

Aus dem Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie
der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

**Analyse klinischer Ergebnisse der photodynamischen intramedullären
Knochenstabilisation bei pathologischen Humerusfrakturen**

I n a u g u r a l d i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
der Universitätsmedizin
der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

vorgelegt von

Matthias Ring
aus Westerstede

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. P. Drees

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. F. Traub

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr. med. Thomas Kindler

Tag der Promotion: 17.06.2026

CC-BY-NC-ND-4.0

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	I
1. Einleitung.....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Epidemiologie der Humerusfraktur	2
1.3 Skelettassoziierte Ereignisse	4
1.4 Relevante Anatomie	6
1.4.1 Knöcherne Anatomie des Humerus	6
1.4.2 Röntgenanatomie	6
1.4.3 Topographie der Gefäße und Nerven.....	8
1.5 Einteilung der Frakturen.....	9
1.6 Behandlungskonzepte	10
1.7 Photodynamische Stabilisation zur Versorgung pathologischer Humerus- frakturen	12
1.8 Fragestellung der Untersuchung.....	13
2. Patienten und Methoden	15
2.1 Patienten	15
2.2 Messinstrumente in der Therapie von pathologischen Humerusfrakturen	15
2.3 Methoden und Material	17
2.3.1 Ethikantrag, geschlechtsneutrale Schreibweise und Abbildungs- nachweise	17
2.3.2 Erhobene Parameter	17
2.3.2.1 Patientencharakteristika	17
2.3.2.2 Knochenspezifische Parameter.....	18
2.3.2.3 Operationsspezifische Parameter	18
2.3.2.4 Innerklinische Parameter.....	18

2.3.2.5 Organisatorische Verlaufsparemeter	19
2.3.2.6 Nachbehandlungsparameter	19
2.3.2.7 Langzeitverlaufsparemeter	19
2.3.3 Statistische Methoden	20
2.3.4 Photodynamische Stabilisation	20
3. Ergebnisse	22
3.1 Patientencharakteristika	22
3.2 Knochenspezifische Parameter	26
3.3 Operationsspezifische Parameter	33
3.4 Innerklinische Parameter	36
3.5 Organisatorische Verlaufsparemeter	39
3.6 Nachbehandlungsparameter	40
3.7 Langzeitverlaufsparemeter	42
4. Diskussion	47
4.1 Ausgangspunkt, Zielsetzung und Einordnung	47
4.2 Literaturkontext: Stand der Evidenz und methodische Flanken	48
4.3 Kohortenprofil: Demographie, Läsionsmuster und Prognosemarker	49
4.4 Kernergebnisse: Schmerz, Funktion, Prozedureffizienz und Implantatverhalten	51
4.4.1 Analgesie	51
4.4.2 Funktioneller Zugewinn und Mobilität	51
4.4.3 Operative Effizienz	52
4.4.4 Sicherheitsprofil und Implantatverhalten	53
4.5 Vergleich mit Alternativen: Kontextualisierung der photodynamischen Knochenstabilisation	54
4.6 Effizienz- und Sicherheitsbilanz im onkologischen Pfad	55

4.7 Verzögerung des präoperativen Zeitintervalls (Symptombeginn bis Operation)	55
4.8 Implantatversagen: Detaillierte Analyse und Indikationsgrenzen der Illumin-Oss-Monotherapie	57
4.9 Verweildauer: Postoperative vs. Gesamtverweildauer	59
4.10 Stärken und Limitationen der vorliegenden Untersuchung	61
4.11 Klinisch-praktische Implikationen und Ableitungen	62
4.12 Perspektiven für Forschung und Versorgung	63
4.13 Schlussfolgernde Gesamteinordnung	64
5. Zusammenfassung	65
6. Literaturverzeichnis	68
7. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	77
8. Danksagung	79
9. Tabellarischer Lebenslauf	80

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
a.p.	anterior-posteriorer Strahlengang
AZ	Allgemeinzustand
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
COPD	Chronisch obstruktive Lungenerkrankung
CT	Computertomographie
ECOG	Eastern Cooperative Oncology Group
MW	Mittelwert
MRT	Magnetresonanztomographie
MSTS-UE	Musculoskeletal Tumor Society Upper Extremity Score
N.	Nervus
NRS	Numerische Ratingskala
ORIF	Open Reduction and Internal Fixation
postop.	postoperativ
präop.	präoperativ
RANK	receptor Activator of NF-kB
SRE	skeletal related events
SSE	symptomatic skeletal events
TESS	Toronto Extremity Salvage Score
USD	US-Dollar
vs.	versus
WHO	Weltgesundheitsorganisation
z. B.	zum Beispiel
%	Prozent

1. Einleitung

1.1 Einführung

Die pathologische Fraktur stellt im Hinblick auf ihre Genese, Diagnostik und Therapie besondere Herausforderungen an den behandelnden Chirurgen. Die Definition der pathologischen Fraktur ist uneinheitlich und wird zumeist als Ausdruck eines knochen-eigenen Tumors oder eines metastatischen Geschehens verstanden (Marshall et al., 2018). Weitere Autoren zählen hierzu ebenso Knochenerkrankungen wie Osteoporose (Wuennemann et al., 2020) oder das Paget-Syndrom (Singer, 2020). In allen Fällen ist die Knochenphysiologie pathologisch verändert und erfordert daher ein von einer einfachen Fraktur abweichendes Vorgehen.

Für die Behandlung pathologischer Frakturen stehen sowohl operative als auch nicht-operative Verfahren zur Verfügung. Die Wahl des geeigneten Therapieansatzes erfordert eine differenzierte Berücksichtigung des der Fraktur zugrundeliegenden Tumors. Bei singulären Metastasen können kurative Ansätze in Betracht gezogen werden, die stets die vollständige, onkologisch korrekte Entfernung der Metastase beinhalten. Im Rahmen operativer Verfahren müssen die individuellen Bedürfnisse und klinischen Voraussetzungen des Patienten, die pathologisch veränderte lokale Knochenstruktur sowie die systemische Gewebsphysiologie berücksichtigt werden. Darüber hinaus ist eine sorgfältige Abwägung der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Osteosyntheseverfahren erforderlich, um eine adäquate Stabilisierung und bestmögliche Heilung zu erreichen. Im Optimalfall findet ein Osteosyntheseverfahren Anwendung, welches den Knochen stabilisiert und ein hohes Maß an Funktionalität ermöglicht. Zudem soll es zu einer deutlichen Beschwerdebesserung führen und eine verzögerungsfreie Behandlung des Tumors gestatten. Ebenso ist das Ziel, den bereits aufgrund seines Tumors eingeschränkten Patienten nicht zusätzlich durch eine übermäßige Operationsdauer, eine lange Krankenhausverweildauer oder eine hohe Komplikationsrate zu beeinträchtigen. Frakturen des Humerus gehen mit einer deutlichen Einschränkung der Lebensqualität einher und stellen unter den Frakturen der langen Röhrenknochen eine der häufigsten Frakturlokalisationen dar.

Aufgrund des demographischen Wandels und der steigenden Lebenserwartung wird der Behandlungsbedarf älterer Menschen, auch im Bereich der palliativen Versorgung von Knochenmetastasen, stetig zunehmen. Knochenmetastasen gehen hierbei langfristig mit einer erhöhten Morbidität einher (Coleman, 2006). Interdisziplinäres Zusammenarbeiten ist hierbei Grundlage einer erfolgreichen Behandlung (Ibrahim et al., 2009). Gerade bei älteren und mehrfach erkrankten Patienten in palliativen Situationen rückt die individuelle Therapieentscheidung in den Vordergrund (Bedard et al., 2014). Ziel muss es sein, Komplikationen (sogenannte *skeletal related events*) durch Knochenmetastasen wie Schmerzen, Bewegungseinschränkungen oder neurologische Einschränkungen effektiv zu behandeln, um die Krankenhausverweildauer in der verbleibenden Überlebenszeit gering zu halten.

Eine neuartige operative Therapiemöglichkeit für pathologische Frakturen ist die photodynamische, intramedulläre Knochenstabilisation mittels IlluminOss®-Implantat.

Diese retrospektive Arbeit verfolgt zwei zentrale Fragestellungen. Zunächst wird die Anwendung der photodynamischen, intramedullären Knochenstabilisation bei der Behandlung von Tumoren mit pathologischen Frakturen des Humerus analysiert. Des Weiteren wird untersucht, inwieweit dieses Verfahren den komplexen Anforderungen an die Versorgung solcher Frakturen gerecht wird und welche potenziellen Einschränkungen es aufweist. Ziel ist es, eine detaillierte Beurteilung der Effektivität und Sicherheit dieses therapeutischen Ansatzes zu liefern.

1.2 Epidemiologie der Humerusfraktur

Die Frakturlokalisationen des Humerus weisen stark unterschiedliche Inzidenzen auf. Proximale Humerusfrakturen machen etwa 5 % aller Frakturen und rund 50 % aller Humerusfrakturen aus. Im Jahr 2019 wurden in Deutschland 61.606 proximale Humerusfrakturen registriert, dies entspricht ca. 8,9 % aller Frakturen in der Bundesrepublik Deutschland. Die Inzidenz dieser Frakturen stieg von 65,2 auf 74,2 pro 100.000 Einwohnerjahre im Zeitraum von 2007 bis 2016, mit einer deutlichen Geschlechtsdifferenz: Frauen waren mit 108 pro 100.000 Einwohnerjahre häufiger betroffen als Männer (38 pro 100.000 Einwohnerjahre). Im Vergleich zu 2009 sind die Inzidenzen für Frakturen des proximalen Humerus, Humerusschafts und distalen Humerus gestiegen (Gruson et al., 2008; Rupp et al., 2021; Klug et al., 2019; Hemmann et al., 2020).

Ähnliche Tendenzen lassen sich hier über alle Länder der sozioökonomisch westlichen Hemisphäre darstellen (Kristiansen et al., 1987; Launonen et al., 2015; Kannus et al., 2000; Sumrein et al., 2017; Khatib et al., 2014; Baron et al., 1996a; Baron et al., 1996b; Alzobi et al., 2023; Karl et al., 2015; Bissell et al., 2008; Court-Brown et al., 2019; Siggeirsdottir et al., 2013; Curran et al., 2010; Iglesias-Rodríguez et al., 2021).

Mattila et al. untersuchten 936 Humerusschaftfrakturen im Zeitraum 2006 bis 2016 und zeigten neben einem großen Anteil an typischen traumatischen Frakturen ebenso 4,3 % pathologische Frakturen (Mattila et al., 2022). Pidhorz fasst für die Humerusschaftfrakturen, welche den dritthäufigsten Typus von Frakturen der langen Röhrenknochen ausmachen, ebenfalls zwei Alterscluster zusammen: einerseits Männer im Alter von 20 bis 30 Jahren mit Hochenergietraumata und andererseits 60 bis 70 Jahre alte Frauen mit Niedrigenergietraumata (Pidhorz, 2014).

Distale Humerusfrakturen sind deutlich seltener und weisen ebenfalls Besonderheiten auf. Challa et al. beschreiben suprakondyläre Humerusfrakturen in "low and lower middle-income countries". Hier waren die Frakturen sehr üblich bei Kindern (17-35 % aller traumatischen Verletzungen) (Challa et al., 2020). Throckmorton et al. beleuchten die mit einer Inzidenz von 5,7 Fällen pro 100.000 Einwohner selten auftretenden distalen Humerusfrakturen und konnten eine bimodale Verteilung zeigen, mit einem Peak bei männlichen Patienten zwischen 12 und 19 Jahren sowie Frauen älter als 80 Jahre (Throckmorton et al., 2007).

Pathologische Humerusfrakturen stellen eine weitere Subspezialität der Humerusfrakturen dar. Zwischen 2007 und 2017 untersuchten Amen et al. 30.866 Patienten mit Humerusfrakturen, davon waren 98,5 % native und 1,5 % pathologische. Patienten mit pathologischen Frakturen hatten eine signifikant höhere 30-Tages-Sterblichkeit, mehr „adverse events“, mehr „minor complications“, eine verlängerte postoperative Krankenhausverweildauer und eine erhöhte stationäre Wiederaufnahmerate (Amen et al., 2021). Metastasen kommen nach Lunge und Leber am dritthäufigsten im Knochengewebe vor und treten hierbei häufig am proximalen Humerus auf. Die Behandlung von pathologischen Frakturen ohne operative Versorgung verursacht bei stationärer Aufnahme in den USA durchschnittliche Kosten von 24.224 USD pro behandelten Fall (Di Caprio et al., 2022; Barlev et al., 2010). Jairam et al. zeigten 2016, dass 4,4 % der Patienten mit Knochenmetastasen pathologische Frakturen hatten, mit dem

Humerus als dritthäufigster Lokalisation (6,2 %) (Jairam et al., 2020). In einer brasilianischen Studie stellte der Humerus 15 % der pathologischen Frakturen dar (Narazaki et al., 2006). Kendal et al. zeigten, dass der Humerus nach dem Femur die zweithäufigste Frakturlokalisation bei langen Röhrenknochen ist (Kendal et al., 2022). Weiter aufgeschlüsselt zeigt sich die pathologische Fraktur des Humerus häufig in der Diaphyse (12,6-75,4 %), gefolgt vom proximalen Drittel (5,2-66 %) und lediglich in Ausnahmefällen im distalen Humerus (5-29 %). Das Auftreten einer pathologischen Fraktur geht zudem mit einer geringeren Überlebenszeit (17,6 Monate vs. 57,3 Monate) im Vergleich zu einem Ausbleiben einer pathologischen Fraktur einher (Sonmez et al., 2008).

Pathologische Frakturen entstehen am häufigsten aufgrund von Knochenmetastasen. Hierbei finden sich in der Literatur folgende häufige Primarien: Mammakarzinom (13,1-45 %), Nierenzellkarzinom (6,1-31,3 %), Bronchialkarzinom (10,2-26 %), Multiples Myelom (18-24,9 %), Oropharyngealkarzinom (23 %) und Karzinome aus dem Bereich des Gastrointestinaltrakts (13,1 %) (Amen et al., 2021; Maurer et al., 1995; Kobryn et al., 2023; Flemming und Beals, 1986; Moura et al., 2019; Tat et al., 2023; Gebhart et al., 2001; Rovere et al., 2022; Hill et al., 2014; Sarahrudi et al., 2007; Yazawa et al., 1990; Janssen et al., 2016; Piccioli et al., 2010; Schmidbauer und Ecke, 1991).

1.3 Skelettassoziierte Ereignisse

Skelettassoziierte Ereignisse, englisch *skeletal related events* (SRE), umfassen in der Beschreibung von Tumorerkrankungen folgende Ereignisse: pathologische Fraktur, Rückenmarkskompression, Notwendigkeit von Radiotherapie zur Analgesie oder Frakturprophylaxe sowie chirurgische Eingriffe am Knochen (So et al., 2012). Diese werden bei Beschwerden auch als symptomatische skelettale Ereignisse, englisch *symptomatic skeletal events* (SSE), definiert (Smith et al., 2014).

Wenn auch nicht als SRE definiert, sind Knochenschmerzen mit 60-84 % das häufigste Symptom von Knochenmetastasen. Meist intermittierend beginnend verändert sich der Schmerzcharakter hin zu einem konstanten und stärkeren Schmerz, wobei die Intensität nicht mit der Größe des Tumors oder der Knochenmetastase korreliert. Die Behandlung umfasst auf der einen Seite direkte Therapieformen gegen den Tumor wie lokale chirurgische Eingriffe oder Radiotherapie sowie systemische Therapien. Auf

der anderen Seite stehen Analgetika nach dem WHO-Stufenschema, Adjuvantien wie Kortikosteroide und Antikonvulsiva sowie Medikamente, welche direkten Einfluss auf den Knochenabbau haben (antiresorptive Therapie). Im immer weiterführenden molekularen Verständnis von tumorinduziertem Knochenschmerz besteht der Versuch, neben Bisphosphonaten und RANK-Ligand-Inhibitoren, Antikörper gegen den neutrotrophen Nervenwachstumsfaktor einzusetzen (Zajaczkowska et al., 2019; Slatkin et al., 2019).

Besonderheit der pathologischen Fraktur und damit einhergehenden lokalen oder systemischen Erkrankung, welche zu einer verminderten mechanischen Belastbarkeit führt, ist die inadäquate zur Fraktur führende Krafteinwirkung (de Zwart und Weise, 2006). Epidemiologisch machen die pathologischen Frakturen einen geringen Anteil unter den Frakturen aus (s. Kapitel 1.2) und können sowohl bei lytischen als auch sklerotischen Knochenmetastasen auftreten (Coleman, 1997).

Die metastasenbedingte Rückenmarkskompression macht einen geringen Anteil unter den SRE aus und wird unter Tumorerkrankungen mit einer Inzidenz von 1,6-2,8 % beschrieben (Campillo-Recio et al., 2019; Van den Brande et al., 2022). Zugrunde liegt entweder eine hämatogene Streuung, der direkte Druck durch Tumorwachstum oder spinale Instabilität. Die Therapie umfasst neben der initialen Gabe von Glukokortikoiden aus einer ausreichenden Analgesie und chirurgischem Management zur Vermeidung einer Querschnittssymptomatik (Patnaik et al., 2020).

Die Bestrahlung von Knochenmetastasen umfasst die konventionelle externe Strahlentherapie, welche in der Mehrzahl der Fälle zu einer Symptomlinderung und bei nahezu einem Drittel der Patienten zu einer kompletten Beschwerdefreiheit führt (Lutz et al., 2011). Eine vielversprechende Weiterentwicklung ist die stereotaktische Bestrahlung mit Lokalkontrollraten bis zu 85 % (De la Pinta, 2020).

Tumorbedingte Hyperkalzämie tritt bei bis zu 19 % der Patienten mit Knochenmetastasen auf und kann unbehandelt schwerwiegende Folgen wie Nierenversagen, Bewusstseinsstörungen und schließlich Tod durch Herzrhythmusstörungen haben (Coleman, 1997). Behandelt wird sie durch intravenöse Flüssigkeitsgabe sowie die Applikation von Bisphosphonaten oder Denosumab (Dickens et al., 2023). Neben der konservativen Behandlung von pathologischen Frakturen bestehen chirurgische Möglichkeiten in der Behandlung von Knochenmetastasen. Diese umfassen die Resektion und Prothesenversorgung sowie die Osteosynthese mit Augmentation durch Polymethylmethacrylat (Verbundosteosynthese) (Cirstoiu et al., 2022).

1.4 Relevante Anatomie

1.4.1 Knöcherne Anatomie des Humerus

Der Humerus ist der längste Knochen der oberen Extremität und besteht aus drei Teilen: dem proximalen Ende, dem Corpus und dem distalen Ende. Der proximale Anteil endet mit dem Caput humeri als Teil des Schultergelenks sowie den Tubercula majus und minus als Ansatzpunkte für Muskeln der Rotatorenmanschette. Das Corpus humeri ist der zylindrische Mittelteil des Humerus und beherbergt den Sulcus n. radialis für N. radialis und A. profunda brachii. Das distale Ende des Humerus bildet durch Artikulation mit Radius und Ulna das Ellenbogengelenk. Die Epikondylen dienen hierbei als Ursprungsstellen für zahlreiche Muskeln und Bänder des Unterarms und beinhalten medial den Sulcus n. ulnaris mit dem N. ulnaris.

1.4.2 Röntgenanatomie

Zur Diagnose von Humerusfrakturen wird initial immer eine Röntgenbildgebung in zwei Ebenen verwendet. Der proximale Humerus wird mit einer "true a.p." oder "Grashey view" und einem "y-view" geröntgt, um Dislokationen zu erkennen (Sanders, 2005; Bianchi, 2006), wobei CT-Aufnahmen bei komplexen Frakturen genauere Ergebnisse liefern (Castagno, 1987). Der Humerusschaft wird in anteroposteriorer und lateraler Ansicht dargestellt. Für den distalen Humerus wird neben den Standardansichten auch eine Schrägaufnahme empfohlen, wobei CT und 3D-Rekonstruktionen die Frakturklassifikation verbessern können. Radiologische Anzeichen wie das "double arc sign" und Fettpolsterzeichen helfen bei der Frakturdiagnose am distalen Humerus, besonders bei Kindern (Rueger et al., 2005; Beazley et al., 2017; Samelis et al., 2019; Lauder und Richard, 2020).

Es lassen sich für eine pathologische Fraktur mehrere radiologische Typika darstellen. Diese sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

Struktur- oder Dichteänderung des Knochens in der Umgebung der Fraktur	Unschärfe Begrenzung der Bruchränder ohne die sonst üblichen scharfen Kanten	Inkongruenz der Fraktur­ränder
Typische Frakturlokalisation: subtrochantäres Femur, Übergang vom Humeruskopf zur Metaphyse, Wirbelkörper	Eine durch die geringe Zahl der Fragmente nicht erklärbare, größere Defektzone (z. B. Osteolysen oder bei Zysten)	Pathologische Periostreaktionen (z. B. zwiebel­schalenartig)
Frakturlokalisation häufiger in einer Belastungszone (z. B. proximales Femur)	Fehlen von >50 % der Zirkumferenz bei einem Röhrenknochen	Infiltrierte Frakturlinien im MRT
Substanzielles, benachbartes Muskelödem	Endostales Scalloping (fokale Resorption des Endosts)	Häufig Querfrakturen
Gut definierte T1-hypointense Signalabnormalitäten im MRT	Homogen niedriges T1-gewichtetes Signalintensität ohne normal dazwischenliegendes Knochenmark im MRT	Stärkere Weichteilverschattung
Knochenneubildgebungen in der Umgebung der Fraktur		

Tabelle 1: Radiologische Typika pathologischer Frakturen (Schulz et al., 2006; Freyschmidt, 2008; Marshall et al. ,2018)

Lodwick et al. führen zudem drei Grundmuster der Knochenzerstörung auf. Diese unterscheiden sich in eine geographische Destruktion, welche sich durch langsames Wachstum und eine Destruktion mit definierter Begrenzung auszeichnet; in eine motenfraßartige Destruktion mit schnellerem Wachstum und einer Destruktion ohne definierbare Begrenzung; und in eine permeative Destruktion, welcher ein schnelles Wachstum und eine Destruktion mit totaler Penetration der Kompakta zugrunde liegt (Lodwick, 1965; Lodwick 1980 et al.).

Soldatos et al. untersuchten zudem Unterschiede in primären und sekundären Knochentumoren. Sie zeigten, dass durch primäre Knochentumore bedingte pathologische Frakturen eine höhere Inzidenz an lytischem Knochenkortex, Mineralisation und extraossärem Weichteilgewebe in Röntgenbildern hatten. Zudem wiesen sie eine erhöhte Inzidenz an Mineralisation und Weichteilgewebe in der Computertomographie

auf und gingen mit einer erhöhten Inzidenz an periostealen Abnormalitäten in der Magnetresonanztomographie einher. Aufgrund der mineralisierten Matrix an der Frakturstelle als Merkmal eines primären Knochentumors präferierten Soldatos et al. die Computertomographie gegenüber der Magnetresonanztomographie (Soldatos et al., 2012). Dieser Einschätzung widersprechen Marshall et al. und heben die Magnetresonanztomographie als wichtiges diagnostisches Mittel zur Diskriminierung zwischen benignen und malignen Frakturen hervor, da pathologische Frakturen z. B. in der T1-Wichtung ein eher homogenes Bild an hypointensen Signalabnormalitäten mit gut definierten konvexen Rändern aufwiesen (Marshall et al., 2018).

1.4.3 Topographie der Gefäße und Nerven

Die Gefäßversorgung des Humerus kann in drei Abschnitte unterteilt werden: das proximale Drittel wird von der A. circumflexa humeri anterior und posterior versorgt, das mittlere Drittel von der A. profunda brachii und A. brachialis und das distale Drittel von Kollateralarterien. Es gibt unterschiedliche Ansichten zur Bedeutung der A. circumflexa humeri anterior bei der Versorgung des Humeruskopfes: Einige Forscher wie Brooks et al. und Meyer et al. betonen ihre Wichtigkeit, während andere, wie Duparc et al., aufgrund des kleineren Durchmessers Zweifel äußern. Hettrich et al. wiederum zeigten, dass die A. circumflexa humeri posterior den Großteil der Versorgung des Humeruskopfes übernimmt. Hufeland et al. ergänzten, dass die A. circumflexa humeri anterior auch die lange Bizepssehne und den Sulcus intertubercularis versorgt. Am distalen Humerus erfolgt die Gefäßversorgung über segmentale Gefäße, wobei die laterale Säule hauptsächlich von posterioren Gefäßen versorgt wird (Menck et al., 1997; Brooks et al., 1993; Meyer et al., 2005; Duparc et al., 2001; Hettrich et al., 2010; Hufeland et al., 2019; Islam et al., 2017).

Der N. axillaris verläuft um den Humerus und innerviert den M. deltoideus und M. teres minor. Der N. radialis beginnt anteromedial, verläuft entlang des Humerus und endet anterolateral im distalen Drittel des Oberarms. Der N. ulnaris verläuft zunächst anterior zusammen mit der A. brachialis und tritt dann in das posteriore Kompartiment über. Der N. medianus verläuft medial und lateral entlang der A. brachialis. Eine Transposition des N. ulnaris beim Zugang zum distalen Humerus kann postoperative Neuropa-

thien erhöhen, wird aber bei präoperativen Beschwerden als potenziell sinnvoll erachtet (Zlotolow et al., 2006; Updegrave et al., 2017; Rueger et al., 2005; Lauder und Richard, 2020; Beazley et al., 2017).

1.5 Einteilung der Frakturen

Proximale Humerusfrakturen werden nach dem von Codman entwickelten Konzept in vier Hauptfragmente unterteilt, die durch vier Muskeln der Rotatorenmanschette unterschiedlich dislozieren. Die Neer-Klassifikation von 1970 bzw. 2002 teilt diese Frakturen in sechs Gruppen ein, basierend auf der Dislokation der Fragmente, wobei die schwersten Verletzungen mit einer Dislokation des Humeruskopfes auftreten. Habermeyer führte 1989 eine Klassifikation ein, die das Risiko einer Humeruskopfnekrose berücksichtigt und nach Frakturverlauf, Dislokation und Fragmentanzahl unterscheidet. 1997 ergänzte Habermeyer seine Klassifikation um nicht dislozierte und Luxationsfrakturen. Die AO-Klassifikation beschreibt Frakturen numerisch und wurde zuletzt 2018 überarbeitet, um ein systematisches Schema zur Einteilung von Frakturen zu bieten (Codman, 1934; Pennig, 2023; Neer, 1970; Neer, 2002; Habermeyer und Schweiberer, 1989; Habermeyer, 1997; Meinberg et al., 2018). Dieser Klassifikation folgen ebenfalls die Humerusschaftfrakturen sowie die distalen Humerusfrakturen. Spezifikationen für den distalen Humerus finden sich in dem auf drei Säulen basierenden Modell von Jupiter und Mehne. Darüberhinaus existieren weitere Unterscheidungen für Abscherfrakturen des Capitulum humeri, Frakturen mit Beteiligung der Trochlea sowie unter Einbeziehung einer posterioren, kondylären Trümmerzone. Die aktuelle Literatur weist hier die modifizierte, vierteilige Dubberley-Klassifikation aus, welche die vorherige Klassifikation um sagittale und axiale Frakturlinien erweitert (Jupiter und Mehne, 1992; McKee et al., 1996; Dubberley et al., 2006; Watson et al., 2019).

Im Kontext von pathologischen Frakturen existieren unter anderem zwei häufig gebräuchliche Einteilungen. Mirels entwickelte anhand der Untersuchung von 78 knöchernen metastatischen Läsionen in langen Röhrenknochen ein Scoring-System, welches das Risiko des Erleidens einer pathologischen Fraktur durch eine Knochenmetastase quantifiziert (s. Tabelle 2). Ab einer Punktzahl von 8 steigt das Risiko einer

pathologischen Fraktur auf 15 % bzw. ab 9 auf 33 % und eine prophylaktische Stabilisation vor Bestrahlung wird empfohlen (Mirels, 1989). Tat et al. konnten die Validität des Mirels-Scores für Humerusläsionen bestätigen (Tat et al., 2023).

Punktzahl	1 Punkt	2 Punkte	3 Punkte
Lokalisation	Obere Extremität	Untere Extremität	Pertrochantärregion
Schmerzintensität	Mild	Moderat	Funktional
Läsionsart	Blastisch	Gemischt	Lytisch
Ausmaß	<1/3	1/3-2/3	>2/3

Tabelle 2: Mirels-Score zur Risikovorhersage einer pathologischen Fraktur durch eine Knochenmetastase

Zudem beschreibt Harrington relative Kriterien, anhand welcher eine prophylaktische Stabilisation einer drohenden pathologischen Fraktur empfohlen ist: 1. Eine destruktive Läsion von mehr als 50 % des kortikalen Knochens; 2. Eine lytische Läsion des proximalen Femurs von mehr als 2,5 cm; 3. Eine Läsion des proximalen Femurs assoziiert mit einer Avulsion des Trochanter minor und 4. persistierende, belastungsabhängige Schmerzen trotz Strahlentherapie. Limitationen dieser Kriterien sind die Beschränkung auf das proximale Femur und Knochenmetastasen sowie lediglich lytische Läsionen als Grundlage (Harrington, 1986).

Auf die Wichtigkeit des kortikalen Knochens weisen ebenfalls Tatar et al. hin: in einer CT-basierten Untersuchung nach Radiotherapie von Metastasen in langen Röhrenknochen konnten sie zeigen, dass eine kortikale Beteiligung von >30 % ein unabhängiger prädiktiver Faktor für pathologische Frakturen ist (Tatar et al., 2014).

1.6 Behandlungskonzepte

Die Therapiekonzepte von proximalen Humerusfrakturen sind sehr unterschiedlich und ein abschließender Konsensus über eine konservative oder operative Versorgung ist Bestandteil einer andauernden wissenschaftlichen Diskussion (Burkhart et al., 2013; Song et al., 2015; Warnhoff et al., 2019; Baertl et al., 2020). Einigkeit besteht in Deutschland hingegen in der Versorgung von pathologischen Frakturen des proximalen Humerus, welche nach vollständigerer Resektion bei singulärer Metastase primär

osteosynthetisch und bei fehlender osteosynthetischer Versorgungsmöglichkeit mittels Endoprothese versorgt werden sollen (S1-Leitlinie „Oberarmkopffraktur“, 2017).

Die Humerusschaftfraktur kann konservativ mit dem Sarmiento-Brace behandelt werden (Sarmiento et al., 1977). Voraussetzungen für einen konservativen Behandlungserfolg sind laut Schittko junge Patienten mit entsprechendem Muskelmantel und geringen Schmerzen, eine engmaschige ambulante Betreuung des Patienten, physiotherapeutische Behandlung zur Vermeidung der Bewegungseinschränkung, ausreichende Schmerzmedikation, Hinweis auf die lange Behandlungszeit und Aufklärung, Wunsch des Patienten und exzellente Compliance (Schittko, 2003). Daher stellen für Mäder et al. pathologische Humerusschaftfrakturen eine Kontraindikation für eine konservative Therapie dar (Mäder et al., 2023). Die Empfehlungen in Deutschland sprechen sich für eine relative Indikation zur Osteosynthese bei pathologischen Humerusschaftfrakturen aus (S1-Leitlinie „Oberarmschaftfraktur“, 2021). Operative Versorgungsmöglichkeiten der nicht-pathologischen Humerusschaftfraktur bestehen in der Plattenosteosynthese, der intramedullären Nagelosteosynthese oder einer Stabilisation im Fixateur externe (Van Middelndorp et al., 2011; Lotzien et al., 2019), wobei auch hier ein abschließender Konsensus zwischen Platten- und Nagelosteosynthese aussteht. Diskussionspunkte bleiben die Rate an Radialisläsionen, Pseudarthrosen und systemimmanenten Komplikationen wie Schulterimpingement (Beeres et al., 2022; Hurley et al., 2023; Van Bergen et al., 2023; Culemann, 2016).

Distale Humerusfrakturen werden klassischerweise operativ mittels Plattenosteosynthese oder Endoprothese versorgt und stellen aufgrund ihrer Komplexität hohe Anforderungen an den Operateur dar (Batten et al., 2017; Bonnaire und Bula, 2010; Dey Hazra et al., 2018; Lauder und Richard, 2020). Eine in Deutschland gültige Empfehlung – insbesondere zur pathologischen Fraktur des distalen Humerus – ist zwar angemeldet als S2e-Leitlinie am 14.02.2020, steht aber noch zur Fertigstellung aus.

Die Metastasierung beschreibt die Ausbreitung von Tumorzellen vom Primärtumor in entfernte Organe. Lange Zeit wurde dieses Geschehen als binäres Phänomen verstanden: Entweder lag eine lokal begrenzte, potenziell heilbare Erkrankung vor, oder es bestand eine systemische Ausbreitung mit unheilbarer Prognose. Daraus leitete

sich die Annahme ab, dass bei metastasiertem Krebs ausschließlich eine palliative Therapie mit dem Ziel der Symptomkontrolle und Lebensverlängerung möglich sei. Im Jahr 1995 formulierten Samuel Hellman und Ralph Weichselbaum ein alternatives Modell: sie prägten den Begriff der Oligometastasierung und beschrieben Metastasierung als Spektrum anstatt als dichotomes Ereignis (Hellmann und Weichselbaum, 1995). Oligometastasen wurden definiert als ein intermediärer Zustand zwischen lokal begrenzter und polymetastatischer Erkrankung. Typischerweise handelt es sich hierbei um Patienten mit einer geringen Zahl von Metastasen (häufig definiert als ≤ 5), die prinzipiell für kurativ intendierte, lokal wirksame Therapien wie chirurgische Resektion oder stereotaktische Körperbestrahlung infrage kommen. Somit konnten Patienten mit limitierter Metastasenzahl als eigenständige Gruppe betrachtet werden, die potenziell von einer aggressiven lokalen Therapie profitieren. Hieraus entwickelte sich die Erforschung der metastasen-gerichteten Therapie.

Die ursprüngliche Hypothese bildet bis heute die Grundlage der Oligometastasenforschung. Während Milano et al. den Stellenwert des Konzepts unterstreichen (Milano et al., 2021), zeigen neuere Analysen, dass die Übertragbarkeit in die klinische Praxis komplex ist und nicht in allen Tumorentitäten, etwa beim Mammakarzinom, ein Überlebensvorteil nachweisbar ist (Katipally et al., 2022). Dennoch stellt die Unterscheidung zwischen oligo- und polymetastatischer Erkrankung ein zentrales Konzept in der modernen Onkologie dar.

1.7 Photodynamische Stabilisation zur Versorgung pathologischer Humerusfrakturen

Ausgehend von den unterschiedlichen Vor- und Nachteilen der chirurgischen Behandlungsmöglichkeiten beschreiben Hoellwarth et al. die Anforderungen an ein ideales Implantat zur Behandlung pathologischer Frakturen: geringe Gewebeschäden beim Einbringen des Implantats, unmittelbare Funktionalität, die Möglichkeit der sich gegebenenfalls zeitnah anschließenden Radio- oder Chemotherapie, die Option der intraoperativen Exzision oder Behandlung von erkranktem Gewebe und die im Fall von Tumorwachstum einfache Materialentfernung zur Prothesenimplantation (Hoellwarth et al., 2020).

Eine neuartige Entwicklung zur Behandlung pathologischer Frakturen stellt hier die photodynamische Knochenstabilisation dar. Hierbei wird mittels eines Ballonkatheters ein durch ein Lichtleiterkabel aushärtbares Polymer eingebracht, welches sich zu einem individualisierten intramedullären Implantat formt (Gausepohl et al., 2017).

Vegt et al. haben diesen minimal-invasiven Therapieansatz bereits bei osteoporotischen Frakturen und Humerusfrakturen erfolgreich beschrieben (Vegt et al., 2014; Vegt et al., 2018).

In kleineren Studienpopulationen mit 12 Patienten bei Zoccali et al. und 19 Patienten bei Hoellwarth et al. wurde dieser Therapieansatz bereits erfolgreich für pathologische Humerusfrakturen angewandt (Zoccali et al., 2021; Hoellwarth et al., 2020).

Ebenso benannten Hoellwarth et al. bereits einige theoretische Vorteile der photodynamischen Knochenstabilisation. Dazu zählen ein geringes Bindegewebestrauma aufgrund des minimal-invasiven Zugangs und die Flexibilität im Auswählen des Zugangswegs. Das Verfahren bietet zudem eine hohe Rotationsstabilität und vermeidet durch den Verzicht auf Verriegelungsschrauben ein zusätzliches Gewebstrauma. Die anfänglich flüssige Konsistenz des Implantats ermöglicht eine optimale Anpassung an komplexe Frakturkonstellationen.

Ein besonders relevanter Vorteil ist die simultane Behandlung von Fraktur und Läsion. Durch die intramedulläre Applikation des Implantats wird nicht nur eine stabile Versorgung der pathologischen Fraktur erreicht, sondern auch der entstandene knöcherne Substanzdefekt aufgefüllt. Des Weiteren erleichtert das Fehlen von Metallartefakten die Planung einer adjuvanten Strahlentherapie, und das blaue Licht hat ein antimikrobielles Spektrum (Hoellwarth et al., 2020).

1.8 Fragestellung der Untersuchung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

1. Welche Charakteristika in Bezug auf **Patienten und Fraktur** liegen bei Versorgung mittels photodynamischer, intramedullärer Knochenstabilisation nach pathologischer Humerusfraktur vor?

2. Welche Charakteristika in Bezug auf **Operation und kurzfristige Ergebnisse** liegen bei Versorgung mittels photodynamischer, intramedullärer Knochenstabilisation nach pathologischer Humerusfraktur vor?
3. Wie ist das **Langzeitoutcome entsprechend Funktionalität, Lebensqualität und Überleben** bei Versorgung mittels photodynamischer, intramedullärer Knochenstabilisation nach pathologischer Humerusfraktur?
4. Worin bestehen die **Komplikationen** bei Versorgung mittels photodynamischer, intramedullärer Knochenstabilisation nach pathologischer Humerusfraktur?

2. Patienten und Methoden

2.1 Patienten

Diese retrospektive, deskriptive Studie soll das Patientenkollektiv untersuchen, welches in der Universitätsklinik für Orthopädie an der Universitätsklinik Tübingen im Zeitraum von 2013 bis 2019 sowie im Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz im Zeitraum von 2019 bis 2023 aufgrund einer pathologischen Humerusfraktur operativ mit einer photodynamischen Stabilisation versorgt worden sind. Nach Prüfung der Kriterien wurden 40 Patienten mit 41 Humerusfrakturen eingeschlossen.

2.2 Messinstrumente in der Therapie von pathologischen Humerusfrakturen

Zur umfassenden Beurteilung des langfristigen funktionellen Ergebnisses und der Lebensqualität nach der Versorgung von pathologischen Humerusfrakturen wurden in dieser retrospektiven Studie mehrere validierte Messinstrumente herangezogen.

Toronto Extremity Salvage Score (TESS)

Der Toronto Extremity Salvage Score (TESS) dient als primäres, patientenbasiertes Messinstrument zur quantitativen Erfassung der funktionellen Einschränkungen (patient-reported outcome). Dieser Fragebogen wurde spezifisch für die postoperative Evaluation von Patienten mit Extremitätentumoren entwickelt. Er umfasst 30 Fragen, die den Schwierigkeitsgrad bei alltäglichen Aktivitäten und Freizeitbeschäftigungen bewerten. Die Skala reicht von 0 (maximale funktionelle Beeinträchtigung) bis 100 (optimale funktionelle Leistung), wobei ein höherer Wert ein besseres funktionelles Ergebnis indiziert (Kask et al., 2020). Die Anwendung des TESS ermöglicht eine detaillierte Einschätzung der körperlichen Einschränkungen aus der Perspektive des Patienten.

Musculoskeletal Tumor Society Upper Extremity Score (MSTS)

Neben dem TESS wurde der Musculoskeletal Tumor Society Upper Extremity Score (MSTS) zur objektiven Bewertung der funktionellen Leistung herangezogen (Enneking et al., 1991). Dieses Instrument bewertet die postoperative Funktionalität der oberen Extremität anhand von sechs definierten Kriterien: Schmerzintensität, Alltagsfunktionen, emotionale Akzeptanz der Beeinträchtigung, Handpositionierung, feinmotorische Fähigkeiten und die Fähigkeit zum Heben von Lasten. Jede Kategorie wird mit einer Punktzahl von 0 bis 5 bewertet, was eine Gesamtpunktzahl von 0 (maximale Beeinträchtigung) bis 30 (optimale Funktionalität) ergibt. Der MSTS dient somit zur objektiven Beurteilung des Therapieerfolgs und der funktionellen Rekonstruktion.

Henderson-Klassifikation

Zur standardisierten Erfassung von postoperativen Komplikationen nach der Versorgung mit Tumorendoprothesen wurde die Henderson-Klassifikation angewandt (Henderson et al., 2011). Diese Klassifikation kategorisiert Komplikationen in fünf Haupttypen: Typ 1 (Weichteilversagen), Typ 2 (aseptische Lockerung), Typ 3 (strukturelles Materialversagen), Typ 4 (Infektion) und Typ 5 (Tumorprogress). Die Verwendung dieses Klassifikationssystems ermöglicht eine systematische und vergleichende Analyse der Komplikationsraten und liefert wichtige Erkenntnisse zur klinischen Sicherheit des angewandten Verfahrens.

Likert-Skala

Die Zufriedenheit der Patienten mit dem Behandlungsergebnis wurde mittels einer Likert-Skala erfasst. Diese Methode wurde zur Erhebung von subjektiven Einschätzungen genutzt. In der vorliegenden Untersuchung wurde eine 6-stufige Skala von 1 (sehr unzufrieden) bis 6 (sehr zufrieden) verwendet, um die patientenberichtete Zufriedenheit mit dem funktionellen Ergebnis und der Lebensqualität zu quantifizieren.

2.3 Methoden und Material

2.3.1 Ethikantrag, geschlechtsneutrale Schreibweise und Abbildungsnachweise

Die Studie wurde in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt und durch die Ethikkommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz unter dem Aktenzeichen „2020-14844-retrospektiv“ genehmigt. Zur besseren Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit auf eine geschlechterspezifische Schreibweise verzichtet und das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche personenbezogenen Bezeichnungen gelten – sofern nicht anders angegeben – für alle Geschlechter.

Sämtliche in dieser Arbeit verwendeten Röntgenaufnahmen stammen aus dem eigenen Patientengut und wurden im Rahmen der klinischen Diagnostik für das Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Universitätsmedizin Mainz erstellt.

2.3.2 Erhobene Parameter

Aus dem Krankenhausinformationssystem und den digitalen Patientenakten der Kliniken wurden folgende Parameter erhoben:

2.3.2.1 Patientencharakteristika

- Alter in Jahren bei Operation
- Geschlecht (weiblich vs. männlich)
- Eastern Cooperative Oncology Group (ECOG) Performance Status
- Allgemeinzustand (AZ) in 1 (stark reduziert), 2 (mäßig) und 3 (gut) nach subjektiver ärztlicher Einschätzung
- Schmerzintensität auf der numerischen Ratingskala (NRS) präoperativ
- Score auf dem Toronto Extremity Salvage Score (TESS) präoperativ
- Score auf dem Musculoskeletal Tumor Society Upper Extremity Score (MSTS-UE) präoperativ
- Symptome (Ruheschmerzen, Schwellung, Fehlstellung, Hämatom, Sensibilitäts Einschränkungen)

- Funktionalität präoperativ (vollständig immobilisierende Schmerzen vs. eingeschränkte Mobilität)
- Vorhandensein von Diabetes mellitus
- Vorhandensein von Nikotinabusus

2.3.2.2 Knochenspezifische Parameter

- Art der Läsion (pathologische Fraktur vs. pathologische Osteolyse)
- Lokalisation am Humerus (proximal vs. Schaft vs. distal)
- Seitenangabe
- Primarius
- Vorhandensein und Lokalisation weiterer Metastasen
- Lokalisation von weiteren ossären Metastasen

2.3.2.3 Operationsspezifische Parameter

- Zeitraum Symptombeginn bis Operation in Tagen
- Operationsdauer in Minuten
- Operationsdauer weniger als 60 Minuten
- Nachbehandlungsschema (frei funktionell vs. schmerzadaptierte Belastung vs. Immobilisierung in der Oberarmcastschiene)
- Zusätzliche Osteosynthese (Schraube vs. Platte)

2.3.2.4 Innerklinische Parameter

- Schmerzintensität auf der NRS postoperativ
- Score auf dem MSTS-UE postoperativ
- Krankenhausverweildauer in Tagen
- Postoperative Verweildauer in Tagen
- Transfusion eines Erythrozytenkonzentrats postoperativ
- Surgical Site Infection postoperativ
- Infektion postoperativ

2.3.2.5 Organisatorische Verlaufsparemeter

- Zeitraum Operation bis zur 1. orthopädischen Wiedervorstellung in Tagen
- Zeitraum zwischen 1. und 2. orthopädischer Wiedervorstellung in Tagen
- Zeitraum zwischen 2. und 3. orthopädischer Wiedervorstellung in Tagen
- Zeitraum zwischen Operation und letzter orthopädischer Wiedervorstellung in Tagen
- Zeitraum zwischen Operation und letztem Kontakt im Krankenhaus in Tagen

2.3.2.6 Nachbehandlungsparameter

- Empfehlung zur Radiatio postoperativ
- Durchführung einer Radiatio postoperativ
- Zeitraum Operation bis Beginn der Radiatio in Tagen
- Durchführung einer Systemtherapie präoperativ
- Empfehlung einer Systemtherapie postoperativ
- Durchführung einer Systemtherapie postoperativ
- Score auf dem TESS bei erster orthopädischer Wiedervorstellung
- Score auf dem TESS bei zweiter orthopädischer Wiedervorstellung
- Score auf der Likert-Skala postoperativ
- Subjektive Verbesserung der Lebensqualität postoperativ (ja/nein)

2.3.2.7 Langzeitverlaufsparemeter

- Versterben
- Überleben in Monaten
- Überleben nach 90 Tagen
- Überleben nach 1 Jahr
- Überleben nach 2 Jahren
- Revisionsoperation innerhalb von 1 Jahr
- Revisionsoperation innerhalb von 2 Jahren
- Implantatbruch innerhalb von 1 Jahr
- Implantatbruch innerhalb von 2 Jahren
- Komplikationstyp entsprechend der Henderson-Klassifikation

2.3.3 Statistische Methoden

Die Daten der Patienten wurden mit Microsoft® Excel for Mac Version 16.78 gesammelt. Es erfolgte eine deskriptive Datenanalyse zur Erfassung der Patientencharakteristika, zur Beschreibung der frakturspezifischen, operationsspezifischen und innerklinischen Parameter sowie der organisatorischen Verlaufsparemeter, Nachbehandlungsparameter und Langzeitverlaufsparemeter. Der Stichtag für das Überleben in Monaten ist die abschließende Auswertung der Daten am 21.09.2023. Die Auswertung der Kaplan-Meier-Kurve erfolgte über IBM SPSS Statistics Version 29.0.1.0. Die statistische Auswertung wurde mittels GraphPad Prism Version 10.4.1 durchgeführt. Angewandte Tests waren der ungepaarte und gepaarte t-Test.

2.3.4 Photodynamische Stabilisation

Es wurde an beiden orthopädischen Zentren die photodynamische Stabilisation mithilfe des Produktes IlluminOss® Photodynamic Bone Stabilization System des Herstellers IlluminOss® (IlluminOss Medical Inc, Rhode Island, USA) durchgeführt. Dieses System besteht aus einer Einwegverpackung für den einmaligen Gebrauch, zusammen mit einem wiederverwendbaren Aushärtungssystem, einer Lichtquelle und einem Instrumentenset. Das dreiteilige System besteht aus dem Photodynamic Bone Stabilization Procedure Pack – welches wiederum den Balloon Stabilization Catheter Pouch, den Photodynamic Polymer Pouch und Additional Components umfasst – , dem Photodynamic Curing System und dem Instrument Kit. Die Aushärtungszeit des Implantats ist direkt von seiner Größe abhängig. In den meisten Fällen wurde eine Größe verwendet, deren Aushärtung 1000 Sekunden (ca. 16,7 Minuten) dauert. Die gesamte Aushärtungszeit variiert jedoch je nach Implantatgröße und liegt bei den verwendeten Implantaten zwischen 800 und 1200 Sekunden. Abbildung 1 zeigt schematisch das abschließende Bild eines im Humerus einliegenden Implantats. Hierbei wird der zuvor eingeführte Ballon mit Monomer ausgefüllt und dieses mittels Lichtquelle ausgehärtet.

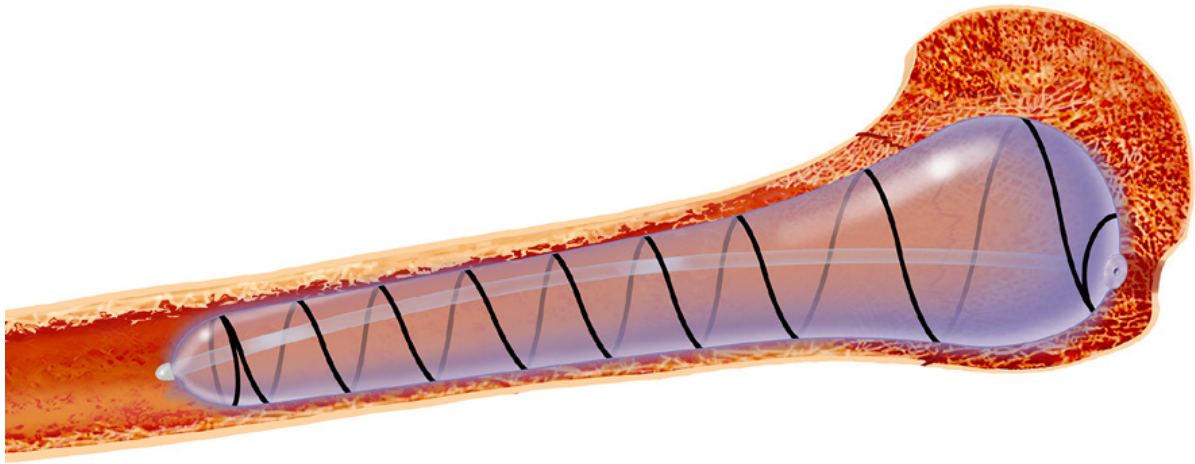


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Humerus mit einliegendem Implantat bestehend aus Ballon sowie mittels Lichtquelle ausgehärtetem Polymer, Abbildung aus „Humerus Surgical Technique Quick Reference Guide, 2019, IlluminOss Medical Inc“

3. Ergebnisse

Aufgrund der retrospektiven Natur der Studie und der Datenerfassung an zwei unterschiedlichen klinischen Standorten war die Dokumentation der erhobenen Parameter nicht für alle Patienten zu jedem definierten Zeitpunkt vollständig. In der untersuchten Kohorte von insgesamt 40 Patienten lagen die vollständigen Datensätze für einzelne Parameter daher nur in einer kleineren Stichprobe vor. Dies führt dazu, dass die im Rahmen dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse teilweise auf reduzierten Fallzahlen basieren (z. B. $n=28$ oder $n=13$), was bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden muss. Die inkonsistenten Fallzahlen in den einzelnen Analysen spiegeln die heterogene Datenverfügbarkeit wider und stellen eine wesentliche Limitation dieser Untersuchung dar.

3.1 Patientencharakteristika

Es wurden insgesamt 40 Patienten mit 41 Humerusfrakturen in die Analyse eingeschlossen. Eine Patientin erlitt eine pathologische Fraktur beider Humeri bei Multiplem Myelom. Das durchschnittliche Alter in Jahren bei Fraktur lag bei 67,5 Jahren [Spannweite: 40-87, $n=41$]. 20 Patienten waren weiblich, 20 Patienten männlich. Eine Darstellung der Alterskohorten findet sich in Abbildung 2 und verdeutlicht, dass die Mehrzahl der Patientenfälle Teil der Alterskohorten 60-69 Jahre sowie 70-79 Jahre waren.

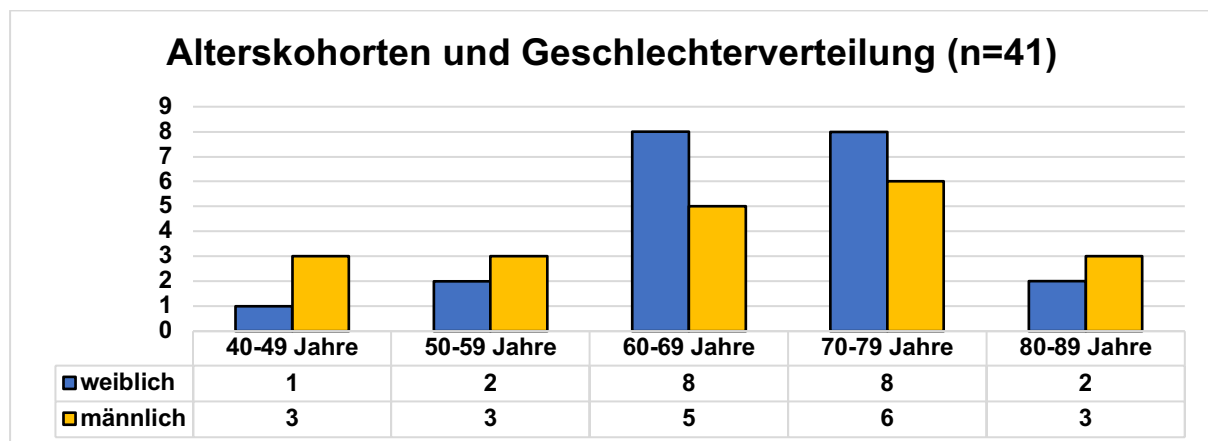


Abbildung 2: Übersicht der Geschlechterverteilung (männlich/weiblich) nach dekadischen Alterskohorten bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, $n=41$

Der ECOG Performance Status lag präoperativ bei durchschnittlich 1,8, der Median bei 1 [Spannweite: 0-4, n=39]. Eine Verteilung des ECOG Performance Status mit Angabe des Überlebens in Monaten findet sich in der Abbildung 3.

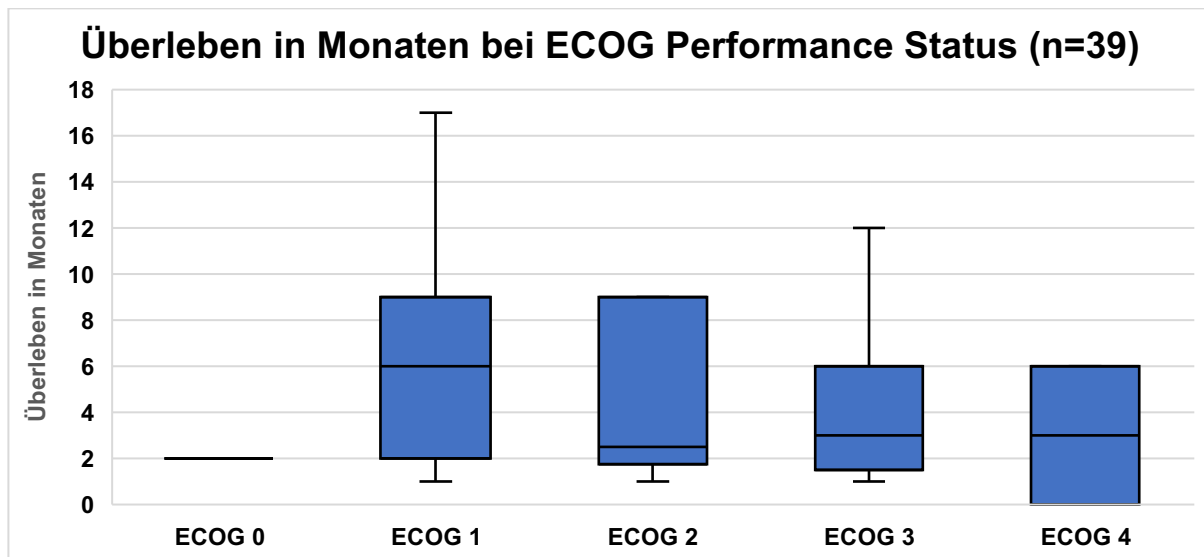


Abbildung 3: Überleben in Monaten in Abhängigkeit des ECOG Performance Status bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=39

In dieser Kohorte wurde der ECOG-Performance-Status in zwei Gruppen unterteilt: 27 Patienten (69,2 %) wiesen einen Status von 0 bis 2 auf, während 12 Patienten (30,8 %) einen Status von 3 oder 4 hatten. Das mediane Überleben betrug 6,2 Monate bei Patienten mit einem Status von 0 bis 2 im Vergleich zu 3,8 Monaten bei Patienten mit einem Status von 3 oder 4. Obwohl die Überlebenszeit in der Gruppe mit dem besseren Performance-Status höher war, erreichte dieser Unterschied kein Signifikanzniveau ($p=0,215$).

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit der kleinen Stichprobengröße unserer Kohorte und kontrastiert mit der in der Literatur gut belegten prognostischen Aussagekraft des ECOG-Performance-Status in größeren Studien. Es ist wichtig zu betonen, dass der ECOG-Status das körperliche Wohlbefinden und die Funktionsfähigkeit abbildet und nicht direkt die Tumorlast. Dies erklärt, weshalb selbst Patienten mit metastasierter Erkrankung in vielen Fällen einen guten ECOG-Status von 0 bis 2 aufweisen können. Die detaillierte Darstellung dieser Daten erfolgt in Abbildung 4.

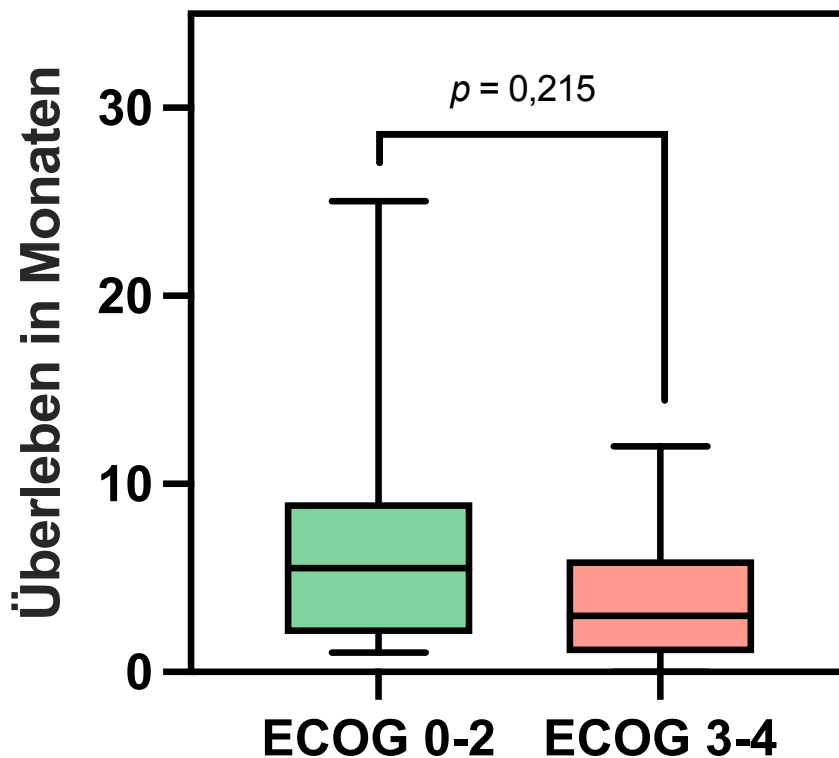


Abbildung 4: Vergleich des Überlebens in Monaten zwischen ECOG 0-2 und ECOG 3-4 bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, ungepaarter t-Test, n=39

Der präoperative Allgemeinzustand (AZ) der Patienten wurde in dieser Kohorte anhand einer selbst definierten Skala von 1 (stark reduziert) bis 3 (gut) erhoben. Eine Dokumentation lag für 28 von insgesamt 40 Patienten vor. Der Mittelwert des präoperativen AZ betrug 2,1 [Spannweite: 1-3; n=28]. Die Mehrheit der dokumentierten Patienten (43 %) befand sich in einem guten Allgemeinzustand, gefolgt von Patienten mit reduziertem (29 %) sowie stark reduziertem Allgemeinzustand (28 %). Die Verteilung ist in Abbildung 5 dargestellt.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Bewertung des Allgemeinzustands eine subjektive und unspezifische Einschätzung durch den behandelnden Arzt darstellt. Sie basiert überwiegend auf klinischer Erfahrung und ist nicht universell standardisiert. Dies stellt eine methodische Limitation dar, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss.

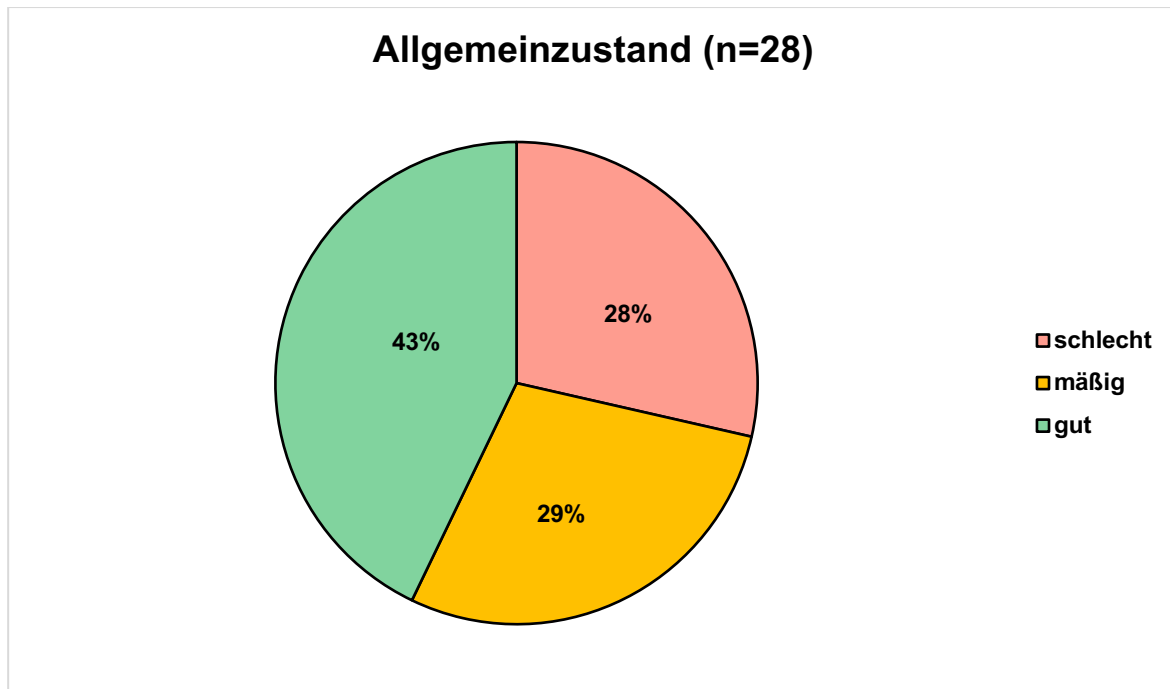


Abbildung 5: Übersicht über den präoperativen Allgemeinzustand bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur in den Abstufungen gut, mäßig und schlecht, n=28

Die Schmerzintensität, erfasst auf der NRS-Skala, wurde präoperativ mit einem Durchschnitt von 6,9 angegeben [Spannweite: 4-10, n=28], was auf eine hohe Schmerzbelastung hinweist. Die funktionellen Einschränkungen der Patienten wurden mittels zweier standardisierter Scores bewertet. Der präoperative Toronto Extremity Salvage Score (TESS) lag im Median bei 36,5 von 100 Punkten [Mittelwert: 41,1; Spannweite: 19-100; n=28], während auf der Musculoskeletal Tumor Society (MSTS)-Skala ein medianer Wert von 9,5 von 30 Punkten erreicht wurde [Mittelwert: 11,5; Spannweite: 6-25; n=28]. Die niedrigen Werte auf beiden Scores unterstreichen die signifikante funktionelle Beeinträchtigung der Patienten.

Das dominierende Leitsymptom waren Schmerzen, die bei allen Patienten auftraten und meist als Ruheschmerzen beschrieben wurden. Dies führte bei 32 Patienten zu vollständig immobilisierenden Schmerzen. Weitere Symptome wie Schwellung, Fehlstellung, Hämatom oder Sensibilitätseinschränkungen traten nur in seltenen Fällen hinzu, wie in Abbildung 6 dargestellt. Bei der Betrachtung von Komorbiditäten wurde bei 13 Patienten die Anamnese erfasst, von denen zwei an Diabetes mellitus litten und bei zwei weiteren ein Nikotinabusus beschrieben wurde.

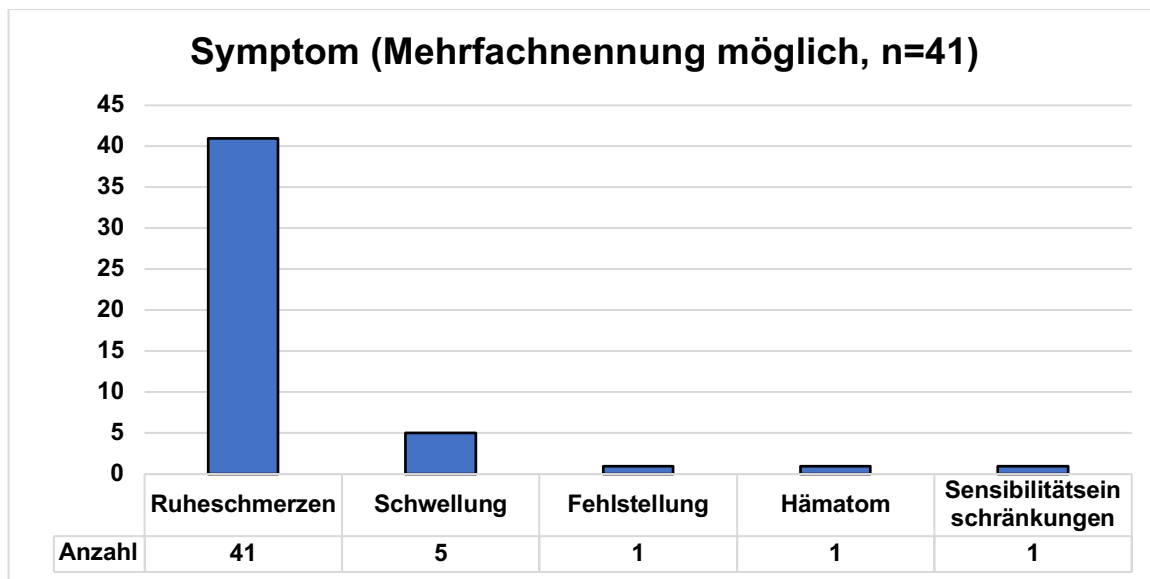


Abbildung 6: Übersicht über die Symptome bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, Mehrfachnennung möglich, n=41

3.2 Knochenspezifische Parameter

Von den insgesamt 41 analysierten Fällen wiesen 27 eine bereits eingetretene pathologische Fraktur auf. Diese Brüche waren akute. Die verbleibenden 14 Fälle zeigten eine signifikante pathologische Osteolyse mit teilweise ausgedehnten, die Kortikalis betreffenden Knochendefekten. Obwohl diese Defekte eine erhebliche strukturelle Schwächung und Instabilität des Knochens darstellten, war es zum Zeitpunkt der Diagnose noch nicht zu einem vollständigen Bruch gekommen. Abbildungen 7a und 7b zeigen ein Beispiel einer frakturgefährdeten pathologischen Osteolyse am Humerusschaft, in diesem Fall einer 76 Jahre alten weiblichen Patientin mit Mamma-Karzinom. Abbildungen 8a und 8b zeigen ein Beispiel einer pathologischen Fraktur am Humerusschaft bei einem 86 Jahre alten männlichen Patienten mit Prostata-Karzinom.



Abbildung 7a: Röntgenbild des Oberarms rechts im anterior-posterioren Strahlengang, welches eine frakturgefährdete pathologische Osteolyse (Pfeilmarkierung) bei einer 76 Jahre alten Patientin mit Mamma-Karzinom zeigt; Eigene Abb.



Abbildung 7b: Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen Strahlengang, welches eine frakturgefährdete pathologische Osteolyse (Pfeilmarkierung) bei einer 76 Jahre alten Patientin mit Mamma-Karzinom zeigt; Eigene Abb.



Abbildung 8a: Röntgenbild des Oberarms links im anterior-posterioren Strahlengang, welches eine pathologische Fraktur (Pfeilmarkierung) bei einem 86 Jahre alten Patienten mit Prostata-Karzinom zeigt; Eigene Abb.



Abbildung 8b: Röntgenbild des Oberarms links im axialen Strahlengang, welches eine pathologische Fraktur (Pfeilmarkierung) bei einem 86 Jahre alten Patienten mit Prostata-Karzinom zeigt; Eigene Abb.

Die Analyse der 41 eingeschlossenen Fälle ergab eine klare Verteilung der pathologischen Frakturen und Osteolysen am Humerus. Die häufigste Lokalisation war der Humerusschaft mit 24 Fällen, gefolgt vom proximalen Humerus mit 16 Fällen. Lediglich ein Fall betraf den distalen Humerus.

Die Wahl des chirurgischen Verfahrens hing maßgeblich von der Lokalisation ab. Bei der dokumentierten distalen Humerusfraktur erfolgte beispielsweise eine Plattenosteosynthese, da dieser Bereich aufgrund seiner anatomischen Gegebenheiten in der Regel nicht mit einer intramedullären Osteosynthese versorgt wird.

Die Frakturen verteilten sich ungleichmäßig auf die betroffenen Körperseiten: 22 der 41 Fälle betrafen die rechte Seite, während 19 auf der linken Seite lokalisiert waren. Ein exemplarischer Fall einer pathologischen Fraktur des proximalen Humerus ist in Abbildung 9 dargestellt. Dieser 66-jährige Patient litt an einem klarzelligen Nierenzellkarzinom. Die detaillierte Verteilung der Frakturlokalisationen und die Seitenverteilung sind in den Abbildungen 10 und 11 visualisiert.



Abbildung 9: Röntgenbild des Oberarms rechts im posterior-anterioren Strahlengang, welches eine pathologische Fraktur (Pfeilmarkierung) bei einem 66 Jahre alten Patienten mit Nierenzellkarzinom zeigt; Eigene Abb.

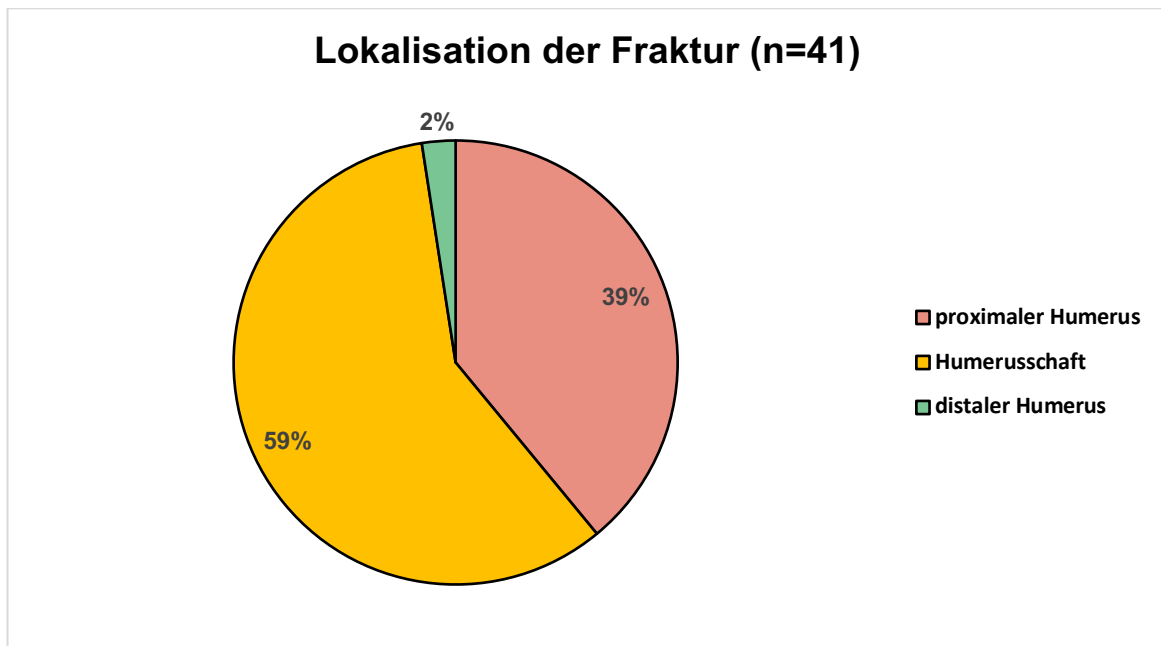


Abbildung 10: Übersicht über die Lokalisation der Fraktur bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur in den Abstufungen proximal, Schaft und distal, n=41

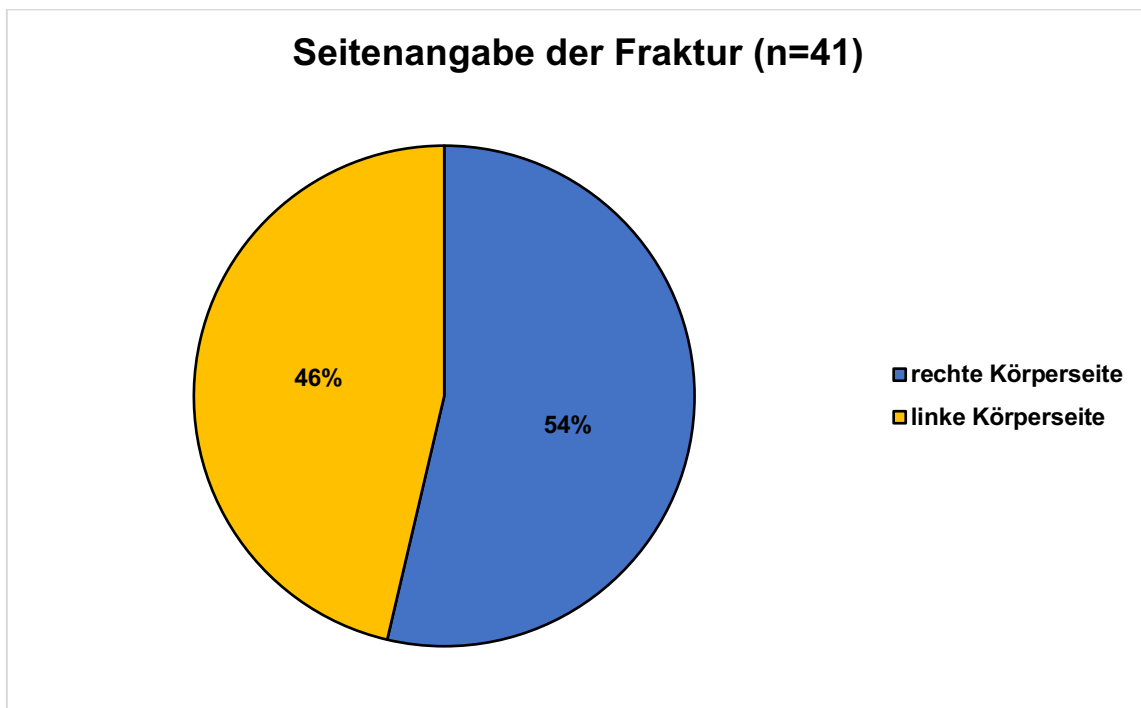


Abbildung 11: Übersicht über die Körperseite der Fraktur bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41

Ätiologie der pathologischen Humerusläsionen

Im vorliegenden Kollektiv traten die pathologischen Frakturen und Osteolysen des Humerus ausschließlich als Knochenmetastasen auf. Primäre Knochentumoren wurden nicht beobachtet, was sich durch ihre seltene Inzidenz und abweichende Behandlungsstrategien erklärt. Da diese Tumorentitäten in der Regel reseziert werden, während die hier untersuchten metastatischen Läsionen mittels Osteosynthese stabilisiert wurden, fokussierte sich das Kollektiv primär auf Frakturen, die durch Knochenmetastasen verursacht wurden.

Die häufigste Primärlokalisation der Metastasen war das Multiple Myelom, das in 14 von 41 Fällen (34,1 %) als Ursache identifiziert wurde. Es folgten das Bronchialkarzinom mit 7 Fällen (17,1 %) und das Mammakarzinom mit 6 Fällen (14,6 %). Das Prostatakarzinom und das Nierenzellkarzinom traten in jeweils 3 Fällen (7,3 %) auf, das Mundhöhlenkarzinom in 2 Fällen (4,9 %). Weitere, seltenere Entitäten wurden jeweils in einem Fall (2,4 %) dokumentiert: Kolonkarzinom, hepatozelluläres Karzinom, neuroendokrines Karzinom, Melanom, Urothelkarzinom und Schilddrüsenkarzinom. Eine detaillierte Darstellung der Verteilung der Primärtumoren findet sich in Abbildung 12.

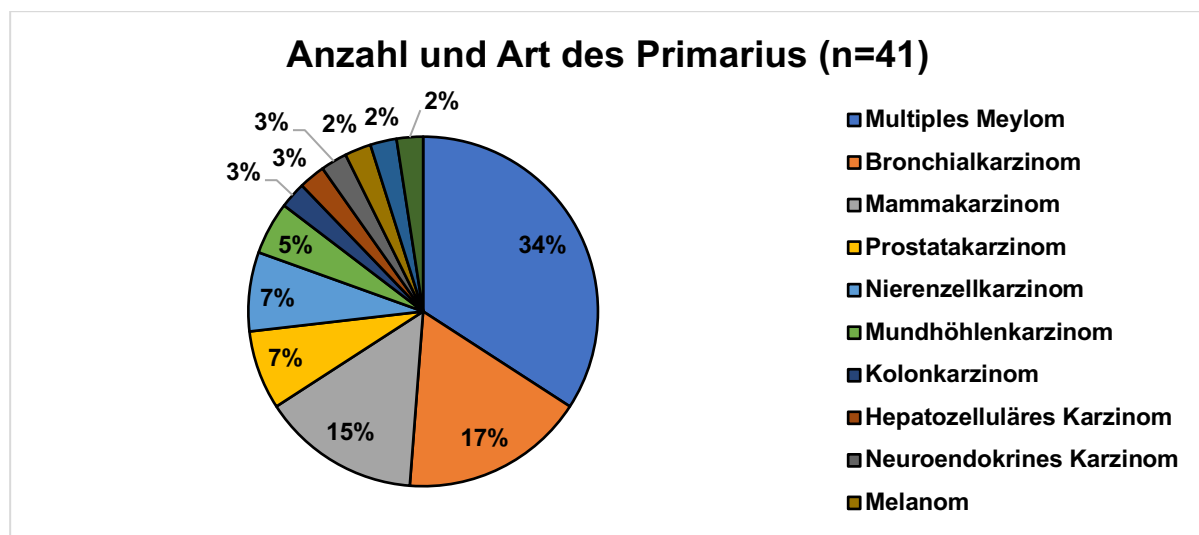


Abbildung 12: Übersicht über Anzahl und Art des Primarius bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41

Metastatische Ausbreitung und Lokalisation

Alle Patienten der Kohorte wiesen eine oligo- oder disseminierte Metastasierung auf. Neben der primären Läsion im Humerus waren bei 25 der 41 Fälle weitere Knochenmetastasen dokumentiert. Als häufigste extraskelettale Metastasenlokalisationen zeigten sich die Lymphknoten (9 Fälle) und die Lunge (8 Fälle).

Seltener wurden Metastasenherde in der Leber, den Nebennieren und dem Gehirn (jeweils 3 Fälle) gefunden. Zudem fanden sich bei jeweils 2 Patienten Weichteil- und Nierenmetastasen. Vereinzelte Metastasen wurden im Mediastinum und Peritoneum nachgewiesen.

Die detaillierte Verteilung der zusätzlichen Metastasen ist in Abbildung 13 dargestellt.

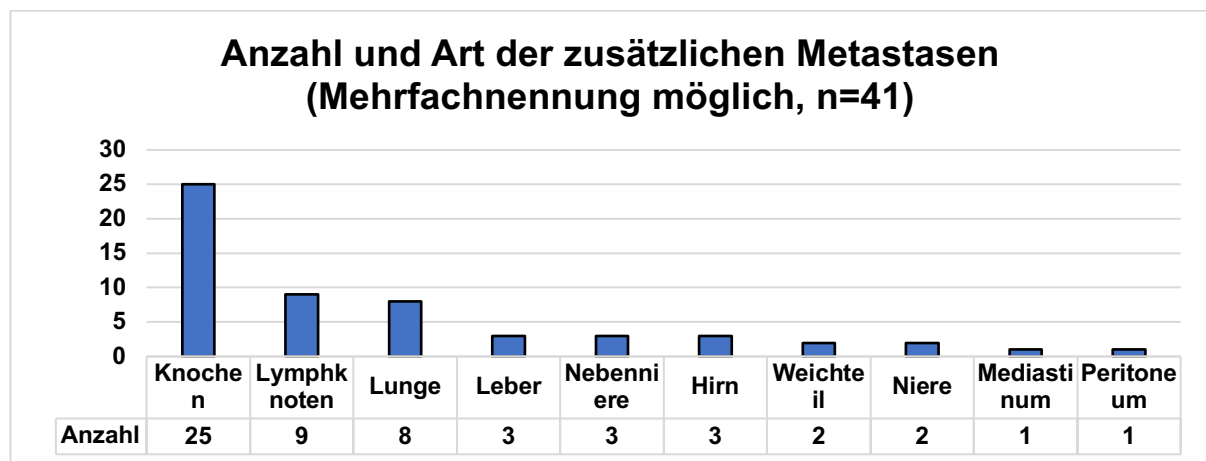


Abbildung 13: Übersicht über Anzahl und Art der zusätzlichen Metastasen bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41

Lokalisation weiterer Knochenmetastasen

Unter den weiteren Knochenmetastasen war die Wirbelsäule mit 20 von 41 Fällen die mit großem Abstand häufigste Lokalisation. Es folgten die Scapula und das Becken mit jeweils 6 Fällen, sowie die Rippen und das Femur mit jeweils 5 Fällen.

Seltener wurden Metastasen im Schädelknochen und im Sternum (jeweils 3 Fälle), sowie in der Clavicula und dem nicht operierten Humerus (jeweils 2 Fälle) gefunden. Eine einzelne Metastase wurde in der Mandibula nachgewiesen.

Die detaillierte Verteilung dieser zusätzlichen Knochenmetastasen ist in Abbildung 14 dargestellt.

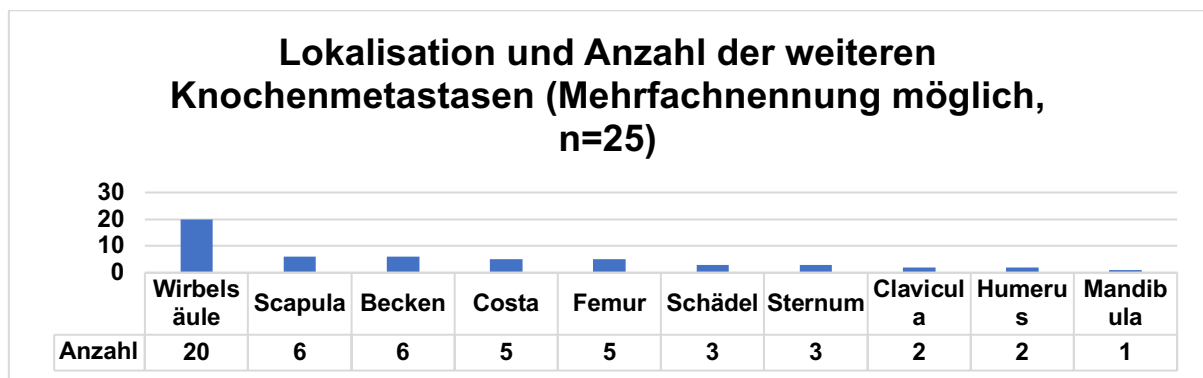


Abbildung 14: Übersicht über Anzahl und Art der weiteren Knochenmetastasen bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41

3.3 Operationsspezifische Parameter

Das Spektrum des Operationszeitpunkts war sehr breit gefächert und spiegelte die unterschiedlichen klinischen Ausgangssituationen der Patienten wider. Während im Median 33,5 Tage (Mittelwert: 46,1 Tage; Spannweite: 1-157 Tage; n=40) zwischen dem Auftreten von Beschwerden und der Operation lagen, variierte die Dringlichkeit stark.

Bei einigen Patienten, die sich mit akuten Symptomen oder bereits einer pathologischen Fraktur vorstellten, war die Operation oft zeitnah notwendig, selbst wenn der Primärtumor noch unbekannt war. Diese Fälle trugen zu den kürzeren Intervallen bei. Im Gegensatz dazu gab es Patienten, bei denen die Grunderkrankung und die Metastasierung bereits bekannt waren und die Indikation zur Stabilisierung erst im weiteren Verlauf der Erkrankung gestellt wurde. Diese Fälle, die oft eine sorgfältige Abwägung der therapeutischen Optionen erforderten, erklären die längeren Zeitspannen bis zur Operation.

Die Operationsdauer, definiert als Schnitt-Naht-Zeit, wies eine erhebliche Variabilität auf, die in erster Linie auf die unterschiedlichen Komplexitätsgrade der Eingriffe zurückzuführen war. Der Median der Operationszeit betrug 65 Minuten (Mittelwert: 75,7 Minuten; Spannweite: 44-220 Minuten; n=41). In 14 von 41 Fällen konnte der Eingriff in weniger als 60 Minuten abgeschlossen werden.

Das breite Spektrum der Operationszeiten lässt sich insbesondere durch den zusätzlichen Aufwand bei komplexeren Eingriffen erklären. So erreichte die maximale Dauer von 220 Minuten ein Verfahren, bei dem neben der Stabilisierung mittels IlluminOss®-Systems zusätzlich eine Plattenosteosynthese durchgeführt wurde.

Darüber hinaus war die Operationszeit zusätzlich durch die Aushärtungszeit des Implantats beeinflusst, die 1000 Sekunden (entsprechend 16,7 Minuten) beträgt.

Die Abbildungen 15a und 15b zeigen beispielhaft entsprechend der Patientin der Abbildungen 7a und 7b die postoperativen Röntgenbilder.



Abbildung 15a: Röntgenbild des Oberarms rechts im anterior-posterioren Strahlengang nach Versorgung einer frakturgefährdeten Osteolyse mittels photodynamischer Knochenstabilisation, Patientin siehe Abbildung 6a/6b; Eigene Abb.



Abbildung 15b: Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen Strahlengang nach Versorgung einer frakturgefährdeten Osteolyse mittels photodynamischer Knochenstabilisation, Patientin siehe Abbildung 7a/7b; Eigene Abb.

Die Notwendigkeit zusätzlicher Osteosynthesen wurde bei insgesamt acht Patienten festgestellt. In vier dieser Fälle wurde eine zusätzliche Schraubenosteosynthese während derselben Operation, parallel zur photodynamischen intramedullären Stabilisierung, durchgeführt. Bei den restlichen vier Patienten kam eine ergänzende Plattenosteosynthese zum Einsatz.

Wurden diese acht Fälle aus der Analyse der Operationsdauer ausgeschlossen, ergab sich eine signifikante Verkürzung. Die mediane Operationszeit sank auf 62 Minuten (Mittelwert: 68,3 Minuten; Spannweite: 44–154 Minuten; n=33).

Postoperatives Nachbehandlungsschema

Frei funktionell: 32 von 41 Patienten (78 %) wurden postoperativ mit eingeschränkter Belastung, aber freiem Bewegungsumfang behandelt.

Schmerzadaptierte Vollbelastung: 8 von 41 Patienten (20 %) konnten sofort vollbelastet und uneingeschränkt bewegt werden.

Immobilisierung: Ein Patient (2 %) erforderte aufgrund einer zusätzlichen Plattenosteosynthese einer distalen Humerusfraktur eine Ruhigstellung mittels einer Oberarmcastschiene, was sowohl Belastung als auch Bewegungsumfang einschränkte.

Die Verteilung der Nachbehandlungsschemata ist in Abbildung 16 dargestellt.

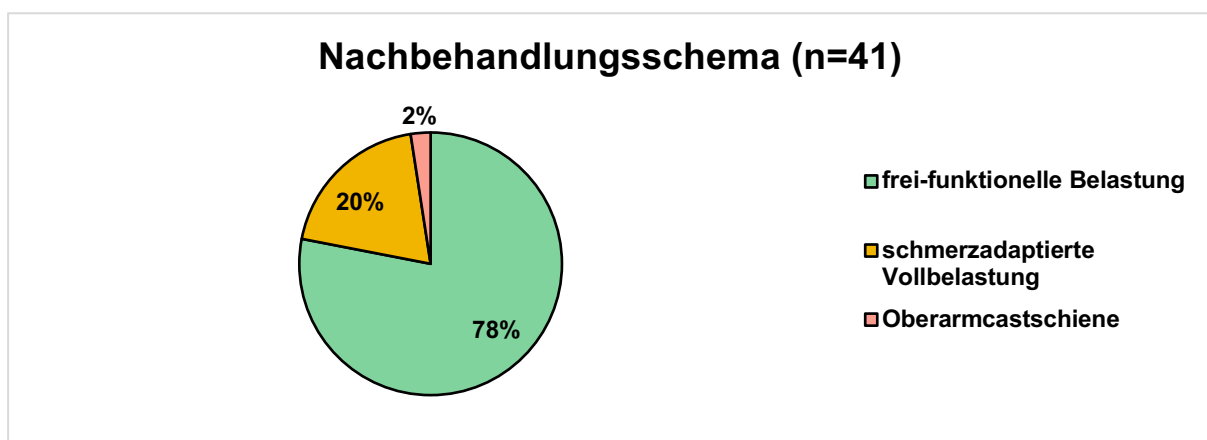


Abbildung 16: Übersicht über das Nachbehandlungsschema nach photodynamischer Stabilisation einer pathologischen Humerusfraktur in den Abstufungen frei-funktionelle Belastung, schmerzadaptierte Vollbelastung und Oberarmcastschiene, n=41

Die beobachteten Unterschiede im Nachbehandlungsschema sind auf die Variabilität zwischen den Klinikstandorten und den Behandlungsjahren zurückzuführen. Die postoperative Strategie der schmerzadaptierten Vollbelastung wurde vor 2019 an der Universitätsklinik Tübingen nicht angewendet. Ab 2019 etablierte sich dieses Nachbehandlungskonzept an der Universitätsklinik Mainz als das dominierende Schema.

3.4 Innerklinische Parameter

Die Analyse der Schmerzintensität zeigt eine signifikante und klinisch relevante Verbesserung nach der operativen Intervention. Präoperativ lag der durchschnittliche Schmerzwert der Patienten auf der Numerical Rating Scale (NRS) bei 6,9, was eine

erhebliche Schmerzlast vor der Operation indiziert. Nach der chirurgischen Stabilisierung der Fraktur sank die mittlere Schmerzintensität postoperativ deutlich auf einen Durchschnittswert von 2,0 (Spannweite: 0-5; n=28).

Dieser starke Abfall der Schmerzwerte steht in direktem Zusammenhang mit dem Erfolg der Operation, da durch die Stabilisierung der Fraktur die primäre Schmerzquelle erfolgreich adressiert wurde. Die statistische Auswertung dieser Veränderung mittels eines gepaarten t-Tests bestätigte die signifikante Reduktion der Schmerzintensität mit einem erreichten p-Wert von $p < 0,001$. Diese hohe statistische Signifikanz belegt, dass die beobachtete Schmerzreduktion nicht zufällig war. Die prä- und postoperativen NRS-Werte, die diesen signifikanten Unterschied verdeutlichen, sind in Abbildung 17 detailliert visualisiert.

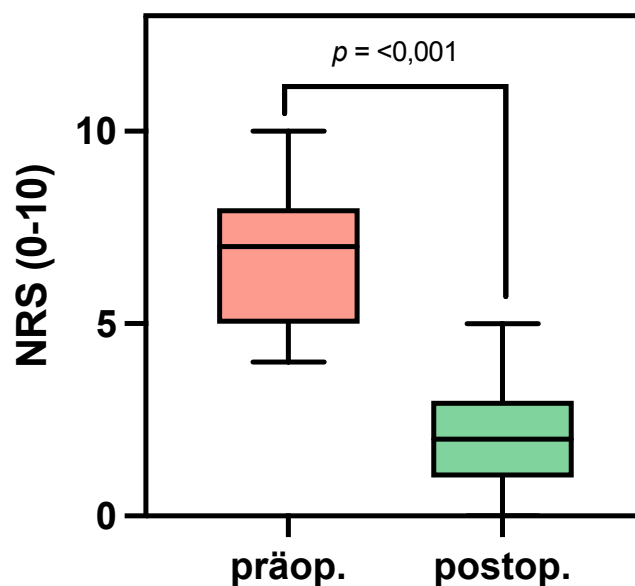


Abbildung 17: Vergleich des präoperativen und postoperativen Wertes auf der NRS nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, gepaarter t-Test, n=28

Die Untersuchung der funktionellen Ergebnisse, basierend auf dem MSTS-UE (Musculoskeletal Tumor Society Score for the Upper Extremity), ergab eine signifikante Verbesserung der Gliedmaßenfunktion. Präoperativ lag der mediane MSTS-UE-Wert bei 9,5 Punkten. Postoperativ stieg dieser Wert auf einen Median von 20 von 30 Punkten (Mittelwert: 21,4; Spannweite: 10-30; n=26).

Diese substanzielle Steigerung des MSTS-UE spiegelt die erfolgreiche Wiederherstellung der Funktion der oberen Extremität nach der operativen Intervention wider. Die statistische Analyse mittels eines gepaarten t-Tests bestätigte diesen Anstieg als statistisch hochsignifikant mit einem p-Wert von $p < 0,001$. Die detaillierte Gegenüberstellung der prä- und postoperativen MSTS-UE-Werte, die diese signifikante Verbesserung belegt, ist in Abbildung 18 dargestellt.

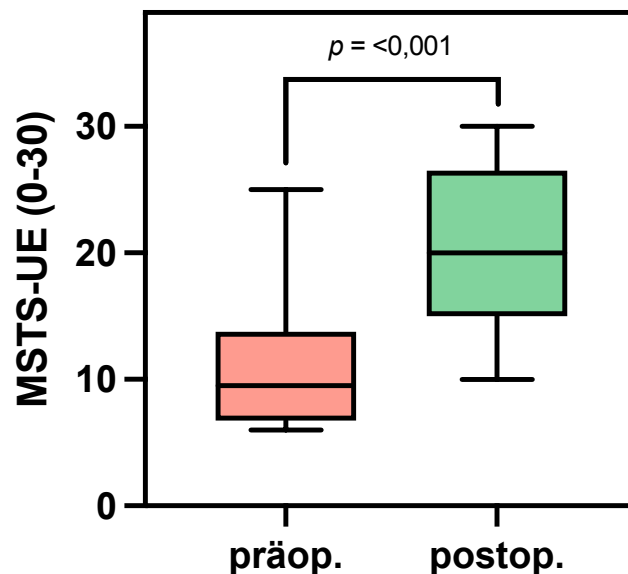


Abbildung 18: Vergleich des präoperativen und postoperativen Wertes des MSTS-UE nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, gepaarter t-Test, $n=26$

Die Krankenhausverweildauer lag im Median bei fünf Tagen (Mittelwert: 8,5 Tage; Spannweite: 2-63 Tage; $n=41$). Die breite Spanne von zwei bis 63 Tagen ist auf die komplexen, über den chirurgischen Eingriff hinausgehenden Behandlungen der Patienten zurückzuführen. Bei einem Teil der Patienten, die sich mit einer pathologischen Fraktur als Erstsymptom vorstellten, war eine umfassende onkologische Diagnostik (Staging) präoperativ erforderlich. Andere erhielten eine unmittelbare Anschlussbehandlung wie eine Systemtherapie oder geplante Bestrahlung, die ebenfalls stationär begann. Ein Ausreißer in der Statistik war eine Patientin, die aufgrund einer symptomatischen Hirnmetastase fast zwei Monate lang stationär betreut werden musste, was die obere Grenze der Verweildauer signifikant beeinflusste.

Der Zeitraum zwischen Operation und Entlassung (postoperative Verweildauer) konnte lediglich für die Patienten der Universitätsmedizin Mainz festgestellt werden und betrug im Median drei Tage (Mittelwert: 9,9 Tage; Spannweite: 2-61 Tage; n=13).

Hinsichtlich der postoperativen Komplikationen war die Rate gering. Es traten keine relevanten Blutungskomplikationen auf, obwohl bekanntermaßen blutungsgefährdete Tumore wie Metastasen von Nierenzellkarzinomen, Schilddrüsenkarzinomen sowie multiple Myelome behandelt wurden. Es konnte in der Kohorte nur eine Transfusion von Erythrozytenkonzentraten festgestellt werden und diese stand nicht im direkten Zusammenhang mit dem chirurgischen Eingriff, sondern war auf eine bereits präoperativ bestehende Anämie zurückzuführen.

Ein weiteres bemerkenswertes Ergebnis ist das vollständige Ausbleiben postoperativer Infektionen. Bei keiner der 41 Versorgungen traten Infektionen im Operationsgebiet (Surgical Site Infections, SSI) oder systemische Infektionen auf. Dies ist umso bemerkenswerter, als ein Teil der Patientenkohorte durch einen schlechten ECOG-Status, vorangegangene lokale Strahlentherapie oder mehrere Linien der Systemtherapie vorbelastet war.

3.5 Organisatorische Verlaufsparemeter

Die orthopädische Nachsorge zeigte eine schrittweise Abnahme der Patientenzahl in den späteren Untersuchungsintervallen.

Die erste postoperative Wiedervorstellung fand im Median 24 Tage (Mittelwert: 38,1 Tage; Spannweite: 4-183 Tage; n=37) nach der Operation statt.

Das Zeitintervall bis zur zweiten Wiedervorstellung betrug, bezogen auf den ersten Termin, im Median 28 Tage (Mittelwert: 63,1 Tage; Spannweite: 7-210 Tage; n=12).

Eine dritte Wiedervorstellung wurde bei drei Patienten durchgeführt, im Median 35 Tage (Mittelwert: 73,3 Tage; Spannweite: 5-180 Tage) nach dem zweiten Termin.

Die gesamte Dauer der orthopädischen Nachbetreuung belief sich im Median auf 41 Tage (Mittelwert: 64,5 Tage; Spannweite: 4-318 Tage; n=37).

Die Gesamterfassungszeit aller postoperativen Einträge, unabhängig von der Fachrichtung, umfasste im Median 47 Tage (Mittelwert: 103,1 Tage; Spannweite: 2-644 Tage; n=41).

3.6 Nachbehandlungsparameter

Postoperative Radiotherapie: In 28 von 41 Fällen (68,3 %) wurde eine postoperative Radiotherapie des lokalen Tumorbettes empfohlen. Diese Empfehlung wurde bei 25 Patienten (89,3 %) umgesetzt. Die Bestrahlung begann im Median 33,5 Tage (Mittelwert: 45 Tage; Spannweite: 17-130 Tage; n=8) nach dem operativen Eingriff.

Systemische Therapie: Eine präoperative systemische Therapie wurde bei acht von 13 erfassten Fällen (61,5 %) durchgeführt. Postoperativ wurde eine Fortführung oder Einleitung der Systemtherapie bei zehn von 13 erfassten Fällen (76,9 %) empfohlen. Von diesen Empfehlungen wurden sechs von neun Fällen (66,7 %) umgesetzt.

Funktionales Ergebnis (TESS)

Der Toronto Extremity Salvage Score (TESS) zeigte im Vergleich zum präoperativen Wert eine signifikante Verbesserung. Bei der ersten Wiedervorstellung betrug der postoperative TESS-Median 61/100 Punkte (Mittelwert: 66,8; Spannweite: 31-100; n=26). Dieser Wert stellte einen statistisch signifikanten Anstieg zum präoperativen Median von 36,5 Punkten dar ($p < 0,001$). Die Verbesserung des Scores, welche sich in den nachfolgenden Kontrollen stabilisierte, ist in Abbildung 19 dargestellt.

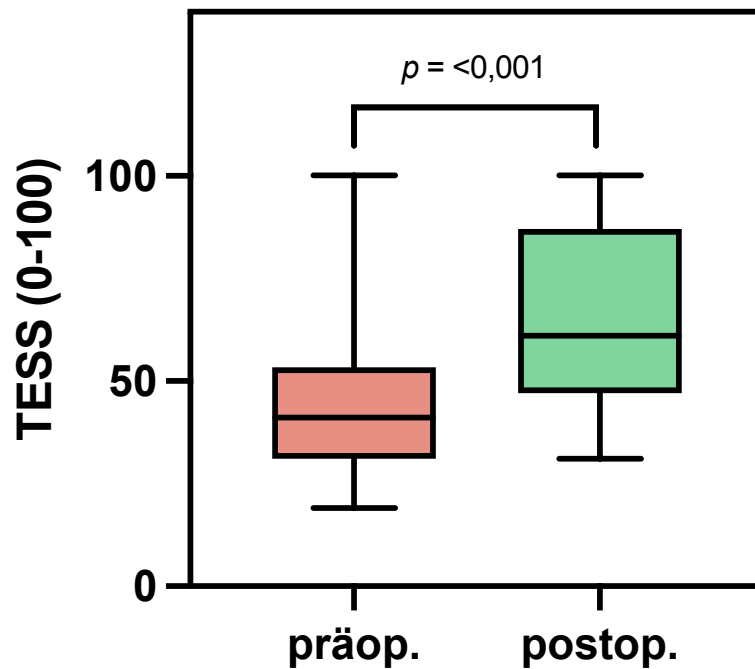


Abbildung 19: Vergleich des präoperativen und postoperativen Wertes des TESS nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, gepaarter t-Test, n=26

Bei zweiter Wiedervorstellung stieg der TESS im Median auf 77/100 Punkten [Mittelwert: 75; Spannweite: 32-100; n=8]. Gleichzeitig trat ein deutlicher *loss of follow up* zwischen der ersten und zweiten Wiedervorstellung für diesen Parameter von 26 auf acht Fälle auf.

Einschränkungen und Beobachtungszeitraum

Die vorliegende Analyse unterliegt bestimmten Einschränkungen, insbesondere bezüglich des Beobachtungszeitraums. Die abnehmende Patientenzahl in den späteren Nachsorgeintervallen (n=12 bzw. n=3) ist maßgeblich auf zwei Faktoren zurückzuführen: Einige Patienten verstarben innerhalb der ersten drei bis sechs Monate postoperativ. Zudem wurde ein Teil der Patienten für die photodynamische Therapie an die Klinik überwiesen und anschließend in ihre Heimatkliniken rücküberwiesen.

Die genauen Gründe für den Verlust der Nachsorgekontakte wurden in dieser Untersuchung nicht systematisch erfasst. Dennoch ist angesichts des palliativen Therapiekonzepts und der kurzen medianen Überlebenszeit von drei Monaten zu vermuten, dass ein relevanter Anteil der Patienten den Nachsorgezeitraum aufgrund ihres Versterbens nicht vollständig durchlaufen konnte.

Subjektive Lebensqualität

Die postoperative Lebensqualität der Patienten wurde sowohl durch subjektive Berichte als auch mittels einer Likert-Skala erfasst. Die Mehrheit der Patienten, 21 von 28 (75 %), berichtete von einer subjektiven Verbesserung ihrer Lebensqualität nach dem Eingriff. Dies wurde durch die Likert-Skala bestätigt, bei der die subjektive Beurteilung einen postoperativen Median von 4 (Mittelwert: 4,25; Spanne: 3–6; n=28) erreichte. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die operative Behandlung eine positive Auswirkung auf die wahrgenommene Lebensqualität der meisten Patienten hatte.

Fazit und Ausblick

Insgesamt sprechen die vorliegenden Daten für eine erfolgreiche Operation, die bei der Mehrzahl der Patienten zu einer spürbaren und positiven Beeinflussung der Lebensqualität geführt hat. Zur umfassenden Bewertung der Therapieeffektivität und zur Validierung der subjektiven Wahrnehmung der Patienten sind jedoch weitere objektive Parameter sowie zusätzliche standardisierte Berichte von Patienten (Patient Reported Outcome Measures) notwendig.

3.7 Langzeitverlaufsparemeter

Alle Patienten mit Knochenmetastasen wurden im Rahmen eines palliativen Therapiekonzepts behandelt. Die Überlebensanalyse umfasste 33 Patienten, bei denen ein Versterben dokumentiert war. Die mediane Überlebenszeit nach dem Eingriff betrug drei Monate (Mittelwert: 5,4 Monate; Spannweite: 0-25 Monate). Acht Patienten gingen aus der Nachsorge verloren, was angesichts des palliativen Settings eine erwartbare Limitation der Studie darstellt. Die Überlebensraten betrugen 63,6 % (21 von 33 Patienten) nach 90 Tagen, 12,9 % (vier von 31 Patienten) nach einem Jahr und 3,3 % (einer von 30 Patienten) nach zwei Jahren. Das Überleben ist als Kaplan-Meier-Kurve in Abbildung 20 dargestellt.

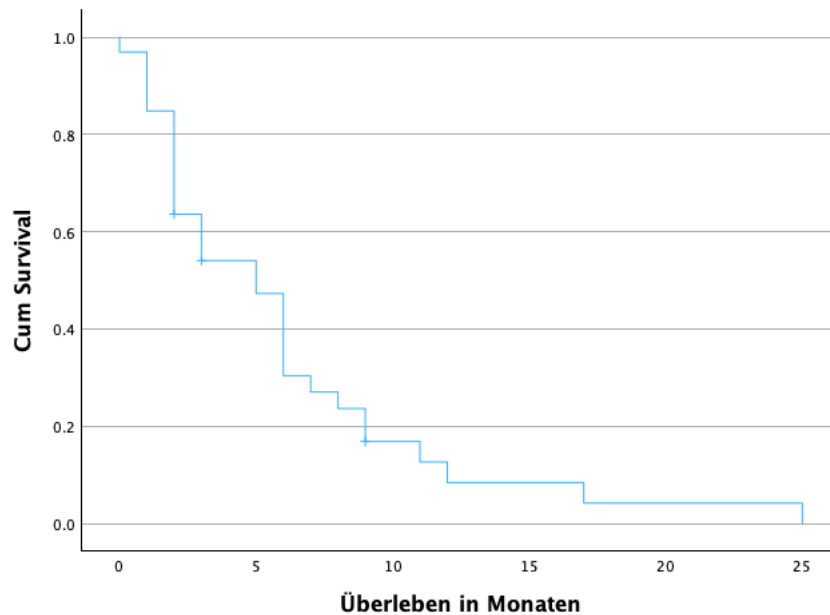


Abbildung 20: Überleben in Monaten nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=33

Insgesamt wurden bei zwei Patienten Revisionsoperationen durchgeführt. Bei einem Patienten wurde nach einem Implantatbruch ein Diaphysenersatz vorgenommen. Eine 73-jährige Patientin mit einem Mammakarzinom erlitt am neunten postoperativen Tag eine Refraktur ohne adäquates Trauma, nachdem der Eingriff eine photodynamische Stabilisierung und zusätzliche Schraubenosteosynthese umfasst hatte. Die anschließende Revision und Stabilisierung erfolgte mittels einer Plattenosteosynthese. Dieser spezifische Fallverlauf ist in den Abbildungen 21 bis 25 detailliert dokumentiert.



Abbildung 21a: Röntgenbild des Oberarms rechts im anterior-posterioren Strahlengang mit pathologischer Fraktur des Humerusschaftes (Pfeilmarkierung); Eigene Abb.

Abbildung 21b: Intraoperative Bildgebung nach Versorgung einer pathologischen Fraktur des Humerusschaftes mittels photodynamischer Knochenstabilisation und zusätzlicher Schraubenosteosynthese; Eigene Abb.



Abbildung 22a und 22b: Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen und anterior-posterioren Strahlengang nach photodynamischer Knochenstabilisation und zusätzlichen Schraubenosteosynthese einer pathologischen Humerusschaftfraktur; Eigene Abb.



Abbildung 23a und 23b: Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen und anterior-posterioren Strahlengang mit Bild einer Refraktur sowie Materialbruch der photodynamischen Knochenstabilisation; Eigene Abb.

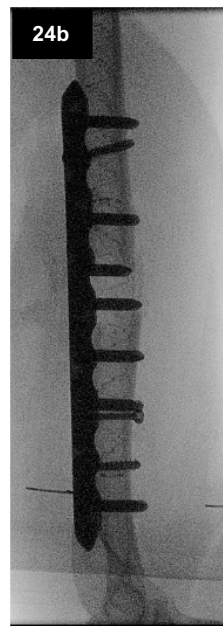


Abbildung 24a und 24b: Intraoperative Bildgebung im anterior-posterioren sowie lateralen Strahlengang nach Versorgung der Refraktur mittels Plattenosteosynthese; Eigene Abb.



Abbildung 25: Ausschnitt des Oberarms rechts aus der Übersichtsaufnahme einer Computertomographie nach Versorgung der Refraktur mittels Plattenosteosynthese; Eigene Abb.

Beide Fälle stellen als Implantatbruch eine Komplikation Typ 3 gemäß der Henderson-Klassifikation (strukturelles Materialversagen) dar.

4. Diskussion

4.1 Ausgangspunkt, Zielsetzung und Einordnung

Pathologische Frakturen des Humerus entstehen meist auf dem Boden maligner Knochenläsionen – typischerweise Metastasen oder Multiples Myelom – und manifestieren sich klinisch mit intensiven Schmerzen, funktionellen Einbußen und raschem Verlust von Mobilität. Da kurative Optionen in dieser Konstellation selten bestehen, richtet sich die chirurgische Versorgung vorrangig an palliativen Zielen aus: verlässliche Analgesie, Wiederherstellung oder Erhalt basaler Funktion, Minimierung prozedurbedingter Morbidität und Sicherung der Lebensqualität im häufig begrenzten Zeitfenster. Vor diesem Hintergrund hat die photodynamische intramedulläre Stabilisation (IlluminOss-System) als minimalinvasives, radioluzentes Verfahren Aufmerksamkeit erlangt – nicht zuletzt, weil sie mit kleinen Zugängen und geringem Weichteiltrauma die schnelle Rekonvaleszenz begünstigen und durch Röntgentransparenz die onkologische Weiterbehandlung erleichtern kann. Diese Arbeit bewertet Wirksamkeit und Sicherheit des Verfahrens in einer palliativen Zielpopulation mit metastasen- bzw. myelombedingten Humerusläsionen sowie drohenden Frakturen und ordnet die Befunde in die internationale Literatur ein.

Ein praktisches Hindernis für Vergleichbarkeit und Evidenzakkumulation bleibt die uneinheitliche Terminologie. Begriffe wie „Stressfraktur“, „Insuffizienzfraktur“ und „Fragilitätsfraktur“ werden in der Literatur nicht selten unscharf verwendet; „pathologische Fraktur“ bezeichnet im engeren Sinn die tumorbedingte Läsion. Eine Standardisierung ist für saubere Studiendesigns, Metaanalysen und die klinische Kommunikation essenziell. Zweiter systematischer Unsicherheitsfaktor ist die Indikationsstellung zur prophylaktischen Stabilisierung. In der Praxis dominieren nach wie vor der Mirels-Score und die Harrington-Kriterien, deren Subjektivität und begrenzte Validierung die Forderung nach objektiveren, biomechanisch fundierten Prädiktoren untermauert (z. B. CT-gestützte Finite-Elemente-Analysen). Für die obere Extremität plädieren neuere Daten dafür, die Mirels-Schwelle niedriger als an der unteren Extremität anzusetzen ($\geq 7/12$), wobei die Testgüte des Scores begrenzt bleibt (Hoban et al., 2022).

Die vorliegende Untersuchung fokussiert bewusst metastasen- und myelombedingte Läsionen des Humerus – also den typischen Anwendungsbereich des IlluminOss-Systems – und schließt primäre Sarkome aus, die kurativ-resezierende Strategien erfordern. Als patientenrelevanter Hauptendpunkt wurde die Schmerzreduktion (NRS) definiert; sekundär wurden Funktion (MSTS-UE), prozedurale Effizienz, Komplikationen inklusive Implantatverhalten, Nachbehandlungsregime und onkologische Ko-Faktoren, insbesondere der ECOG-Performance-Status, untersucht. Daraus leiten sich die Kernhypothesen ab: (i) rasche, klinisch relevante Analgesie und frühe Funktionsaufnahme, (ii) günstige Operationsdauer mit niedriger innerklinischer Belastung, (iii) hoher prognostischer Wert des ECOG für Verlauf und Überleben.

4.2 Literaturkontext: Stand der Evidenz und methodische Flanken

Klinische Serien zur photodynamischen Humerusstabilisation berichten überwiegend Patient:innen im siebten Lebensjahrzehnt und eine Entitätenmischung, in der Multiples Myelom sowie Mamma- und Bronchialkarzinom dominieren; Prostata- und Nierenzellkarzinome sind seltener. Querschnittsübergreifend gilt der ECOG-Status als etablierter Prognosemarker, wobei ECOG 0-2 konsistent mit einem Überlebensvorteil gegenüber ECOG 3-4 assoziiert ist. Als Endpunkt hat sich der NRS für Knochenschmerz bewährt; methodisch fordert die Literatur wiederholt standardisierte postoperative Messzeitpunkte, um Effektstärken über Kohorten hinweg präziser vergleichbar zu machen. Zudem besteht Konsens, dass die Entscheidung zwischen akuter Frakturversorgung und Prophylaxe bei drohender Fraktur – traditionell über Mirels-Score und Harrington-Kriterien gesteuert – objektiviert werden sollte, etwa durch CT-basierte Finite-Elemente-Analysen (Schermann et al., 2020).

Im Vergleich zu nicht-pathologischen Humerusfrakturen – die proximal dominieren – betreffen tumorbedingte Läsionen in vielen Serien vor allem den Schaft. Dieses Muster ist biologisch plausibel, weist aber auch auf einen technisch-prozeduralen Auswahlbias zugunsten diaphysärer Morphologien hin, für die das IlluminOss-System besonders geeignet ist. Die Literatur rekurriert auf Schnitt-Naht-Zeiten von etwa 60-75

Minuten für die photodynamische Knochenstabilisation sowie auf kurze Liegezeiten und betont wiederholt die organisatorischen Vorteile der Radioluzenz im multimodalen Tumorpfad (Zoccali et al., 2021). In komparativen Beobachtungsstudien finden sich Operationszeiten für intramedulläre Nagelung von ungefähr 90 Minuten und für Plattenosteosynthese von 100-120 Minuten; randomisierte Vergleiche fehlen, Meta-Analysen zeigen keine generelle Überlegenheit eines Verfahrens, sondern ein differenzielles Muster, in dem minimalinvasive Zugänge tendenziell mit kürzerer Operationsdauer und geringerem Weichteiltrauma assoziiert sind (Hu et al., 2022; Hoellwarth et al., 2020). Gleichzeitig mehrten sich Hinweise auf morphologiespezifische Grenzen der photodynamischen Knochenstabilisation, insbesondere bei kompletten distalen Humerusfrakturen (Al Farii et al., 2025).

Der pathophysiologische Rahmen tumorbedingter Knochenschmerzen ist multifaktoriell (nozizeptiv, neuropathisch, zentral). Mechanische Stabilität durch ein kanalkonformes intramedulläres Implantat adressiert unmittelbar die mechanische Schmerzkomponente; adjuvante Radiotherapie und Systemtherapie wirken auf die biologische Schmerzachse. Diese Verschränkung wird in Übersichten zu Knochenmetastasen und Radiotherapie-Leitlinien breit reflektiert (Mantyh, 2014).

4.3 Kohortenprofil: Demographie, Läsionsmuster und Prognosemarker

Die Kohorte umfasst 41 Patient:innen mit malignitätsbedingten Humerusläsionen; primäre Sarkome wurden ausgeschlossen. Das Durchschnittsalter beträgt 67,5 Jahre bei ausgeglichenem Geschlechterverhältnis. In 65,9 % lag eine manifeste pathologische Fraktur vor, 34,1 % wurden prophylaktisch wegen drohender Fraktur versorgt – eine Verteilung, die mit externen Registern konsistent ist und die fortbestehende Relevanz valider Indikationsschwellen unterstreicht (Hoban et al., 2022). Diaphysäre Läsionen dominierten mit 58,5 % gegenüber proximalen (39,0 %) und seltenen distalen Befunden (2,4 %); eine leichte Rechtsdominanz (53,7 %) blieb mangels Händigkeitserhebung ohne klare funktionelle Interpretation. Die häufigste Entität war das Multiple Myelom (34,1 %), gefolgt von Bronchial- (17,1 %) und Mammakarzinom (14,6 %); Prostata- und Nierenzellkarzinome traten seltener auf (je 7,3 %). Diese Verteilung entspricht dem in der Literatur beschriebenen Muster.

Die Prävalenz von Diabetes mellitus lag bei etwa 15,3 % — vergleichbar mit anderen Serien (Amen et al., 2021). Die Frakturrisikodynamik ist heterogen; differenzielle Analysen (insulinpflichtig vs. nicht-insulinpflichtig) sind sinnvoll, da unterschiedliche Risiken berichtet werden (Schneider et al., 2012). Rauchen war ebenfalls in 15,3 % dokumentiert; jenseits der karzinogenen Wirkung bestehen Hinweise auf karzinomunabhängige Assoziationen mit pathologischen Frakturen (Amen et al., 2021; Oliveira et al., 2018). Die häufig rauchassoziierte Chronisch obstruktive Lungenerkrankung (COPD) mit Steroidbedarf gilt als unabhängiger Frakturrisikofaktor (Poirier et al., 2023). Diese Trias (Nikotinkonsum – COPD – Steroidtherapie) sollte in multivariaten Modellen abgebildet werden, um die perioperative Risikoabschätzung zu schärfen und Nachbehandlung wie auch Implantatwahl zu individualisieren (Moayeri et al., 2017; Chen et al., 2015; Høidrup et al., 2000; Kanis et al., 2004).

Der präoperative ECOG-Status lag im Mittel bei 1,8 (Median 1), 69,2 % der Patient:innen waren in ECOG 0-2, 30,8 % in ECOG 3-4. ECOG korrelierte deutlich mit dem Überleben: 6,2 Monate für ECOG 0-2 versus 3,8 Monate für ECOG 3-4. Damit qualifiziert sich der ECOG-Status als zentraler Prognosemarker und sollte in künftigen Studien als Primärmaß systematisch erhoben und für Subgruppenanalysen genutzt werden. Die hohen präoperativen Schmerzwerte (NRS 6,9) bestätigen die palliative Zielsetzung der Intervention. Die mediane Zeit vom Symptombeginn bis zur Operation betrug 33,5 Tage; für die Vergleichbarkeit künftiger Kohorten empfiehlt sich ergänzend die Erfassung der Zeitspanne zwischen Diagnosestellung und Operation. Aus diesen Profilen ergeben sich erwartbare Subgruppendifferenzen: Myelomfälle können aufgrund längerer systemischer Überlebenszeiten höhere Langzeitbeanspruchungen der Implantate generieren; rein diaphysäre Läsionen sind technisch prädestiniert für die photodynamische Knochenstabilisation; und bei impending fractures ist ein günstigeres biomechanisches Umfeld zu erwarten als bei dislozierten Komplettfrakturen (Terek et al., 2024).

4.4 Kernergebnisse: Schmerz, Funktion, Prozedureffizienz und Implantatverhalten

Ein wesentlicher Schwerpunkt palliativer Tumororthopädie ist nicht die Verlängerung des Überlebens, sondern die Linderung von Leid und die Wiederherstellung alltagsrelevanter Funktionen. Vor diesem Hintergrund müssen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nicht nur anhand klassischer klinischer Parameter wie Komplikationsrate oder Operationsdauer bewertet werden, sondern primär aus der Perspektive der Patienten.

4.4.1 Analgesie

Unsere Ergebnisse zeigen eine deutliche Reduktion der Schmerzbelastung: Der mediane NRS-Wert sank von 6,9 präoperativ auf 2,0 postoperativ. Damit konnte bei nahezu allen Patienten eine klinisch relevante Analgesie erzielt werden. Schmerzfreiheit oder zumindest eine deutliche Schmerzreduktion stellt im palliativen Setting den wichtigsten Endpunkt dar, da sie unmittelbar die Lebensqualität verbessert. Auch andere Arbeitsgruppen berichten über ähnlich ausgeprägte Effekte: In einer multizentrischen Untersuchung reduzierte sich der durchschnittliche Schmerz-Score von 8,4 auf 5,0 nach IlluminOss-Versorgung (Terek et al., 2024), während Zoccali et al. eine rasche und nachhaltige Schmerzreduktion nach Versorgung von Humerusmetastasen dokumentierten (Zoccali et al., 2021). Die Schmerzlinderung ist als stabiler Kurzeffekt der sofortigen mechanischen Stabilisierung zu werten. Methodisch empfiehlt sich die prospektive Festlegung standardisierter Messzeitpunkte (z. B. 24 Stunden/7 Tage/6 Wochen), um Verlaufsunterschiede zwischen Subpopulationen künftig belastbar quantifizieren zu können.

4.4.2 Funktioneller Zugewinn und Mobilität

Neben der Analgesie ist die Wiederherstellung der Armfunktion entscheidend für Autonomie und Selbständigkeit. In unserer Serie stieg der MSTS-UE-Score von median 31,7 % auf 66,7 %, was einem signifikanten funktionellen Zugewinn entspricht. Bereits wenige Tage nach der Operation konnten die meisten Patienten den Arm im Alltag

wieder einsetzen, was durch die minimalinvasive Technik und die geringe Weichteilmorbidität begünstigt wurde. Die Ergebnisse decken sich mit internationalen Erfahrungen: In der LIGHTFIX-Studie wurde eine rasche Mobilisierung beobachtet, die es den Patienten ermöglichte, alltägliche Aktivitäten innerhalb weniger Wochen wieder aufzunehmen (Terek et al., 2024). Auch Zoccali et al. betonen, dass Illumin-Oss durch die gewebeschonende Technik eine schnelle Wiederherstellung der Gebrauchsfähigkeit unterstützt (Zoccali et al., 2021).

Obwohl in unserer Kohorte keine spezifischen Lebensqualitätsinstrumente wie der EORTC QLQ-C30 oder der QuickDASH eingesetzt wurden, spiegeln die funktionellen Scores und die dokumentierte Schmerzlinderung wesentliche Dimensionen der Lebensqualität wider. Internationale Studien stützen diese Interpretation: Vegt et al. zeigten in einer Serie, dass Patienten nach IlluminOss-Versorgung eine signifikante Verbesserung des DASH-Scores und des Constant Shoulder Scores angaben (Vegt et al., 2018). Auch Zoccali et al. berichten über eine signifikante Verbesserung der subjektiven Lebensqualität, die nicht nur auf die Schmerzlinderung, sondern auch auf die schnelle Mobilität und geringe perioperative Belastung zurückzuführen war (Zoccali et al., 2021). Damit wird deutlich, dass minimalinvasive Verfahren neben objektiven Parametern wie Operationszeit oder Komplikationsrate insbesondere auch patientenzentrierte Endpunkte verbessern.

Gerade im palliativen Kontext ist es von großer Bedeutung, dass chirurgische Eingriffe die Fortführung der onkologischen Therapie nicht verzögern. Die Radioluzenz des IlluminOss-Implantats stellt hierbei einen entscheidenden Vorteil dar, da sie die Durchführung einer adjuvanten Strahlentherapie ohne Beeinträchtigung erlaubt (Hoellwarth et al., 2020). Dies unterstützt die schnelle Wiederaufnahme multimodaler Therapiekonzepte und trägt somit indirekt zur Stabilisierung der Lebensqualität bei.

4.4.3 Operative Effizienz

Die mittlere Schnitt-Naht-Zeit betrug 75,7 Minuten (Median 65 Minuten); ohne Zusatzosteosynthese lag der Median bei 61,5 Minuten. Diese Werte positionieren die photodynamische Knochenstabilisation günstig gegenüber Alternativen und decken sich mit externen Beobachtungen, die für intramedulläre Nagelung ungefähr 90 Minuten und für Plattenosteosynthese 100-120 Minuten berichten (Hoellwarth et al., 2020; Hu

et al., 2022). Klinisch relevant ist die geringe Variabilität in rein diaphysären Fällen, was nahelegt, dass Lokalisation und die Notwendigkeit von Zusatzosteosynthesen die Operationsdauer stärker determinieren als die Tumorätiologie an sich. Die Radio-luzenz des Implantats schafft zudem organisatorische Effizienz im onkologischen Pfad, weil sie Planungsartefakte reduziert und die frühe Radiotherapie erleichtert (Zoccali et al., 2021). Die mittlere Krankenhausverweildauer betrug 8,5 Tage (Median 5 Tage). Methodisch bedeutsam ist, dass die gesamte stationäre Zeit (Aufnahme bis Entlassung) erfasst wurde; für zukünftige Wirksamkeitsvergleiche sollte die rein postoperative Verweildauer gesondert berichtet werden. Systemunterschiede zwischen Gesundheitssystemen (z. B. in US-Hospitälern) limitieren direkte Vergleiche (Wager und Cox, 2024).

4.4.4 Sicherheitsprofil und Implantatverhalten

Transfusionen waren eine Rarität (ein Fall, anämiebedingt), postoperative Infektionen traten nicht auf. Der Befund ist konsistent mit dem minimalinvasiven Ansatz (kleine Zugänge, kurzes Weichteiltrauma, moderate Operationsdauer) und deckt sich mit Risikofaktoren für Surgical Site Infections in der muskuloskelettalen Onkologie, in der Implantatpräsenz und lange Operationszeiten als Haupttreiber gelten (Miwa et al., 2022; Hu et al., 2022). In zwei Fällen kam es zu frühen Implantatbrüchen. Da externe Arbeiten auch unter restriktiveren Mobilisationsschemata Brüche berichten, ist ein monokausaler Zusammenhang mit der Nachbehandlung unwahrscheinlich. Wahrscheinlicher ist ein multifaktorielles Geschehen, in dem Knochenqualität, Defektlänge, Implantat-Sizing und Lokalisation zusammenwirken. Die Literatur verweist auf erhöhte Versagensraten insbesondere bei vollendeten distalen Frakturen und empfiehlt dort Augmentation (z. B. Plattenosteosynthese) oder Alternativen; impending fractures gelten als „Stärke“ der Monotherapie durch photodynamische Knochenstabilisation (Al Farii et al., 2025; Terek et al., 2024). Diese Einschätzung spiegelt sich im prospektiven Multicenter-Trial LIGHTFIX wider, der der photodynamischen Knochenstabilisation bei impending fractures eine hohe Zuverlässigkeit bescheinigt (Terek et al., 2024).

Nachbehandlerisch dominierten freifunktionelle Schemata (78 %) bzw. schmerzadaptierte Vollbelastung (19,5 %), Immobilisation war im Wesentlichen bei distaler Zusatzplatte vorgesehen. Versagensereignisse traten in beiden Regimen auf; insofern bleibt

die Option zur frühen Vollbelastung ein substanzieller Vorteil des palliativen Gesamtkonzepts, ohne dass das Rehabilitationsschema als Hauptdeterminante des Implantatverhaltens gelten kann (Soeharno et al., 2018). Onkologisch ist die Radioluzenz bedeutsam, da sie die Planung adjuvanter Radiotherapie erleichtert und Artefakte vermeidet – ein praktischer Vorteil gegenüber Metallimplantaten, der eine zeitnahe Fortführung systemischer und lokaler Therapien unterstützt (Zoccali et al., 2021).

4.5 Vergleich mit Alternativen: Kontextualisierung der photodynamischen Knochenstabilisation

Im Spektrum verfügbarer Verfahren bei pathologischen bzw. drohenden Humerusfrakturen – intramedulläre Nagelung, Plattenosteosynthese (offen oder minimalinvasiv, häufig zementaugmentiert) und endoprothetische Rekonstruktionen bei periartikulären Destruktionen – wird die Auswahl maßgeblich durch Lokalisation (diaphysär vs. meta-/epiphysär), Frakturstatus (impending vs. komplett), Knochenqualität und onkologische Prognosefaktoren bestimmt. Systematische Vergleiche zwischen intramedullärer Nagelung und Plattenosteosynthese zeigen eine insgesamt vergleichbare Sicherheit und Effektivität, teils mit geringerer Rate postoperativer N.-radialis-Paresen für die intramedulläre Nagelosteosynthese (Chen et al., 2024). Die Platte behält dort Vorteile, wo eine ausgedehnte Kürettage und präzise Reposition erforderlich sind; funktionell unterscheiden sich offene vs. minimalinvasive Plattenosteosynthese nicht einheitlich. Für proximale Läsionen mit metaphysärer Beteiligung deutet die Literatur auf kontextspezifische Gleichwertigkeit zwischen zementaugmentierter Plattenosteosynthese und intramedulläre Nagelung hin (Wu et al., 2023). In klassischen Algorithmen wird proximal bei ausgedehnten Zerstörungen eine großzügige Indikation zur endoprothetischen Rekonstruktion empfohlen, während diaphysäre Läsionen intramedullär adressiert werden (Piccioli et al., 2010).

Vor diesem Hintergrund zeigt die photodynamische Knochenstabilisation in unserer Serie kurze Schnitt-Naht-Zeiten (Median 65 Minuten; ohne Zusatzosteosynthese 61,5 Minuten) sowie niedrige perioperative Belastung (sehr geringe Transfusions- und keine Infektionsraten) und deckt sich damit mit externen Reihen, die der Technik eine minimalinvasive, organisationsökonomisch günstige Rolle zuschreiben (Zoccali et al., 2021).

Reoperations- und Versagensraten variieren mit Frakturstatus und Lokalisation; die konsistente Evidenzlage spricht für eine niedrige Schwelle zur Augmentation bei kompletten distalen Frakturen, während impending Läsionen die Stärke der photodynamischen Knochenstabilisation darstellen (Al Farii et al., 2025; Hoellwarth et al., 2020). Zusätzlich berichtet eine multizentrische Untersuchung signifikante Verbesserungen von Schmerz und Funktion unter photodynamischer Knochenstabilisation bei humeraler Metastasierung; randomisierte Vergleiche zwischen photodynamischer Knochenstabilisation, intramedullärer Nagelung und Plattenosteosynthese sind jedoch weiterhin ein dringlicher Forschungsbedarf (Terek et al., 2024).

4.6 Effizienz- und Sicherheitsbilanz im onkologischen Pfad

Im engeren Sinne prozedural belegt die Kohorte eine zeitökonomische Durchführung mit niedriger hämatologischer und infektiologischer Belastung. Über den Operationssaal hinaus entstehen organisatorische Effizienzgewinne aus der Radioluzenz: Planungsartefakte in der Bildgebung entfallen, was die frühzeitige Radiotherapie begünstigt und Verzögerungen in multimodalen Pfaden vermeidet (Zoccali et al., 2021). Die international unterschiedlichen Längen stationärer Aufenthalte erfordern zwar vorsichtige Interpretation, doch legen Vergleiche nahe, dass die photodynamische Knochenstabilisation bei gegebener Indikation die Prozesszeiten günstig beeinflussen kann (Wager und Cox, 2024). In Summe ist die Sicherheitsplausibilität minimalinvasiver Verfahren – bei sorgfältiger Indikations- und Morphologieauswahl und unter Fokussierung auf Operationsdauer unter zwei Stunden, sorgfältiges Implantat-Sizing, Kortikallissubstanz und Defektlänge – gut begründet (Kawai et al., 2005; Hu et al., 2022; Miwa et al., 2022).

4.7 Verzögerung des präoperativen Zeitintervalls (Symptombeginn bis Operation)

In unserer Kohorte zeigte sich eine mediane Verzögerung von 33,5 Tagen zwischen dem ersten Auftreten von Beschwerden und der Operation (Kapitel 3.3). Diese relativ

lange Latenz steht im Widerspruch zur palliativ-onkologischen Zielsetzung, den Behandlungsablauf maximal zu beschleunigen, um Leid zu reduzieren. Ein derartiges Intervall bedeutet für die Betroffenen eine verlängerte Phase mit Schmerzen und eingeschränkter Funktion – im schlimmsten Fall kann eine zunächst drohende Fraktur während des Wartens tatsächlich auftreten. So brachen in einer aktuellen Studie 32 % der anfänglich nur drohenden Frakturen noch vor der geplanten Stabilisierung, während auf diagnostische Schritte (Biopsie) gewartet wurde (Verspoor et al., 2023). Solche Ereignisse verdeutlichen die klinische Bedeutung einer zeitnahen Intervention.

Die Verzögerung bis zur Operation kann durch verschiedene Faktoren bedingt sein. Einerseits spielen patienten- und arztseitige Faktoren eine Rolle – unspezifische Symptome werden mitunter fehlgedeutet oder die Notwendigkeit einer frühen weiterführenden Diagnostik wird nicht erkannt. Ein Mangel an Awareness über die Dringlichkeit schneller Abklärung bei metastasenverdächtigen Knochenläsionen wurde als häufige Ursache für Behandlungsverzögerungen identifiziert (Guzik, 2018). Andererseits erfordert die diagnostische Sicherung bei pathologischen Frakturen Zeit: Insbesondere bei solitären Läsionen ohne bekannte Primärerkrankung empfehlen Leitlinien eine präoperative Biopsie, um ein primäres Knochensarkom auszuschließen. Diese wichtige Maßnahme verzögert allerdings die definitive operative Versorgung – im Median um etwa einen Monat, wie eine aktuelle Serie zeigte (30 Tage vom Diagnosestart bis zur Operation) (Verspoor et al., 2023). Zusätzlich können organisatorische Aspekte im Gesundheitssystem eine Rolle spielen, etwa mehrstufige Zuweisungswege (beispielsweise Überweisung durch Allgemeinmediziner an onkologische und weiterführend orthopädische Fachärzte), begrenzte Operationskapazitäten oder Wartezeiten für bildgebende Verfahren.

Notwendigkeit von Optimierungen

Angesichts der palliativmedizinischen Zielsetzung sollte kritisch hinterfragt werden, ob die beobachtete Verzögerung von rund einem Monat ein systembedingtes Problem darstellt – und wie sich der onkologische Behandlungspfad organisatorisch effizienter gestalten ließe. Denkbar wären Fast-Track-Konzepte oder klar definierte Zuweisungswege für Patienten mit Skelettmetastasen, um Diagnose und Therapieeinleitung zu beschleunigen. Erfahrungen aus der Strahlentherapie legen nahe, dass Prozessoptimierungen die Wartezeit deutlich reduzieren können: So führte in einem Zentrum die

direkte Zuweisung palliativ zu bestrahlender Patienten an einen spezialisierten Koordinator zu einer Verkürzung der Zeit von Überweisung bis Behandlungsstart von median fünf auf drei Tage (Job et al., 2017). Auch eine frühzeitige Konsultation des Strahlentherapeuten innerhalb von 48 Stunden nach Aufnahme stand in Zusammenhang mit einer signifikant kürzeren Krankenhausverweildauer im palliativ-onkologischen Setting (Cushman et al., 2018). Übertragen auf die operative Therapie von Knochenmetastasen bedeutet dies, dass eine engere interdisziplinäre Verzahnung (z. B. frühe Vorstellung beim orthopädischen Tumorzentrum, paralleles Einleiten der Diagnostik) und Priorisierung dieser Patienten zu einer schnelleren Behandlung führen könnten. Insgesamt sollte die Latenz zwischen Symptombeginn und Operation in der Diskussion kritisch beleuchtet und als Qualitätsindikator herangezogen werden. Wo immer möglich, ist sie durch organisatorische Maßnahmen – beispielsweise durch Abkürzen von Wartezeiten, feste Behandlungspfade und Sensibilisierung der Zuweiser – zu minimieren, um die Morbidität langer Wartezeiten zu verringern.

4.8 Implantatversagen: Detaillierte Analyse und Indikationsgrenzen der IlluminOss-Monotherapie

In unserer Serie traten zwei Implantatversagen auf. Für eine präzise Bewertung sollten diese Fälle einzeln analysiert und auf gemeinsame Merkmale oder Fehlerquellen hin untersucht werden. Mögliche Risikofaktoren für ein Versagen des IlluminOss-Systems sind:

Ein hoher Mirels-Score deutet auf eine ausgedehnte osteolytische Destruktion und hohe Frakturgefahr hin. In solchen Fällen ist der Knochen deutlich geschwächt, was die Belastung des Implantats erhöht. Es ist zu prüfen, ob die Versager-Fälle in unserer Kohorte einen überdurchschnittlich hohen Mirels-Score aufwiesen – als indirektes Maß für die Tumorlast im Knochen und die daraus resultierende Instabilität.

Auch das Ausmaß des Knochendefekts (z. B. nach Ausräumung des Tumors) dürfte die biomechanische Stabilität beeinflussen. Lange Defekte bedeuten, dass ein längerer Streckenabschnitt des Knochens ausschließlich vom Polymerimplantat überbrückt

werden muss, ohne zusätzliche Abstützung durch Kortikalis. Eine Hypothese ist, dass sehr lange oder metaphysär gelegene Defekte (insbesondere in belasteten Zonen) die Bruchgefahr des IlluminOss-Nagels erhöhen.

Schließlich spielt die Frage einer zusätzlichen mechanischen Sicherung eine Rolle. Wurden in den Versager-Fällen Begleitmaßnahmen wie Verriegelungsschrauben oder eine unterstützende Platte unterlassen, könnte dies zum Versagen beigetragen haben. Das IlluminOss-Implantat fungiert als intramedullärer Stabilisator, doch bei komplexen Frakturen oder großen Defekten kann eine alleinige intramedulläre Stabilisierung insuffizient sein. Hier stellt sich die Indikationsgrenze der Monotherapie mit dem IlluminOss-System: Ab welcher Tumorausdehnung oder Instabilität sollte zwingend eine zusätzliche Osteosynthese (z. B. Plattenosteosynthese) erfolgen, um ein Versagen zu vermeiden?

Die internationale Literatur bestätigt, dass das IlluminOss-System zwar Vorteile in der palliativen Frakturversorgung bietet, jedoch in bestimmten Situationen an mechanische Grenzen stößt. So brachen im multizentrischen LIGHTFIX-Trial (humorale Metastasen) 12 von 81 Implantaten, was einer Quote von 15 % entspricht. Interessanterweise empfahlen die Autoren der Studie, das photodynamische Implantat vorzugsweise bei impending fractures (drohenden Frakturen) einzusetzen und bei vollständigen pathologischen Frakturen mit Vorsicht vorzugehen (Terek et al., 2024). Insbesondere sollte in Letzteren erwogen werden, das IlluminOss durch eine zusätzliche Platte oder durch mehr als die üblichen zwei Verriegelungsschrauben zu ergänzen, um die Stabilität zu erhöhen. Diese Mahnung stützt sich auf die Beobachtung, dass das Polymerimplantat bei höhergradig instabilen Frakturen häufiger versagt. Zoccali et al. ziehen eine ähnliche Schlussfolgerung: In ihrer 12-Patienten-Serie trat in zwei Fällen (17 %) ein Nagelbruch auf (Zoccali et al., 2021). Die Autoren merken an, dass das System zwar prinzipiell auch bei bereits komplett frakturierten Fällen einsetzbar ist, sie es aber bevorzugt bei drohenden Frakturen anwenden würden. Gerade wenn eine ausgedehnte Kortikalis-Zerstörung vorliegt, welche die Verwendung eines konventionellen Verriegelungsnagels erschwert (weil keine Schraubenverankerung mehr möglich ist), wird IlluminOss als Alternative angesehen – jedoch mit dem Hinweis, dass die Festigkeit des Systems limitiert ist. Bei sehr instabilen Fraktursituationen kann es während der Polymerisation zu einem Stabilitätsverlust kommen, und generell besteht ein

Restrisiko, dass das Implantat unter Belastung bricht. Diese Einschränkungen unterstreichen, dass klare Indikationsgrenzen definiert werden müssen.

Auch Vergleichsstudien mit herkömmlichen Osteosyntheseverfahren zeigen die Problematik auf: In einer retrospektiven Analyse von 105 pathologischen Humerusfrakturen trat bei Verwendung des photodynamischen Nagels (IlluminOss) in 15,8 % der Fälle ein Implantatbruch auf, während bei standardmäßigen Verriegelungsnägeln kein einziger Bruch beobachtet wurde (0 %) (Hoellwarth et al., 2020). Zementierte Platten lagen in einem ähnlichen Bereich mit 14 % Bruchrate (Hoellwarth et al., 2020). Die Gesamt-Reoperationsraten unterschieden sich interessanterweise nicht signifikant zwischen den Gruppen – ein Befund, der darauf hindeutet, dass gebrochene Polymer-Implantate durch nachfolgende Korrektoreingriffe (z. B. Revision mit zusätzlicher Plattenosteosynthese oder Wechsel auf eine Metalnagelosteosynthese) erfolgreich behandelt werden konnten. Dennoch: Die höhere Fragilität des IlluminOss-Implants im Vergleich zu Metall erfordert eine wohlüberlegte Patientenselektion. Hoellwarth et al. formulieren in ihrer Schlussfolgerung, dass die potenzielle „Fragilität bedacht werden muss“, selbst wenn das System in ausgewählten Fällen Vorteile (z. B. minimalinvasive Technik, bessere Bestrahlbarkeit) bietet. Für unsere Diskussion bedeutet das, die beiden Versager-Fälle dahingehend zu beleuchten, ob sie außerhalb der empfohlenen Indikationsgrenzen lagen – etwa durch sehr große osteolytische Defekte oder die Entscheidung, auf eine zusätzliche Abstützung zu verzichten. Sollte dies der Fall sein, wären hieraus klare Empfehlungen abzuleiten: Bei ausgedehnter Destruktion (hoher Mirels-Score, lange Defektstrecke) oder manifester Fraktur sollte IlluminOss nicht als alleinige Stabilisierung verwendet werden, sondern mit konventionellen Methoden (Plattenosteosynthese, Schraubenverriegelung, Zementaugmentation) kombiniert werden (Terek et al., 2024). Auf diese Weise ließe sich die Indikation für eine IlluminOss-Monotherapie schärfer fassen und zukünftige Implantatversagen hoffentlich vermeiden.

4.9 Verweildauer: Postoperative vs. Gesamtverweildauer

In den Ergebnissen (Kapitel 3.4) wurde bisher die gesamte stationäre Verweildauer der Patienten betrachtet. Diese betrug in unserem Kollektiv im Median 5 Tage. Für die

Beurteilung der unmittelbaren chirurgischen Morbidität und Effizienz ist es jedoch sinnvoll, die postoperative Verweildauer – definiert als Zeitraum vom Operationstag bis zur Entlassung – separat auszuweisen. Oft wird die Gesamtverweildauer nämlich durch den onkologischen Behandlungspfad verlängert und spiegelt nicht ausschließlich den Erholungs- und Mobilisationsverlauf nach der Operation wider. Beispielsweise verbleiben viele Patienten nach der Operation im Krankenhaus, um frühzeitig mit adjuvanten Therapien (Bestrahlung, systemische Therapie) beginnen zu können. Dies kann die Aufenthaltsdauer erheblich ausdehnen, ohne dass dies auf Komplikationen der Operation zurückzuführen ist. Pintova et al. berichteten von einem eindrücklichen Beispiel: In einer kleinen Serie blieben fünf von sieben Patienten freiwillig stationär, um eine postoperative Bestrahlung durchzuführen, obwohl eine Entlassung medizinisch möglich gewesen wäre. Dadurch stieg die durchschnittliche Krankenhausaufenthaltsdauer dieser Patienten auf 40 Tage, wohingegen Patienten, die zur Bestrahlung entlassen wurden und diese ambulant erhielten, nur neun Tage in der Klinik verbrachten (Pintova et al., 2015). Dieses Beispiel verdeutlicht, wie die Integration zusätzlicher Therapien in denselben stationären Aufenthalt die Verweildauer verzerrt.

Für unsere eigene Kohorte bedeutet dies: Die rein postoperative Verweildauer (vom Operationstag bis zur Entlassung) liefert ein objektiveres Maß für den unmittelbaren chirurgischen Erfolg und die Erholungszeit. Sie betrug in unserem Kollektiv median 3 Tage, deutlich kürzer als die gesamte Verweildauer. Dies spricht für eine effiziente postoperative Betreuung und zügige Mobilisation der Patienten. Unterstützt wird dies durch Berichte aus der Literatur: Minimalinvasive Stabilisierungsverfahren – wie das hier untersuchte IlluminOss-System – ermöglichen oftmals eine sehr kurze postoperative Hospitalisierung. So lag die mediane Aufenthaltsdauer nach IlluminOss-Versorgung in einer aktuellen Studie nur bei 2,5 Tagen, 53 % der Patienten konnten direkt nach Hause entlassen werden (Hoellwarth et al., 2020). Auch andere Zentren berichten von verkürzten Liegezeiten und schneller Rekonvaleszenz durch die schonende Operationsmethode. Unsere Ergebnisse scheinen dies widerzuspiegeln, wenn man die postoperative Verweildauer isoliert betrachtet.

Die getrennte Ausweisung der postoperativen Verweildauer ist wichtig, um die chirurgische Morbidität und Effizienz unverfälscht beurteilen zu können. Eine lange Gesamtverweildauer mag in einem onkologischen Zentrum durchaus üblich sein, spiegelt aber

häufig die Koordination verschiedener Therapien wider (z. B. Wartezeit bis zum Beginn einer Strahlentherapie oder Anschlussheilbehandlung) und weniger Probleme der Operation. Für den chirurgischen Vergleich (etwa mit anderen Techniken oder Kliniken) sollte daher primär die postoperative Verweildauer herangezogen werden. Diese Kennzahl erlaubt es, die operative Leistung und das Komplikationsmanagement fair zu bewerten, ohne dass Verzögerungen im onkologischen Pfad das Bild verfälschen. Im Kontext unserer Studie konnte durch die separate Betrachtung gezeigt werden, dass die Patienten nach der Operation relativ schnell genesen und entlassen wurden, was für die geringe chirurgische Morbidität und Effektivität der gewählten Therapie spricht. Zukünftig sollte in Veröffentlichungen zur palliativen Knochenchirurgie standardmäßig zwischen postoperativer und Gesamt-Verweildauer differenziert werden, um eine bessere Vergleichbarkeit der operativen Effizienz zu gewährleisten (Cushman et al., 2018).

4.10 Stärken und Limitationen der vorliegenden Untersuchung

Eine Stärke liegt im klaren Fokus auf eine palliative Zielpopulation (Metastasen/Myelom) mit hoher klinischer Relevanz; die Arbeit adressiert reale Entscheidungsprobleme (impending vs. komplette Fraktur; diaphysär vs. periartikulär) und nutzt validierte Prognosemaßstäbe (ECOG als Primärmaß, ergänzt um den Karnofsky-Index), wobei der ECOG-Status in der Kohorte – in Übereinstimmung mit der Literatur – eine enge Assoziation mit dem Überleben zeigt. Die konvergenten Signale zu Effizienz (Median-Operationsdauer 65 Minuten; ohne Zusatzosteosynthese 61,5 Minuten) und Sicherheit (sehr niedrige Transfusionsrate; keine postoperativen Infektionen) sprechen für eine günstige Risikobilanz der photodynamischen Knochenstabilisation im gewählten Indikationsspektrum.

Die Limitationen sind vornehmlich methodischer Natur. Das retrospektive Design ohne randomisierte Kontrolle gegenüber Intramedullärer Nagelung, Plattenosteosynthese oder Prothesenversorgung begrenzt Kausalaussagen; Residualkonfounding kann nicht ausgeschlossen werden. Die diaphysäre Dominanz spiegelt auch die Machbarkeit der photodynamischen Knochenstabilisation wider; distale bzw. periartikuläre Komplettfrakturen sind technisch anspruchsvoller und wurden seltener adressiert, was

Vergleiche verzerren kann, wenn nicht konsequent stratifiziert wird. Die kurze mediane Expositionszeit in palliativen Kollektiven unterschätzt wahrscheinlich späte Ermüdungsereignisse; gleichwohl belegen die zwei beobachteten frühen Implantatbrüche, dass Geräteversagen auftreten kann und patienten- bzw. läsionsspezifische Faktoren (Knochenqualität, Defektlänge, Sizing) kritisch sind. Zentrumsspezifisch heterogene Nachbehandlungsregime (freifunktionell vs. schmerzadaptierte Vollbelastung) erschweren die Attribuierung einzelner Effekte; Versagen trat in beiden Regimen auf. Schließlich mindern nicht standardisierte Zeitpunkte der NRS- und Funktionsmessungen die Präzision und Vergleichbarkeit der Effektstärken. Diese methodischen Flanken sind in der externen Evidenz nicht ungewöhnlich: Viele Publikationen sind retrospektiv; randomisierte Vergleiche zwischen photodynamischer Knochenstabilisation und Standardverfahren fehlen weitgehend. Ein multizentrischer Studienbericht stützt zwar die Verbesserung von Schmerz und Funktion unter photodynamischer Knochenstabilisation, liefert aber noch keine definitive Vergleichswirkung (Terek et al., 2024). Zudem warnen systematische Reviews vor erhöhtem Versagensrisiko der photodynamischen Knochenstabilisation bei kompletten distalen Frakturen, was unsere Überlegungen zur Indikationsschärfung untermauert (Al Farii et al. 2025; Piccioli et al., 2010).

4.11 Klinisch-praktische Implikationen und Ableitungen

Aus der Gesamtschau der Daten lassen sich praxisnahe Empfehlungen formulieren, die den morphologiespezifischen Charakter der Verfahren stärker betonen als ein „one-size-fits-all“-Paradigma: Bei diaphysären impending Läsionen sollte die photodynamische Knochenstabilisation als first-line-Option erwogen werden, da die Monotherapie in diesem Setting zuverlässig ist, eine frühe Funktionsaufnahme erlaubt und die onkologische Weiterbehandlung durch Radioluzenz logistisch begünstigt (Zoccali et al., 2021). Bei kompletten distalen oder ausgeprägt metaphysären Frakturen ist die Schwelle zur Augmentation durch Plattenosteosynthese oder Zement niedrig zu halten; in ausgesuchten proximalen Situationen mit ausgeprägter metaphysärer Destruktion bleibt die endoprothetische Rekonstruktion eine tragfähige Alternative (Al Farii et al., 2025; Piccioli et al., 2010). Wo eine erweiterte Kürettage notwendig ist, behält die Platte – offen oder minimalinvasiv eingebracht – ihren Stellenwert, ohne dass funktionelle Nachteile gegenüber alternativen Zugängen konsistent belegt wären (Wu et al.,

2023; Chen et al., 2024). Für den transfusions- und infektionssensiblen Tumorkontext empfehlen sich prozedurale Zielgrößen wie Operationsdauer unter zwei Stunden, sorgfältiges Sizing und konsequente Fokussierung auf Knochensubstanz und Läsionslänge (Kawai et al., 2025; Hu et al., 2022; Miwa et al., 2022).

Die Nachbehandlung sollte morphologie- und defektadaptiv gesteuert und die Adhärenz dokumentiert werden. Wissenschaftlich ist die Wechselwirkung aus Regime, Lokalisation und Implantatparametern zielgerichtet zu modellieren. Onkologisch verdient das Radiotherapie-Timing (Tage bis zur postoperativen Radiotherapie), Dosis/Fraktionierung und die lokale Kontrolle besondere Aufmerksamkeit, weil aktuelle Übersichten eine Bandbreite effektiver Schemata für nicht-spinale Knochenmetastasen beschreiben (Zoccali et al., 2021; Ramadan et al., 2023).

4.12 Perspektiven für Forschung und Versorgung

Die Disziplin steht an der Schwelle von machbarkeits- hin zu vergleichend- wirksamkeitsorientierter Evidenz. Priorität haben prospektive, idealerweise randomisierte Studien, die photodynamische Knochenstabilisation, verriegelte Nagelung, zementaugmentierte Platte und endoprothetische Optionen in klar definierten Subpopulationen (diaphysär vs. meta-/epiphysär vs. distal; impending vs. komplett; Myelom vs. solide Tumoren) systematisch vergleichen. Zentrale Endpunkte sollten NRS zu festgelegten Zeitpunkten (24 Stunden/7 Tage/6 Wochen), Patient-Reported Outcomes, Reoperationen, Materialversagen, echte postoperative Verweildauer sowie Radiotherapie-Timing umfassen (Terek et al., 2024; Hoban et al., 2022). Parallel gilt es, bildbasierte Biomechanik – insbesondere CT-gestützte Finite-Elemente-Analysen – zu validieren und in Indikationsmodelle zu integrieren, um die Prophylaxeschwellen am Humerus objektiver zu fassen (Hoban et al., 2022). Schließlich sollten onko-logistische Vorteile der Radioluzenz (Planbarkeit der Radiotherapie, Rehabilitationsdauer, Prozesszeiten) und gesundheitsökonomische Effekte systematisch erhoben werden (Wager und Cox, 2024).

4.13 Schlussfolgernde Gesamteinordnung

Die vorliegende Arbeit positioniert die photodynamische intramedulläre Stabilisation als effiziente und sichere Option in der Versorgung metastasen- bzw. myelombedingter Humerusläsionen – insbesondere bei diaphysären Morphologien und impending Frakturen. Kurzfristig lassen sich klinisch bedeutsame Analgesieeffekte erzielen (NRS-Rückgang von 6,9 auf 2,0) bei geringer perioperativer Belastung (kurze Schnitt-Naht-Zeit; sehr niedrige Transfusionsrate; keine postoperativen Infektionen in der Serie). Diese Resultate sind konsistent mit der externen Evidenz, darunter Fallserien und ein prospektiver Multicenter-Trial, die Verbesserungen von Schmerz und Funktion sowie organisationsökonomische Vorteile durch Radioluzenz berichten (Terek et al., 2024; Zoccali et al., 2024). Gleichwohl begrenzen morphologiespezifische Risiken – vor allem bei distalen Komplettfrakturen – und potenzielle Auswahl-/Machbarkeitsbias die unkritische Generalisierung. Heterogene Nachbehandlungsschemata und kurze Expositionszeiten in palliativen Kollektiven können Spätversagen unterschätzen. Daraus folgt eine selektive Indikationsstellung mit niedriger Schwelle zur Augmentation in Risiko-Konstellationen. Als roter Faden erweist sich die Prognosejustierung über den ECOG-Status, der eng mit dem Überleben assoziiert war und eine tragfähige Grundlage für Therapieentscheidungen, Studienstratifizierung und durch Patient-Reported Outcome getriebene Ergebnisbewertung bildet. In Summe entsteht das Bild einer konkurrenzfähigen, minimalinvasiven Stabilisationsoption mit klarem patientenzentriertem Nutzen und interdisziplinärer Anschlussfähigkeit, deren Wirksamkeit in geeigneten Indikationen etabliert, deren Optimierung (Subgruppenselektion, Nachbehandlung, Indikationsschwellen) jedoch Gegenstand zukünftiger Forschung ist (Terek et al., 2024; Hoban et al., 2022; Ramadan et al., 2023).

5. Zusammenfassung

Pathologische Frakturen des Humerus bei Patienten mit fortgeschrittenen Tumorerkrankungen stellen eine erhebliche klinische Herausforderung dar. Sie gehen mit massiven Schmerzen, funktionellen Einschränkungen und hoher Morbidität einher und verlangen nach operativen Stabilisationsverfahren, die primär palliativ ausgerichtet sind. Hauptziele sind Schmerzkontrolle, rascher Funktionserhalt sowie die Minimierung prozedurbedingter Belastungen. In diesem Kontext wurde die photodynamische intramedulläre Knochenstabilisation (IlluminOss®-System) als minimalinvasives Verfahren entwickelt, das durch seine Gewebeschonung, Rotationsstabilität und Radioluzenz potenzielle Vorteile gegenüber konventionellen Osteosyntheseverfahren bietet. Die vorliegende retrospektive, monozentrische Analyse untersuchte die Ergebnisse bei 41 pathologischen Humerusläsionen im palliativen Behandlungspfad.

Wichtigste Erkenntnisse

Die Auswertung belegt die substanzielle Wirksamkeit des Verfahrens im Hinblick auf die palliativen Kernziele. Ein ausgeprägter Analgesie-Effekt konnte dokumentiert werden: der präoperative mediane NRS-Schmerzscore von 6,9 fiel postoperativ auf 2,0 ab. Parallel dazu zeigte sich ein signifikanter funktioneller Zugewinn, messbar am Anstieg des MSTS-UE-Scores von median 31,7 % auf 66,7 %. Damit bestätigt sich, dass die Methode zu einer raschen Mobilisierung und deutlichen Verbesserung der Alltagsfunktion führt. Auch die Patientenzufriedenheit war hoch, was durch den TESS und ergänzende Patient-Reported Outcomes gestützt wird.

Darüber hinaus erwies sich das Verfahren als effizient: die mediane Schnitt-Naht-Zeit betrug 65 Minuten, ohne Zusatzosteosynthese sogar nur 61,5 Minuten. Die perioperative Morbidität war niedrig, Infektionen traten nicht auf, die Transfusionsrate war gering. Besonders hervorzuheben ist die Radioluzenz des Implantats, die eine problemlose Durchführung und präzise Planung adjuvanter Radiotherapie ermöglicht. Diese Eigenschaft verleiht der Methode einen entscheidenden Vorteil im onkologischen Versorgungspfad.

Limitationen

Die Untersuchung ist durch mehrere methodische Faktoren eingeschränkt. Das retrospektive Design, die begrenzte Fallzahl und die teilweise unvollständige Datendokumentation stellen die Hauptlimitationen dar. Hinzu kommen heterogene Nachbehandlungsprotokolle sowie nicht standardisierte Erhebungszeitpunkte, die eine Vergleichbarkeit einschränken. Auch die Erfassung des Allgemeinzustands erfolgte subjektiv und nicht validiert. Ein Auswahl- und Machbarkeitsbias ist nicht auszuschließen, da die Mehrheit der Fälle diaphysäre Läsionen betraf. Zudem lagen die Expositionszeiten im palliativen Setting naturgemäß kurz, was eine Beurteilung von Langzeiteffekten limitiert.

Klinisch bedeutsam sind die dokumentierten Implantatversager (Henderson Typ 3). Zwei frühe strukturelle Brüche verdeutlichen, dass die Monotherapie in bestimmten Konstellationen, insbesondere bei kompletten distalen Frakturen, an ihre Grenzen stößt. In diesen Fällen sollte frühzeitig über eine Augmentation durch zusätzliche Plattenosteosynthese nachgedacht werden.

Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen den Stellenwert der photodynamischen intramedullären Stabilisation als schnelle, effektive und gewebeschonende Option in der palliativen Tumororthopädie. Für die Zukunft erscheint es jedoch essenziell, die Indikationsgrenzen der Monotherapie präziser zu definieren. Standardisierte Messzeitpunkte – etwa 24 Stunden, 7 Tage und 6 Wochen postoperativ – könnten konsistente Vergleiche ermöglichen. Ebenso ist die systematische Erfassung der postoperativen Krankenhausverweildauer und des zeitlichen Verlaufs bis zur Radiotherapie notwendig, um die Integration in multimodale Therapiekonzepte noch besser zu evaluieren.

Auf Forschungsebene sollten randomisierte, multizentrische Studien die Überlegenheit der photodynamischen Stabilisation nicht nur bei drohenden Frakturen (impending fractures), sondern auch im Vergleich zu etablierten Verfahren wie intramedullärer Nagelung, Plattenosteosynthese oder Endoprothetik untersuchen. Neben klassischen Endpunkten wie Schmerz und Funktion sollten dabei auch domänenspezifische Patient-Reported Outcomes in den Vordergrund rücken. Ergänzend könnten bildba-

sierte Modelle – beispielsweise CT-gestützte Finite-Elemente-Analysen – die Risikostratifizierung pathologischer Frakturen verbessern und bestehende klinische Scores (z. B. Mirels-Score) sinnvoll ergänzen.

Schlussfolgerung

Die photodynamische intramedulläre Stabilisation stellt sich in dieser Untersuchung als effiziente, sichere und patientenzentrierte Methode dar, die zentrale palliative Ziele zuverlässig erreicht. Trotz methodischer Einschränkungen zeigen die Ergebnisse, dass dieses Verfahren einen wertvollen Baustein in der modernen Tumororthopädie darstellt. Die Weiterentwicklung standardisierter Studienprotokolle und die Integration in prospektive, randomisierte Studien sind entscheidend, um das volle Potenzial der Methode zu validieren und ihre Rolle im onkologischen Behandlungspfad langfristig zu festigen.

6. Literaturverzeichnis

- Alzobi OZ, Salman LA, Derbas J, Abudalou A, Hantouly AT, Ahmed G (2023). Epidemiology of proximal humerus fractures in Qatar. *European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology*, 33(7):3119–3124.
- Amen TB, Varady NH, Birir A, Hayden BL, Chen AF (2021). Morbidity and mortality of surgically treated pathologic humerus fractures compared to native humerus fractures. *J Shoulder Elbow Surg*, 30(8):1873–1880.
- Baertl S, Alt V, Rupp M (2021). Surgical enhancement of fracture healing – operative vs. nonoperative treatment. *Injury*, 52:S12–S17.
- Barlev A, Song X, Ivanov B, Setty V, Chung K (2010). Payer costs for inpatient treatment of pathologic fracture, surgery to bone, and spinal cord compression among patients with multiple myeloma or bone metastasis secondary to prostate or breast cancer. *J Manag Care Pharm*, 16(9):693–702. doi:10.18553/jmcp.2010.16.9.693.
- Baron JA, Barrett JA, Karagas MR (1996). The epidemiology of peripheral fractures. *Bone*, 18(3 Suppl):209S–213S. doi:10.1016/8756-3282(95)00504-8.
- Baron JA, Karagas M, Barrett J, Kniffin W, Malenka D, Mayor M et al. (1996). Basic epidemiology of fractures of the upper and lower limb among Americans over 65 years of age. *Epidemiology*, 7(6):612–8. doi:10.1097/00001648-199611000-00008.
- Batten TJ, Sin-Hidge C, Brinsden MD, Guyver PM (2018). Non-operative management of distal humerus fractures in the elderly: a review of functional outcomes. *European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology*, 28(1):23–27.
- Beazley JC, Baraza N, Jordan R, Modi CS (2017). Distal Humeral Fractures-Current Concepts. *Open Orthop J*, 11(1):1353–1363.
- Bedard G, Hoskin P, Chow E (2014). Overall response rates to radiation therapy for patients with painful uncomplicated bone metastases undergoing initial treatment and retreatment. *Radiotherapy and Oncology*, 112(1):125–127.
- Beeres FJP, van Veelen N, Houwert RM, Link BC, Heng M, Knobe M et al. (2022). Open plate fixation versus nailing for humeral shaft fractures: a meta-analysis and systematic review of randomised clinical trials and observational studies. *Eur J Trauma Emerg Surg*, 48(4):2667–2682.
- Van Bergen SH, Mahabier KC, Van Lieshout EMM, Van der Torre T, Notenboom CAW, Jawahier PA et al. (2023). Humeral shaft fracture: systematic review of non-operative and operative treatment. *Arch Orthop Trauma Surg*, 143(8):5035–5054.
- Bianchi S, Prato N, Martinoli C, Derchi LE (2006). *Shoulder Radiography. Imaging of the Shoulder*. Springer, Berlin, Heidelberg; 2006:3–13 doi:10.1007/3-540-30001-5_1.
- Bissell BT, Johnson RJ, Shafritz AB, Chase DC, Ettlinger CF (2008). Epidemiology and risk factors of humerus fractures among skiers and snowboarders.
- Bonnaire F, Bula P (2010). Distale Humerusfrakturen: Diagnostik, Klassifikation und Behandlungsstrategie. *Trauma Berufskrankh*, 12(SUPPL. 2):96–103.
- Van den Brande R, MJ Cornips E, Peeters M, Ost P, Billiet C, Van de Kelft E (2022). Epidemiology of spinal metastases, metastatic epidural spinal cord compression and pathologic vertebral compression fractures in patients with solid tumors: A systematic review. *J Bone Oncol*, 35.

- Brooks CH, Revell WJ, Heatley FW (1993). Vascularity of the humeral head after proximal humeral fractures. An anatomical cadaver study. *J Bone Joint Surg Br*, 75(1):132–6. doi:10.1302/0301-620X.75B1.8421010.
- Burkhardt KJ, Dietz SO, Bastian L, Thelen U, Hoffmann R, Müller LP (2013). Behandlung der proximalen Humerusfraktur des Erwachsenen. *Dtsch Arztebl Int*, 110(35–36):591–597.
- Campillo-Recio D, Jimeno Ariztia M, Flox Benítez G, Marco Martínez J, Vicente Martín C, Plaza Canteli S (2019). Metastatic spinal cord compression: Incidence, epidemiology and prognostic factors. *Rev Clin Esp*, 219(7):386–389.
- Castagno AA, Shuman WP, Kilcoyne RF, Haynor DR, Morris ME, Matsen FA (1987). Complex fractures of the proximal humerus: role of CT in treatment. *Radiology*, 165(3):759–62. doi:10.1148/radiology.165.3.3685356.
- Challa S, Agarwal-Harding KJ, Levy P, Barr-Walker J, Sabatini CS (2020). Supracondylar humerus fractures in low- and lower middle-income countries: a scoping review of the current epidemiology, treatment modalities, and outcomes. *Int Orthop*, 44(11):2443–2448.
- Chen S-J, Liao W-C, Huang K-H, Lin C-L, Tsai W-C, Kung P-T et al. (2016). Chronic obstructive pulmonary disease is a strong independent risk factor for osteoporosis and pathologic fractures: a population-based cohort study. *QJM*, 109(1):70. doi:10.1093/qjmed/hcv065.
- Chen B-K, Tai T-H, Lin S-H, Chen K-H, Huang Y-M, Chen C-Y (2024). Intramedullary Nail vs. Plate Fixation for Pathological Humeral Shaft Fracture: An Updated Narrative Review and Meta-Analysis of Surgery-Related Factors. *J Clin Med*, 13(3). doi:10.3390/jcm13030755.
- Cirstoiu C, Cretu B, Iordache S, Popa M, Serban B, Cursaru A (2022). Surgical management options for long-bone metastasis. *EFORT Open Rev*, 7(3):206–213.
- Codman EA (1934). The shoulder: rupture of the supraspinatus tendon and other lesions in or about the subacromial bursa. Boston: Thomas Todd.
- Coleman RE (1997). Skeletal complications of malignancy. *Cancer*, 80(8 Suppl):1588–94. doi:10.1002/(sici)1097-0142(19971015)80:8+<1588::aid-cnrcr9>3.3.co;2-z.
- Coleman RE, Roodman, Smith, Body, Suva, Vessella (2006). Clinical features of metastatic bone disease and risk of skeletal morbidity. *Clinical Cancer Research*, 12(20 PART 2).
- Court-Brown CM, Duckworth AD, Ralston S, McQueen MM (2019). The relationship between obesity and fractures. *Injury*, 50(8):1423–1428.
- Culemann U (2016). Shaft and distal humeral fractures. *Trauma Berufskrankh*, 18:468–473.
- Curran D, Maravic M, Kiefer P, Tochon V, Fardellone P (2010). Epidemiology of osteoporosis-related fractures in France: A literature review. *Joint Bone Spine*, 77(6):546–551.
- Cushman TR, Shirvani S, Khan M, Kumar R (2018). The effect of early versus delayed radiation therapy on length of hospital stay in the palliative setting. *Ann Palliat Med*, 7(4):368–372. doi:10.21037/apm.2018.05.07.
- Dey Hazra RO, Lill H, Jensen G, Imrecke J, Ellwein A (2018). Frakturspezifische Therapiekonzepte der distalen Humerusfraktur. *Obere Extremität*, 13(1):23–32.
- DiCaprio MR, Murtaza H, Palmer B, Evangelist M (2022). Narrative review of the epidemiology, economic burden, and societal impact of metastatic bone disease. *Ann Jt*, 7.
- Dickens LT, Derman B, Alexander JT (2023). Endocrine Society Hypercalcemia of Malignancy Guidelines. *JAMA Oncol*, 9(3):430–431.

- Dubberley JH, Faber KJ, Macdermid JC, Patterson SD, King GJW (2006). Outcome after open reduction and internal fixation of capitellar and trochlear fractures. *J Bone Joint Surg Am*, 88(1):46–54. doi:10.2106/JBJS.D.02954.
- Duparc F, Muller JM, Fréger P (2001). Arterial blood supply of the proximal humeral epiphysis. *Surg Radiol Anat*, 23(3):185–90. doi:10.1007/s00276-001-0185-9.
- Enneking WF, Dunham W, Gebhardt MC, Malawar M, Pritchard DJ (1993). A system for the functional evaluation of reconstructive procedures after surgical treatment of tumors of the musculoskeletal system. *Clin Orthop Relat Res*, (286):241–6.
- Farii H, McChesney G, S. Patel S, Satcher R, Frink S, Moon B et al. (2024). Device-related clinical outcomes of the Photodynamic Bone Stabilization System in the treatment of pathologic humerus fractures: A Meta-Analysis of The Literature. *Med Res Arch*, 13(1). doi:10.18103/mra.v13i1.6255.
- Flemming JE, Beals RK (1986). Pathologic fracture of the humerus. *Clin Orthop Relat Res*, (203):258–60.
- Freyschmidt J (2008). Die pathologische Fraktur aus Sicht des Radiologen. *Trauma Berufskrankh*, 10(SUPPL. 2):165–166.
- Gausepohl T, Pennig D, Heck S, Gick S, Vegt PA, Block JE (2017). Effective management of bone fractures with the IlluminOss® photodynamic bone stabilization system: Initial clinical experience from the european union registry. *Orthop Rev (Pavia)*, 9(1):5–8.
- Gebhart M, Dequanter D, Vandeweyer E (2001). Metastatic involvement of the humerus: a retrospective study of 51 cases. *Acta Orthop Belg*, 67(5):456–63.
- Gruson KI, Ruchelsman DE, Teiwani NC (2008). Isolated tuberosity fractures of the proximal humeral: Current concepts. *Injury*, 39(3):284–298.
- Guzik G (2018). Analysis of factors delaying the surgical treatment of patients with neurological deficits in the course of spinal metastatic disease. *BMC Palliat Care*, 17(1):44. doi:10.1186/s12904-018-0295-3.
- Habermeyer P (1997). [Fracture of the head of the humerus]. *Unfallchirurg*, 100(10):820–37. doi:10.1007/s001130050199.
- Habermeyer P, Schweiberer L (1989). [Fractures of the proximal humerus]. *Orthopade*, 18(3):200–7.
- Harrington KD (1986). Impending pathologic fractures from metastatic malignancy: evaluation and management. *Instr Course Lect*, 35:357–81.
- Hellman S, Weichselbaum RR (1995). Oligometastases. *J Clin Oncol*, 13(1):8–10.
- Hemmann P, Ziegler P, Konrads C, Ellmerer A, Klopfer T, Schreiner AJ et al. (2020). Trends in fracture development of the upper extremity in Germany - A population-based description of the past 15 years. *J Orthop Surg Res*, 15(1).
- Henderson ER, Groundland JS, Pala E, Dennis JA, Wooten R, Cheong D et al. (2011). Failure mode classification for tumor endoprostheses: Retrospective review of five institutions and a literature review. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 93(5):418–429.
- Hettrich CM, Boraiah S, Dyke JP, Neviasser A, Helfet DL, Lorch DG (2010). Quantitative assessment of the vascularity of the proximal part of the humerus. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 92(4):943–948.
- Hill T, D'Alessandro P, Murray K, Yates P (2015). Prognostic factors following pathological fractures. *ANZ J Surg*, 85(3):159–163.

- Hoban KA, Downie S, Adamson DJA, MacLean JG, Cool P, Jariwala AC (2022). Mirels' score for upper limb metastatic lesions: do we need a different cutoff for recommending prophylactic fixation? *JSES Int*, 6(4):675–681.
- Hoellwarth JS, Weiss K, Goodman M, Heyl A, Hankins ML, McGough R (2020). Evaluating the re-operation rate and hardware durability of three stabilizing implants for 105 malignant pathologic humerus fractures. *Injury*, 51(4):947–954.
- Høidrup S, Prescott E, Sørensen TI, Gottschau A, Lauritzen JB, Schroll M et al. (2000). *Tobacco smoking and risk of hip fracture in men and women*.
- Hu Y, Wu T, Li B, Huang Y, Huang C, Luo Y (2022). Efficacy and Safety Evaluation of Intramedullary Nail and Locking Compression Plate in the Treatment of Humeral Shaft Fractures: A Systematic Review and Meta-analysis. *Comput Math Methods Med*, 2022:5759233. doi:10.1155/2022/5759233.
- Hufeland M, Hamed G, Kubo H, Pilge H, Krauspe R, Filler T et al. (2019). Blood supply in the bicipital groove: A histological analysis. *Orthop Rev (Pavia)*, 11(1):34–37.
- Hurley ET, Wickman J, Crook BS, Cabell G, Rodriguez K, Boadi P et al. (2023). Intramedullary nailing vs. open reduction–internal fixation for humeral shaft fractures: a meta-analysis of randomized controlled trials. *J Shoulder Elbow Surg*, 32(12):2567–2574.
- Ibrahim T, Flamini E, Fabbri L, Serra P, Mercatali L, Ricci R et al. (2009). Multidisciplinary approach to the treatment of bone metastases: Osteo-Oncology Center, a new organizational model. *Tumori*, 95(3):291–7. doi:10.1177/030089160909500304.
- Iglesias-Rodríguez S, Domínguez-Prado DM, García-Reza A, Fernández-Fernández D, Pérez-Alfonso E, García-Piñeiro J et al. (2021). Epidemiology of proximal humerus fractures. *J Orthop Surg Res*, 16(1).
- Jairam V, Lee V, Yu JB, Park HS (2020). Nationwide Patterns of Pathologic Fractures among Patients Hospitalized with Bone Metastases. *American Journal of Clinical Oncology: Cancer Clinical Trials*, 43(10):720–726.
- Janssen SJ, van Dijke M, Lozano-Calderón SA, Ready JE, Raskin KA, Ferrone ML et al. (2016). Complications after surgery for metastatic humeral lesions. *J Shoulder Elbow Surg*, 25(2):207–215.
- Job M, Holt T, Bernard A (2017). Reducing radiotherapy waiting times for palliative patients: The role of the Advanced Practice Radiation Therapist. *J Med Radiat Sci*, 64(4):274–280. doi:10.1002/jmrs.243.
- Jupiter JB, Mehne DK (1992). Fractures of the distal humerus. *Orthopedics*, 15(7):825–33. doi:10.3928/0147-7447-19920701-07.
- Kanis JA, Johansson H, Oden A, Johnell O, De Laet C, Joseph Melton L et al. (2004). A meta-analysis of prior corticosteroid use and fracture risk. *Journal of Bone and Mineral Research*, 19(6):893–899.
- Kannus P, Palvanen M, Niemi S, Parkkari J, Järvinen M, Vuori I (2000). Osteoporotic fractures of the proximal humerus in elderly Finnish persons: Sharp increase in 1970-1998 and alarming projections for the new millennium. *Acta Orthop Scand*, 71(5):465–470.
- Karl JW, Olson PR, Rosenwasser MP (2015). The Epidemiology of Upper Extremity Fractures in the United States, 2009. *J Orthop Trauma*, 29(8):e242-4. doi:10.1097/BOT.0000000000000312.
- Kask G, Uimonen MM, Barner-Rasmussen I, Tukiainen EJ, Blomqvist C, Repo JP (2021). Further validation of the Toronto extremity salvage score for lower extremity soft tissue sarcoma based on Finnish patients. *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery*, 74(1):71–78.

- Katipally RR, Olson AC, Chmura SJ (2022). Flipping the Null: Lessons From Breast Cancer and Re-calibrating Expectations in Oligometastases. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 114(5):840–842. doi:10.1016/j.ijrobp.2022.09.055.
- Kawai A, Kadota H, Yamaguchi U, Morimoto Y, Ozaki T, Beppu Y (2005). Blood loss and transfusion associated with musculoskeletal tumor surgery. *J Surg Oncol*, 92(1):52–58.
- Kendal JK, Heard BJ, Abbott AG, Moorman SW, Saini R, Puloski SKT et al. (2022). Does surgical technique influence the burden of lung metastases in patients with pathologic long bone fractures? *BMC Musculoskelet Disord*, 23(1).
- Khatib O, Onyekwelu I, Zuckerman JD (2014). The incidence of proximal humeral fractures in New York State from 1990 through 2010 with an emphasis on operative management in patients aged 65 years or older. *J Shoulder Elbow Surg*, 23(9):1356–1362.
- Klug A, Gramlich Y, Wincheringer D, Schmidt-Horlohé K, Hoffmann R (2019). Trends in surgical management of proximal humeral fractures in adults: a nationwide study of records in Germany from 2007 to 2016. *Arch Orthop Trauma Surg*, 139(12):1713–1721.
- Kobryn A, Nian P, Baidya J, Li TL, Maheshwari A V. (2023). Intramedullary Nailing with and without the Use of Bone Cement for Impending and Pathologic Fractures of the Humerus in Multiple Myeloma and Metastatic Disease. *Cancers (Basel)*, 15(14).
- Kristiansen B, Barfod G, Bredesen J, Erin-madsen J, Grum B, Horsnaes MW et al. (1987). Epidemiology of proximal humeral fractures. *Acta Orthop*, 58(1):75–77.
- Lauder A, Richard MJ (2020). Management of distal humerus fractures. *European Journal of Orthopaedic Surgery and Traumatology*, 30(5):745–762.
- Launonen AP, Lepola V, Saranko A, Flinkkilä T, Laitinen M, Mattila VM (2015). Epidemiology of proximal humerus fractures. *Arch Osteoporos*, 10(1):1–5.
- Leitlinienkommission der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie (2021). *Oberarmschaftfraktur. (AWMF-Nr. 187-038)*.
- Leitlinienkommission der Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie e. V. (2017). *Oberarmkopffraktur. (AWMF-Nr. 012-023)*. Göttingen.
- Lodwick GS (1965). A probabilistic approach to the diagnosis of bone tumors. *Radiol Clin North Am*, 3(3):487–97.
- Lodwick GS, Wilson AJ, Farrell C, Virtama P, Smeltzer FM, Dittrich F (1980). Estimating rate of growth in bone lesions: observer performance and error. *Radiology*, 134(3):585–90. doi:10.1148/radiology.134.3.6986621.
- Lotzien S, Hoberg C, Rausch V, Rosteius T, Schildhauer TA, Gessmann J (2019). Open reduction and internal fixation of humeral midshaft fractures: Anterior versus posterior plate fixation. *BMC Musculoskelet Disord*, 20(1).
- Lutz S, Berk L, Chang E, Chow E, Hahn C, Hoskin P et al. (2011). Palliative radiotherapy for bone metastases: An ASTRO evidence-based guideline. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 79(4):965–976.
- Mäder M, Tille E, Nowotny J, Kamin K, Schaser K-D (2023). Therapie von Humerusschaftfrakturen. *Z Orthop Unfall*, 161(04):455–472. doi:10.1055/a-1958-6044.
- Mantyh PW (2014). Bone cancer pain: From mechanism to therapy. *Curr Opin Support Palliat Care*, 8(2):83–90.
- Marshall RA, Mandell JC, Weaver MJ, Ferrone M, Sodickson A, Khurana B (2018). Imaging features and management of stress, atypical, and pathologic fractures. *Radiographics*, 38(7):2173–2192.

- Mattila H, Keskitalo T, Simons T, Ibounig T, Rämö L (2023). Epidemiology of 936 humeral shaft fractures in a large Finnish trauma center. *J Shoulder Elbow Surg*, 32(5):e206–e215.
- Maurer F, Ambacher T, Volkmann R, Weller S (1995). Pathologische Frakturen: Diagnostische und therapeutische Überlegungen sowie Behandlungsergebnisse. *Langenbecks Arch Chir*, 380(4). doi:10.1007/BF00207909.
- McKee MD, Jupiter JB, Bamberger HB (1996). Coronal shear fractures of the distal end of the humerus. *J Bone Joint Surg Am*, 78(1):49–54. doi:10.2106/00004623-199601000-00007.
- Meinberg EG, Agel J, Roberts CS, Karam MD, Kellam JF (2018). Fracture and Dislocation Classification Compendium-2018. *J Orthop Trauma*, 32:S1–S170.
- Menck J, Döbler A, Döhler JR (1997). [Vascularization of the humerus]. *Langenbecks Arch Chir*, 382(3):123–7.
- Meyer C, Alt V, Hassanin H, Heiss C, Stahl JP, Giebel G et al. (2005). The arteries of the humeral head and their relevance in fracture treatment. *Surgical and Radiologic Anatomy*, 27(3):232–237.
- van Middendorp JJ, Kazacsay F, Lichtenhahn P, Renner N, Babst R, Melcher G (2011). Outcomes following operative and non-operative management of humeral midshaft fractures: A prospective, observational cohort study of 47 patients. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 37(3):287–296.
- Milano MT, Biswas T, Simone CB, Lo SS (2021). Oligometastases: history of a hypothesis. *Ann Palliat Med*, 10(5):5923–5930. doi:10.21037/apm.2020.03.31.
- Mirels H (1989). Metastatic disease in long bones. A proposed scoring system for diagnosing impending pathologic fractures. *Clin Orthop Relat Res*, (249):256–64.
- Miwa S, Yamamoto N, Hayashi K, Takeuchi A, Igarashi K, Tsuchiya H (2022). Surgical Site Infection after Bone Tumor Surgery: Risk Factors and New Preventive Techniques. *Cancers (Basel)*, 14(18).
- Moayeri A, Mohamadpour M, Mousavi SF, Shirzadpour E, Mohamadpour S, Amraei M (2017). Fracture risk in patients with type 2 diabetes mellitus and possible risk factors: A systematic review and meta-analysis. *Ther Clin Risk Manag*, 13:455–468.
- Moura DL, Alves F, Fonseca R, Freitas J, Casanova J (2019). Treatment of pathological humerus-shaft tumoral fractures with rigid static interlocking intramedullary nail – 22 years of experience. *Rev Bras Ortop (Sao Paulo)*, 54(2):149–155.
- Narazaki DK, de Alverga Neto CC, Baptista AM, Caiero MT, de Camargo OP (2006). Prognostic factors in pathologic fractures secondary to metastatic tumors. *Clinics (Sao Paulo)*, 61(4):313–20. doi:10.1590/s1807-59322006000400007.
- Neer CS (2002). Four-segment classification of proximal humeral fractures: Purpose and reliable use. *J Shoulder Elbow Surg*, 11(4):389–400.
- Neer CS (2006). THE CLASSIC: Displaced Proximal Humeral Fractures. *Clin Orthop Relat Res*, 442:77–82. doi:10.1097/01.blo.0000198718.91223.ca.
- Oliveira MB dos R, Marques B de C, Matos RA, Fontenelle CR da C, Mello FC de Q, Paschoal MEM (2018). Pathological fractures due to bone metastases from lung cancer: Risk factors and survival. *Acta Ortop Bras*, 26(6):388–393.
- Patnaik S, Turner J, Inaparthi P, Kieffer WKM (2020). Metastatic spinal cord compression. *Br J Hosp Med*, 81(4):1–10.

Pennig HD (2023). *Morphometrische Analyse zur Funktion eines innovativen, individuell anpassbaren Kunststoffimplantats für die Stabilisierung proximaler Humerusfrakturen - Eine anatomische Studie.* Köln: Universität Köln.

Piccioli A, MacCauro G, Rossi B, Scaramuzzo L, Frenos F, Capanna R (2010). Surgical treatment of pathologic fractures of humerus. *Injury*, 41(11):1112–1116.

Pidhorz L (2015). Acute and chronic humeral shaft fractures in adults. *Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research*, 101(1):S41–S49.

De la Pinta C (2020). SBRT in non-spine bone metastases: a literature review. *Medical Oncology*, 37(12).

Pintova S, Holcombe RF, Blacksburn S, Friedlander P (2015). Impact of inpatient radiation on length of stay and health care costs. *J Community Support Oncol*, 13(11):399–404. doi:10.12788/jcso.0183.

Poirier J-L, Wurtz LD, Collier CD (2023). Increased Number of Medical Comorbidities Associated With Increased Risk of Presenting With Pathological Femur Fracture in Metastatic Bone Disease. *Iowa Orthop J*, 43(1):87–93.

Ramadan S, Arifin AJ, Nguyen TK (2023). The Role of Post-Operative Radiotherapy for Non-Spine Bone Metastases (NSBMs). *Cancers (Basel)*, 15(13). doi:10.3390/cancers15133315.

Rovere G, Meschini C, Piazza P, Messina F, Caredda M, De Marco D et al. (2022). Proximal humerus fractures treatment in adult patients with bone metastasis. *Eur Rev Med Pharmacol Sci*, 26(1 Suppl):100–105. doi:10.26355/eurev_202211_30288.

Rueger JM, Janssen A, Barvencik F, Briem D (2005). Distale Humerusfraktur. *Unfallchirurg*, 108(1):49–58.

Rupp M, Walter N, Pfeifer C, Lang S, Kerschbaum M, Krusch W et al. (2021). Originalarbeit: Inzidenz von Frakturen in der Erwachsenenpopulation in Deutschland. *Dtsch Arztebl Int*, 118(40):665–669.

Samelis P V, Papagrigorakis E, Ellinas S (2019). Role of the Posterior Fat Pad Sign in Treating Displaced Extension Type Supracondylar Fractures of the Pediatric Elbow Using the Blount Method. *Cureus*.

Sanders TG, Jersey SL (2005). Conventional radiography of the shoulder. *Semin Roentgenol*, 40(3):207–222.

Sarahrudi K, Wolf H, Funovics P, Pajenda G, Hausmann JT, Vécsei V (2009). Surgical treatment of pathological fractures of the shaft of the humerus. *Journal of Trauma - Injury, Infection and Critical Care*, 66(3):789–794.

Sarmiento A, Kinman PB, Galvin EG, Schmitt RH, Phillips JG (1977). Functional bracing of fractures of the shaft of the humerus. *J Bone Joint Surg Am*, 59(5):596–601.

Schermann H, Gortzak Y, Kollender Y, Dadia S, Trabelsi N, Yosibash Z et al. (2020). Patient-specific computed tomography-based finite element analysis: a new tool to assess fracture risk in benign bone lesions of the femur. *Clinical Biomechanics*, 80.

Schittko A (2003). Humerusschaftfrakturen. *Unfallchirurg*, 106(2):145–160.

Schmidbauer G, Ecke H (1992). [Diagnosis and therapy of metastasis-induced pathologic fractures]. *Unfallchirurgie*, 18(4):203–12. doi:10.1007/BF02588181.

Schneider ALC, Williams EK, Brancati FL, Blecker S, Coresh J, Selvin E (2013). Diabetes and risk of fracture-related hospitalization: The atherosclerosis risk in communities study. *Diabetes Care*, 36(5):1153–1158.

Schulz T, Prietzel T, Kluge R, Schneider JP, Tannapfel A, Kahn T (2006). Effiziente Diagnostik pathologischer Frakturen. *Röntgenpraxis*, 56(3):75–92.

Siggeirsdottir K, Aspelund T, Jonsson BY, Mogensen B, Gudmundsson EF, Gudnason V et al. (2014). Epidemiology of fractures in Iceland and secular trends in major osteoporotic fractures 1989-2008. *Osteoporosis International*, 25(1):211–219.

Singer FR (2000). *Paget's Disease of Bone*. MDText.com, Inc

Slatkin N, Zaki N, Wang S, Louie J, Sanga P, Kelly KM et al. (2019). Fulranumab as Adjunctive Therapy for Cancer-Related Pain: A Phase 2, Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled, Multicenter Study. *Journal of Pain*, 20(4):440–452.

Smith MR, Coleman RE, Klotz L, Pittman K, Milecki P, Ng S et al. (2015). Denosumab for the prevention of skeletal complications in metastatic castration-resistant prostate cancer: Comparison of skeletal-related events and symptomatic skeletal events. *Annals of Oncology*, 26(2):368–374.

So A, Chin J, Fleshner N, Saad F (2012). Management of skeletal-related events in patients with advanced prostate cancer and bone metastases: Incorporating new agents into clinical practice. *Can Urol Assoc J*, 6(6):465–70. doi:10.5489/cuaj.12149.

Soeharno H, Povegliano L, Choong PF (2018). Multimodal Treatment of Bone Metastasis-A Surgical Perspective. *Front Endocrinol (Lausanne)*, 9(SEP):518. doi:10.3389/fendo.2018.00518.

Soldatos T, Chalian M, Attar S, McCarthy EF, Carrino JA, Fayad LM (2013). Imaging differentiation of pathologic fractures caused by primary and secondary bone tumors. *Eur J Radiol*, 82(1).

Song JQ, Deng XF, Wang YM, Wang XB, Li X, Yu B (2015). Operative vs. nonoperative treatment for comminuted proximal humeral fractures in elderly patients: A current meta-analysis. *Acta Orthop Traumatol Turc*, 49(4):345–353.

Sonmez M, Akagun T, Topbas M, Cobanoglu U, Sonmez B, Yilmaz M et al. (2008). Effect of pathologic fractures on survival in multiple myeloma patients: a case control study. *J Exp Clin Cancer Res*, 27(1):11. doi:10.1186/1756-9966-27-11.

Sumrein BO, Huttunen TT, Launonen AP, Berg HE, Felländer-Tsai L, Mattila VM (2017). Proximal humeral fractures in Sweden—a registry-based study. *Osteoporosis International*, 28(3):901–907.

Tat J, Bodansky D, Sheth U, Ung Y, Whyne C, Nam D (2023). Predicting Pathological Fractures at Metastatic Humeral Lesions. *JBJS Open Access*, 8(2).

Tatar Z, Soubrier M, Dillies AF, Verrelle P, Boisgard S, Lapeyre M (2014). Assessment of the risk factors for impending fractures following radiotherapy for long bone metastases using CT scan-based virtual simulation: a retrospective study. *Radiat Oncol*, 9:227.

Terek RM, IlluminOss Study Group, McGough R, Fabbri N, Cheung F, Brigman B et al. (2024). IlluminOss photodynamic bone stabilization system improves pain and function in the treatment of humeral metastatic disease. *Bone Joint J*, 106-B(12):1485–1492. doi:10.1302/0301-620X.106B12.BJJ-2023-1089.R2.

Throckmorton TW, Zarkadas PC, Steinmann SP (2007). Distal Humerus Fractures. *Hand Clin*, 23(4):457–469.

UI Islam S, Glover AW, Waseem M (2017). Challenges and Solutions in Management of Distal Humerus Fractures. *Open Orthop J*, 11(1):1292–1307.

Updegrave GF, Mourad W, Abboud JA (2018). Humeral shaft fractures. *J Shoulder Elbow Surg*, 27(4):e87–e97.

Vegt P, Muir JM, Block JE (2014). The photodynamic bone stabilization system: A minimally invasive, percutaneous intramedullary polymeric osteosynthesis for simple and complex long bone fractures. *Medical Devices: Evidence and Research*, 7:453–461.

Vegt P, Verbruggen J, Gausepohl T, Vroemen JP, Schafer W, Pennig D et al. (2018). The Photodynamic Bone Stabilization System in the Treatment of Humerus Fractures: A Prospective Clinical Trial. *Cureus*.

Verspoor FGM, Hannink G, Parry M, Jeys L, Stevenson JD (2023). The Importance of Awaiting Biopsy Results in Solitary Pathological Proximal Femoral Fractures : Do We Need to Biopsy Solitary Pathological Fractures? *Ann Surg Oncol*, 30(12):7882–7891.

Wager E, Cox C, International Comparison of Health Systems. In Altman, Drew (Editor), *Health Policy 101*, (KFF, October 2024) <https://www.kff.org/health-policy-101-international-comparison-of-health-systems/> (24/09/2025 accessed).

Warnhoff M, Lill H, Jensen G, Ellwein A, Dey Hazra RO (2019). Proximal humeral fractures—what is new? *Obere Extremität*, 14(1):9–17.

Watson JJ, Bellringer S, Phadnis J (2020). Coronal shear fractures of the distal humerus: Current concepts and surgical techniques. *Shoulder Elbow*, 12(2):124–135.

Wu K, Lin T, Lee CH (2023). Intramedullary nailing versus cemented plate for treating metastatic pathological fracture of the proximal humerus: a comparison study and literature review. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, 24(1).

Wuennemann F, Kintzelé L, Weber MA, Kauczor HU, Rehnitz C (2020). Radiologic diagnosis of pathologic fractures. *Radiologe*, 60(6):498–505.

Yazawa Y, Frassica FJ, Chao EY, Pritchard DJ, Sim FH, Shives TC (1990). Metastatic bone disease. A study of the surgical treatment of 166 pathologic humeral and femoral fractures. *Clin Orthop Relat Res*, (251):213–9.

Zajęczkowska R, Kocot-Kępska M, Leppert W, Wordliczek J (2019). Bone pain in cancer patients: Mechanisms and current treatment. *Int J Mol Sci*, 20(23).

Zlotolow DA, Catalano LW, Barron OA, Glickel SZ (2006). Surgical exposures of the humerus. *J Am Acad Orthop Surg*, 14(13):754–65. doi:10.5435/00124635-200612000-00007.

Zoccali C, Attala D, Pugliese M, di Uccio AS, Baldi J (2021). The IlluminOss® photodynamic bone stabilization system for pathological osteolyses and fractures of the humerus: indications, advantages and limits in a series of 12 patients at 24 months of minimum follow-up. *BMC Musculoskelet Disord*, 22(1).

de Zwart H, Weise K (2006). Pathologische Frakturen bei Knochenmetastasen. *OP-Journal*, 22(1):40–44. doi:10.1055/s-2007-979248.

7. Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Alle Röntgenaufnahmen wurden im Rahmen der klinischen Betreuung der Patient:innen durch die Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie Universitätsmedizin Mainz erstellt und für die vorliegende Arbeit verwendet.

Tabelle 1. Radiologische Typika pathologischer Frakturen (Schulz et al., 2006; Freyschmidt, 2008; Marshall et al., 2018). Seite 7

Tabelle 2. Mirels-Score zur Risikovorhersage einer pathologischen Fraktur durch eine Knochenmetastase. Seite 10

Abbildung 1. Schematische Darstellung eines Humerus mit einliegendem Implantat bestehend aus Ballon sowie mittels Lichtquelle ausgehärtetem Polymer, Abbildung aus „Humerus Surgical Technique Quick Reference Guide, 2019, IlluminOss Medical Inc“. Seite 21

Abbildung 2. Übersicht der Geschlechterverteilung (männlich/weiblich) nach dekadischen Alterskohorten bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41. Seite 22

Abbildung 3. Überleben in Monaten in Abhängigkeit des ECOG Performance Status bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=39. Seite 23

Abbildung 4. Vergleich des Überlebens in Monaten zwischen ECOG 0-2 und ECOG 3-4 bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, ungepaarter t-Test, n=39. Seite 24

Abbildung 5. Übersicht über den präoperativen Allgemeinzustand bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur in den Abstufungen gut, mäßig und schlecht, n=28. Seite 25

Abbildung 6. Übersicht über die Symptome bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, Mehrfachnennung möglich, n=41. Seite 26

Abbildung 7a. Röntgenbild des Oberarms rechts im anterior-posterioren Strahlengang, welches eine frakturgefährdete pathologische Osteolyse (Pfeilmarkierung) bei einer 76 Jahre alten Patientin mit Mamma-Karzinom zeigt. Seite 27

Abbildung 7b. Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen Strahlengang, welches eine frakturgefährdete pathologische Osteolyse (Pfeilmarkierung) bei einer 76 Jahre alten Patientin mit Mamma-Karzinom zeigt. Seite 27

Abbildung 8a. Röntgenbild des Oberarms links im anterior-posterioren Strahlengang, welches eine pathologische Fraktur (Pfeilmarkierung) bei einem 86 Jahre alten Patienten mit Prostata-Karzinom zeigt. Seite 28

Abbildung 8b. Röntgenbild des Oberarms links im axialen Strahlengang, welches eine pathologische Fraktur (Pfeilmarkierung) bei einem 86 Jahre alten Patienten mit Prostata-Karzinom zeigt. Seite 28

Abbildung 9. Röntgenbild des Oberarms rechts im posterior-anterioren Strahlengang, welches eine pathologische Fraktur (Pfeilmarkierung) bei einem 66 Jahre alten Patienten mit Nierenzellkarzinom zeigt. Seite 29

Abbildung 10. Übersicht über die Lokalisation der Fraktur bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur in den Abstufungen proximal, Schaft und distal, n=41. Seite 30

Abbildung 11. Übersicht über die Körperseite der Fraktur bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41. Seite 30

Abbildung 12. Übersicht über Anzahl und Art des Primarius bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41. Seite 31

Abbildung 13. Übersicht über Anzahl und Art der zusätzlichen Metastasen bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41. Seite 32

Abbildung 14. Übersicht über Anzahl und Art der weiteren Knochenmetastasen bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=41. Seite 33

Abbildung 15a. Röntgenbild des Oberarms rechts im anterior-posterioren Strahlengang nach Versorgung einer frakturgefährdeten Osteolyse mittels photodynamischer Knochenstabilisation, Patientin siehe Abbildung 6a/6b. Seite 34

Abbildung 15b. Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen Strahlengang nach Versorgung einer frakturgefährdeten Osteolyse mittels photodynamischer Knochenstabilisation, Patientin siehe Abbildung 7a/7b. Seite 35

Abbildung 16. Übersicht über das Nachbehandlungsschema nach photodynamischer Stabilisation einer pathologischen Humerusfraktur in den Abstufungen frei-funktionelle Belastung, schmerzadaptierte Vollbelastung und Oberarmcastschiene, n=41. Seite 36

Abbildung 17. Vergleich des präoperativen und postoperativen Wertes auf der NRS nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, gepaarter t-Test, n=28. Seite 37

Abbildung 18. Vergleich des präoperativen und postoperativen Wertes des MSTS-UE nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, gepaarter t-Test, n=26. Seite 38

Abbildung 19. Vergleich des präoperativen und postoperativen Wertes des TESS nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, gepaarter t-Test, n=26. Seite 41

Abbildung 20. Überleben in Monaten nach photodynamischer Stabilisation bei Patienten mit pathologischer Humerusfraktur, n=33. Seite 43

Abbildung 21a. Röntgenbild des Oberarms rechts im anterior-posterioren Strahlengang mit pathologischer Fraktur des Humerusschaftes (Pfeilmarkierung). Seite 44

Abbildung 21b. Intraoperative Bildgebung nach Versorgung einer pathologischen Fraktur des Humerusschaftes mittels photodynamischer Knochenstabilisation und zusätzlicher Schraubenosteosynthese. Seite 44

Abbildung 22a und 22b. Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen und anterior-posterioren Strahlengang nach photodynamischer Knochenstabilisation und zusätzlichen Schraubenosteosynthese einer pathologischen Humerusschaftfraktur. Seite 45

Abbildung 23a und 23b. Röntgenbild des Oberarms rechts im lateralen und anterior-posterioren Strahlengang mit Bild einer Refraktur sowie Materialbruch der photodynamischen Knochenstabilisation. Seite 45

Abbildung 24a und 24b. Intraoperative Bildgebung im anterior-posterioren sowie lateralen Strahlengang nach Versorgung der Refraktur mittels Plattenosteosynthese. Seite 46

Abbildung 25. Ausschnitt des Oberarms rechts aus der Übersichtsaufnahme einer Computertomographie nach Versorgung der Refraktur mittels Plattenosteosynthese. Seite 46

8. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Frank Traub für die Überlassung des Promotionsthemas, die stets konstruktive Zusammenarbeit sowie seine herausragende Betreuung. Er stand mir während des gesamten Promotionsvorhabens mit großem Engagement, fachlicher Kompetenz und viel Geduld zur Seite. Für seine kontinuierliche Unterstützung und die Zeit, die er sich für meine Anliegen genommen hat, bin ich ihm zu tiefem Dank verpflichtet. Ohne seine Hilfe wäre die Anfertigung dieser Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Mein Dank gilt zudem Frau Dr. Saskia Sachsenmaier und Frau Sandra Soike für ihre wertvolle und unkomplizierte Unterstützung bei der Patientenidentifikation.

Für das Korrekturlesen möchte ich insbesondere meiner Mutter, Dr. Heike Boppert, und Rebekka Angenendt danken.

Meiner Familie gilt mein tiefster und herzlichster Dank. Ohne ihre bedingungslose Unterstützung, ihren unerschütterlichen Glauben an mich und ihre Liebe hätte ich weder mein Studium noch diese Doktorarbeit in dieser Form vollenden können. Sie waren in jeder Phase an meiner Seite und haben mir den Rücken gestärkt – dafür bin ich unendlich dankbar. Ebenso danke ich meinen Freundinnen und Freunden von Herzen, die mir in schwierigen Momenten Mut gemacht, mich motiviert und mit ihrer Nähe und Zuversicht begleitet haben.

9. Tabellarischer Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Matthias Dieter Ring
Geburtsdatum: 31.12.1994
Geburtsort: Westerstede, Deutschland

Qualifikationen

2001 – 2004	Grundschule (Westerstede)
2004 – 2012	Gymnasium (Oldenburg)
2012	Eintritt in die Crew VII/12 als Sanitätsoffizieranwärter
2012 – 2018	Studium der Humanmedizin an der Universität Hamburg
2019	Ärztliche Approbation
2019 – 2021	Assistenzarzt Chirurgie am Bundeswehrkrankenhaus Hamburg
2021 – 2023	Truppenarzt im Sanitätsversorgungszentrum Stadtallendorf
2022	Zusatzbezeichnung Notfallmedizin
seit 2023	Assistenzarzt Chirurgie am Bundeswehrkrankenhaus Ulm