vermuten [30].

Die ausgewertete Häufigkeitsverteilung der Kombinationen zwischen AO-Klassifikation und Frakturspaltbreite zeigt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang. Die in der Literatur geforderte optimale Reposition, bei Bedarf auch durch Kompression, ist eine der Grundvoraussetzungen für eine Ausheilung der Fraktur [4]. Auffällig ist insofern, dass im untersuchten Kollektiv die Querfraktur den Frakturtyp mit den weitesten Frakturspaltbreiten darstellt. Überwiegend fanden bei diesen „einfachen“ Frakturen Spaltbreiten von 30-40 % des Durchmessers des Humerusschaftes. Diese wären eher bei Schräg- oder Mehrfragmentfrakturen zu erwarten.

Zwischen AO-Klassifikation und dem Versagenstyp ergab sich kein signifikanter Zusammenhang. Dennoch sind Auffälligkeiten zu beobachten. Der in der Arbeit am häufigsten vorkommende Versagenstyp ist die Nagelloockerung. Diese kommt häufig bei Frakturtyp A3, d.h. bei der Querfraktur vor. Mit 31 Fällen von 57 (54 %) ist die Querfraktur zwar auch die häufigste Fraktur im gesamten Kollektiv, dennoch scheint es, dass die Querfraktur in Kombination mit der Marknagelung Defizite im Bereich der mechanischen Stabilität mit sich bringt. Auf eine Instabilität von Nagelosteosynthesen wird mehrfach in der Literatur hingewiesen. Insbesondere gilt dies für die Rotation [4,19]. Eine Rotationsbewegung führt in der Querfraktur zu Scherkräften, die sich als ungünstig für die Frakturheilung erwiesen haben [45].

Für den Zusammenhang des Versagensmechanismus und der Frakturspaltbreite wurde ein p-Wert knapp oberhalb des Signifikanzniveaus von $\alpha=0,05$ (Exakter Test von Fisher, $p=0,0755$) berechnet, d.h. es könnte sich unter Umständen bei einem größeren Patientenkollektiv ein signifikanter Zusammenhang zeigen. Wenn man davon ausgeht, dass bei der Einbringung des Marknagels intraoperativ mit oder ohne Kompression auf den Frakturspalt beide Fraktarenden bestmöglich aufeinander getellt wurden, ist ein mechanisches Versagen anzunehmen, bei dem sukzessiv die Fraktarenden auseinandergleiten und so teilweise Frakturspaltbreiten bis zu 50% des Humerusschaftes resultierten. Zusätzlich werden auf Grund der häufig festgestellten, teilweise massiven Osteolysen um den Marknagel selbst sowie um seine Verriegelungsschrauben, weitere Rotationsbewegungen möglich, die dazu führen, dass grobe Fehlstellungen entstehen.

Lediglich in Patient (1,8 %) war mittels konservativer Versorgung vorbehandelt worden. Auch sind hier die Pseudarthrosenraten höher [27,55,71]. Dieses entspricht dem aktuellen Trend zur weitgehenden operativen Versorgung der Humerusschaftfrakturen [8].

Zur Analyse der Pseudarthrosen hat sich das Diamond-Konzept bewährt. Es werden 4 wesentliche Faktoren betrachtet [30,31], das Gewebbett, Durchblutung und

Wachstumsfaktoren sowie die mechanische Stabilität. Betrachtet man das in dieser Studie ausgewertete Kollektiv, so ergibt sich, dass die „mechanischen“ Probleme gegenüber den „biologischen“ weit überwiegen. 12 Patienten mit Nägeln und 3 Patienten mit Platte zeigten keine offensichtliche Instabilität. Von diesen zeigten 12 einen übermäßig weiten Frakturspalt im Sinne von Augat/Claes [4,19], entsprechend einer Problematik des Pseudarthrosen-Betts nach Diamond-Konzept. Somit verbleiben lediglich 3 Patienten, bei denen von biologischen Defiziten der Gewebsdifferenzierung auszugehen ist.

5.3 Revision

Die Häufigkeit von Revisionen nach operativer Versorgung von Humerusschaftfrakturen wird mit 2 % bei Plattenosteosynthese mit autologer Spongiosa, 5 % bei Plattenosteosynthese ohne autologer Spongiosa, 12 % bei Nagelversorgung mit autologer Spongiosa und 34 % bei Nagelversorgung ohne Spongiosa angegeben [67]. Auffällig ist, dass in der Regel deutlich höhere Revisionsraten für Nägel, gegenüber Platten angegeben werden [9,15,67,81], Vorteile scheinen minimal invasive Plattenosteosynthesen zu zeigen [55,94]. In wenigen Publikationen wurden Nagel und Platten als gleich bzgl. entstehender Pseudarthrosen bewertet [32,97].

Ziel der Revision der Pseudarthrose ist die dauerhafte knöcherner Konsolidierung. Hierfür werden verschiedene Operationsmethoden und Techniken verwendet [13]. Das Vorgehen der Pseudarthrosenrevision am Humerusschaft wird am BG Klinikum Hamburg mittels Debridements, Sequestromie und Anlagerung autologer Spongiosa durchgeführt [13]. Zur Stabilisierung wird eine winkelstabile Osteosyntheseplatte verwendet. Diese Vorgehensweise entspricht den überwiegenden Empfehlungen der Literatur. Die Raten für Re-Pseudarthrosen der Revisionsoperationen sind für Platten geringer als für Nägel um bis zu 74 % [9].

Im untersuchten Kollektiv wurden lediglich 3 Patienten ohne Verfahrenswechsel revidiert. Insbesondere der in dem analysierten Patientenkollektiv am häufigsten für die Erstversorgung verwendete Marknagel wurde zu Gunsten der Platten ausgetauscht. Der konservativ behandelte Patient wurde ebenfalls mittels Plattenosteosynthese revidiert.

Innerhalb des Behandlungszeitraumes des analysierten Patientenkollektives konnte in 38 der 57 Fälle bereits mit einer Revisionsoperation eine knöcherne Konsolidierung ermöglicht werden.

Die durchschnittliche Behandlungsdauer von der Verletzung bis zur finalen Versorgung der Pseudarthrose betrug 16 Monate im hiesigen Patientenkollektiv. Der Vergleich mit der Literatur zeigt, dass sich die Behandlungszeit der Verletzung bis zur finalen Versorgung innerhalb des in der Literatur genannten Zeitraumes von 16,2 Monaten befindet [17]. Darüber hinaus ist zu sehen, dass die größte Gruppe im Bereich von 6-10 Monaten liegt. Da in der Regel nach ca. 6 Monaten die Entscheidung einer ausgebliebenen Knochenheilung getroffen werden kann [24,57], entsprechen die gefundenen Zeiten einer zeitgerechten Versorgung durch Revision.

40 Fälle wurden mit einer Revision zum Ausheilen gebracht. Ein überraschendes Ergebnis war, dass 17, d.h. ein Drittel der mit einer Revision behandelten Patienten ein weiteres Versagen zeigte. Dieses ist mehr als in der Literatur üblicherweise angegeben. So fanden Beikert et al. [8] eine Rate von 16 % bei Nagelversorgung für eine zweite erforderliche Revision, Peters et al. [67] 2 % bei Plattenosteosynthesen mit Spongiosa, 5 % bei Plattenosteosynthesen ohne Spongiosa, 12 % bei Nagel-Versorgung mit Spongiosa und 34 % bei Nagel-Versorgung ohne Spongiosa, wobei wesentlich und signifikant häufiger nach einer mit einem Nagel durchgeführten Revision eine weitere erforderlich wurde. Alle 1. Revisionen waren im BG Klinikum Hamburg durchgeführt worden. Die entsprechenden Fälle wurden deshalb aufbereitet. Es zeigte sich, dass in einem Fall, in dem entgegen dem Behandlungskonzept kein Verfahrenswechsel vom Nagel zur Platte erfolgte, eine erneute Revision erforderlich wurde. Auch wenn dieses Vorgehen aus nachvollziehbaren Gründen erfolgte, ist kritisch zu bemerken, dass eine direkte Wahl der Platte möglicherweise besser gewesen wäre.

Ein Patient wurde, wegen langstreckiger proximaler Fragmente mit einer langen Tibiakopfplatte versorgt, die dann im Schaftbereich brach. Die Platte ist hier dünner als die sonst verwendete Schaftplatte und war offensichtlich für den Fall unterdimensioniert. Dieses bestätigt erneut, dass eine Platte für den Humerusschaft großen biomechanischen Belastungen unterliegt und die Wahl einer kräftigen Platte erfordert [85]. Ein Patient mit starker Epilepsie erlitt hintereinander 3 Plattenbrüche, entsprechend einem Materialversagen in Form eines Ermüdungsbruches oder -ausrisse. Bei Begleiterkrankungen, die die Therapie massiv beeinflussen können wie in diesem Fall, könnte gesondert über die Wahl des Implantates entschieden werden. Hier sind die Folge-Revisionen nicht als Folge des gewählten Vorgehens einzuschätzen.

Unproblematisch sind selbstverständlich die 3 Fälle, in denen sich lediglich eine Materialentfernung als Folgeeingriff registriert wurde.

Es ist zu schließen, dass bei Revisionen von Humerusschaftfrakturen, die mechanischen Ansprüche an das Implantat nicht hoch genug eingeschätzt werden können.

5.4 Keimnachweis

Bei Infektionen wurde in dem analysierten Kollektiv übergangsweise oder vollständig die Ausheilung der Fraktur über den Fixateur externe, entsprechend der Literatur [76], erzielt.

Im ausgewerteten Patientenkollektiv fand sich in 28,1 % der Fälle ein intraoperativer Keimnachweis, wobei gehäuft Keime aus der Familie der Staphylokokken (31,3 %) auftraten. In einem der Fälle fand sich eine Kombination von Staphylokokken und *Bacillus pumilus*. In einem anderen Fall fand sich *Bacillus licheniformis*. Ein weiterer Fall war ein Patient mit einliegender Osteosyntheseplatte, bei der keine Konsolidierung trotz radiologisch unauffälliger Verhältnisse erfolgt ist. Bei Revision stellte sich ein vorliegender Infekt dar, welcher als Ursache für die Pseudarthrose gewertet wurde. Bei weiteren 6 Fällen wurde ebenfalls eine Keimbelastung festgestellt, wobei keine konkrete Beschreibung der Keime innerhalb der Patientenakte aufzufinden war. In der Literatur wird auf Keime als Ursache einer Pseudarthrose mehrfach hingewiesen, wobei es Hinweise gibt, dass die Kontaminationsrate unterschätzt wird [37,61,75], da nicht immer der Keimnachweis erfolgen kann. In der Studie von Mills et al. [61] fand sich in 38 % der Fälle eine Infektion, die in 7 % der Fälle der alleinige Grund zur Ausprägung einer Pseudarthrose darstellte. Durch die Studiengruppe Putnam et al. wurde bekräftigend dargelegt, dass bei Osteosyntheseplatten eine erhöhte Gefahr der Infektion besteht als bei Marknagelung des Humerusschafts [69]. Das Verhältnis wird in dieser Studie mit 1,4 % zu 0,2 % angegeben [69].

5.5 Limitierungen der Studie

Das Ziel der Studie war es, zu untersuchen, welche Versagensmuster bei Osteosynthesen des Humerusschafts auftreten können und so Schlussfolgerungen zur Vermeidung zu ermöglichen. Es handelt sich um eine retrospektive Auswertung von

Messungen und Daten im Rahmen der klinischen Behandlung. Ein Vergleichskollektiv in Form einer Kontrollgruppe der Patienten, die primär geheilt sind, ist daher nicht gegeben. Der große Vorteil der Methode ist, dass das so ermittelte Kollektiv erst eine relevant große Anzahl von Versagensfällen erreicht, die sonst - bei einer durchschnittlichen Rate an Pseudarthrosen von 10 % [8,15,43,54,60,70,80,83] - lediglich mit einem großen klinischen Kollektiv von ca. 600 Primär-Operationen mit unterschiedlichen Verfahren gesammelt werden könnten. Der Nachteil ist, dass es nicht möglich ist, direkt die Häufigkeiten des Auftretens von Versagensmechanismen bzw. Pseudarthrosen unter verschiedenen Bedingungen zu zahlenmäßig zu vergleichen, z.B. zwischen Versorgung mit Platte und Nagel oder in Abhängigkeit von den verschiedenen Frakturtypen. Es konnte zu diesen Fragestellungen jedoch eine Abschätzung durch Vergleich mit der Literatur erfolgen.

Eine Schwierigkeit stellten teilweise schwer in Vollzähligkeit auffindbare Röntgenbilder dar. Erst ab dem Jahr 2010 wurden alle Röntgenbilder digitalisiert. So war es in der Regel leider nicht möglich, die interessante Frage der Unterscheidung zwischen primär weitem Frakturspalt und sekundärer Dislokation zu beantworten

Da es sich darüber hinaus um ein multifaktorielles Geschehen handelt und im Patientenkollektiv auch verschiedenen multiple Risikofaktoren vorhanden sind, ist vorzuschlagen, die entsprechenden Häufigkeiten im Rahmen einer Studie mit einem großen Kollektiv zu verifizieren.

5.6 Schlussfolgerungen

Bei der Versorgung von Humerusschaftfrakturen ist größtmögliche Stabilität erforderlich, es dürfen keine Kompromisse eingegangen werden, auch bei sogenannten „einfachen“ Frakturen. Die mechanische Stabilität ist wesentlich durch die Wahl des Verfahrens, des Implantats und der operativen Vorgehensweise des Operateurs bedingt. Insbesondere ist auf Grund der Ergebnisse zu empfehlen, dass, wenn ein Nagel als Implantat vorgesehen ist, durch den Operateur bereits bei der Planung berücksichtigt werden muss, wie die oben beschriebenen Problematiken adressiert werden und so die primäre Reposition und Stabilität der Osteosynthese sichergestellt werden kann. Andernfalls, oder bei Zweifeln, ist eine Platte primär in Erwägung zu ziehen mit statistisch geringerer beschriebener Pseudarthrosenrate [14,15,50,67,70,81].

Als Problem zeigte sich auch eine ungenügende primäre Reposition. Eventuell könnten auch neue Implantate, z.B ein winkelstabiler Nagel oder ein Nagel mit frakturnahen Schraubenlöchern zur Problemlösung beitragen.

6. Zusammenfassung

Im BG Klinikum Hamburg erfolgte eine retrospektive Untersuchung von 57 Patientenfällen, bei denen im Zeitraum von 2004 bis 2014 Revisionsoperationen nach Humerusschaftfraktur durchgeführt worden sind. Die Patienten waren sowohl im BG Klinikum Hamburg als auch in der überwiegenden Zahl auswärtig konservativ oder operativ vorbehandelt worden. Es erfolgte eine Analyse der Patientendaten bezüglich verschiedener Einflussfaktoren auf den Versagensmechanismus. Wesentlich war die Analyse der Stabilität der Osteosynthese, der Frakturtypen (AO-Klassifikation [42,68]), der Frakturspaltbreiten, des verwendeten Implantat, der Lokalisation, des Verletzungsausmaßes, der Unfallursache, der Art der Pseudarthrose, der Keimbelastung, Rauchen, Alter, Geschlecht und der Vorbehandlungszeit sowie Voroperationen im Vergleich mit der Literatur. Ziel war die Analyse der zur operativen Revision führenden Versagensmechanismen.

Es zeigte sich mehrheitlich eine Instabilität der Osteosynthese, die zu einer chirurgischen Revision führte. Bei 31 Patienten (54,4%) bestand eine Marknagellockerung, bei 12 Patienten (21,1 %) ein fehlender Frakturdurchbau bei nicht gelockerter Marknagelosteosynthese, bei 9 Patienten (15,8 %) eine Lockerung der Plattenosteosynthese bzw. Plattenbruch, bei 3 Patienten (5,3 %) kein Frakturdurchbau bei nicht gelockerter Plattenosteosynthese und bei je einem Patienten (1,8 %) fand sich eine Platteninfektion bzw. eine ausgebildete Pseudarthrose nach konservativer Therapie.

Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und der vergleichenden Sachlage der Literatur kann die Aussage getätigt werden, dass der Marknagel sowie die Osteosyntheseplatte, winkelstabil sowie nicht winkelstabil, als indikationsabhängige geeignete Versorgung der Fraktur des Humerusschaftes gesehen werden können.

Die Versorgung mit dem Marknagel ist als geschlossenes Vorgehen und damit mit einem deutlich geringeren Risiko an Infektionen und Verletzungen der Arterien und Nerven zu bewerten. Die Reposition und Kompression durch den Marknagel konnte in den ausgewerteten Fällen häufig nicht dauerhaft gewährleistet werden. Das offene Vorgehen mit Repositionierung, Spongiosaplastik und abschließende Versorgung mit einer Osteosyntheseplatte mit Winkelstabilität (LCDC) erwies sich in unserer Klinik als Mittel der Wahl, um die Fraktur am Humerusschaft zeitnah zum Ausheilen bringen zu können. Obwohl die Plattenosteosynthese mit einem größeren Risiko von Nervenschäden behaftet ist, zeigt die nahezu 100 % Durchbauung in unserem Patientengut den Vorteil der Plattenosteosynthese im Vergleich zur intramedullären Stabilisierung mit einer

Pseudarthrosenrate von bis zu 10 % [93], weshalb die Reosteosynthese nach Versagen einer vorherigen Osteosynthese mittels winkelstabiler Platte (LCDC) im BG Klinikum Hamburg mit guter Prognose angewendet wird.

7. Literaturverzeichnis

1. Abumunaser LA, Al-Sayyad MJ (2011) Evaluation of the calori et al nonunion scoring system in a retrospective case series. *Orthopedics*. May 18;34(5):359.
2. Andrew H, Crenshaw J (1998) *Operative Orthopaedics, Fractures of Shoulder Girdle, Arm and Forearm* 9. Auflage; Mosby; Vol. III; Part XII Kap. 49: 2296-309.
3. Argintar E, Triantafillou K, Delahay J, Wiesel B (2012) The musculoskeletal effects of perioperative smoking. *J Am Acad Orthop Surg*. Jun;20(6):359-63.
4. Augat P, Simon U, Liedert A, Claes L (2005) Mechanics and mechano-biology of fracture healing in normal and osteoporotic bone. *Osteoporos Int* 16:S36-S43.
5. Banaszkiwicz PA, Sabboubeh A, McLeod I, Maffulli N (2003) Femoral ex-change nailing for aseptic non-union: not the end to all problems. *Injury*. May;34(5):349-56.
6. Bernard de Dompure, R., Peter R, Hoffmeyer P (2010): Uninfected nonunion of the humeral diaphyses: Review of 21 patients treated with shingling, compression plate, and autologous bone graft. *Orthop Traumatol Surg Res* 96, 139–146.
7. Beicker R (2001) Retrograde Nagelung am Humerus. Eine Alternative? *Trauma Berufskrankheit* 3 (Suppl 2): S292. <https://doi.org/10.1007/PL00014731>.
8. Beickert R, Hierholzer C & Bühren V (2006) Diaphysäre Humerus-pseudarthrosen. *Trauma Berufskrankh* 8: 169-176.
9. Bhandari M, Devereaux PJ, Mckee MD et al (2006) Compression plating versus intramedullary nailing of humeral shaft fractures – a meta-analysis. *Acta Orthop* 77:279–284.
10. Biber R, Bail HJ, Geßlein M (2018) CME Zertifizierte Fortbildung Humerusschaftfraktur. *Unfallchirurg* 9 2018;121:747-758 <https://doi.org/10.1007/s00113-018-0533-4>.
11. Bleeker WA, Nijsten MW, ten Duis HJ (1991) Treatment of humeral shaft fractures relates to associated injuries: a retrospective study of 237 patients. *Acta Orthop Scand* 62: 148-153.
12. Blum J (1998) Retrograde Nagelung von Humerusschaftfrakturen mit dem UHN. Eine internat. multizentrische Studie. *Unfallchirurg*; May; 101(5): 342-52.
13. Breer S, Auerswald M, Fuchs S et al (2015) Versorgung von Pseudarthrosen der langen Röhrenknochen. *Trauma und Berufskrankheit* 17: 233-243.
14. Changulani M, Jain UK, Keswani T (2007) Comparison of the use of the humerus intramedullary nail and dynamic compression plate for the management of the diaphyseal fractures of the humerus. A randomised controlled study. *Int Orthop* 31:391-395.

15. Chapman JR, Henley MB, Agel J et al (2000) Randomized prospective study of humeral shaft fracture fixation: intramedullary nails versus plates. *J Orthop Trauma* 14:162-166.
16. Chantelot C, Ferry S, Lahoude-Chantelot S et al (2005) Surgery for pseudarthrosis of humeral shaft fractures: a retrospective series of 21 cases. *Chir Main* 24:84-91.
17. Chen SB, Zhang CQ, Jin DX, Cheng XG, Sheng JG, Zeng BF (2009) Treatment of aseptic nonunion after intramedullary nailing fixation with locking plate. *Orthop Surg*. Nov;1(4):258-63.
18. Cheng HR, Lin J (2008) Prospective randomized comparative study of antegrade and retrograde locked nailing for middle humeral shaft fracture. *J Trauma* 65:94–102.
19. Claes L, Augat P, Suger G, Wilke HJ (1997) Influence of size and stability of the osteotomy gap on the success of fracture healing. *J Orthop Res* 15, 577-584.
20. Claes L, Wolf S, Augat P (2000) Mechanische Einflüsse auf die Callusheilung. *Chirurg* 71:989-994.
21. Claiborne AC (1998) *Operative Orthopaedics, General Principles of Fracture Treatment*. 9. Auflage; Vol. III; Part XII Kap. 46: 1993-2036.
22. Claes L, Oedekoven G (1991) Biological osteosynthesis *Chirurg* 62(5): 367-377
23. Copuroglu C, Calori GM, Giannoudis PV (2013) Fracture non-union: who is at risk? *Injury*. Nov;44(11):1379-82.
24. Culemann U. Schaft und distale Humerusfrakturen (2016) *Trauma Berufskrankh* 18 (Suppl 5):S468-S473. DOI 10.1007/s10039-016-0199-5.
25. Denard A Jr, Richards JE, Obrebsky WT, Tucker MC, Floyd M, Herzog GA (2010) Outcome of nonoperative vs operative treatment of humeral shaft fractures: a retrospective study of 213 patients. *Orthopedics* 33 (8). doi: 10.3928/01477447-20100625-16.
26. Dujardin FH, Mazirt N, Tobenas AC et al. (2000) Failure of locked nailing for nonunion of the humeral shaft. *Rev Chir Orthop* 86: 773–780.
27. Ekholm R, Adami J, Tidermark J et al (2006) Fractures of the shaft of the humerus. An epidemiological study of 401 fractures. *J Bone Joint Surg Br* 88:1469–1473.
28. Gaston MS, Simpson AH (2007) Inhibition of fracture healing. *J Bone Joint Surg* 89-B:1553-1560.
29. Gautier E, Perren SM (1992) Die "Limited Contact Dynamic Compression Plate" (LC-DCP) - biomechanische Forschung als Grundlage des neuen Plattendesigns *Orthopäde* 21: 11-23.

30. Giannoudis PV, Einhorn TA, Marsh D (2007) Fracture Healing: The diamond concept; *Injury, Int. J. Care Injured*; 38 S4: 53-56.
31. Giannoudis PV, Einhorn TA, Schmidmeier G, Marsh D. (2008) The diamond concept - open questions; *Injury, Int. J. Care Injured*; 39 S2:5-8.
32. Goncalves FF, Dau L, Grassi CA, Palauro FR, Neto AAM, Pereira PCG (2018) Evaluation of the surgical treatment of humeral shaft fractures and comparison between surgical fixation methods. *Rev Bras Ortop.* 2018;53(2):136-141. <https://doi.org/10.1016/j.rboe.2017.03.015>.
33. Gottschalk MB, Carpenter W, Hiza E. et al (2016) Humeral Shaft Fracture Fixation. Incidence rates und complications as reported bei amirican board of orthopaedic surgery Part II candidates. *J Bone Joint Surg Am* 98:e71 1-8.
34. Hansis ML (2000) Aktuelle Entwicklungen in der Unfallchirurgie Dt. Ärzteblatt 97 Heft 20: A2038-2042.
35. Hansmann H (1886) Eine neue Methode der Fixierung der Fragmente bei complicirten Fracturen *Verh Dtsch Chir* 15: 134-137.
36. Hennig F., Beck H. (1989) Erfahrungen mit dem Fixateur externe. In: Stuhler T. (eds) *Fixateur externe — Fixateur interne*. Springer, Berlin, Heidelberg.
37. Hirner A, Weise K (2004) *Chirurgie - Schnitt für Schnitt*. Thieme Verlag.
38. Holz F, Krämer KL, Pfeil J / Magin M, Sommer HM Standardverfahren der operativen Orthopädie und Unfallchirurgie - 11 Oberarm und Ellenbogen. Hrsg. Cotta H, Wentzensen A; 403-9.
39. Hoogendoorn JM, Simmermacher RK, Schellekens PP, van der Werken C (2002) [Adverse effects if smoking on healing of bones and soft tissues]. *Unfallchirurg.* Jan;105(1):76-81. Review.
40. Hunger H, Leopold D (2013) *Identifikationen S. 151*, Springer Verlag.
41. Ji C, Li J, Zhu Y, Liu S et al (2019) Assessment of incidence and various demographic risk factors of traumatic humeral shaft fractures in China. *Scientific Reports* volume 9, Article number: 1965.
42. Kellam JF, Meinsberg EG, Agel J et al (2018) Introduction: fracture and dislocation classification compendium 2018: international comprehensive classification of fractures and dislocations committee. *J Orthop Trauma* 32 (Supp.1):S1-S10.
43. Kim JW, Oh CW, Byun YS et al (2015) A prospective randomized study of operative treatment for noncomminuted humeral shaft fractures: conventional open plating versus minimal invasive plate osteosynthesis. *J Orthop Trauma* 29:189–194.

44. Klestil T, Rangger C, Kathrein A, Brenner E, Beck E 1997 The conservative and surgical therapy of traumatic humeral shaft fractures. *Chirurg* 68: 1132–1136.
45. Koch PP, Gross DF, Gerber C. (2002) The results of functional (Sarmiento) bracing of humeral shaft fractures. *J Shoulder Ellbow Surg* 11:143-150.
46. Krackhardt T, Eingartner C, Weise K (2001) *Unfallchirurg* 2001 · 104: 998–1009.
47. Kulkarni VS1, Kulkarni MS2, Kulkarni GS1, Goyal V1, Kulkarni MG1. Comparison between antegrade intramedullary nailing (IMN), open reduction plate osteosynthesis (ORPO) and minimally invasive plate osteosynthesis (MIPO) in treatment of hu-merus diaphyseal fractures. *Injury*. 2017 Aug;48 Suppl 2:S8-S13. doi: 10.1016/S0020-1383(17)30487-4.
48. Lambotte A (1908) *Sur l'osteosynthèse Belg Med* 231.
49. Lee JJ, Patel R, Biermann JS, Dougherty PJ (2013) The musculoskeletal ef- fects of cigarette smoking. *J Bone Joint Surg Am.* 1;95(9):850-859.
50. Leiblein M, Verboket R, Marzi I, Wagner N, Nau C (2019) Nonunion oft he humerus – Treatment concepts and results of the last five years. *Chinese Journal of Traumatology* 22: 187-195.
51. Loitz, D., Könnecker, H., Illgner, A. et al. *Unfallchirurg* (1998) 101: 543. <https://doi.org/10.1007/s001130050307>.
52. Lotzien S, Hoberg C, Hoffmann MF, Gessmann J, Seybold D, Schildhauer TA, Königshausen M Standards (2017) Humerusschaftfraktur. *Trauma und Berufskrankheit Vol. 19* (4):216-221.
53. Lynch JR, Taitsman LA, Barei DP, Nork SE (2008) Femoral nonunion: risk factors and treatment options. *J Am Acad Orthop Surg* 16:88-97.
54. Mahdi S, Khameneh H, Abbasian M, Abrishamkarzadeh H, Baheri S, Abdollahimajd F, Safdari F, Rahimi-Dehgolan S (2019) Humeral shaft fracture: a randomized controlled trial of nonoperative versus operative management (plate fixation). *Orthopedic Research and Reviews*:11:141-147.
55. Matsunaga F, Tamaoki M, Matsumoto M et al (2017) Minimaly invasive osteosynthesis with a bridge plate versus a functional brace for humeral shaft fractures. *J Bone Joint Surg A* 99:583-92.
56. Maurath, J., Köbler, H. & Christ, H. *Arch orthop Unfall-Chir* (1962) 54: 347. <https://doi.org/10.1007/BF00572484>.
57. McKee MD (2000). Aseptic non-union. In: *AO Principles of Fracture Management*. Stuttgart/New York: Thieme:749-54.

58. McKee MD, Miranda MA, Riemer BL et al (1996) Management of humeral nonunion after failure of locking intramedullary nail. *J Orthop Trauma* 10(7):492-499.
59. Mendel F, Goehre F, Hofmann GO (2014) Periimplantäre Frakturen - assoziiert mit Plattenosteosynthese. *Trauma Berufskrankh* 16 (Suppl 4):323-329.
60. Mendes Junior A, Da Mota Neto J, De Simoni L et al (2016) MIPO for humeral shaft fractures: correlation between radiographic, DASH, and SF12 results. *Acta Shoulder Elbow Surg* 1:35-43.
61. Mills L, Tsang J, Hopper G, Keenan G, Simpson AH (2016) The multifactorial aetiology of fracture nonunion of searching for latent infection. *Bone Joint Res* 5:512–519 doi: 10.1302/2046-3758.510.BJR-2016-0138.
62. Müller ME, Allgöwer M, Schneider R, Willenegger H. *Manual der Osteosynthese. AO-Technik*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
63. Nast-Kolb D, Schweiberer L, Betz A, Wilker D, Habermeyer P: Die operative Versorgung der Humerusschaftfraktur, *Unfallchirurg* 88 (1985) 500-504.
64. Panteli M, Pountos I, Jones E, Giannoudis PV (2015) Biological and molecular profile of fracture non-union tissue: current insights. *J. Cell. Mol. Med.* Vol 19, No4:685-713.
65. Patel RA, Wilson RF, Patel PA, Palmer RM (2013) The effect of smoking on bone healing: A systematic review. *Bone Joint Res.* Jun 14;2(6):102-11.
66. Perren SM (1992) Biomechanische Grundlagen der Frakturbehandlung. *Orthopäde* 21:3-10.
67. Peters RM, Claessen FM, Doornberg JN, Kolovich GP, Diercks RL, van den Bekerom MP. Union rate after operative treatment of humeral shaft nonunion--A systematic review. *Injury.* 2015 Dec;46(12):2314-24. doi: 10.1016/j.injury.2015.09.041. Epub 2015 Oct 21.
68. Pignataro GS, Junqueira AE, Matsunaga FT, Matsumoto MH, Belloti JC, Tamaoki MJS (2015) Evaluation of the reproducibility of the AO/ASIF classification for humeral shaft fractures. *Rev Bras Orthop.* 2015;50(4):378-382. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rboe.2015.07.003>.
69. Putnam J, Nowak L, Sanders D, MacNevin M, Lewendy A, Jones C, McKee M, Schemitsch E (2019) Early post-operative outcomes of plate versus nail fixation for humeral shaft fractures, *Injury, Int. J. Care Injured* 50 (2019) 1460-1463
70. Putti AB, Uppin RB, Putti BB (2009) Locked intramedullary nailing versus dynamic compression plating for humeral shaft fractures. *J Orthop Surg (Hong Kong)* 17:139–141.

71. Ramo L, Taimela S, Lepola V et al (2017) Open reduction and internal fixation of humeral shaft fractures versus conservative treatment with a functional brace: a study protocol of a randomised controlled trial embedded in a cohort. *BMJ Open* 7:e14076.
72. Raschke, M.J., Roßlenbroich, S. & Everding, J. *Trauma Berufskrankh* (2017) 19(Suppl 3): 255. <https://doi.org/10.1007/s10039-017-0312-4>.
73. Ring D, Chin K, Taghinia AH, Jupiter JB, Nonunion after functional brace treatment diaphyseal humeral shaft fractures, *J Trauma* 2007; 62(5):1157-8.
74. Risselada M, van Bree H, Kramer M et al (2006) Evaluation of non-union fractures in dogs bei use B-mode ultrasonography, power Doppler ultrasonography, radiography and histologic examination. *AM J Vet Res* 67:1354-1361.
75. Rodriguez EK, Boulton C, Weaver JM, Herder LM, Morgan JH, Chacko AT, Appleton PT, Zurakowski D, Vrahas MS (2014) Predictive factors of distal femoral fracture nonunion after lateral locking plating. *Injury*, 45(3):554-559.
76. Rommens PM, Endrizzi DP, Blum J, White RR (2000) Humerus: shaft. In: Rüedi TP, Murphy WM (Hrsg.) *AO Principles of Fracture Management*. Thieme, Stuttgart, New York.
77. Rommens PM, Kuechle R, Bord T et al (2008) Humeral nailing revisited. *Injury* 39:1319–1328.
78. Ruchholtz S, Wirtz DC (HRSG) (2010) *Essentials - Intensivkurs zur Weiterbildung: Orthopädie und Unfallchirurgie*, Thieme, Stuttgart New York:308.
79. Runkel M, Rommens PM (2000) Pseudarthrosen. *Unfallchirurg* 103:51-63.
80. Sarmiento A, Zagorski JB, Zych GA et al (2000) Functional bracing for the treatment of fractures of the humeral diaphysis. *J Bone Joint Surg Am* 82:478-486.
81. Schemitsch EH, Bhandari M, Talbot M (2009) Fractures of the humeral shaft. In: Browner BD, Jupiter JB, Levine AM, Trafton PG, Krettek C: *Skeletal Trauma Vol. 2: 1593-1622*, 4. Aufl., Saunders Elsevier, Philadelphia.
82. Schoch BS, Padegimas EM, Maltenfort M et al (2017) Humeral shaft fractures: national trends in management. *J Orthop Traumatol* 18:259–263.
83. Schütz L (2016) Pseudarthrosen am Humerusschaft. *Trauma Berufskrankh* 2016 (Suppl 2):18:S189-S192. DOI 10.1007/s10039-015-0062-0.
84. Schütz M, Kääh MJ, Haas NP (2004) Die Operation diaphysärer Schafffrakturen des Unterarms mit einem winkelstabilen Platten- Schrauben-System *Operative Orthopädie und Traumatologie* 16 (3): 273-287.

85. Schweiberer L, Betz A, Krueger P, Wilker D (1982) Bilanz der konservativen und operativen Knochenbruchbehandlung der oberen Extremität Chirur 54: 226.
86. Seide K, Morlock MM, Schümann U, Wolter D (1999) Wirkprinzipien der winkelstabilen Platten-Schrauben-Verbindung bei Fixateur-interne-Osteosynthesen. Trauma Berufskrankh 1999;1:320-325.
87. Shao YC, Harwood P, Grotz MR et al (2005) Radial nerve palsy associated with fractures of the shaft of the humerus: a systematic review. J Bone Joint Surg Br 87:1647–1652.
88. Sloan A, Hussain I, Maqsood M, Eremin O, El-Sheemy M (2010) The effects of smoking on fracture healing. Surgeon. Apr;8(2):111-6.
89. Smejkal K, Lochman P, Dedek T, Trlica J, Surgical treatment of humeral diaphyseal fractures. Acta Chir Orthop Traumatol Cech 2014;81(2):129-34.
90. Strohm PC, Kubosch DC, Hübner EJ et al (2011) Therapie der Humerusschaftfraktur. Der Chirurg Volume 82, 947-956.
91. Stürmer, K. Orthopäde (1996) 25: 386. <https://doi.org/10.1007/s001320050039>.
92. Tytherleigh-Strong G, Walls N, McQueen MM, The epidemiology of humeral shaft fractures. J Bone Joint Surg Br 1998;80(2):249-53.
93. Wallstabe S, Fuchs S, Faschingbauer M, Jürgens C, (2010) Humerusschaftfraktur – Ist die Plattenosteosynthese noch gerechtfertigt ?, Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie, <https://dx.doi.org/10.3205/10dkou419>.
94. Wen H, Zhu S, Chen Z, Yang H, Xu Y (2019) Antegrade intramedullary nail versus plate fixation in the treatment of humeral shaft fractures. Medicine 98;46(e17952).
95. Wenzl ME, Porte T, Fuchs S et al (2003) Verfahren zur Rekonstruktion und Osteosynthese von Pseudarthrosen des Humerus. Trauma und Berufskrankheit 5:86-91.
96. Wessinghage D, Themistocles Gluck (1991) 100 Jahre künstlicher Gelenkersatz, Zeitschrift für Orthopädie 129: 383-388.
97. Zhao JG, Wang J, Meng XH, Zeng XT, Kann SL (2017) Surgical interventions to treat humerus shaft fractures: A network meta-analysis of randomized controlled trials.
98. [https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Humerus_\(deutsche_Beschriftung\).jpg](https://de.m.wikipedia.org/wiki/Datei:Humerus_(deutsche_Beschriftung).jpg)
(Zugriff: 10.11.2019)

99. http://e-learning.studmed.unibe.ch/radiosurf/htmls/print_all.html?radiosurf%7Cradskeleton%7Cfindings%7Cclassification

(Zugriff: 28.01.2020)

8. Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. med. Ch. Jürgens, Ärztlicher Direktor am BG-Klinikum Hamburg und Direktor der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck, für die Überlassung des Themas sowie den gegebenen Freiraum bezüglich der Gestaltung der Arbeit.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn PD Dr. med. Sven Hirschfeld, Leitender Arzt am BG-Klinikum Hamburg, für seine Betreuung und das Erteilen wertvoller Ratschläge.

Mein besonders großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. med. Klaus Seide, wissenschaftlicher Leiter des Labors für Biomechanik am BG-Klinikum Hamburg, der durch seine fortwährende Unterstützung sowie zielführende Ideen maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss meiner Arbeit beigetragen hat.

Mein ganz herzlicher Dank gilt Frau Dr. rer. hum. biol. Birgitt Kowald, wissenschaftliche Mitarbeiterin am BG-Klinikum Hamburg für ihre andauernde, hochkarätige Unterstützung bei der Strukturierung und Auswertung der gewonnenen Daten sowie für das herzliche und vertraute Betreuungsverhältnis während der gesamten Arbeit.

Abschließend bedanke ich mich bei meinen Eltern für ihre immerwährende und umfassende Unterstützung auf all meinen Wegen.

9. Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Lars Wagenmann
Alter: 29
Nationalität: Deutsch



Promotion:

2016-2020
Thema: Versagen von Osteosynthesen des Humerusschaftes, BG Klinikum Hamburg

Bildung:

2010-2016
Studium der Zahnmedizin an der Justus-Liebig-Universität, Gießen
Abschluss: Staatsexamen

1996-2009
Erzbischöfliche Liebfrauenschule zu Köln (Privatschule)
Landschulheim Schloss Heessen, Heessen (Internat)
Abschluss: Abitur

Berufserfahrung

2018-heute
Zahnarzt bei LS smart, zahnärztliches MVZ, Hamburg

2016-2018
Vorbereitungsassistent in Zahnarztpraxis Dr. Klaus Mühlenberg, Hamburg

2014-2016
Regelmäßige Hospitationen in Praxis für MKG Dr. Dr. Cöln sowie Praxis für Oralchirurgie Dr. Kemp

2014-2016
Regelmäßiger Zahnärztlicher Bereitschaftsdienst (ZBD) im Universitätsklinikum Gießen, Abteilung für Prothetik und Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie

Publikation

M. Kruse, L. Wagenmann, V. Kruse, B. Kowald, K. Seide, M. Faschingbauer Auftreten von Pseudarthrosen bei Humerusschaftfrakturen Trauma und Berufskrankheit 2019 21:146-155