

Aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

**Zusammenhang zwischen Unfallmechanismus und  
Morphologie distaler Radiusfrakturen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf

vorgelegt von  
Christopher Selle  
2024

## **Angabe der Gutachter**

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Michael Schädel-Höpfner

Zweitgutachter: PD Dr. med. Stephen Fung

*Meiner Familie*

### **Auflistung eigener Publikationen**

Eingereicht am 05.03.2024, akzeptiert 26.08.2024, veröffentlicht 21.10.2024:

Selle C, Latz D, Friesen D, Schädel-Höpfner M.

Die Flexionsfraktur des distalen Radius bei Extensionsmechanismus im Handgelenk

Handchir Mikrochir Plast Chir. 2024 Oct 21. German. doi: 10.1055/a-2411-9237. Epub ahead of print. PMID: 39433278.

## **Zusammenfassung**

Die distale Radiusfraktur ist eine der häufigsten Frakturen des Menschen mit einer weltweit steigenden Inzidenz. Die Einteilung erfolgte historisch zunächst anhand der vermuteten Unfallmechanismen, sodass im klinischen Alltag zumeist zwischen „Extensionsfrakturen nach Colles“ und „Flexionsfrakturen nach Smith“ unterschieden wird. In der Analyse der radiologischen Bildgebung findet man jedoch immer wieder eine „Flexionsfraktur“ bei anamnestisch berichtetem Sturz auf die Handflächenseite (Extensionsmechanismus). Daher stellt sich die Frage, inwiefern eine „Flexionsfraktur“ bei einem Extensionsmechanismus entstehen kann. Es finden sich in der verfügbaren internationalen Literatur sehr wenige Analysen, die sich mit dieser Thematik im Detail auseinandersetzen.

Ziel dieser Arbeit war es, eine Analyse der Unfallmechanismen durchzuführen, die zu den verschiedenen Fraktorentitäten distaler Radiusfrakturen führen. Insbesondere wurde ein Augenmerk auf die Entstehung der sogenannten Flexionsfraktur gelegt und gezeigt, welche physiologisch-anatomischen und physikalischen Parameter hierfür Voraussetzung sind.

Hierzu wurden Daten zu Frakturen genutzt, die unter Einsatz eines Fallprüfstandes an nicht formalinfixierten, unbehandelten Humanpräparaten zwischen dem 01.01.2016 und 31.12.2021 entstanden. Eine biographische Beschreibung der verwendeten Präparate lag vor. Zusätzlich wurden die physikalischen Parameter zur Entstehung der Fraktur detailliert dokumentiert.

Aus den insgesamt 122 Präparaten mit vollständigem Datensatz konnten 17 (13,9%) radiologische Flexionsfrakturen identifiziert werden. Bei 10 (8,2%) dieser Frakturen lag ein Extensionsmechanismus vor. Der mittlere Extensionswinkel betrug bei diesen 10 Frakturen  $86,3^\circ$  im Vergleich zu  $90,5^\circ$  bei den Extensionsfrakturen. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass häufiger eine Pronationsstellung (6/10) als eine Supinationsstellung (1/10) im Handgelenk vorlag, wenn eine radiologische Flexionsfraktur im Extensionsmechanismus entstand. Die potentielle Energie im Moment der Frakturerzeugung lag bei den Flexionsfrakturen im Mittel bei 168,0 Joule, während Nicht-Flexionsfrakturen in der Untersuchung einen Mittelwert von 185,2 Joule (Median 197,1 J) aufwiesen.

Im Gegensatz zu den einzigen zwei bisherigen Publikationen mit experimentellem Ansatz zu der speziellen Entität der Flexionsfrakturen konnte in unserer Arbeit mit einer großen Zahl an Frakturpräparaten gearbeitet werden.

Verschiedene technische Limitierungen dieser Arbeit erschweren eine exakte Übertragbarkeit in die klinische Realität. Des Weiteren kann die physiologische Abwehrreaktion eines Patienten beim Sturz in einer experimentellen

Versuchsanordnung nicht reproduziert werden, sodass die vorliegenden Frakturen a.e. einen bewusstlos stürzenden Patienten imitieren. Dennoch lässt sich anhand der vorliegenden Erkenntnisse festhalten, dass eine bisher als „Flexionsfraktur nach Smith“ klassifizierte Fraktur auch bei Extensionsmechanismus entstehen kann.

## Summary

Distal radius fractures are among one of the most common fractures in humans with a rising incidence. Historic classification often followed the suspected mechanism of injury. Among clinicians the terms of a “Colles” and “Smith”-fracture are well established when referring to a distal radius fracture that is either displaced to the dorsal or palmar site of the radius. When analyzing x-rays, it is not uncommon to find a Smith-fracture while the patient describes a fall on the extended wrist. Thus, the question arises how a flexion type-fracture is possible if one falls on the dorsally extended wrist. The international availability of literature on this specific topic is rare.

The aim of this study was to analyze the mechanisms of injury that lead to the various entities of distal radius fractures. Special attention was given to so called Smith’ fractures and how they come to being regarding physiological, anatomical, and physical parameters required.

Therefore data of fractures were collected that were produced using a “drop-bench” on non-formalin fixated human specimen between January 2016 and December 2021. Biographic data to all used specimen was available. Additionally, the physical parameters were fully documented.

From all included 122 specimens with full data set 17 (13.9%) showed to be radiologic Smith type fractures. Within 10 (8.2%) of those the wrist was set in dorsal extension. The mean angle of extension was  $86.3^\circ$  for those 10 Smith fractures compared to  $90.5^\circ$  in Colles fractures. Furthermore, pronation was set in 6/10 while supination was set in 1/10 when finding a Smith fracture in dorsal extension. The mean potential energy was 168.0 joules for Smith fractures in dorsal extension while the non-Smith-type fractures showed a mean of 185.2 joules (median 197.1 joules).

In contrast to the only two other publications with experiments regarding Smith fractures in dorsal wrist extension this paper was based on a far greater number of specimens.

Different technical limitations of the set up used to get these fractures make it difficult to transfer the results straight into clinical reality. Under no circumstances the physiological defense action of a falling patient can be reproduced experimentally. Therefore, the findings must be regarded as an imitation of an unconscious falling patient. Nevertheless, it can be concluded that a commonly named “Smith fracture” must not only occur while falling on the palmar flexed wrist. The same fracture may be seen while a patient falls on the wrist in a dorsal extension with named physical parameters.

## Abkürzungen

<b>3D</b>	dreidimensional
<b>AO</b>	Arbeitsgemeinschaft für Osteosynthesefragen
<b>Ap</b>	anterior-posteriorer Strahlengang
<b>BMI</b>	Body-Maß-Index
<b>bzw.</b>	beziehungsweise
<b>°C</b>	Grad Celsius
<b>cm</b>	Zentimeter (1m = 100cm)
<b>CT</b>	Computertomographie
<b>DRUG</b>	Distales Radioulnargelenk
<b>Fa.</b>	Firma
<b>J</b>	Joule ( $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2}$ )
<b>KIS</b>	Krankenhausinformationssystem
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>m</b>	Meter
<b>MA</b>	Mayo Klassifikation
<b>MWU</b>	Mann-Whitney-U-Test
<b>Nm</b>	Newtonmeter
<b>OR</b>	odds-ratio
<b>o.g.</b>	oben genannt
<b>OTA</b>	Orthopedic Trauma Association
<b>PE</b>	Frakturtyp nach Pechlaner
<b>s</b>	Sekunde
<b>SI</b>	système international d'unités - Internationale Einheitensystem
<b>s.u.</b>	siehe unten

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Vorbemerkungen .....	1
1.2	Das Handgelenk.....	3
1.2.1	Anatomische Grundlagen .....	3
1.2.2	Definition der Bewegungsrichtungen .....	7
1.3	Klassifikationen distaler Radiusfrakturen.....	10
1.3.1	Einteilung nach Colles und Smith .....	11
1.3.2	AO-Klassifikation .....	12
1.3.3	Fernandez-Klassifikation .....	15
1.3.4	Frykman-Klassifikation .....	17
1.3.5	Mayo-Klassifikation.....	19
1.3.6	Pechlaner-Klassifikation .....	21
1.3.7	Klassifikation nach Brink und Rikli.....	23
1.3.8	Klassifikation nach Hintringer und Krimmer .....	25
1.4	Ziele der Arbeit .....	27
<b>2</b>	<b>Material und Methoden</b> .....	<b>28</b>
2.1	Ausgangsdaten.....	28
2.2	Vorbereitung der Humanpräparate .....	29
2.3	Versuchsaufbau und Frakturherzeugung .....	32
2.4	Radiologische Dokumentation .....	33
2.5	Dokumentierte Daten .....	34
2.6	Analyse.....	35
2.7	Statistische Auswertung.....	36
<b>3</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>37</b>
3.1	Ausgangslage.....	37
3.2	Allgemeine Beschreibung der Frakturen .....	37
3.3	Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus.....	38
3.3.1	Betrachtung der Winkelmaße .....	38
3.3.2	Betrachtung der potentiellen Energie.....	39
3.3.3	Betrachtung biographischer und physiognomischer Daten .....	40



3.3.4	Betrachtung der Begleitverletzungen .....	41
3.3.5	Betrachtung der Klassifikationen .....	41
<b>4</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Ausgangslage und Vergleich mit den vorangegangenen Publikationen ...</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Allgemeine Ergebnisse .....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Betrachtung der Winkelmaße .....	46
4.2.2	Betrachtung der potentiellen Energie.....	50
4.2.3	Betrachtung biographischer und physiognomischer Daten .....	52
4.2.4	Betrachtung der Begleitverletzungen .....	53
4.2.5	Betrachtung der Klassifikationen .....	54
<b>4.3</b>	<b>Limitationen.....</b>	<b>60</b>
<b>4.4</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick.....</b>	<b>62</b>
<b>5</b>	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis.....</b>	<b>63</b>
<b>6</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>68</b>
<b>8</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>69</b>
<b>8.1</b>	<b>Körperspendevertrag Medcure .....</b>	<b>69</b>
<b>8.2</b>	<b>Körperspendevertrag Science Care .....</b>	<b>70</b>
<b>9</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>.....</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Vorbemerkungen

Die distale Radiusfraktur ist eine der häufigsten Frakturen des Menschen. Sie ist daher und wegen der möglichen Folge einer funktionellen Einschränkung der oberen Extremität von höchster klinischer Relevanz. Ihre Inzidenz ist weltweit steigend [1–4]. Im Jahr 2019 lag die Inzidenz der in Deutschland registrierten Frakturen bei 106,2 / 100.000 Einwohner und belegte damit nach den Oberschenkelhalsfrakturen und pertrochantären Femurfrakturen den dritten Rang [5]. Außerdem zeigt sie eine Zweigipfligkeit in der Altersverteilung mit einem Hoch bei jungen Männern (20-30 Jahre) und einem zweiten Hoch bei älteren Frauen (60-80 Jahre) mit unterschiedlichem Pathomechanismus [3,6,7]. Zum einen finden sich bei jungen Patienten häufig Hochrasanztraumata, während zum anderen bei älteren Verletzten Niedrigenergie-traumata im Vordergrund stehen [7].

Gegenstand der einschlägigen klinischen Forschung ist die optimale Versorgung dieser Frakturen. Um jedoch die Frakturmechanismen genauer zu betrachten, wurden nur wenige biomechanische und pathophysiologische Betrachtungen durchgeführt [8–10]. Hierin liegt jedoch die Voraussetzung des Verständnisses der Frakturen. Aus einem tieferen Verständnis des Pathomechanismus der Frakturstehung resultiert auch ein Gewinn für die Versorgungsmöglichkeiten. Die bisherigen Frakturklassifikationen ergeben sich aus der Analyse und Eingruppierung verschiedener Frakturentitäten mit unterschiedlichen Betrachtungsschwerpunkten. Im klinischen Alltag hat sich zunächst weitläufig die grob betrachtende Einteilung nach vermutetem Pathomechanismus in Extensions- und Flexionsfrakturen durchgesetzt. Benannt wurden diese beiden Hauptkategorien nach ihren Erstbeschreibern 1814 Abraham Colles [11] und 1847 Robert William Smith [12]. Die Bezeichnung der „Colles“ und „Smith“ Fraktur ist heute noch, insbesondere im angelsächsischen Raum, weit verbreitet. Die Einteilung bezieht sich auf die Stellung der Hand im Radiokarpalgelenk relativ zum Unterarm zum Unfallzeitpunkt. Eine Extensionsfraktur nach Colles soll durch einen Sturz auf die Handfläche bei Streckung im Handgelenk entstehen und eine Flexionsfraktur nach Smith durch einen Sturz auf den Handrücken bei Beugung im Handgelenk [11,12]. Jedoch zeigt sich in der klinischen Erfahrung, dass häufig der genaue

Unfallmechanismus nicht exakt erinnerlich ist oder die vorliegende Fraktur in ihrer Morphologie eine andersartigen Krafteinwirkung nahelegt. Andererseits lässt sich jedoch auch häufig der Schilderung der Patienten entnehmen, dass es zu einem Sturz auf die Handfläche (Extensionsmechanismus) kam, obwohl die radiologische Bildgebung eine "typische" Flexionsfraktur zeigt.

Einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Frakturausmaß hat der Faktor Osteopenie beziehungsweise Osteoporose [6]. Insbesondere beim alten Menschen gilt die distale Radiusfraktur mitunter als Indikatorfraktur für eine, zu diesem Zeitpunkt noch nicht diagnostizierte Osteoporose. Mit steigendem Lebensalter in der Gesamtbevölkerung nimmt somit auch die Anzahl der Radiusfrakturen beim alten Menschen zu [13]. Hier kommt es häufig bereits bei sogenannten Niedrigenergietraumata zu Frakturen. Somit hat neben den Faktoren Energie, Winkel und Alter auch die Knochendichte einen hohen Einfluss auf die Frakturmorphologie.

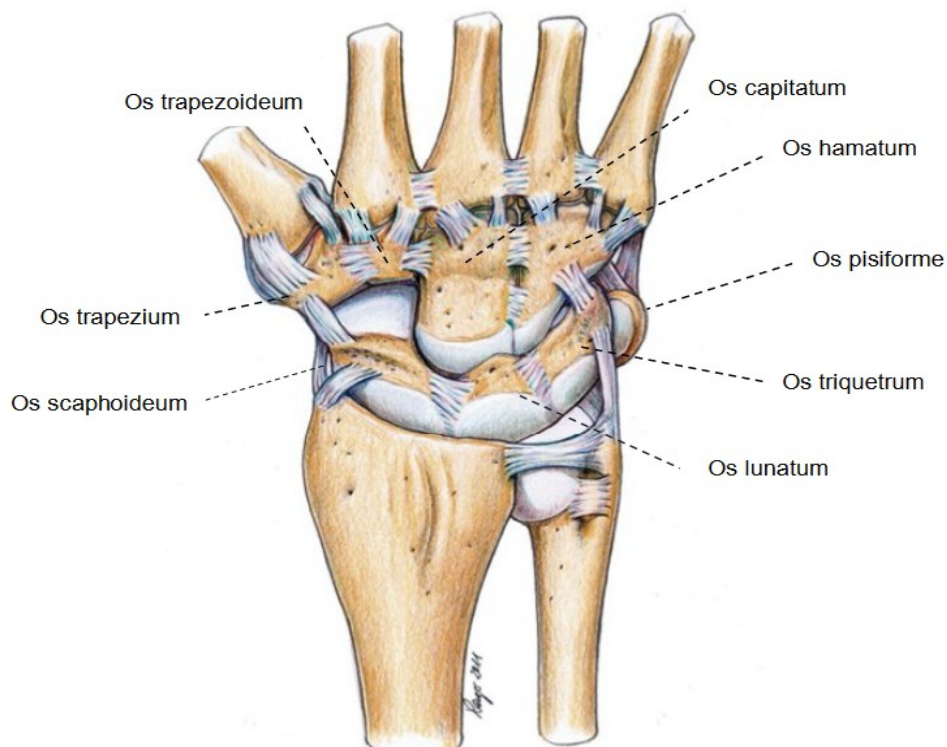
Die Analyse der Frakturmorphologie setzt ein genaues Verständnis der zugrundeliegenden anatomischen Bedingungen im Gesunden voraus. Weiterhin ist die Einordnung der Fraktur in ein eindeutiges Klassifikationssystem für die systematische Betrachtung der Fraktur von hoher Bedeutung. Durch die Klassifikation werden die verschiedenen Frakturmorphologien u.a. im Ausmaß der Schädigung vergleichbar und es sind Rückschlüsse zur weiteren, insbesondere operativen Versorgung möglich. Daher wird in dieser Einleitung im Weiteren ein besonderer Schwerpunkt auf die Handgelenkanatomie des gesunden adulten Patienten gelegt und gängige Klassifikationssysteme werden beschrieben.

## 1.2 Das Handgelenk

### 1.2.1 Anatomische Grundlagen

Anatomisch betrachtet setzt sich das Handgelenk (Abb. 1 und Abb. 2) aus zwei Anteilen (a. und b.) zusammen. Funktionell ergänzt wird das Handgelenk durch das distale Radioulnargelenk – DRUG (c.)

- a. Das *Radiokarpalgelenk* besteht zwischen der Gelenkfläche des distalen Radius und der proximalen Handwurzelreihe und ist das größte der drei Gelenke. Ulnar wird dieser Gelenkabschnitt durch die Artikulation zwischen dem Handgelenkdiskus und den ulnaren Handwurzelknochen der proximalen Reihe (Lunatum und Triquetrum) fortgesetzt.
- b. Das *Mediokarpalgelenk* besteht zwischen den Knochen der proximalen und distalen Handwurzelreihe
- c. Das distale *Radioulnargelenk* besteht zwischen dem distalen Radius und der distalen Ulna



**Abb. 1: Übersicht der Anatomie des Handgelenkes**

*Darstellung des Handgelenkes mit den beteiligten Knochen von Unterarm und Handwurzel und dem stabilisierenden Bandapparat.*

*Quelle: mit freundlicher Genehmigung von Prof. Langer*

### 1.2.1.1 Radiokarpalgelenk (Articulatio radiocarpalis)

Die Facies articularis carpalis des Radius (Speiche) ist konkav und lässt sich in die Fovea scaphoidea und lunata unterteilen [14]. Eine weitere konkave Gelenkfläche schließt sich zur Ulna (Elle) an – die Incisura ulnaris. Die Winkel des Radius werden, historisch nach Böhler, wie folgt beschrieben. In der sagittalen Ebene beträgt die palmare Inklinasion zwischen 10-15° und in der Frontalebene zeigt sich eine ulnare Inklinasion zwischen 25-30° [15,16].

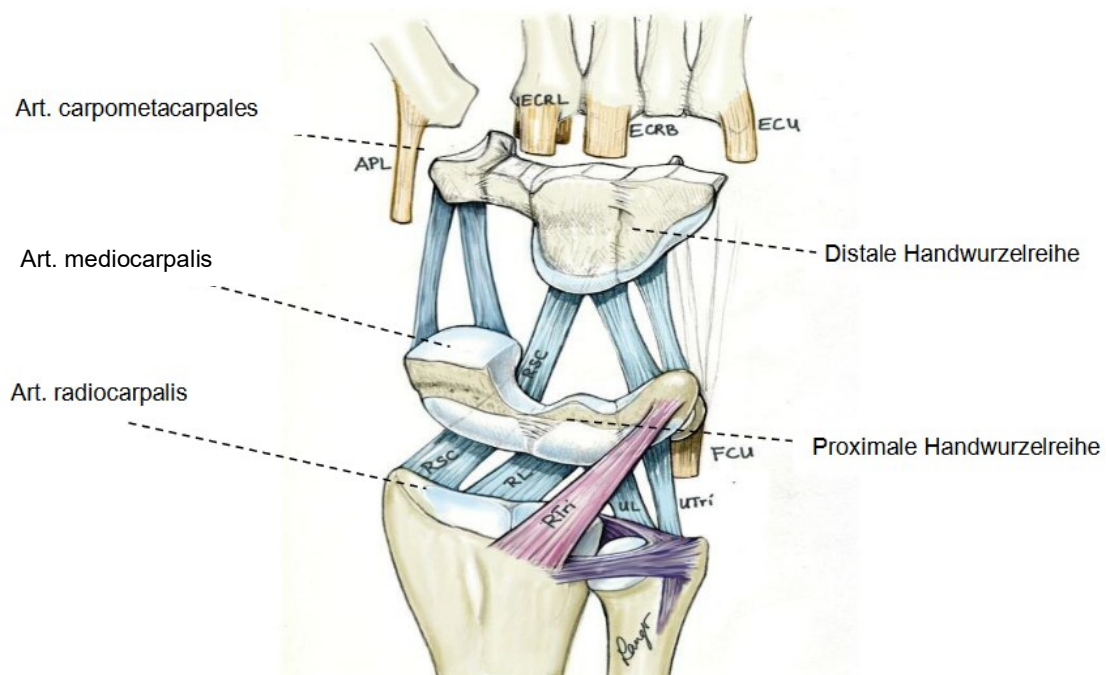
Nach distal hin schließt sich der Karpus mit seinen konvexen Gelenkflächen an. Diese werden aus den ersten drei der acht Handwurzelknochen gebildet. Die proximale Reihe besteht aus dem Os scaphoideum (Kahnbein), Os lunatum (Mondbein) und Os triquetrum (Dreieckbein). Diese sind über straffe, intrinsische Bandverbindungen (Abb. 1) aneinander verbunden und trennen das Radiokarpalgelenk vom Mediokarpalgelenk. Nach palmar vorgelagert ist das Os pisiforme (Erbsenebein) in der Sehne des Musculus flexor carpi ulnaris als Sesambein zu finden. Hierdurch kommt es zu einer sekundären Stabilisierung des Triquetrum nach palmar.

Der ulnare Gelenkanteil nimmt etwa  $\frac{1}{4}$  der Gelenkfläche ein. Überspannt wird der Ulnakopf durch den Discus ulnaris, der Teil des TFCC (triangulärer fibrocartilaginärer Komplex) ist. Dieser ist zwischen dem ulnaren Rand des Radius und dem Processus styloideus ulnae verankert ist. Zusammen bilden die Anteile des Radius, der Ulna und proximalen Handwurzel ein Ellipsoidgelenk [17].

### 1.2.1.2 Mediokarpalgelenk (Articulatio mediocarpalis)

In der distalen Reihe des Karpus finden sich das Os trapezium (Große Vieleckbein), das Os trapezoideum (Kleines Vieleckbein), das Os capitatum (Kopfbein) und das Os hamatum (Hakenbein), die ebenfalls über straffe Bänder untereinander und mit den Basen der Metakarpalia verspannt sind. Diese Knochen bilden zusammen mit der proximalen Handwurzelreihe ein S-förmiges, verzahntes Scharniergelenk [17]. Das Os scaphoideum bildet distal eine konvexe Gelenkfläche und artikuliert mit den konkaven Anteilen der Ossa trapezium et trapezoideum. Zum Os capitatum hin zeigt das Os scaphoideum eine konvexe Gelenkfläche, die mit der Konkavität des Os capitatum artikuliert. Das Os scaphoideum ist im proximalen ulnaren Pol konkav und artikuliert darüber hinaus mit dem Os lunatum. Weiter ulnar schließt sich die Gelenkfläche zwischen dem spitz-konkaven Os hamatum und dem konvexen Anteil des Os triquetrum an.

Distal der zweiten Handwurzelreihe schließen sich die Metakarpalia (Mittelhandknochen) an und bilden das Karpometakarpalgelenk (Abb. 2).



**Abb. 2: Übersicht der Anatomie des Handgelenks auseinandergezogen**

Diese Abbildung zeigt auseinandergezogen die einzelnen Abschnitte des Handgelenkes, den distalen Radius und die distale Ulna mit der Artikulation des DRUG. Weiterhin dargestellt sind die Gelenkflächen zwischen Radius und proximaler Handwurzelreihe (Art. radiocarpalis), zwischen proximaler und distaler Handwurzelreihe (Art. mediocarpalis), sowie zwischen der distalen Handwurzelreihe und den Mittelhandbasen (Art. carpometacarpales).

Quelle: mit freundlicher Genehmigung von Prof. Lanqer

### 1.2.1.3 Distales Radioulnargelenk (Articulatio radioulnaris distalis)

Das DRUG ist eine Zapfengelenk und besteht, wie unter 1.2.1.1 beschrieben, zwischen dem distalen Radius und der distalen Ulna. Der Ulnakopf mit seiner Circumferentia articularis liegt proximal des Discus ulnaris und wird durch die Bänder des TFCC umschlossen. Hier sind das Ligamentum radioulnare palmar und dorsale im Besonderen zu erwähnen. Durch die Einbettung des TFCC in das Handgelenk werden Stoß- und Druckkräfte aus dem Radiocarpalgelenk aufgenommen. Ein weiterer passiver Stabilisator des DRUG ist die Membrana interossea, welche proximal des DRUG zwischen Radius und Ulna liegt. Aufgrund der geringen knöchernen Stabilität und einem hohen Bewegungsumfang kommt, neben den erwähnten passiven Stabilisatoren, auch der aktiven Stabilisierung durch den Musculus pronator quadratus, eine bedeutende Rolle zu. Zur Ulna hin stabilisieren die Sehnen der Musculi flexor et extensor carpi ulnaris das Gelenk zusätzlich.

Die herausragende Bedeutung für die Beweglichkeit des Unterarmes besteht in der Rotationsbewegung der Speiche um die Elle im Zusammenspiel mit dem proximalen Radioulnargelenk. Genauer handelt es sich um eine Roll-Gleit-Bewegung. [16,18]

## 1.2.2 Definition der Bewegungsrichtungen

Das Handgelenk lässt in seiner Beweglichkeit drei Hauptbewegungsrichtungen zu. Im Alltagsgebrauch setzen sich die komplexen Bewegungsmuster aus den folgenden Richtungen zusammen.

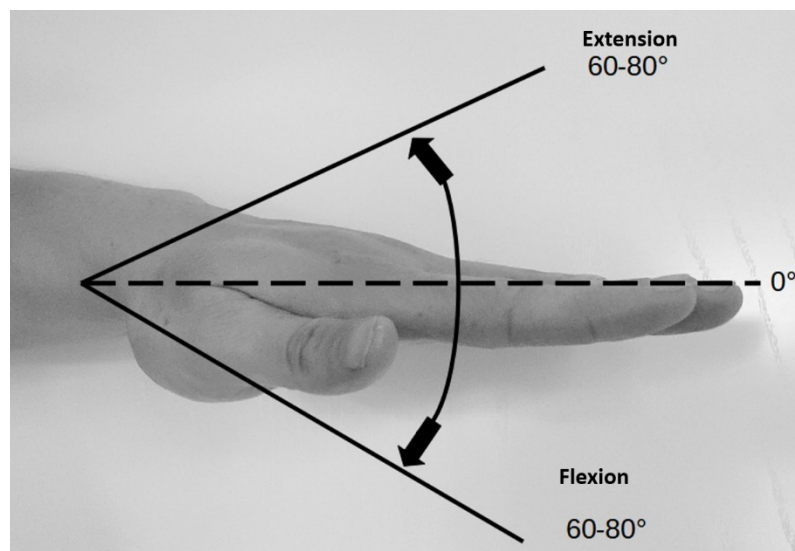
### 1.2.2.1 Extension und Flexion

Die Dorsalextension (im Weiteren Extension oder Streckung genannt) bezeichnet die Bewegungsrichtung des Handgelenks in Richtung des Handrückens (Abb. 3)

Hauptverantwortliche Muskeln sind der *Musculus extensor carpi radialis longus*, *Musculus extensor carpi radialis brevis* und *Musculus extensor carpi ulnaris*.

Die Palmarflexion (im Weiteren Flexion oder Beugung genannt), bezeichnet die Bewegungsrichtung des Handgelenks in Richtung der Hohlhand. Hier kommt dem *Musculus flexor carpi radialis* und *Musculus flexor carpi ulnaris* eine übergeordnete Bedeutung zu.

Das physiologische Bewegungsausmaß beträgt bis zu 80° für jede Bewegungsrichtung. Der minimale funktionelle Anspruch des Bewegungsradius für alltägliche Aufgaben wird mit 30° Extension und 5° Flexion angegeben [19].



**Abb. 3: Extension und Flexion**

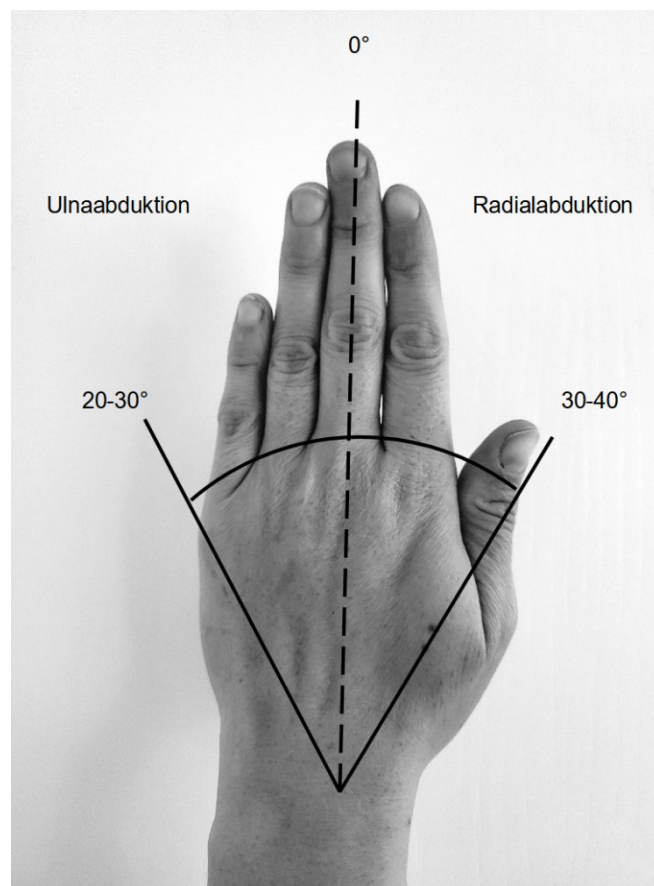
*Schematische Übersicht der Bewegungsrichtung mit dem möglichen Bewegungsausmaß nach Palmer et al. (1985).*

*Quelle: eigene Darstellung*



### 1.2.2.2 Radialabduktion- und Ulnarabduktion

Die Radial- bzw. Ulnarabduktion bezeichnet die Bewegungsrichtung des Handgelenkes in Richtung der Speiche oder der Elle (Abb. 4). Die physiologische mögliche Beweglichkeit beträgt zwischen 20-30° in der Radialabduktion und 30-40° in der Ulnarabduktion. Das für den Alltag wichtige Bewegungsausmaß geben Palmer et. al [19] mit 15° Abduktion nach radial und 30° Abduktion nach ulnar an. Die Radialabduktion wird hauptsächlich durch die Musculi extensor carpi radialis longus et brevis geführt. Unterstützung erhalten die Muskeln unter anderem durch den Musculus abductor pollicis longus. Die Ulnarabduktion erfolgt vor allem durch den Musculus extensor carpi ulnaris [14].



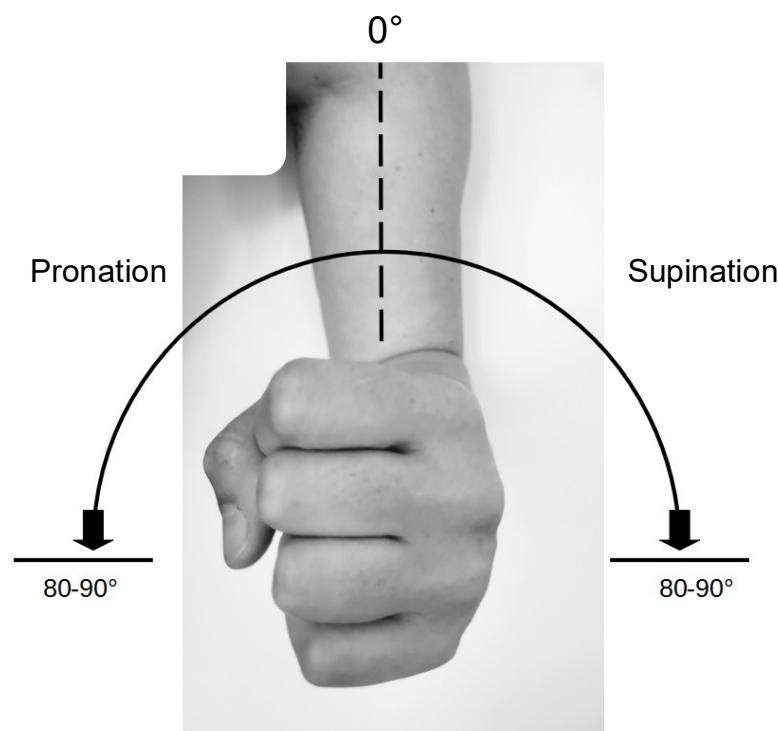
**Abb. 4: Radial- Ulnarabduktion**

*Schematische Übersicht der Bewegungsrichtung mit dem möglichen Bewegungsausmaß nach Palmer et al. (1985).*

*Quelle: eigene Darstellung*

### 1.2.2.3 Pro- und Supination

Die Umwendbewegung des Unterarmes wird Pro- und Supination genannt. Hierbei dreht sich die Speiche um die Elle. Die Drehung erfolgt sowohl am Ellenbogen (im proximalen Radioulnargelenk), als auch im Handgelenk (im distales Radioulnargelenk). Die Bewegungsachse verläuft vom Radiuskopf diagonal in die distale Ulna [20]. Bei der Pronation wird die Drehung des Unterarmes im Raum beschrieben, sodass bei vollständiger Pronation der Handrücken sichtbar himmelwärts zeigt (Abb. 5). Bei der vollständigen Supination ist in der Endstellung die Handfläche himmelwärts gedreht. Stets dreht sich der Radius um die Ulna. Die maximale physiologische Umwendbewegung beträgt zwischen  $80^\circ$  und  $90^\circ$  in jede der beiden Richtungen. Muskulär ist eine Vielzahl von Akteuren bedeutend. Insbesondere in der Pronation sind der Musculus pronator teres (handgelenkfern) und der Musculus pronator quadratus (handgelenknah) hervorzuheben. Die Supination ist eine primär handgelenkfern gesteuerte Bewegung über den Musculus biceps brachii und Musculus supinator. Handgelenknah unterstützt der Sehnenzug der Daumenstrecker und des Daumenspreizers. [14,17]



**Abb. 5: Pro- und Supination**

*Schematische Übersicht der Bewegungsrichtung mit dem möglichen Bewegungsausmaß nach Palmer et al. (1985).*

*Quelle: eigene Darstellung*

Isolierte Bewegungen in nur einer Bewegungsrichtung sind jedoch selten. Physiologisch sind Kombinationen der o.g. Bewegungsrichtungen, die für den Gebrauch der Hand entscheidend sind. Die Kombination der Bewegung in den genannten Ebenen im Zusammenspiel mit der Stabilisierung der Knochen über die einzigartige knöchernen und ligamentäre Anatomie lässt erst komplexe Bewegungsmuster wie die Zirkumduktion [21], das Kreisen der Hand und die Pfeilwurfbewegung zu. Bei letzterer, der sogenannten „*dart throwing motion*“ [19], erfolgt eine schräg verlaufende Bewegung von dorsoradial nach ulnopalmar. Komplexe Bewegungsmuster sind auch für viele Alltagstätigkeiten erforderlich, wie Haare kämmen, Schuhe zubinden und Getränke einschütten.

### **1.3 Klassifikationen distaler Radiusfrakturen**

Es haben sich viele verschiedene Klassifikationen für die distale Radiusfraktur etabliert. Alle Frakturklassifikationen beruhen auf unterschiedlichen Betrachtungsschwerpunkten. Manche der folgend genannten Klassifikationen bauen auf älteren Systemen auf und stellen deren Weiterentwicklung durch neue Erkenntnisse dar. Ihren individuellen Schwerpunkt legen die Klassifikationen auf die Beschreibung von Begleitverletzungen, des möglichen Unfallmechanismus oder die Stellung der Fragmente sowie mögliche therapeutische Optionen. Im Folgenden wird eine Auswahl der geläufigen und relevanten Klassifikationen kurz vorgestellt und zusammengefasst. Des Weiteren folgt zu jeder Klassifikation ein Anwendungsbeispiel.

Die folgend genannten Frakturklassifikationen sind spezifisch für Frakturen des adulten Menschen. Kindliche Frakturen sind weitestgehend ausgenommen oder erhalten in den genannten Klassifikationen besondere Merkmale oder Kennzeichen. Da für diese Arbeit adulte Frakturen maßgeblich sind, soll auf die Klassifikation der distalen Radiusfrakturen des Heranwachsenden nicht weiter eingegangen werden.

Ein Vergleich der Klassifikationen untereinander mit Beachtung der Vorteile wie auch der Limitierungen folgt in der Diskussion, insbesondere im Hinblick auf die Anwendbarkeit bei distalen Radiusfrakturen.

### 1.3.1 Einteilung nach Colles und Smith

In der engeren Betrachtung handelt sich bei der Bezeichnung einer distalen Radiusfraktur nach Colles und Smith nicht um eine eigene Klassifikation. Vielmehr wird, insbesondere im angelsächsischen Raum, hiermit eine synonyme Beschreibung einer Extensions- oder Flexionsfraktur (Abb. 6) vorgenommen.

Die Beschreibung der Extensionsfraktur erfolgte erstmals durch Abraham Colles 1814 [11]. Eine weitergehende Differenzierung der Frakturen konnte ebenso wie in der Beschreibung von Robert W. Smith 1847 [12] aufgrund der fehlenden technischen Möglichkeiten nicht erfolgen, obwohl Bezüge zu präparatorischen Befunden bei letzterem Autor vermerkt sind. Smith setzt sich 33 Jahre nach der Erstbeschreibung jedoch bereits detaillierter mit dem Unfallmechanismus auseinander und postuliert die Flexionsfraktur als Folge des Sturzes auf den Handrücken.



**Abb. 6: Colles und Smith Fraktur**

*Abbildung a) zeigt das seitliche Röntgenbild einer Colles (Extensionsfraktur) mit Abkipfung der Radiusgelenkfläche nach dorsal.*

*Abbildung b) zeigt das seitliche Röntgenbild einer Smith (Flexionsfraktur) mit Abkipfung der Radiusgelenkfläche nach palmar.*

*Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – a) Präparat L-1827XXX; b) L-1901XXX*

### 1.3.2 AO-Klassifikation

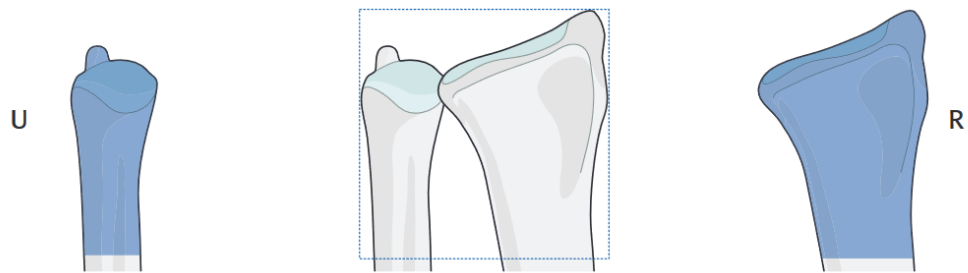
Die AO-Klassifikation ist die international am weitesten verbreitete Klassifikation. In ihrer ursprünglichen Form wurde sie erstmalig 1986 französischsprachig publiziert [22]. 1990 [23] und 1996 [24] wurde sie überarbeitet und englischsprachig in ihrer noch heute gebräuchlichen Form als Konsensus aus der Müller-Klassifikation (*Comprehensive Classification of Fractures of the Long Bones - CCF*) und der *Orthopedic Trauma Association (OTA)* Klassifikation zusammengesetzt und publiziert. Hierdurch entstand international verständliche Klassifikation mit einem alphanumerischen Kode, die standardisiert reproduzierbar ist. Zuletzt erfolgte eine ausführliche Überarbeitung und neuerliche Publikation im Jahr 2018 [25].

Grundsätzlich besteht die AO-Klassifikation aus einer spezifischen numerischen Kodierung der Lokalisation des Knochens (Zahl) mit Angabe der Lokalisation der Fraktur im Knochen (proximal -1, diaphysär -2, distal -3). In der überarbeiteten Version von 2018 erfolgte der Einschub der Buchstaben *R*: Radius, *U*: Ulna, *F*: Fibula im Bereich der langen paarigen Röhrenknochen. Die Tibia wird ohne Buchstabencode und nur mit ihrer Ordnungsziffer 4 benannt.

Anschließend wird die Morphologie unter Verwendung von Buchstaben von *A/B/C* zur spezifischen Beschreibung der Frakturmorphologie beziehungsweise Typisierung hinzugefügt. Bei diaphysären Frakturen bezeichnet *A* die einfache/glatte Fraktur, *B* die Keilfrakturen und *C* die multifragmentären Brüche. Gelenknah (metaphysär) zeigt *A* die extraartikuläre Fraktur an. *B* bezeichnet die partiell artikuläre Fraktur und *C* die vollständig artikuläre Fraktur (Abb. 7).

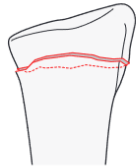
## 2R3/2U3

Location: Radius/Ulna, distal end segment 2R3/2U3

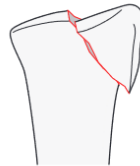


### Types:

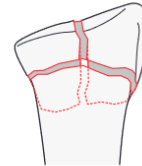
Radius, distal end segment,  
**extraarticular fracture**  
2R3A



Radius, distal end segment,  
**partial articular fracture**  
2R3B



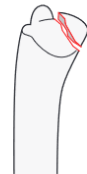
Radius, distal end segment,  
**complete articular fracture**  
2R3C



Ulna, distal end segment,  
**extraarticular fracture**  
2U3A



Ulna, distal end segment,  
**partial articular fracture**  
2U3B



Ulna, distal end segment,  
**complete articular fracture**  
2U3C



### Abb. 7: AO-Klassifikation in der Anwendung am distalen Unterarm

Die Abbildung zeigt die übergeordnete Einteilung der distalen Unterarmfrakturen in die Morphologietypen A, B, und C und den Bezug zur Gelenkflächenbeteiligung

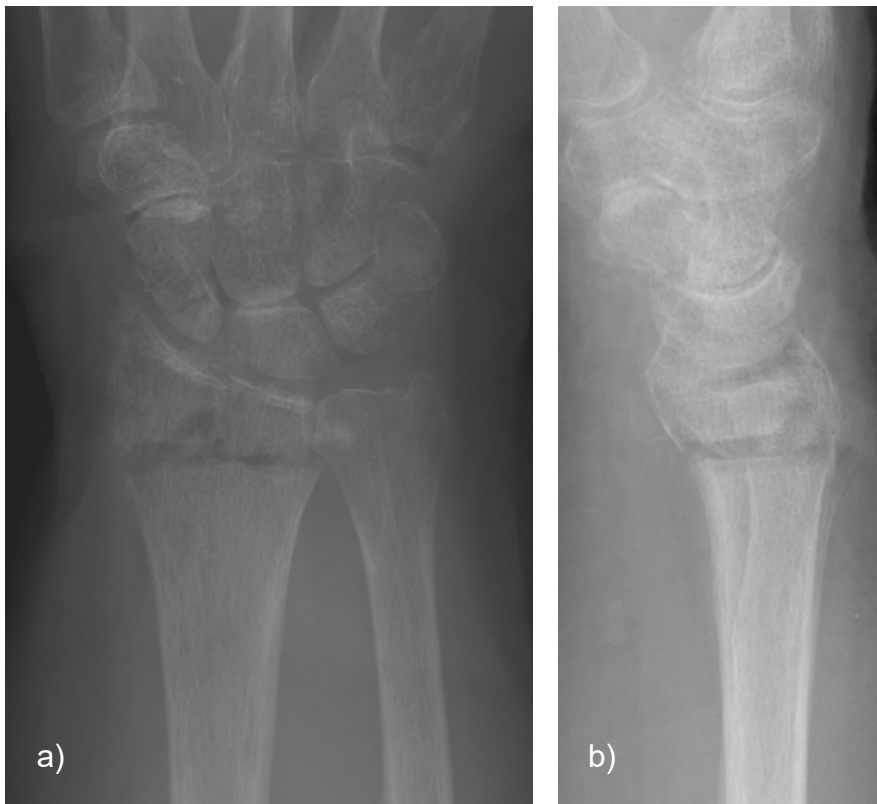
Quelle: Meinberger et al. *Fracture and Dislocation Classification Compendium—2018* [25], mit Genehmigung Wolters Kluwer Health, Inc.

Nachgestellt findet sich wiederum eine Zahlenkombination zur Beschreibung der Ausdehnung der Fraktur und ihrer Eingruppierung.

Weitere spezifische Typisierungen können in der seit 2018 gültigen Fassung in Klammern - ( ) - hinzugefügt werden. In diesen werden zusätzliche Angaben zu (Sub-)Luxationen, ligamentären Instabilitäten, Knorpelschäden, Knochenqualitäten und Amputationen festgehalten.

*Anwendungsbeispiel AO-Klassifikation am distalen Radius: 2R3-C1.2*

beschreibt eine distale einfache intraartikuläre Radiusfraktur mit einem Frakturverlauf in sagittaler Richtung (Abb. 8).



**Abb. 8: Röntgenbild einer Fraktur AO-Typ 2R3-C1.2**

*Die Abbildung a) zeigt ein Röntgenbild im anterior-posterioren Strahlengang. Die Abbildung b) zeigt ein Röntgenbild derselben Fraktur im seitlichen Strahlengang. Es handelt sich hierbei um eine Fraktur des AO-Typs 2R3-C1.2. Nebenbefundlich zeigt sich eine Scaphoidfraktur.*

*Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – Präparat L-1917XXX*

### 1.3.3 Fernandez-Klassifikation



Den Ursprung seiner Einteilung entnahm der Autor seinen vorangegangenen Betrachtungen distaler Radiusfrakturen aus den Jahren 1993 und 1995. Die Klassifikation von Diego L. Fernandez aus dem Jahr 2001 [26] entstand aus einer Rückschau auf die zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Klassifikationen und enthält eine fünfgliedrige Einteilung gemäß des vermuteten Unfallmechanismus (Tabelle 1). Zusätzlich können in weiteren Schritten Angaben über die Dislokationsrichtung, die Anzahl der (artikulären) Hauptfragmente und eine Beschreibung der begleitenden ulnaren knöchernen und ligamentären Schäden gemacht werden. Außerdem werden gleichzeitig Angaben zur Frakturstabilität und der potentiell zu erwartenden Weichteilschäden wiedergegeben. Darüber hinaus verweist der Autor auf Versorgungsmöglichkeiten in einer detaillierten Tabelle (Abb. 9).

Fernandez Typ	Frakturmechanismus	Besondere Formen
I	Biegungsbrüche der Metaphyse	Colles- oder Smith Fraktur
II	Abscherungsfrakturen der Gelenkfläche	Barton / Reversed Barton, Chauffeurs Fraktur
III	Kompressionsfrakturen der Gelenkfläche	
IV	Avulsionsfrakturen der Gelenkfläche	mit radiokarpaler Luxation
V	Kombinationsverletzungen der Typen I-IV	Hochrasanztraumata mit ausgedehnter Gelenkerstörung

**Tabelle 1: Zusammenfassung der Frakturtypen nach Fernandez**

*Übersichtliche Zusammenfassung der verschiedenen Frakturtypen nach Fernandez mit dem Hinweis auf besondere Frakturtypen*

*Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung die zuvor genannte Veröffentlichung von Fernandez 2001*

Fracture types (adults) based on the mechanism of injury	Children fracture equivalent	Stability/instability: high risk of secondary displacement after initial adequate reduction	Displacement pattern	Number of fragments	Associated lesions carpal ligament, fractures, median, ulnar nerve, tendons, ipsilat. fx upper extremity, compartment syndrome	Recommended treatment
Type I Bending fracture of the metaphysis 	Distal forearm fracture Salter II	Stable Unstable	Non-displaced dorsally (Colles-Pouteau) Volarly (Smith) Proximal Combined	Always 2 main fragments + Varying degree of metaphyseal comminution (instability)	Uncommon	Conservative (stable fxs) Percutaneous pinning (extra- or intrafocal) External fixation (exceptionally bone graft)
Type II Shearing fracture of the joint surface 	Salter IV	Unstable	Dorsal Radial Volar Proximal Combined	Two-part Three-part Comminuted	Less uncommon	Open reduction Screw-/plate fixation

**Abb. 9: Ausschnitt aus der originalen Tabelle von Fernandez**

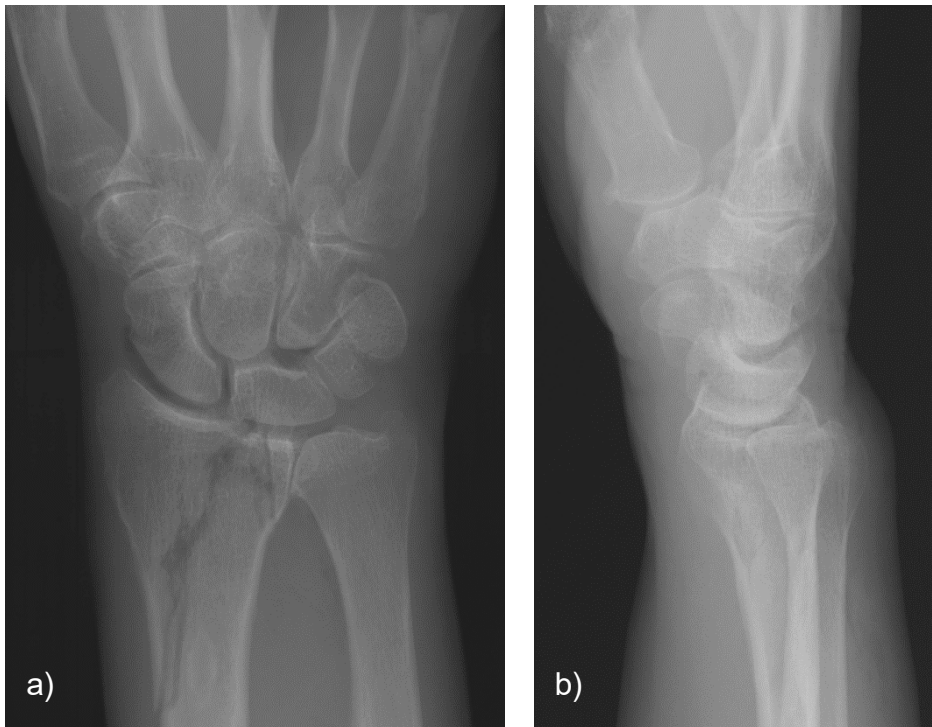
*Exemplarische Darstellung der Frakturtypen I und II nach Fernandez mit biomechanischen Überlegungen und der Therapieempfehlung des Autors*

*Quelle: Ausschnitt aus Fernandez 2001 [26]*



*Anwendungsbeispiel Fernandez-Klassifikation am distalen Radius: Typ III*

beschreibt eine distale, einfache, mehrfragmentäre Kompressionsfraktur der, in diesem Beispiel mit Impression der ulnaren Radiusgelenkfläche (Abb. 10).



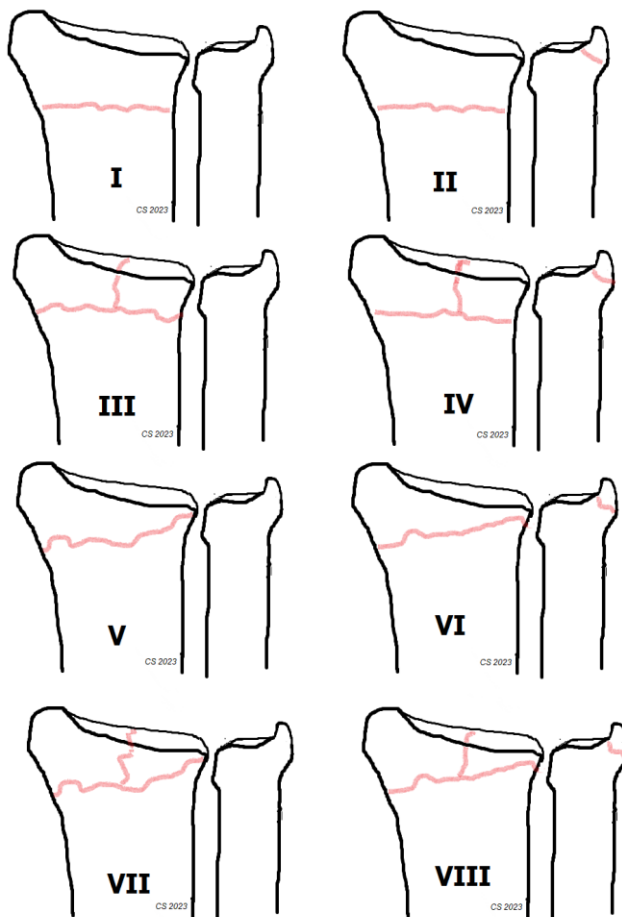
**Abb. 10 Röntgenbild einer Fraktur Typ III nach Fernandez**

*Die Abbildung a) zeigt ein Röntgenbild im anterior-posterioren Strahlengang. Die Abbildung b) zeigt ein Röntgenbild derselben Fraktur im seitlichen Strahlengang. Es handelt sich hierbei um eine Fraktur des Fernandez Typ III mit Fraktur der Radiusgelenkfläche im Bereich der Fovea lunata und einem diaphysärem Ausläufer.*

*Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – Präparat L-18276XX*

### 1.3.4 Frykman-Klassifikation

In seiner Publikation aus dem Jahr 1967 [27] gruppierte Gösta Frykman distale Radiusfraktur in acht verschiedene Gruppe ein. Hierzu erfolgte die grundlegende Betrachtung der Bruchformen hinsichtlich einer intra- bzw. extraartikulären Fraktur. Zusätzlich wird für die Einteilung eine Beteiligung der distalen Ulna als relevant hervorgehoben. Als weiterer wesentlicher Faktor der Frykmann-Klassifikation dient die Beurteilung einer Beteiligung des distalen Radioulnargelenkes. Aus diesen Faktoren lassen sich die acht verschiedenen Gruppen nach Frykman einteilen. Im Fokus der Betrachtung steht jedoch weder die Richtung der Fragmentdislokation noch das Ausmaß der Gelenkflächenzerstörung. Vielmehr beschreibt diese Klassifikation den Bruch nach erfolgter optimaler Reposition (Abb. 11).



**Abb. 11: Frykman-Klassifikation distaler Radiusfrakturen**

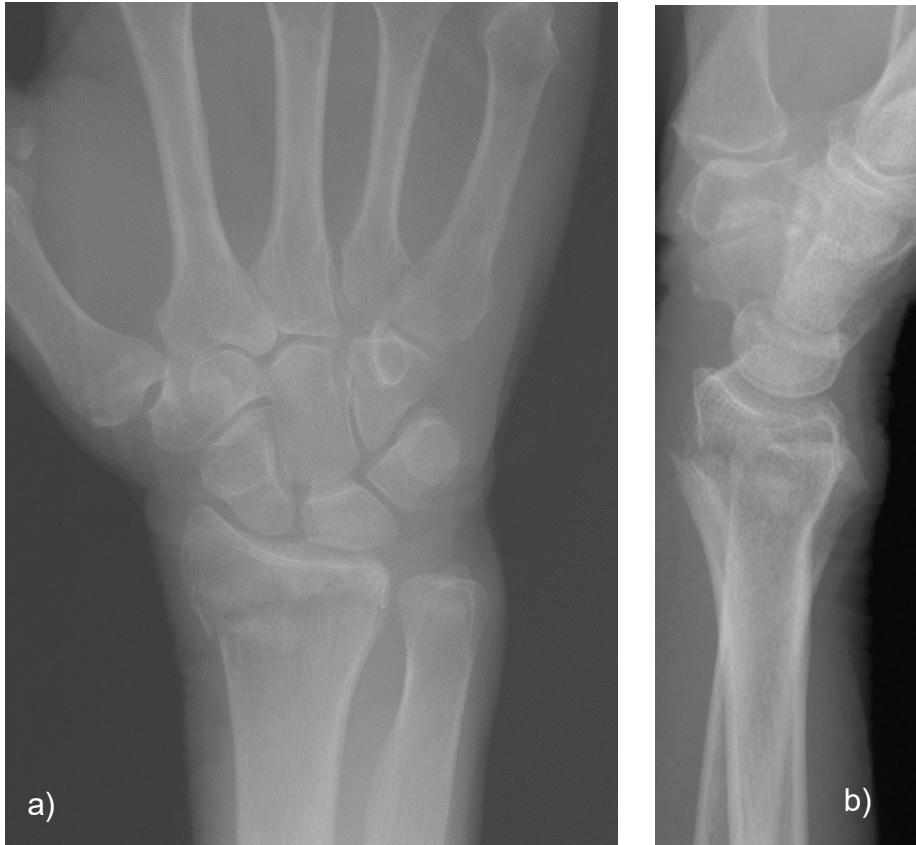
*Schematische Darstellung der Frykman-Klassifikation (1967) mit allen acht Typen*

*Rot = Frakturlinie; Römisch Ziffer I-IV entspricht dem Frakturtyp*

*Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung der radiologischen Beispielbilder in Frykman (1967)*

*Anwendungsbeispiel Fernandez-Klassifikation am distalen Radius: Typ VII*

beschreibt eine metaphysäre Fraktur mit Ausläufer im DRUG und Gelenkflächenbeteiligung ohne Verletzung des Processus styloideus ulnae (Abb. 12).

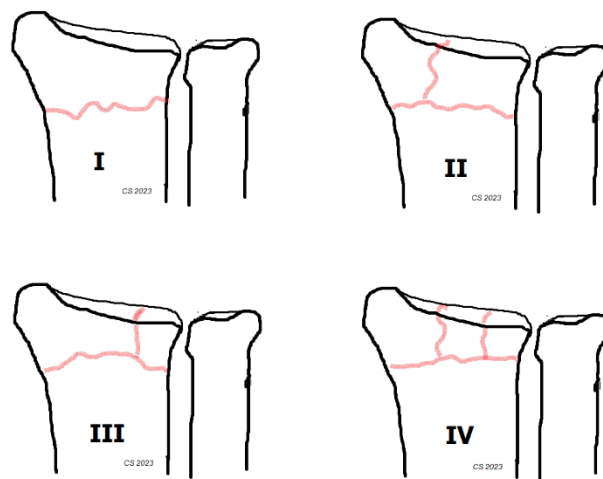


**Abb. 12 Röntgenbild einer Fraktur Typ VII nach Frykman**

*Die Abbildung a) zeigt ein Röntgenbild im anterior-posterioren Strahlengang. Die Abbildung b) zeigt ein Röntgenbild derselben Fraktur im seitlichen Strahlengang. Es handelt sich hierbei um eine Fraktur des Frykman Typ VII: Fraktur der Metaphyse des distalen Radius, die im DRUG ausläuft und eine Gelenkflächenbeteiligung an der ulnaren Begrenzung der Fovea lunata aufweist*  
Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – Präparat L-18278XX

### 1.3.5 Mayo-Klassifikation

Die Klassifikation von Missakian und Kollegen [28] aus dem Jahr 1992 ist weithin als Mayo-Klassifikation distaler Radiusfrakturen bekannt. Benannt wurde diese nach der Mayo Klinik (Rochester, Minnesota, USA). Sie beschreibt eine viergliedrige Einteilung von Radiusfrakturen und fokussiert sich vornehmlich auf intraartikuläre Frakturen und den Bezug der Dislokation bzw. des Bruchspaltes der radiokarpalen Gelenkfläche in Relation zum Os scaphoideum und Os lunatum (Abb. 13). Es wird zusätzlich ergänzt, ob es sich um einen verschobenen oder unverschobenen Bruch, beziehungsweise um einen reponiblen oder irreponiblen Bruch handelt.



**Abb. 13: Schematische Darstellung der Mayo-Klassifikation**

*Die Mayo-Klassifikation des distalen Radius in schematischer Darstellung.*

*Rot = Frakturlinie; Römisch Ziffer I-IV entspricht dem Frakturtyp*

*Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Missakian et al. (1992)*

*MA Typ I* umfasst alle Formen der extraartikulären distalen Radiusfrakturen

*MA Typ II* beschreibt eine intraartikuläre distale Radiusfraktur unter Beteiligung des radioscapoidalen Gelenkanteiles (Fovea scaphoidea) – (Abb. 14)

*MA Typ III* benennt eine intraartikuläre Fraktur des distalen Radius im Bereich der Fovea lunata, oftmals in der Literatur als "die-punch" Fraktur beschrieben

*MA Typ IV* fasst alle intraartikulären komplexen distalen Radiusfrakturen zusammen, die sowohl einen radioscapoidalen Frakturanteil aufweisen, als auch einen Bruch im Bereich der Fovea lunata

*Anwendungsbeispiel Mayo-Klassifikation am distalen Radius: Typ II*



**Abb. 14: Röntgenbilder einer Fraktur Typ II nach Mayo**

*Die Abbildung a) zeigt ein Röntgenbild im anterior-posterioren Strahlengang. Die Abbildung b) zeigt ein Röntgenbild derselben Fraktur im seitlichen Strahlengang. Es handelt sich hierbei um eine distale Radiusflexionsfraktur des Mayo Typ II:*

*Fraktur der Gelenkfläche betrifft die Fovea scaphoidea, des Weiteren zeigt sich eine Fraktur des Ulnakopfes*

*Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – Präparat L-1906XXX*

### 1.3.6 Pechlaner-Klassifikation

Die Klassifikation nach Pechlaner beruht auf einer Serie von Studien zu distalen Radiusfrakturen, die von der Arbeitsgruppe von Sigurd Pechlaner an Leichenpräparaten erzeugt wurde. Die zugehörigen Publikationen von Pechlaner et al. sind aus dem Jahr 1986 [29] und in der überarbeiteten Version von 1997 [30].

Beabsichtigt war eine Klassifikation zu erstellen, die eine Kurzbeschreibung des radiologischen Bildes umfasst und Hinweise auf das Ausmaß der Verletzung gibt. Darüber hinaus sollte die Möglichkeit bestehen, therapeutische Konsequenzen abzuleiten. Im Fokus stand neben der Richtung der Dislokation auch eine Art „*Schlüsselfragment*“, wie es in später folgenden Klassifikationen benannt wird (Tabelle 2).

<b>Pechlaner Typ</b>	<b>Pechlaner Subtyp</b>	<b>Charakteristik</b>
I-1		Dorsale metaphysäre Fraktur
I-2		Dorsale metaphysär-artikuläre Fraktur
I-3		Dorsale Luxationsfraktur
II-1		Zentrale metaphysäre Fraktur
II-2		Zentrale metaphysäre-artikuläre Fraktur
	II-2A	Zentrale Impressionsfraktur
	II-2B	Fraktur Processus styloideus radii
	II-2C	Ulnarer Randbruch
	II-2D	Zentraler Mehrfragmentbruch
II-3		Zentrale Luxationsfraktur
III-1		Palmare metaphysäre Fraktur
III-2		Palmare metaphysäre-artikuläre Fraktur
III-3		Palmare Luxationsfraktur

**Tabelle 2: Pechlaner Klassifikation**

*Übersichtliche Darstellung der Frakturtypen nach Pechlaner und der zentralen Charakteristika der jeweiligen Fraktur*

*Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Pechlaner (1997)*

*Anwendungsbeispiel Pechlaner-Klassifikation am distalen Radius:*

*Typ PE III-2 beschreibt eine palmare metaphysär-artikuläre Kompressionsfraktur, bei der eine Beteiligung der dorsalen Kortikalis möglich ist. Die Beteiligung der Radiusgelenkfläche ist sowohl radiocarpal und/oder im DRU-Gelenk möglich (Abb. 15).*

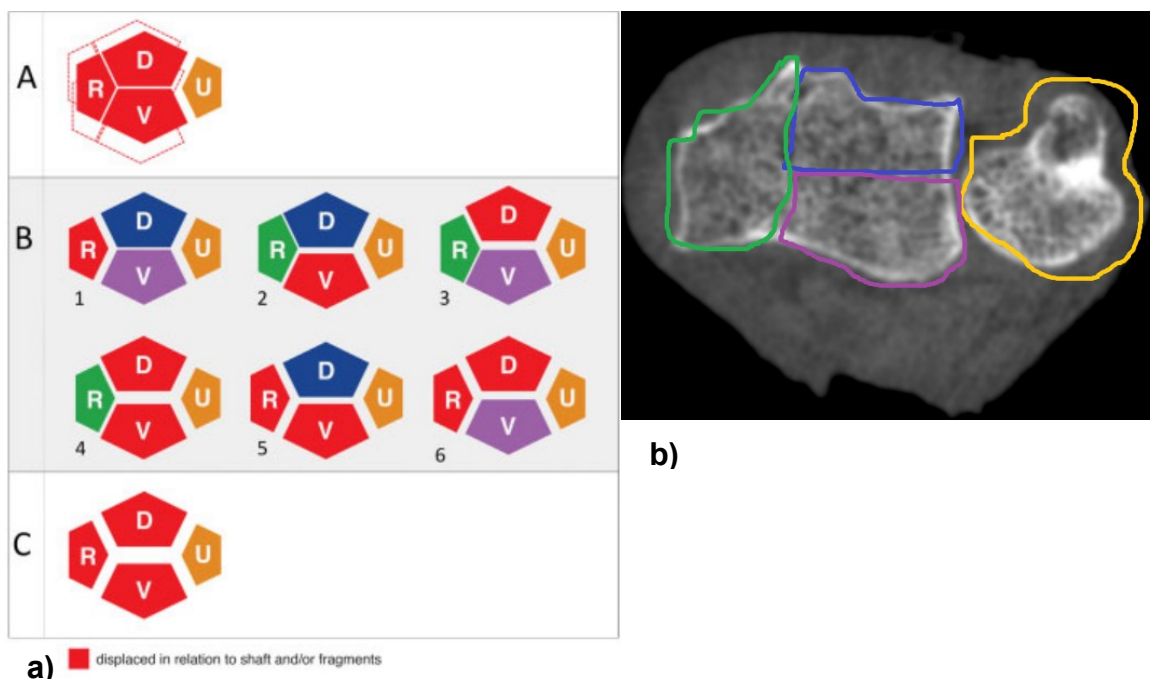


**Abb. 15: Röntgenbilder einer Fraktur Typ PE III-2**

*Die Abbildung a) zeigt ein Röntgenbild im anterior-posterioren Strahlengang. Die Abbildung b) zeigt ein Röntgenbild derselben Fraktur im seitlichen Strahlengang. Es handelt sich hierbei um eine distale Radiusflexionsfraktur des Pechlaner Typ III-2: palmare metaphysär-artikuläre Fraktur betrifft mit Beteiligung der dorsalen Kortikalis und Abriss des Proc. styloideus ulnae.  
Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – Präparat S-1911XXX*

### 1.3.7 Klassifikation nach Brink und Rikli

In ihrer CT basierten Klassifikation aus dem Jahr 2016 [31] beschreiben die Autoren Peter R. G. Brink und Daniel A. Rikli das "4-Ecken-Prinzip" ("Four-Corner Concept"). Dieses basiert auf einer Synopse des Drei-Säulen-Modells von Rikli und Regazonni [32] und der 4-Teile-Klassifikation nach Melone [33], welche in dieser Arbeit nicht genauer beschrieben werden. Zur Einteilung in die verschiedenen Typen sind in der CT-Betrachtung insbesondere die sagittalen Aufnahmen zur Identifikation der sogenannten *Schlüsselecke* (original: "key corner") hervorzuheben. Die axiale Aufnahme des CT ermöglicht es dem Betrachter, die vier Ecken auf einen Blick zu sehen und somit die finale Einteilung vorzunehmen (Abb. 16).



**Abb. 16: Systematik der Brink und Rikli Klassifikation**

a) Die Abbildung zeigt die möglichen Frakturkombinationen und ihre Einteilung in die vorgeschlagene Klassifikation. R= Radiale Radiusgelenkfläche; D= Dorsale Radiusgelenkfläche; V= Volare (palmare) Radiusgelenkfläche; U= Ulna  
In Rot sind die „key fragments“ dargestellt, die relativ zum Schaft oder den anderen Fragmenten verschoben sind.

b) zeigt die axiale CT-Bildgebung korrespondierend zur Darstellung a). R= grün, D= blau, V= violett, U= gelb

Quelle:

a) In Anlehnung an Brink et al. 2016 [30] – mit Genehmigung des Georg Thieme Verlag KG  
b) CT-Bild aus eigener Datenbank: Präparat L-1917XX-X



In dieser Klassifikation werden insgesamt 8 verschiedene Frakturtypen unterschieden.

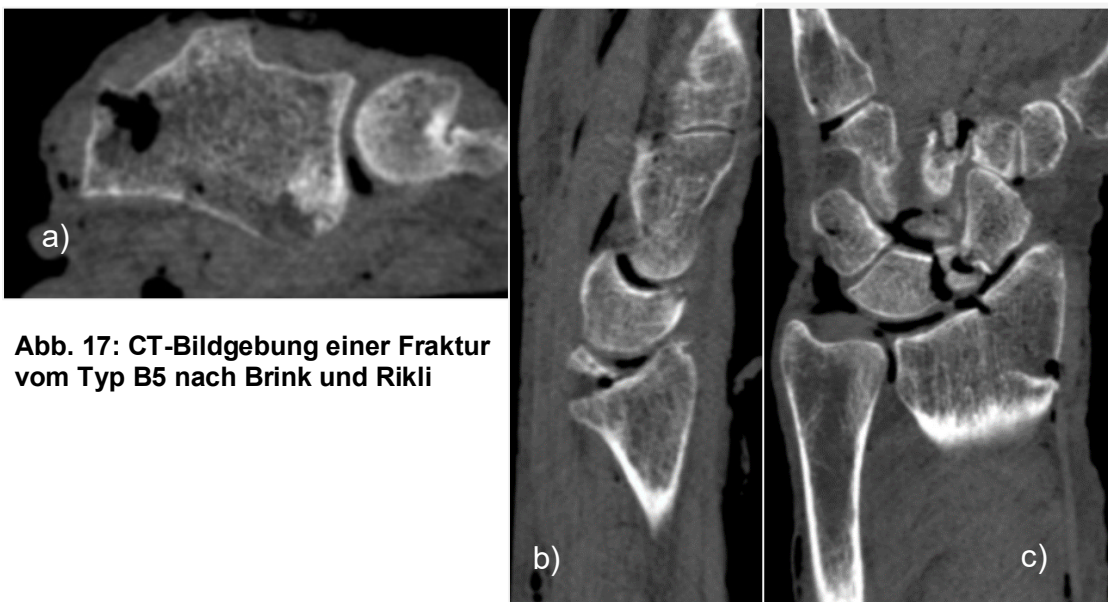
Typ **A** umfasst alle Arten von extraartikulären Frakturen.

Die Gruppe **B** umfasst alle (partiell) artikulären Frakturen mit identifizierbarer *Schlüsselecke* ("key corner") bei denen eine Dislokation in Relation zum Schaft oder den anderen Fragmenten besteht. Hier sind 6 Subtypen beschrieben. Partiiell artikuläre Frakturen können an der radialen Ecke (Processus styloideus radii), der palmaren Kante und der dorsalen Kante oder in verschiedenen Kombinationen ebendieser auftreten. Sind alle 3 Bereiche betroffen, liegt folglich eine vollständig artikuläre Fraktur des Typ **C** vor. Bei allen drei Hauptgruppen kann ebenfalls die vierte Schlüsselecke, die distale Ulna, betroffen sein. Hierunter ist eine Beteiligung des Processus styloideus ulnae oder des Ulnakopfes zusammengefasst.

In speziellen Fällen lässt sich auf Höhe der intermediären Säule die Ausrichtung des Os lunatum in Relation zu einem dorsal oder palmar verschobenen artikulären Fragment betrachten (*b*) Abb. 17). Der Subluxation des Os lunatum kommt aus klinischer Sicht eine besondere Bedeutung zu, da die Autoren fordern, diese in den Fokus der operativen Therapie setzen, um eine spätere chronische Subluxation zu vermeiden.

*Anwendungsbeispiel der Klassifikation nach Brink und Rikli am distalen Radius:*

*Typ B5*



**Abb. 17: CT-Bildgebung einer Fraktur vom Typ B5 nach Brink und Rikli**

*Die Abbildung a) zeigt ein CT-Ausschnitt im axialer Schnitfführung. b) zeigt ein CT-Ausschnitt derselben Fraktur in sagittaler Ebene. c) zeigt ein CT-Ausschnitt derselben Fraktur in coronarer Ebene. Es handelt sich hierbei um eine distale Radiusflexionsfraktur Typ B5 nach Brink und Rikli: artikuläre Fraktur unter Beteiligung der palmaren und radialen Gelenkfläche; Das Os lunatum richtet sich nach palmar (b); Nebenbefundlich Fraktur des proximalen Scaphoidpols (c)*

*Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – Präparat L-1905XXX*

### 1.3.8 Klassifikation nach Hintringer und Krimmer

Die zum aktuellen Zeitpunkt neueste Klassifikation wurde von Hintringer und Krimmer et al. [8] im Jahr 2020 publiziert. Sie beruht auf der Identifikation sogenannter Schlüsselfragmente (englisch "key fragments"), in Anlehnung an Brink und Rikli, die in der eingehenden Analyse der Frakturmorphologie im CT bestimmt werden. Im Zentrum der "key fragment" Analyse stehen biomechanische Betrachtungen. Hier werden, falls möglich, die sogenannten Schlüsselfragmente aufgrund des Ansatzes der entsprechenden dorsalen oder palmaren Bänder identifiziert, da laut den Autoren diese für die Stabilität des Karpus von essenzieller Bedeutung sind. Die Bedeutung der Bandansätze für die Entstehung der häufigsten Frakturlinien wurde 2011 von Mandziak beschrieben [34]. Aufgrund der Analyse soll dann ein Rückschluss auf die notwendige Wahl der Implantate in der Frakturversorgung möglich sein.

In der gesamten Betrachtung und Klassifikation werden 10 verschiedene Frakturtypen benannt, wobei der zentrale Betrachtungsaspekt, abgeleitet aus der biomechanischen Überlegung, auf sogenannte artikuläre Schlüsselfragmente fällt (Bsp. Abb. 18).

Gruppieren lassen sich die Frakturen in der vorgenannten Publikation wie in Tabelle 3: Hintringer und Krimmer Klassifikation dargestellt. Im Gegensatz zu den zuvor benannten Klassifikationen wird von der Autorengemeinschaft hier keine alphanumerische Kodierung vorgeschlagen.

Hauptgruppe	Subtyp
Metaphysäre Fraktur	a) weniger als 15° dorsale und 10° radiale Abkipfung b) mehr als 15° dorsale und 10° radiale Abkipfung c) geringe palmare dislocation oder Tendenz zur palmaren Dislokation
Artikuläre Frakturen mit Schlüsselfragment	a) Radiales Schlüsselfragment b) Dorsales Schlüsselfragment c) Palmares Schlüsselfragment d) Zentrales Schlüsselfragment
Vollständige Zerstörung der Gelenkfläche Vollständige Zerstörung der Gelenkfläche bis in den Schaft Keine erkennbar zu stabilisierenden Fragmente	

**Tabelle 3: Hintringer und Krimmer Klassifikation**

*Übersichtliche Darstellung der Frakturtypen nach Hintringer und Krimmer und der zentralen Charakteristika der jeweiligen Fraktur*

*Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an Hintringer und Krimmer (2020)*

*Anwendungsbeispiel der Klassifikation nach Hintringer und Krimmer am distalen Radius: „radiales Schlüsselfragment“*



**Abb. 18: CT und 3D Modell radiales Schlüsselfragment nach Hintringer-Krimmer**

*Die Abbildung a) zeigt eine 3D Rekonstruktion einer CT-Untersuchung. b) zeigt ein CT-Ausschnitt derselben Fraktur in axialer Ebene.*

*Es handelt sich hierbei um eine distale Radiusfraktur des Hintringer-Krimmer Typ „radiales Schlüsselfragment“. Begleitend besteht eine mehrfragmentäre distale Ulnafraktur*

*Quelle: Aus der Datenbank dieser Arbeit – Präparat L-1907XXX*

## **1.4 Ziele der Arbeit**

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Analyse der Unfallmechanismen durchzuführen, die zu den verschiedenen Frakturentitäten distaler Radiusfrakturen führen. Hierzu wird dem Ansatz von Pechlaner folgend durch die Arbeit an Humanpräparaten versucht den Unfallmechanismus genauer zu beschreiben. Insbesondere wird ein Augenmerk auf die Entstehung der sogenannten Flexionsfraktur gelegt und gezeigt, welche physiologisch-anatomischen und physikalischen Parameter Voraussetzung für deren Entstehung sind. Die Arbeit soll klären inwieweit eine bisher als „Flexionsfraktur nach Smith“ klassifizierte Fraktur auch bei Extensionsmechanismus entstehen kann. Es erfolgt die Betrachtung der Frakturen anhand vorgenannter gängiger und historischer Frakturklassifikationen und ihres klinischen Stellenwertes.

## 2 Material und Methoden

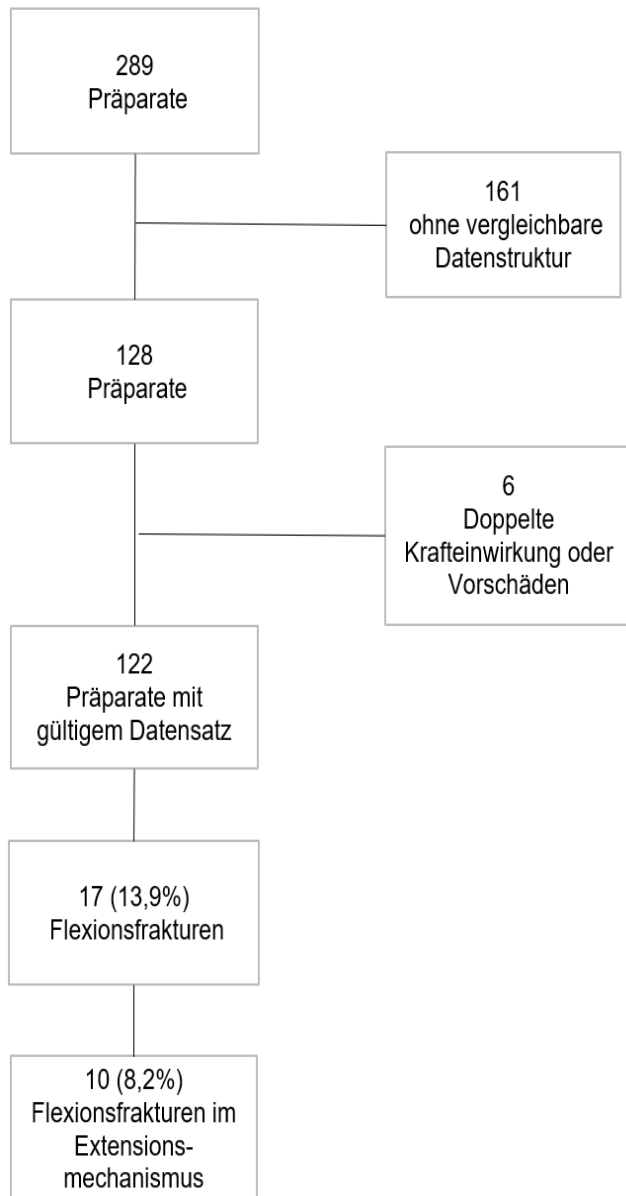
Diese Arbeit wurde durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf unter dem Aktenzeichen „*Studien-Nr.: 2020-1218-andere Forschung erstvotierend*“ am 24.01.2022 genehmigt.

### 2.1 Ausgangsdaten

Für diese Arbeit wurden alle Daten zu Frakturpräparaten von distalen Radiusfrakturen der Firma Rimasys (Köln, Deutschland) berücksichtigt, die im Zeitraum zwischen dem 01.01.2016 und dem 31.12.2021 erzeugt wurden.

Diese Daten wurden nach vollständiger Erhebung ausgewertet. Die Frakturen wurden nicht zu dem Zwecke dieser wissenschaftlichen Arbeit erzeugt, sondern zum Zwecke der operativen chirurgischen Ausbildung.

Zum Ausgangszeitpunkt der Analyse standen 289 Frakturen zur Verfügung. Aufgrund einer vergleichbaren benötigten Datenstruktur im Hinblick auf die Dokumentation von Winkeln, potentieller Energie und zugehöriger radiologischer Bildgebung mussten 161 Frakturen ausgeschlossen werden, bei denen diese Angaben nicht ausreichend oder vergleichbar dokumentiert waren. Des Weiteren wurden 6 Präparate ausgeschlossen, die mehr als einmal einer Gewalteinwirkung ausgesetzt wurden, beziehungsweise offensichtliche Vorschäden durch vorherige Verletzungen oder Operationen, mit entsprechender Veränderung der physiologischen Statik zeigten. Insgesamt konnten 122 Präparate eingeschlossen werden. Die Abb. 19 (S.29) zeigt übersichtlich das Flussdiagramm zum Dateneinschluss und Ausschluss.



**Abb. 19: Dateneinschluss**

*Flussdiagramm des Datenausschluss bzw. Einschlusses mit Überblick der entstandenen Flexionsfrakturen*

## 2.2 Vorbereitung der Humanpräparate

Die entsprechenden distalen Radiusfrakturen wurden an bis dato tiefgefrorenen humanen Leichenpräparaten erzeugt, die für die Frakturzeugung wieder aufgetaut wurden. Hierzu erfolgte die Bereitstellung der Leichen(teile) von zwei verschiedenen Firmen aus den USA, die zuvor mit den Spendern einen Vertrag zur unentgeltlichen Körperspende mit ausdrücklicher Einwilligung zur Nutzung des Körpers für wissenschaftlichen Zwecke, auch in zerlegten Teilen, geschlossen hatten (s. Anhang).

Bei Eintreffen der Leichen waren, je nach Bedarf der Firma Rimasys, Leichen in toto oder einzeln angeforderte Gliedmaßen geliefert worden. Bei einer Lieferung in toto erfolgte die notwendige Amputation beziehungsweise Exartikulation des Armes durch die Mitarbeiter vor Ort. Die Lagerung der tiefgefrorenen Präparate erfolgte bei -20 °C. Der Auftauprozess wurde zur Schonung der Humanpräparate langsam über einen Zeitraum von 8-12 Stunden vollzogen. Anschließend erfolgte die Frakturzeugung unter Einstellung aller benötigten Parameter, insbesondere der vordefinierten Winkel, wie unten beschrieben.

Die Leichenpräparate wurden im Verlauf der Versuchsreihe auf drei verschiedene Weisen präpariert. Bei allen Präparaten ist in der distalen Begrenzung die Hand vollständig intakt. Ebenso erfolgt die Frakturzeugung bei vollständig intaktem Weichteilmantel. In der ersten Variante war der Arm bis zur Artikulation im Schultergelenk intakt und erst auf Höhe der Schulter in den Versuchsaufbau eingespannt.

Bei der zweiten Variante erfolgte eine Amputation mittig im Bereich des distalen Drittels des Humerusschaftes.

In der dritten und überwiegend vorliegenden Präparatekonfiguration (Abb. 20) wurde die Amputation im Bereich des proximalen Drittels des Unterarmschaftes vorgenommen.



**Abb. 20: Unterarmpräparat im Versuchsaufbau**

*Diese Abbildung zeigt das Unterarmpräparat nach Amputation auf Schafthöhe eingespannt in den Versuchsaufbau. Der proximale Unterarmstumpf ist in Epoxidharz eingebettet und von einem Metallzylinder umschlossen.*

*Quelle: eigenem Bestand und s. Selle et al. „Die Flexionsfraktur des distalen Radius bei Extensionsmechanismus im Handgelenk“*

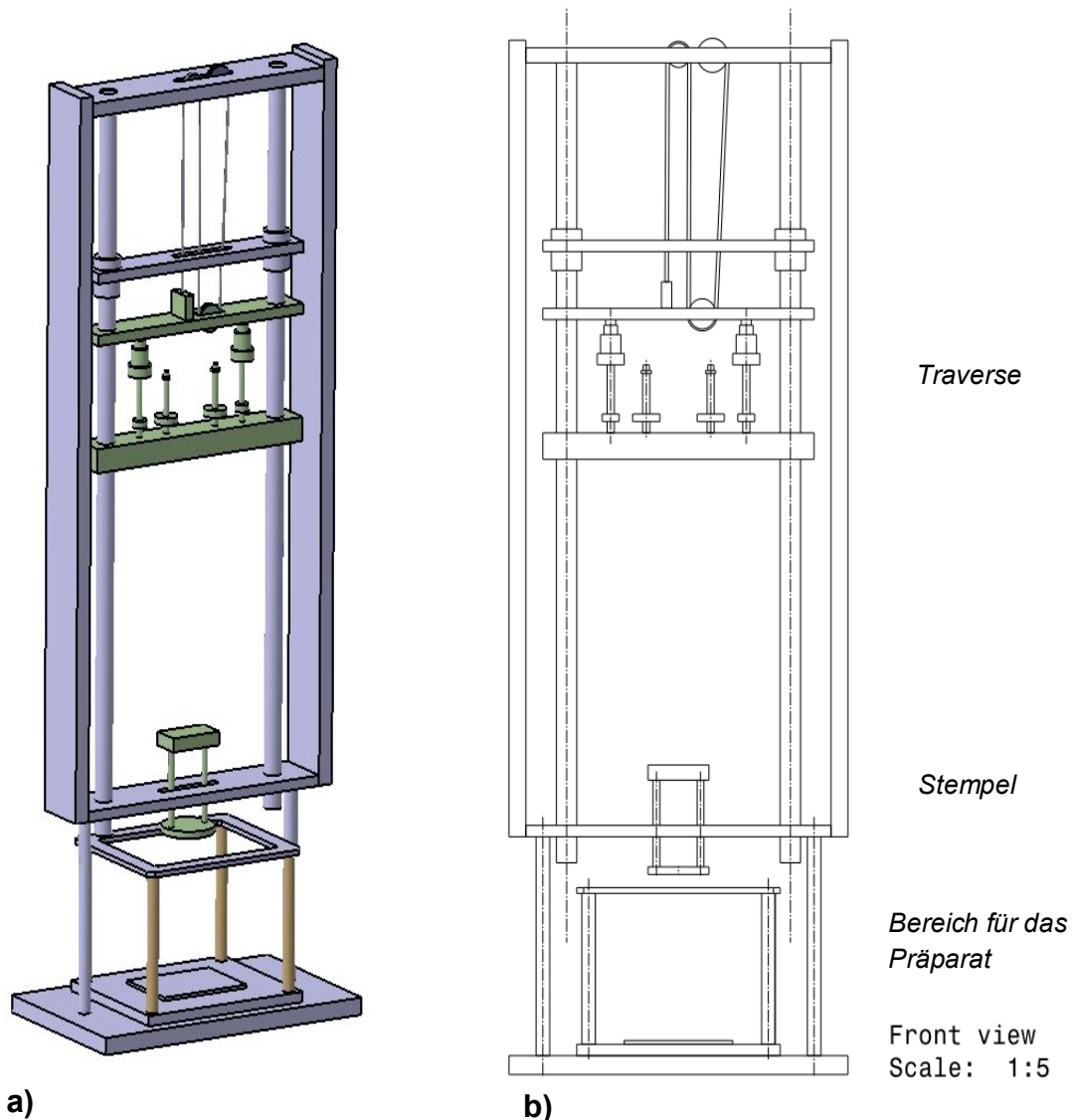
An allen Amputationsstümpfen erfolgte die Fixierung des Präparates in einer handelsüblichen Epoxidharzmischung oder Verbundmörtelmischung mit einem umschließenden Metallzylinder, der letztlich in die Materialprüfmaschine unter dem Stempel eingespannt werden konnte.

Bei den Varianten Eins und Zwei konnte die Einstellstellung aller Winkel, insbesondere die gewünschte Pro- und Supination im Unterarm, beim Einspannen in die Materialprüfmaschine erfolgen. Technisch bedingt, aufgrund der Fixierung im Zylinder mit Epoxidharz oder Verbundmörtel, musste in der dritten Variante eine Einstellung der gewünschten Pro- oder Supination jedoch vor der Fixierung erfolgen, da im fixierten Zustand eine vollständig freie Unterarmdrehung nicht mehr möglich war.



### 2.3 Versuchsaufbau und Frakturherzeugung

Nach dem Einspannen unter dem Stempel wurden die eingestellten Winkelmaße - Extension oder Flexion und Radialabduktion oder Ulnarabduktion im Radiokarpalgelenk - mittels manueller Messung mit einem handelsüblichen Goniometer gemessen und dokumentiert. Zur weiteren Vorbereitung der Frakturherzeugung erfolgte nun die abschließende Konfiguration der Materialprüfmaschine (Abb. 21) mit den weiteren einstellbaren Parametern.



**Abb. 21: Schematische Übersicht des Versuchsaufbaus**

a) zeigt den gesamten Versuchsaufbau in der Übersicht als 3D Modell. b) zeigt die technische Zeichnung des Versuchsaufbaus

Oben: Traverse ohne Zusatzgewichte in der Führungsschiene

Mitte: Stempel für die Übertragung der Energie der Traverse auf das Präparat

Unten: wird das Leichenpräparat eingespannt (Abb. 20)

Quelle: Eigene Darstellung mittels CAD-Software (FreeCAD Version 0.20.2) und s. Selle et al. „Die Flexionsfraktur des distalen Radius bei Extensionsmechanismus im Handgelenk“

Hier konnte die Fallhöhe der Traverse voreingestellt werden. Ebenso konnte die Traverse durch additive Gewichte beschwert werden, um eine höhere potentielle Energie zu erzeugen. Das Gewicht der Traverse selbst betrug 22,5kg und war unveränderlich. Nach Lubahn et al. [35] sollten 23kg die repräsentative Masse einer fallenden oberen Extremität darstellen.

Abschließend löste der Mitarbeiter in der Frakturzeugung die arretierte Traverse mit einem Seilzug aus. Die Traverse traf auf den Stempel und die kinetische Energie wurde auf das Humanpräparat übertragen. Bei korrekter Einstellung entstand eine Fraktur.

## **2.4 Radiologische Dokumentation**

Nach der Frakturzeugung wurde das Präparat unter größter Sorgfalt aus der Maschine ausgespannt und sofort radiologisch dokumentiert. Mit dieser Bildgebung war eine exakte Analyse der Fraktur hinsichtlich der Morphologie möglich.

Die Dokumentation der Fraktur erfolgte im ersten Schritt mit einem dreidimensionalen Bildwandler (Fa. Siemens Healthineers, Cios Spin). Die Bilder wurden als erstes in den klinisch standardisierten Strahlengängen „*anterior-posterior*“ (ap) und „*streng seitlich*“ angefertigt. Im Anschluss erfolgte der 3D Scan.

Abschließend erfolgte die erneute Einlagerung der Präparate in der Tiefkühlung bei -20°C. Nach erfolgter Tiefkühlung wurde im Verlauf eine Computertomographie (Fa. Siemens Somatom Emotion, 16 Zeilen) durchgeführt. Für die CT-Bildgebung erfolgte ein schonender Transport in Kühlboxen, wobei eine Höchsttemperatur von -8 °C erreicht wurde.

## 2.5 Dokumentierte Daten

Zusammengetragen wurden die Daten bei der Firma Rimasys in einem eigens konzipierten Krankenhausinformationssystem (KIS), aus welchem die Daten für diese Arbeit in eine Exceltabelle (Fa. Microsoft, Excel 365, 2022-2023) extrahiert werden konnten.

Aus dem KIS wurden zu jeder erzeugten Fraktur spezifische Daten zu den Körperspender herausgeschrieben.

Diese umfassten die biographischen Daten:

- Alter (in Jahren)
- Geschlecht
- ethnische Zugehörigkeit
- Körpergröße (in cm)
- Gewicht (in kg)

Daraus ableitbar der Body-Maß-Index (BMI) nach der Formel  $BMI = \frac{kg}{m^2}$  [36].

Folgende Winkelmaße (in Bogengrad °) wurden dokumentiert:

- Palmarflexion
- Dorsalextension
- Pronation
- Supination
- Radialabduktion
- Ulnarabduktion

Zum Zweck der statistischen Verarbeitung erhielten die Flexion, Radialabduktion und Pronation negative Vorzeichen. Die Berechnungen wurden unter Berücksichtigung des Betrags angefertigt. Im Folgenden sind negative Winkelmaße als Betrag zu verstehen.

Des Weiteren wurden zwei physikalische Parameter dokumentiert:

- Aufprallgeschwindigkeit ( $v$  in Meter pro Sekunde)
- Potentielle Energie ( $E_{pot}$  in Joule)

Die potentielle Energie ( $E_{pot}$ ) berechnet sich aus der Formel  $E_{pot}=m \cdot g \cdot h$ , wobei  $m$  hier für die Masse steht, die sich aus der Masse der Traverse und dem möglichen Zusatzgewicht ergibt.

Der Multiplikator  $g$  bezeichnet die Erdanziehungskraft, die mit dem allgemeinen Näherungswert  $9,81 \frac{m}{s^2}$  festgesetzt wird.

Die Höhe  $h$  entspricht der Fallhöhe der Traverse bis zum Stempel.

Die dokumentierten Messwert zur Kräfteinwirkung sind folglich rechnerische Größen.

Eine direkte Kraftmessung im Handgelenk fand nicht statt, um die strukturelle Integrität des Kapsel-Band-Apparates zu erhalten.

## **2.6 Analyse**

Die Betrachtung der radiologischen Bildgebung erfolgte mit dem DICOM Viewer RadiAnt (Fa. Medixant, RadiAnt DICOM Viewer 2022.1.1) und ist der erste Schritt in der Analysearbeit.

Zunächst wurden die Frakturen anhand der weithin bekannten AO-Klassifikation [25] eingeteilt. Zusätzlich erfolgte die Einteilung in die Klassifikationen nach Frykmann [27], Fernandez [26], Mayo [28], Pechlaner [29,30], Brink und Rikli [31] sowie Hintringer und Krimmer [8]. Wenn Subklassifikationen zu diesen Einteilungen vorhanden waren, wurden diese ebenfalls separat angewandt. Die Einteilung der Frakturen in die entsprechenden Klassifikationen erfolgte durch einen Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie und wurde folgend durch einen zweiten Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie mit Zusatzweiterbildung Handchirurgie validiert. Aus den vorhandenen Frakturen wurden dann die „Flexionsfrakturen nach Smith“ genauer hinsichtlich der einwirkenden Kraft und des Winkels (des Pathomechanismus) betrachtet. Die erhobenen Daten aus der Frakturherzeugung sollten Rückschlüsse auf die Entstehung der Fraktur zulassen und wurden genauer beschrieben und statistisch analysiert.

## **2.7 Statistische Auswertung**

Die Analyse und statistische Auswertung erfolgte mittels der SPSS-Software (IBM Corp. Released 2021. IBM SPSS Statistics for Macintosh, Version 28.0.1.1. Armonk, NY: IBM Corp.).

Die deskriptive Analyse umfasste die bereits zuvor genannten Daten und Parameter. Für die Tests wurde das Signifikanzniveau  $p \leq 0,05$  festgelegt.

Die Testung auf Normalverteilung erfolgte mittels des Shapiro-Wilk-Test.

Für den Vergleich unabhängiger Stichproben wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Anschließend wurde über die logistische Regression das Odds-Ratio oder auch Chancenverhältnis errechnet. Der Zusammenhang zwischen kategorialen Variablen wurde mit dem Pearson Chi-Quadrat-Test geprüft.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Ausgangslage

In die Auswertung wurden nach o.g. Ausschlusskriterien insgesamt 122 Präparate mit vollständigem Datensatz eingeschlossen. Diese stammten von 109 verschiedenen Körperspendern. 13-mal wurde von dem jeweiligen Körperspender das rechte und linke Handgelenk verwendet. Es wurden 70 linke und 52 rechte Handgelenke verwendet. Der Altersdurchschnitt betrug 74,2 Jahre (Median 76,0) mit einem Minimum von 42,0 Jahren und einem Maximum von 95,0 Jahren. Von den 109 Individuen waren 44 weiblichen Geschlechts und 65 männlichen Geschlechts.

Die ethnische Verteilung ist der angefügten Tabelle 4 zu entnehmen.

Im Folgenden findet der Vergleich zwischen den Flexions- und Extensionsfrakturen statt. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den Flexionsfrakturen unter Extensionmechanismus.

	Race												Total	
	not specified		caucasian		afroamerican		hispanic		asian		nativ or indigen		N	%
Total	3	2,8%	90	82,6%	7	6,4%	5	4,6%	2	1,8%	2	1,8%	109	100,0%

**Tabelle 4: Ethnische Verteilung der Körperspender**

#### 3.2 Allgemeine Beschreibung der Frakturen

Aus den insgesamt 122 Präparaten mit vollständigem Datensatz konnten 13,9% radiologische Flexionsfrakturen (n=17) identifiziert werden. Bei 8,2% (n=10/122) der Flexionsfrakturen lag ein Extensionsmechanismus vor. Ein Extensionsmechanismus wurde 115-mal (94,3%) voreingestellt. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass bei Entstehung einer radiologischen Flexionsfraktur häufiger eine Pronationsstellung (6/17) als eine Supinationsstellung (3/17) im Handgelenk vorlag. Die restlichen radiologischen Flexionsfrakturen entstanden in Neutral-0-Stellung. Über die Radialabduktion (n=3) oder Ulnarabduktion (n=1) bei den Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus konnte in der vorliegenden Datenanalyse aufgrund der absolut geringen Anzahl der Einstellungen keine statistisch sichere Aussage getroffen werden. 6 Frakturen entstanden in Neutralstellung in Bezug auf Radial- und Ulnarabduktion. Statistisch betrachtet, entstanden Flexionsfrakturen häufiger, wenn eine

Pronationseinstellung (6/17) im Entstehungsmoment einwirkte (OR 1,03 [1,01;1,06]  $p=0,014$ ). Des Weiteren lag ein Anzeichen für niedrigere potentielle Energie bei Flexionsfrakturen in dem Versuchsaufbau vor. Hier betrug das OR=0,99 [0,97;1,00] ( $p=0,056$ ).

Bemerkenswerterweise zeigte sich in der Bildanalyse in 4 von 11 Fällen eine Extensionsfraktur unter Flexionseinstellung. Eine statistische Signifikanz in diesem Bezug lag jedoch nicht vor.

### **3.3 Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus**

Insgesamt war nach vorliegender Analyse in 8,2% ( $n=10$ ) der Fälle eine Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus zu finden.

#### **3.3.1 Betrachtung der Winkelmaße**

Diese Frakturen entstanden a.e. bei einem flacheren Extensionswinkel im Vergleich zu Extensionsfrakturen. Hier fand sich im Mittel eine Extensionswinkel von  $86,3^\circ$  ( $SD\pm 10,69^\circ$ ) gegenüber  $90,5^\circ$  ( $SD\pm 7,26^\circ$ ), wobei eine statistische Signifikanz nicht nachgewiesen werden konnte (MWU  $p=0,172$ ).

Die Pronation wurde in 6/10 Fällen eingestellt und lag zwischen  $38^\circ$  und  $43^\circ$ . Der Mittelwert betrug  $40^\circ$  ( $SD\pm 1,57^\circ$ ). Eine Flexionsfraktur wurde bei Supination von  $85^\circ$  erzeugt. 3/10 Flexionsfrakturen entstanden in Neutralstellung. In der Auswertung ist die Pronation dem OR von 1,03 [1,01;1,06] ( $p=0,014$ ) nach möglicher Prädiktor für die Entstehung einer Flexionsfraktur im Allgemeinen. Im speziellen betrachteten Fall konnte dies statistisch nicht nachgewiesen werden.

Eine Auswertung von Kombinationen von Winkeln zur multidimensionalen Beschreibung der Entstehung einer Flexionsfraktur im Extensionsmechanismus ist aufgrund der insgesamt zu geringen Fallzahl nicht sinnvoll möglich.

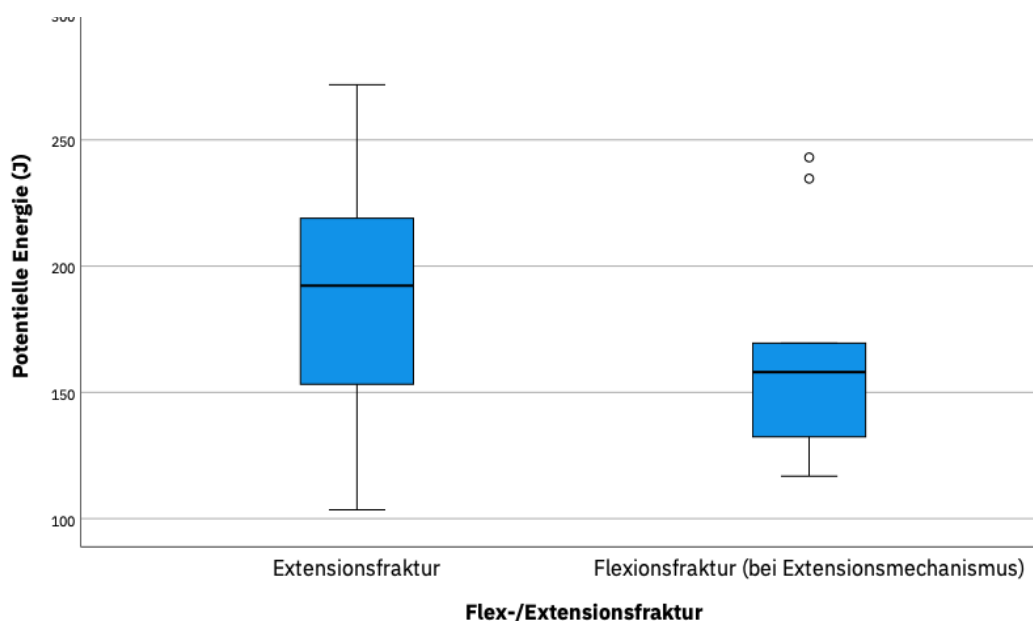
### 3.3.2 Betrachtung der potentiellen Energie

Die potentielle Energie ist bei Extensionsfrakturen im Durchschnitt am größten, während sie bei Flexionsfrakturen in Flexionsstellung abnimmt und schließlich bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus am niedrigsten ist (Tabelle 5 und Abb. 22), MWU  $p=0,086$ . Das OR beträgt 0,98 [0,97;1,00]  $p=0,084$ . Im Median lag die potentielle Energie der Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus bei 158,0J.

Mehr als 45% der Extensionsfrakturen entstanden unter einer potentiellen Energie von 200J oder mehr. Während 80% der Flexionsfrakturen unterhalb von 200J entstanden. Eine statistische Signifikanz lag nicht vor. Eine potentielle Energie von  $\geq 250$ J wurde bei 3/105 Extensionsfrakturen festgestellt. Keine der Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus entstand bei  $\geq 250$ J.

Potentielle Energie (J)	N		Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
	Valid	Missing				
Flex-/Extensionsfraktur						
Extensionsfraktur	105	0	187,98	38,59	103,53	271,90
Flexionsfraktur	7	0	172,46	40,95	107,01	216,20
Flexionsfraktur (bei Extensionsmechanismus)	10	0	164,85	42,59	116,84	243,10

**Tabelle 5: Übersicht der Potentiellen Energie**



**Abb. 22: Potentielle Energie und Frakturmorphologie**

Grafische Darstellung der Verteilung der potentiellen Energie bei Extensionsfrakturen und Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus. Schwarzer Balken = Mittelwert.

Quelle: eigene Darstellung der Auswertung und s. Selle et al. „Die Flexionsfraktur des distalen Radius bei Extensionsmechanismus im Handgelenk“

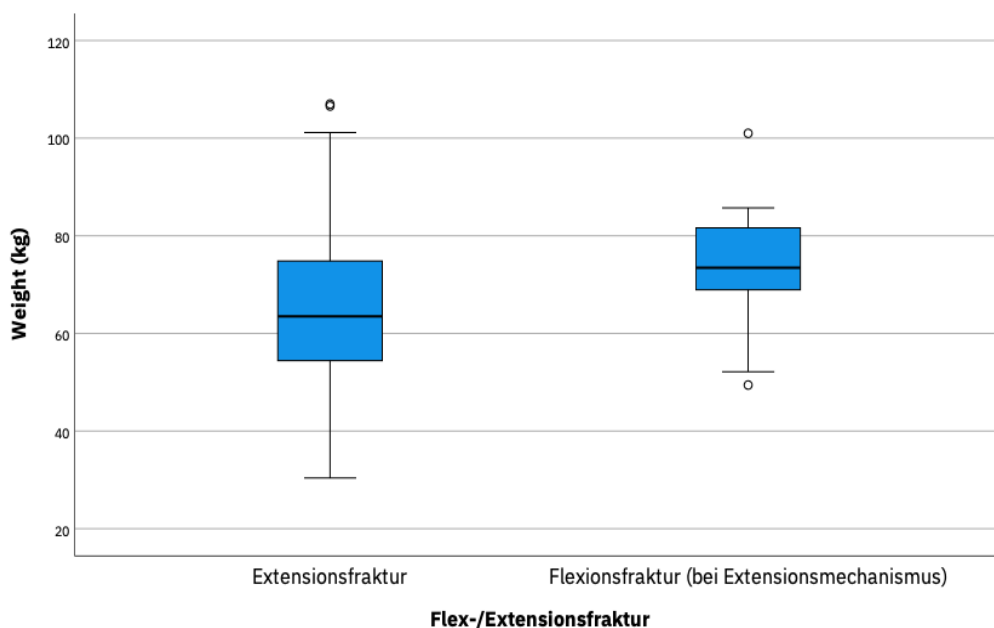


### 3.3.3 Betrachtung biographischer und physiognomischer Daten

Die Frakturpräparate zeigten Anzeichen für einen jüngeren Altersdurchschnitt bei Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus. Dieser betrug 70,7 Jahre ( $SD \pm 6,58$ ) bei Flexionsfrakturen gegenüber 74,8 Jahre ( $SD \pm 10,1$ ) bei Extensionsfraktur (MWU  $p=0,077$ ).

In der Betrachtungsweise der Gesamtheit aller Flexionsfrakturen (17/122) besteht ein signifikanter Unterschied im Altersdurchschnitt, der die o.g. Anzeichen zu einem jüngeren Alter bei Flexionsfrakturen unterstützt (MWU  $p=0,027$ ). Wobei das Alter aufgrund der OR von 0,96 [0,92; 1,01] ( $p=0,216$ ) kein sicherer Prädiktor für das Ergebnis Flexionsfraktur ist.

Es besteht ein Anzeichen dafür, dass die Körperspender der Flexionsfrakturen bei Extensionsmechanismus im Durchschnitt ein höheres Körpergewicht hatten (s. Abb. 23) 73,8kg ( $SD \pm 15,1$ ) gegenüber 64,9kg ( $SD \pm 15,4$ ) bei MWU  $p=0,080$ ; OR 1,04 [1,00;1,08]  $p=0,084$ .



**Abb. 23: Gewichtsunterschiede**

*Gewichtsunterschiede zwischen Präparaten mit Extensionsfraktur und Flexionsfraktur im Extensionsmechanismus. Schwarzer Balken = Mittelwert*

### 3.3.4 Betrachtung der Begleitverletzungen

Die Tabelle 6 zeigt eine Übersicht der Begleitverletzungskategorien und ihre Häufigkeiten bei den Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus (10/105). Es besteht keine statistisch signifikante Häufung von Begleitverletzungen bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus. Aufgrund der geringen absoluten Anzahl ist eine Kombinationsauswertung nicht statistisch sinnvoll möglich.

Begleitverletzung	Häufigkeit absolut	Häufigkeit (%)	Signifikanz (Chi <sup>2</sup> )
Ulnafraktur	2	20%	p=0,757
Skaphoidfraktur	4	40%	p=0,861
Perilunäre Luxation	1	10%	p=0,588
sonstige Karpale Frakturen	4	40%	p=0,858
Mittelhandknochenfraktur	3	20%	p=0,627

**Tabelle 6: Übersicht Begleitverletzungen**

*Übersicht der Begleitverletzungen bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus (n=10)  
Quelle: eigene Darstellung der Auswertung und s. Selle et al. „Die Flexionsfraktur des distalen Radius bei Extensionsmechanismus im Handgelenk“*

### 3.3.5 Betrachtung der Klassifikationen

Die Tabelle 7 zeigt die allgemeine Übersicht der vorliegenden Frakturen in der AO-Klassifikation.

		Total	
		N	%
AO Typ 2R3	A3	3	2,5%
	B1	3	2,5%
	B2	2	1,6%
	B3	1	0,8%
	C1	8	6,6%
	C2	39	32,0%
	C3	66	54,1%
Total		122	100,0%

**Tabelle 7: Verteilung der Frakturmorphologie in der AO-Klassifikation**

*Verteilung der Frakturen in der AO-Klassifikation  
Quelle: eigene Darstellung der Auswertung und s. Selle et al. „Die Flexionsfraktur des distalen Radius bei Extensionsmechanismus im Handgelenk“*

In der Betrachtung der AO-Klassifikation fanden sich in 70% der Fälle bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus eine Fraktur des Typs C2 (n=7), während

29,5% der Extensionsfrakturen (n=31) dem Typ C2 zuzuordnen waren. Eine Flexionsfraktur in Flexionseinstellung wurde dem Typ C2 zugeordnet. Extensionsfrakturen waren mit 59,0% häufiger dem Typ C3 zuzuordnen. Die Signifikanz betrug  $p=0,002$  (Pearson-Chi<sup>2</sup>-Test).

In der entsprechenden Subgruppenanalyse konnte die Flexionsfraktur im Extensionsmechanismus zu 50% (n=5) als C2.1 Fraktur identifiziert werden im Vergleich zu 17,1% der Extensionsfrakturen (n=18). Die Signifikanz betrug  $p=0,032$  (Pearson-Chi<sup>2</sup>-Test). Die Übersicht der Frakturen in der Subgruppenverteilung dieser Arbeit ist der Tabelle 8 zu entnehmen.

		Total	
		N	%
AO Subtype	A3.2	1	0,8%
	A3.3	2	1,6%
	B1.1	3	2,5%
	B2.2	2	1,6%
	B3.3	1	0,8%
	C1.1	1	0,8%
	C1.2	6	4,9%
	C1.3	1	0,8%
	C2.1	23	18,9%
	C2.2	5	4,1%
	C2.3	11	9,0%
	C3.1	3	2,5%
	C3.2	49	40,2%
	C3.3	14	11,5%
	Total	122	100,0%

**Tabelle 8: Subgruppenverteilung der AO-Klassifikation**

In Analyse der Fernandez- und Mayo-Klassifikation zeigten sich keine statistischen Auffälligkeiten im Vergleich zu Extensionsfrakturen.

Ebenso zeigte die Klassifikation nach Frykman keine statistisch signifikanten Unterschiede (Tabelle 9). Absolut gesehen waren Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus häufiger Typ IV Frakturen (60,0% vs. 27,6%).

		Extensionsfraktur		Flexionsfraktur (bei Extensionsmechanismus)			
		N	%	N	%	N	%
Frykman	I	1 <sub>a</sub>	1,0%	0 <sub>a</sub>	0,0%	1	0,9%
	II	2 <sub>a</sub>	1,9%	0 <sub>a</sub>	0,0%	2	1,7%
	III	17 <sub>a</sub>	16,2%	3 <sub>a</sub>	30,0%	20	17,4%
	IV	29 <sub>a</sub>	27,6%	6 <sub>b</sub>	60,0%	35	30,4%
	VII	12 <sub>a</sub>	11,4%	0 <sub>a</sub>	0,0%	12	10,4%
	VIII	44 <sub>a</sub>	41,9%	1 <sub>b</sub>	10,0%	45	39,1%
Total		105	100,0%	10	100,0%	115	100,0%

**Tabelle 9: Ergebnisse der Einteilung nach Frykman**

*Jeder gleiche nachgestellter Buchstabe bezeichnet eine Untergruppe der Kategorien "Flex-/Extensionsfraktur" deren Spalte sich nicht signifikant auf einem  $p=0,05$  Level voneinander unterscheidet.*

*Frakturen der Subgruppe V und VI wurden in dieser Arbeit nicht gesehen.*

Bei der Analyse der Pechlaner-Klassifikation zeigte sich in der übergeordneten Betrachtung kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Extensions- und Flexionsfrakturen nach Extensionsmechanismus. Häufiger konnten Flexionsfrakturen bei Extensionsmechanismus jedoch dem Pechlaner Typ II (90% vs. 65,3%, Pearson-Chi<sup>2</sup>-Test  $p=0,099$ ) zugeordnet werden.

In der Subgruppenbetrachtung des Pechlaner Typ II zeigte sich statistisch auffällig häufig der Typ II-2B mit 40% der Fälle einer bildmorphologischen Smith-Fraktur nach Extension gegenüber 6,9% einer Colles-Fraktur (Pearson-Chi<sup>2</sup>-Test  $p=0,014$ ).

In der Analyse der Klassifikation nach Brink und Rikli fand sich keine statistische Auffälligkeit. Auch die Subgruppenanalyse des Typ B erbrachte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Vergleichsgruppen.

Die Betrachtung nach Hintringer und Krimmer zeigte vermehrt Anzeichen zur Eingruppierung als „radiales Schlüsselfragment“. 50,0% der Flexionsfrakturen wurden gegenüber 13,3% der Extensionsfrakturen diesem Typ zugeordnet werden (Pearson-Chi<sup>2</sup>-Test  $p=0,084$ ).

## 4 Diskussion

### 4.1 Ausgangslage und Vergleich mit den vorangegangenen Publikationen

Ein wesentlicher Vorzug der vorliegenden Arbeit ist die hohe absolute Fallzahl von 122 eingeschlossenen Frakturen an Humanpräparaten. Die Altersstruktur der eingeschlossenen Körperspender entspricht mit einem Altersdurchschnitt von 74,2 Jahren dem im klinischen Alltag gesehenen, geriatrischen Patientengut. In dieser Arbeit betrug die Geschlechtsverteilung etwa 40:60 (weiblich : männlich). Diese Verteilung entspricht nicht einschlägigen epidemiologischen Beschreibungen [5,6]. Diese Autoren sahen eine deutlich erhöhte Zahl weiblicher geriatrischer Patienten mit distalen Radiusfrakturen. Eine zu unserer Untersuchung ähnliche Studie von Matsuura et al. [9] zeigte ebenfalls eine umgekehrte Geschlechterverteilung zu Gunsten des weiblichen Geschlechts. In das vorliegende Studiendesign dieser Arbeit wurden ausschließlich Datensätze mit Frakturen eingeschlossen, sodass das o.g. Geschlechterverhältnis allein der Vorselektion der Körperspender durch die datenliefernde Firma geschuldet ist. Eine weiterhin nicht wirklichkeitsgetreue Verteilung der US-Population spiegelt sich in der vorliegenden ethnischen Verteilung (Tabelle 4, Seite 37) wider. Der Zensus 2020 [37] zeigte einen deutlich geringeren kaukasischen Anteil an der Bevölkerung zu Gunsten anderer Ethnien, weshalb diesbezüglich eine weitergehende Auswertung nicht sinnvoll erschien.

Die beiden Arbeiten von Pechlaner et al. (2002) und Matsuura et al. (2017) [9,10] sind die einzigen, welche die Entstehung von Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus detaillierter beschreiben, wobei hier die methodischen Unterschiede hervorzuheben sind. Beide Autorengruppen arbeiteten mit einer deutlich geringeren Fallzahl von Humanpräparaten (Pechlaner: 63, Matsuura: 10). Des Weiteren hatte insbesondere die japanische Arbeitsgruppe die Absicht, kontrolliert Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus zu erzeugen, während die österreichische Arbeitsgruppe, wie in unserem Fall, die nach palmar dislozierenden Frakturen zunächst als einen unter vielen Befunden der eigentlichen Arbeit erhielten. Durch die explizite Betrachtung der Flexionsfraktur kam es bei Matsuura et al. zu einer deutlich beschränkteren Variabilität der entstanden Frakturen und des zugehörigen Pathomechanismus. Aufgrund der geringeren Fallzahl und des Studiendesigns blieben

möglicherweise weitere Pathomechanismen außen vor.

Aufgrund der großen Fallzahl in dieser Arbeit entsteht bei der vorhandenen Variabilität der eingestellten Parameter eine realistischere, kliniknähere Verteilung in Bezug auf artikuläre oder partiell-artikuläre distale Radiusfrakturen, ohne die primäre explizite Absicht, eine Flexionsfraktur zu erzeugen. Ein weiterer klinisch relevanter Unterschied dieser Arbeit besteht in der Vorbereitung der Präparate. Die Frakturen dieser Arbeit wurden bei vollständig intaktem Weichteilmantel und somit intaktem Kapsel-Band-Apparat erzeugt. In der Studie von Matsuura erfolgte die Frakturherstellung an bis auf die Handgelenkskapsel und die Bänder der Hand präparierten Unterarmen mit exartikulierten Metakarpalia. Methodisch zeigte sich ein ähnlicher Versuchsaufbau im Hinblick auf die einwirkenden Kräfte über Gewichte, die von proximal einmalig und ungehindert auf den präparierten Unterarm einwirkten. Die Arbeit von Pechlaner et al. hingegen unterschied sich deutlich in der angewandten Methodik des Versuchsaufbaus. Hier wurden die Frakturen in einer Materialprüfmaschine erzeugt, bei der schrittweise und langsam eine Überstreckung des Handgelenkes durchgeführt wurde. Teile der Präparate wurden in unterschiedlichen Stadien der Überstreckung eingefroren und mittels CT untersucht, um anschließend weiter überstreckt zu werden. Positiv ist hervorzuheben, dass die Arbeitsgruppe im weiteren Verlauf alle Begleitverletzungen, die CT-basiert nicht abgebildet werden konnten, über eine sorgfältige Präparation der Handgelenke erfasste. Aufgrund unseres Studiendesigns bestand keine Möglichkeit zur Präparation der Handgelenke.

Methodisch bleibt anzumerken, dass nach Lubahn [35] in dem Versuchsaufbau des vertikal herabstürzenden Gewichtes, wie in unserer Arbeit, der rückwärtige Sturz auf das ausgestreckte Handgelenk simuliert werden soll. In seiner Arbeit verglich der Autor weiterhin einen Sturz mit vorwärts gerichteter Neigung und simulierter Abrollbewegung in einer eigens konstruierten Testvorrichtung. Die Testung mit simulierter Abrollbewegung führte jedoch zu einer signifikant geringeren Anzahl an distalen Frakturen, wodurch eine sinnvolle Auswertung nicht möglich war.

## 4.2 Allgemeine Ergebnisse

In dieser Arbeit konnten 13,9% radiologische Flexionsfrakturen und 8,2% radiologische Flexionsfrakturen nach Extensionsmechanismus identifiziert werden. Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Zahlen von anderen Arbeiten [9,10,38]. Die häufigere Grundeinstellung einer Pronation entspricht a.e. auch der physiologischen Abwehrreaktion eines stürzenden Menschen, der seinen ausgestreckten Unterarm mit der Handfläche zur Sturzrichtung hält, um den Sturz abzufangen.

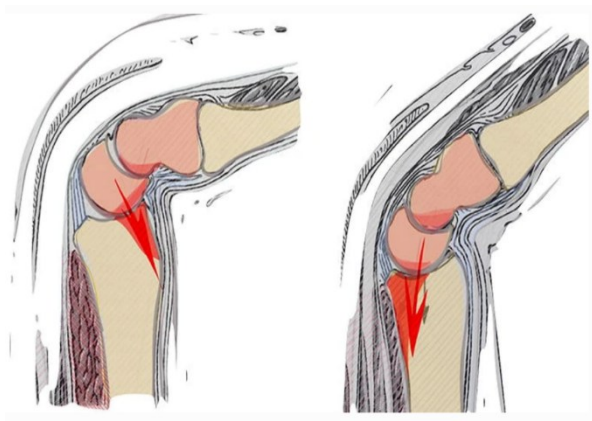
### 4.2.1 Betrachtung der Winkelmaße

In der Betrachtung der Mittelwerte der Extensionswinkel zeigten Flexionsfrakturen einen flacheren Winkel mit  $86,3^\circ$  im Vergleich zu Extensionsfrakturen mit einem Extensionswinkel von  $90,5^\circ$ . Ein statistisch signifikanter Unterschied konnte in dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden. Hingegen konnte eine statistische Auffälligkeit in der Analyse der Unterarmrotation ermittelt werden. Dem o.g. odds-ratio nach erscheint die Einstellung einer Pronation vermehrt zu Flexionsfrakturen zu führen.

In der vergleichbaren Literatur wird bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus ebenfalls ein flacherer Extensionswinkel angegeben. Bei Matsuura et al. wurde in den physischen Versuchen an Leichenpräparaten eine  $30^\circ$  Extension im Radiokarpalgelenk voreingestellt, um eine Flexionsfraktur zu erzeugen. Der Unterarm befand sich immer in  $90^\circ$  Pronation. Ergänzend führten die Autoren eine Computersimulation über die Finite-Elemente-Methode durch, um eine Vorhersage treffen zu können, wann Radii von drei unterschiedlichen Probanden aufgrund von vorherigen CT-Analysen, im Sinne einer Flexionsfraktur brechen würden. Hier zeigte sich die Möglichkeit einer Flexionsfraktur zwischen einem Winkelmaß von  $30^\circ$ - $90^\circ$  Extension und  $90^\circ$ - $105^\circ$  Pronation, wobei ein flacherer Extensionswinkel bevorzugt wurde.

In der Arbeit zur Klassifikation distaler Radiusfrakturen von Hintringer und Krimmer im Jahr 2020 [8] wurden diese Ergebnisse ebenfalls mit aufgenommen. Schematisch wird dies in folgender Abb. 24 dargestellt.

Hier kann veranschaulicht werden, dass in Abhängigkeit der Richtung der einwirkenden Kräfte und der Stellung der Handwurzelknochen (insbesondere des Os lunatum) palmare Frakturen möglich sind. Bei fortschreitender Extension kommt es hingegen zu vermehrter Kompression der dorsaler Radiuskante, wie den Arbeiten von Pechlaner [10,39] entnommen werden kann. Durch die sequentiell erzeugten Frakturen und die zwischenzeitlichen CT-Bildgebungen konnte der Bewegungsablauf der Karpalia und die korrespondierende Kompression an den unterschiedlichen Abschnitten des Radius nachvollzogen werden. Es wird in diesen Arbeiten darauf hingewiesen, dass der flachere Extensionswinkel den Druck des Os lunatum auf die zentral und palmare Gelenkfläche am distalen Radius erhöht. Spezifische Winkelmaße werden jedoch nicht berichtet.



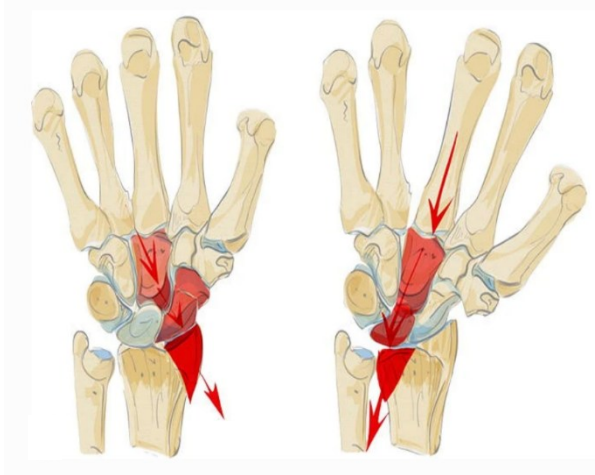
**Abb. 24: Einfluss des Extensionswinkels auf die Radiusgelenkfläche**

*Diese Abbildung zeigt den Einfluss des Extensionswinkels auf die Stellung des Os capitatum und Os lunatum und den daraus resultierenden Druck auf die Radiusgelenkfläche mit möglicher Entstehung einer palmaren Fraktur bei Extensionsmechanismus*

*Quelle: aus Hintringer et al. 2020 [8] – open source*



Mögliche Einwirkungen der Radial- und Ulnaabduktion werden in der Abb. 25 ebenfalls deutlich. In der Radialabduktion übt die veränderte Stellung des Os capitatum und des Os lunatum Druck auf die Fovea lunata sowie in Ulnaabduktion Druck durch das Os capitatum und das Os scaphoideum auf die Fovea scaphoidea aus.



**Abb. 25: Einfluss der Radial- und Ulnaabduktion auf die Radiusgelenkfläche**

*Diese Abbildung zeigt den Einfluss der Radial- und Ulnaabduktion auf die Stellung des Os capitatum und Os scaphoideum und den daraus resultierenden Druck auf die Radiusgelenkfläche mit möglicher Entstehung einer Fraktur im Bereich der Fovea scaphoidea oder Fovea lunata*

*Quelle: aus Hintringer et al. 2020 [8] – open source*

Weitere Erklärungen für die Entstehung von Flexionsfrakturen in einem flacheren Winkel findet sich unter anderem in der Arbeit von Majima et al. [40]. Hier wird im Rahmen einer theoretischen Arbeit anhand von Computersimulationen dargestellt, dass, je näher das Handgelenk einer Neutralstellung kommt, eine größere Kraftübertragung auf den palmaren Aspekt der Gelenkfläche, sowohl über die Fovea lunata, als auch die Fovea scaphoidea einwirkt. Dies sei unter anderem bedingt durch die palmare Inklination der Radiusgelenkfläche, wie weitere Autoren beschreiben [41]. Darüber hinaus zeigt sich in der Simulation von Majima, dass bei zunehmender Extension eine Rotation der proximalen Karpalia nach dorso-radial erfolgt. Ein definierter Winkel, ab dem es zu einer vermehrten Kraftübertragung auf die Fovea scaphoidea und Abnahme der Kraft an der Fovea lunata kommt, wird in der Arbeit nicht beschrieben. Majima et al. sehen im Gegensatz zu Pechlaner und Kollegen, dass nicht das Os lunatum primär für die Kraftübertragung in der Verantwortung steht, sondern, dass die vornehmliche Druckverteilung über das Os capitatum und die Ossa trapezium und trapezoideum auf

das Scaphoid läuft, ähnlich der Abb. 25 (Seite 48, links), ohne dass ein Bezug zur Radial- oder Ulnaabduktion besteht.

In unserer Arbeit konnte der Einfluss einer Bewegung des Karpus bei Radial- und Ulnaabduktion aufgrund der sehr geringen Fallzahl der Einstellungen nicht abschließend geklärt werden. Daher verbleibt auch die statistische Analyse der multidimensionalen Beschreibung einer Flexionsfraktur unter Extensionmechanismus beschränkt möglich.

Die vorliegenden Flexionsfrakturen bei Extensionsmechanismus entstanden zu 60% in Pronation. Dieser Fakt spiegelt eine realistische Haltung des Handgelenkes bzw. des Unterarmes zum Zeitpunkt eines Sturzes eines Patienten wider im Sinne einer unterbewussten Abstützreaktion mit Wendung der Handfläche zum Boden. Die geringe Variabilität der Gradzahlen, kommt a.e. durch die technische Ausführung im Versuchsaufbau zustande. Eine vollumfängliche Auswertung der entstanden Frakturmorphologien im Hinblick auf die Unterarmrotation ist durch die beschränkte Anzahl der Supinationseinstellungen und der Variabilität der Winkelmaße nicht sinnvoll möglich. Hierzu wäre eine größere Anzahl mit breiter Verteilung notwendig.

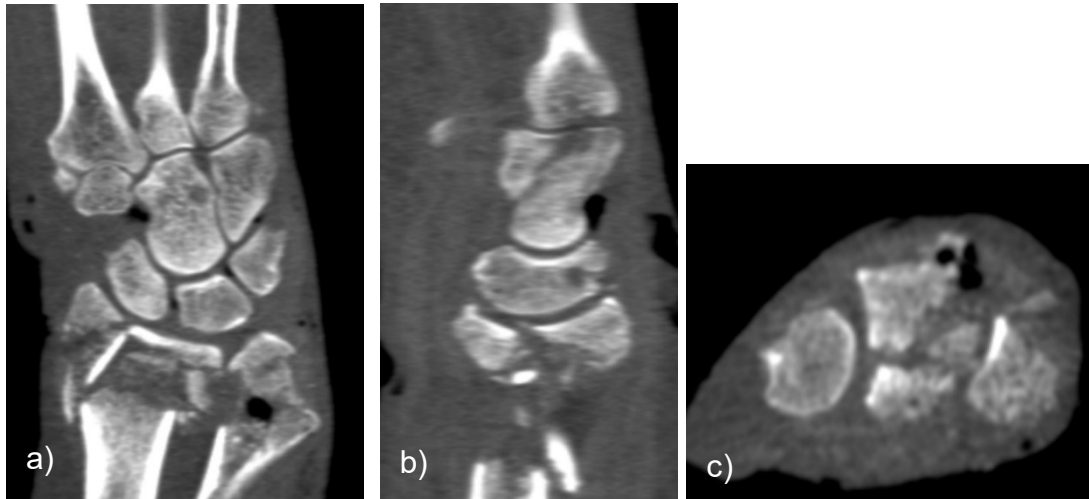
Die in dieser Arbeit und teilweise bei Matsuura beschriebenen Winkel, insbesondere für Extension und Flexion, sind größer als das physiologische und alltägliche Bewegungsausmaß nach Palmer et al. [19]. Hierdurch wird, besonders in unserer Arbeit, zum Teil die pathophysiologische Überstreckung im Abrollmoment des Sturzes imitiert. Andererseits sind die mitunter gefundenen Begleitverletzungen und Kombinationen von Begleitverletzungen auf die unphysiologischen Überstreckungen bei fehlendem muskulärem Abwehrmechanismus zurückzuführen. Auf weitere Limitierungen wird in den folgenden Abschnitten eingegangen. Die Möglichkeit der Entstehung einer Flexionsfraktur bei Extensionsmechanismus im flacheren Winkel lässt sich jedoch auch durch die Arbeit von Majima untermauern.

Weiterhin ist anzumerken, dass die Dokumentation der Winkel durch äußere Ablesung mittels Goniometer ohne radiologische Kontrolle bei vollem Weichteilmantel erfolgte. Daher wird der exakte Winkel im Radiokarpalgelenk geringer sein als die hier abgelesenen Winkel.

#### 4.2.2 Betrachtung der potentiellen Energie

Hervorzuheben ist, dass Anzeichen für eine niedrigere potentielle Energie bei der Entstehung von Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus vorliegen. In dieser Arbeit lag die potentielle Energie bei durchschnittlich 164,9J (SD  $\pm$  10,06J) und im Median bei 158,0J, wenn eine Flexionsfraktur im Extensionsmechanismus entstand. Wenige Autoren können über die Energie im Moment der Frakturzeugung berichten. So beschreiben Wegman et al. [42] für eine der erzeugten Flexionsfrakturen in ihrer Arbeit ein ähnliches Energieniveau im Moment der Frakturzeugung. Die potentielle Energie im Versuchsaufbau bei Matsuura lag konstant bei 196,2J für männliche und 147,15J für weibliche Handgelenke. Bei Lubahn et al. [35] lag die mittlere Energie in den vertikalen Sturzversuchen, einem im Versuchsaufbau dieser Arbeit ähnelndem Ansatz, bei lediglich 112J (SD  $\pm$  15,2J). Es muss jedoch angemerkt werden, dass diese Autoren nicht die Dislokationsrichtung ihrer erzeugten Frakturen erwähnten. Sie beschrieben jedoch, dass in 18% der Fälle mit dieser Energie keine Fraktur entstand. Historisch findet sich in der Publikation von Frykman [27] die Anmerkung, dass in seinen Experimenten zur Entstehung von Radiusfrakturen eine höhere Kraft benötigt wurde, wenn eine Dorsalextension  $> 90^\circ$  vorlag. Außerdem konnte er bereits beschreiben, dass eine höhere Kraft im Sinne eines Hochenergietraumas, wie in dieser Arbeit, mit einem höherem Zerstörungsgrad des Gelenkes einherging. Auf Grund des höheren Zerstörungsgrades des Gelenkes ist der Umgang des Untersuchers mit den hochgradig instabilen Präparaten eine technische Limitierung der Arbeit. Die initiale Abkippung lässt sich möglicherweise somit nicht mehr korrekt bestimmen, eine unwillkürliche Veränderung zwischen der Entfernung des Präparates aus der Versuchsvorrichtung und der radiologischen Dokumentation ist zweifelslos möglich. Eine ähnliche Limitierung liegt in dieser Arbeit vor und wird im Folgenden weiter ausgeführt.

Die von uns analysierten Hochenergetraumata mit ausgedehnter Zerstörung des Handgelenkes entsprachen außerdem nicht dem klinisch alltäglichen Bild distaler Radiusfrakturen (vgl. Abb. 26).



**Abb. 26: Beispielhafte Bildgebung eines Hochenergetraumas**

*Die Abbildung zeigt exemplarisch den Ausschnitt aus der CT-Bildgebung einer distalen Radiusfraktur, die unter einer potentiellen Energie von 247,5J entstand.*

*a): coronare Schnittebene mit Anschnitt der begleitenden mehrfragmentären Ulnafraktur*

*b): sagittale Schnittebene auf Höhe des Os lunatum zur Verdeutlichung der weitestgehenden Zerstörung des meta-diaphysären Überganges, begleitende Fraktur Os capitatum*

*c): axialer Anschnitt subchondral der Radiusgelenkfläche mit hochgradiger Zerstörung der Gelenkfläche*

*Quelle: Eigene Datenbank, Präparat S-1816XX-X*

Das vorliegende Ergebnis in unserer Arbeit mit Bezug auf die notwendige Energie ist in die verfügbare und vergleichbare Datenlage einzuordnen. Es bleibt jedoch zu betonen, dass die ausführliche Analyse der einwirkenden Energie in keiner weiteren gefundenen Arbeit in dieser Weise analysiert oder dokumentiert wurde.

#### 4.2.3 Betrachtung biographischer und physiognomischer Daten

Das Durchschnittsalter der Präparate mit Flexionsfraktur im Extensionsmechanismus betrug 70,7 Jahren gegenüber 74,8 Jahren bei Extensionsfrakturen. Statistisch bestand ein signifikanter Unterschied zwischen allen Flexionsfrakturen und Extensionsfrakturen. Warum jüngere Patienten eine Flexionsfraktur erleiden, kann aus den vorliegenden Daten nicht geschlossen werden. Auch ist das Alter gemäß des OR kein sicherer Prädiktor für das Ereignis einer Flexionsfraktur. In der umfangreichen Literaturrecherche hierzu konnte kein Bericht gefunden werden, der diesen Zusammenhang vergleichend beschrieb.

Des Weiteren bleibt anzumerken, dass in dieser Arbeit, wie auch in den anderen vergleichbaren Arbeiten keine Autorengruppe Flexionsfrakturen im jüngeren Patientengut beschreibt. Auch Matsuura und Kollegen zeigen in einem weiteren Aspekt ihrer Arbeit [9] lediglich auf, wie das Sturzgeschehen bei einem beispielhaften, geriatrischen Patientengut ausgesehen haben soll.

Es gab statistische Anzeichen zu einem höheren absoluten Körpergewicht der Spender bei Präparaten, die eine Flexionsfraktur unter Extensionsmechanismus aufwiesen. Inwiefern damit auch ein vermehrter Handgelenksumfang durch zum Beispiel Fetteinlagerungen am distalen Unterarm und einer folgenden Einschränkung beziehungsweise Behinderung der Dorsalextension bestanden, kann anhand der vorliegenden Daten nicht festgestellt werden. Es wäre denkbar, dass ein vermehrter Umfang am distalen Unterarm die mögliche *range of motion (ROM)*, insbesondere im Hinblick auf die endgradige Beugung oder Streckung, im Handgelenk behindert. Somit könnte ein endgradig flacherer Winkel in der Dorsalextension im Vergleich zu einem normalgewichtigen Körperspender resultieren. Eine statistisch belastbare Auffälligkeit dahingehend konnte nicht festgestellt werden. Weiterführend ist zu berichten, dass keine signifikanten Unterschiede beim BMI und den Extensions- oder Flexionsfrakturen vorlagen. In der verfügbaren epidemiologischen Literatur wurde, beispielhaft bei Premaor et al. [43] berichtet, dass adipöse Männer weniger distale Radiusfrakturen als normgewichtige Menschen erlitten. Weitergehend kam die Arbeitsgruppe um Ong et al. [44] in einer Studie aus der NHS Datenbank 2014 ebenso zu dem Schluss, dass adipöse Patienten weniger distale Radiusfrakturen erlitten. Dafür kamen Ong und Kollegen zu dem Schluss, dass in dem beschriebenen adipösen Patientenkollektiv ein deutlich erhöhtes Risiko für proximal gelegene Frakturen an der oberen Extremität besteht.

Eine genau Bestätigung dieser Beobachtungen ist aus der vorliegenden Datenbank nicht abzuleiten.

#### 4.2.4 Betrachtung der Begleitverletzungen

In unserer vorliegenden Arbeit bestand keine statistisch signifikante Häufung von Begleitverletzungen bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus. Dennoch ist zu bemerken, dass wir mehrere verschiedene knöcherne Begleitverletzungen dokumentierten. Dies kann als Anzeichen für eine erhöhte und möglicherweise unphysiologische Krafteinwirkung gesehen werden. Andere Autoren mit ähnlichem Versuchsaufbau [35,45] konnten ebenfalls eine hohe Anzahl an knöchernen Begleitverletzungen insbesondere am Karpus und der Ulna dokumentieren. Begleitverletzungen insbesondere des Karpus entstehen auch über die Interaktion von Zug- und Druckbelastungen an den intrinsischen Bändern in Abhängigkeit des Extensionswinkels [40].

Wie bereits zuvor erwähnt, ist eine weitergehende Betrachtung der weichteilassozierten Begleitverletzungen (z.B. des TFCC oder anderer ligamentärer Strukturen) im Handgelenk aufgrund des Studiendesigns mit retrospektiver Betrachtung der ermittelten Daten, nicht möglich. Hierzu sei auf die präparatorischen Befunde von Pechlaner et al. aus dem Jahr 2002 [10] verwiesen, die eine Vielzahl von verschiedenen Bandrupturen dokumentieren konnte. Diese Arbeitsgruppe sah bei den palmar betonten Frakturen der Pechlaner-Klassifikation (PE III-1 bis 3) in 43% (n=3/7) der Fälle eine Verletzung der distalen Ulna. In Bezug auf unsere Arbeit ist im Vergleich zu bemerken, dass wir in 20% der Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus eine begleitende Ulnafraktur sahen. Hingegen berichten Matsuura et al. sogar von 70% begleitender Ulnafrakturen. Somit bleibt festzuhalten, dass aufgrund der Methodik im Versuchsaufbau und anschließenden Dokumentation eine unterschiedliche Quantität an Begleitverletzungen dokumentiert werden kann. Zu beachten für die klinische Praxis bleibt, dass Verletzungen des Bandapparates und der distalen Ulna häufige Begleiter einer Radiusflexionsfraktur im Extensionsmechanismus sind und die Instabilität dieser Frakturität widerspiegeln. Letztlich muss das behandelnde Team die entsprechende Begleitverletzungen in seine Therapieüberlegungen einbeziehen.

#### 4.2.5 Betrachtung der Klassifikationen

Die Vielfältigkeit der distalen Radiusfraktur wurde in den o.g. Ergebnissen bereits deutlich. Insbesondere ist eine einheitliche Klassifizierung einer so heterogenen Fraktorentität mitunter eine Herausforderung, die nicht immer bei allen Anwendern zum selben Ergebnis führt, da manche der Klassifikationen Interpretationsräume lassen. Um diesem Umstand zu genüge zu kommen, wurden die eingeschlossenen Frakturen von einem Facharzt für Unfallchirurgie und Orthopädie klassifiziert und die Klassifizierung von einem Facharzt für Unfallchirurgie und Orthopädie mit der Fachweiterbildung Handchirurgie überprüft und bestätigt oder es wurde ein Konsens ermittelt. Es findet sich weitreichende Literatur zur Zuverlässigkeit der Anwendung verschiedener Klassifikationen bei distalen Radiusfrakturen. Wæver et al. [46] beschrieben in ihrer Publikation 2018 beispielsweise, dass die AO-Klassifikation die pragmatischste Klassifikation für die tägliche Routine darstelle, aber bereits auf der Ebene der Einteilung in die Hauptkategorien A, B oder C schwache Inter- und Intra-Rater-Reliabilität aufweise. Auf dem Level der Subklassifikation komme es dann sogar zu einer minimalen Kohärenz zwischen den Anwendern. Weitere Uneinigkeit lagen auch bei der Frykman-Klassifikation vor. Auch in weiter zurückliegenden Jahren beschrieben andere Autoren das Phänomen der höchst subjektiven Einteilung distaler Radiusfrakturen zwischen verschiedenen Anwendern [47] und sogar eine Diskrepanz zwischen der Bewertung als intra- oder extraartikuläre distale Radiusfraktur („*A/C reversal shift*“) [48]. Die Uneinigkeit zwischen der korrekten Beschreibung als intra- oder extraartikuläre Fraktur ist durch die additive CT-Diagnostik, die heutzutage in immer höherer Verfügbarkeit vorliegt, zurückgegangen, da diese Bildgebung eine zweifelsfreie Beurteilung der Gelenkfläche präoperativ ermöglicht. Studien zur Anwendbarkeit der neueren CT-basierten Klassifikationen nach Brink und Rikli oder Hintringer und Krimmer lagen zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor.

Im Speziellen besteht dann bei der Betrachtung und Klassifikation der Flexionsfraktur in dieser Arbeit die Schwierigkeit, diese Entität in ein starres vorgegebenes Muster einzuordnen. Die vorwiegend vorliegende Einteilung der in dieser Arbeit als Schwerpunkt gesetzten Flexionsfrakturen mit Extensionsmechanismus in den unterschiedlichen Klassifikationen als „übergroßes“ Radiusstyloid-Fragment ist möglicherweise zusätzlich durch den Versuchsaufbau bedingt, in welchem überwiegend die Entstehung der Fraktur bei vorliegender Pronationseinstellung erfolgte.

Durch die Grundeinstellung der Pronation kommt es zu einem größeren Druck auf den Processus styloideus radii. Wenn dieser dann mit Anteilen der palmaren Gelenkfläche abbricht und nach palmar disloziert, entsteht dabei eine Fraktur, die sich entsprechend der einzelnen Klassifikationen besser in radiale Subtypen einordnen lässt. Weiterhin sei an dieser Stelle auf die bereits zuvor erwähnte Arbeit von Majima et al. hingewiesen, die detailliert die Rotation der karpalen Knochen im Verlauf der Extension beschreibt und damit auf die Änderung der Kraftübertragung nach dorso-radial aufmerksam macht. Eine gewisse Variabilität unterliegt dabei jedoch auch dem Anwender der Klassifikation oder der mitunter ungenügenden Endbeschreibung der einzelnen Klassifikationen.

Die *AO-Klassifikation* bleibt eine pragmatische Einteilung in der klinischen Routine, auch wenn verschiedene Studien in Bezug auf distale Radiusfrakturen keine hohe Inter- und Intrarater-Reliabilität bescheinigen konnten [46]. Jedoch wird diese Einteilung am distalen Radius nicht der Funktionalität und Komplexität dieses Gelenkes gerecht, das heißt es werden Aspekte des biomechanischen Zusammenhanges nicht berücksichtigt und eine Adressierung der Schlüsselfragmente für eine operative Therapie ist nicht abzuleiten. Die allgemeine Verteilung der Frakturmorphologien in dieser Arbeit zeigte eine deutlich verminderte Quantität von Frakturen der Hauptgruppe A. Dieser Bias hängt mit den Ansprüchen der Präparate als Kursobjekte zur operativen chirurgischen Ausbildung zusammen, für die komplexere Frakturen des Typ C präferiert wurden. Davon abgesehen weist die Verteilung aber Parallelen mit klinischen Studien insbesondere in Bezug auf die Häufigkeit der Subgruppe B auf [49,50]. Der statistische signifikante Unterschied (*Pearson-Chi<sup>2</sup>-Test*  $p < 0,005$ ) zwischen den Hauptvergleichsgruppen in dieser Arbeit mit Bezug auf die AO-Subklassifikation ist bemerkenswert. Die Einteilung in Frakturen des Typ C2 (für Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus) gegenüber der deutlich häufigeren Einteilung als Typ C3 Frakturen (für Extensionsfrakturen) ist möglicherweise auch Folge der o.g. unterschiedlichen potentiellen Energie zwischen den Fraktorentitäten mit Anzeichen für eine niedrigere potentielle Energie bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus (164,9J) gegenüber Extensionsfrakturen (187,9J).



Die *Fernandez-Klassifikation* bietet eine simplifizierte und übersichtliche Möglichkeit distale Radiusfrakturen einzuteilen. Die Einteilung erfolgt, dem Autor nach, anhand des Unfallmechanismus, wobei eine beschreibende Komponente im Vordergrund steht, die die eigentlichen mechanischen Abläufe nur oberflächlich tangiert [26]. Darüber hinaus bietet Fernandez in seiner Originalarbeit Therapieempfehlungen an. Aufgrund des simplifizierten Aufbaus bleibt dies aber eine grobe Einteilung, die zu Lasten einer Differenzierung geht. In unserer Arbeit konnten keine statistischen oder deskriptiven Auffälligkeiten in Bezug auf diese Klassifikation festgestellt werden. Die Einfachheit der Anwendbarkeit in Bezug auf die vorliegende Bildgebung wurde von beiden Nutzern als gut bewertet.

In ähnlicher Art und Weise ist die Anwendbarkeit der *Mayo-Klassifikation* distaler Radiusfrakturen zu bewerten. Die simplifizierte Handhabung macht eine Klassifizierung vorliegender Bildgebung einfach. Insbesondere, wenn CT-Bildgebung vorhanden ist, kann der Zusatz stabil oder instabil leicht bestimmt werden, wobei die CT keine obligatorische Voraussetzung für diese Klassifikation ist. 1992 empfahlen daher die Autoren [28] die Kombination mit weiteren Klassifikationssystem beziehungsweise Scoringssystemen zur Verbesserung der Aussagekraft der eigenen Klassifikation, um letztlich auch eine Entscheidung über eine konservative oder operative Therapie zu treffen. Entsprechend ist die Mayo-Klassifikation als Produkt ihrer Zeit und ohne die primäre Möglichkeit bzw. flächendeckender Verführbarkeit einer hochauflösenden CT-Untersuchung ein fortschrittliches System für die Bewertung der distalen Radiusfraktur mit zufriedenstellender klinischer Anwendbarkeit gewesen. Diese Mayo-Klassifikation nimmt in der heutigen Zeit allerdings einen, andere Klassifikationen ergänzenden, Stellenwert ein. In unserer Arbeit zeigten sich keine weitergehenden Auffälligkeiten.

Die *Klassifikation nach Frykman* zeigte ohne statistische Signifikanz deutlich häufiger (60%) die Eingruppierung in den Typ IV, wenn eine Flexionsfraktur im Extensionsmechanismus vorlag gegenüber 27,6% bei Extensionsfrakturen. Problematisch, insbesondere im Hinblick auf diese Arbeit bleibt, dass die Dislokationsrichtung der Fraktur für die Einteilung nach Frykman irrelevant ist, da sich die Eingruppierung ausschließlich nach dem anterior-posterioren Röntgenbild richtet –

in dem eine palmare oder dorsale Dislokation schwerlich zu differenzieren ist – wenngleich der Autor auch Dislokationen in seiner Arbeit von 1967 [27] beschreibt. Im Vergleich mit der verfügbaren Literatur beschrieb Lubahn [35] in seiner vertikalen Sturzreihe, ähnlich zu unserem Versuchsaufbau, dass die Mehrheit seiner gefundenen Frakturen ebenfalls auf die Kategorie IV (nach Frykman) entfielen, auch wenn die prozentuale Verteilung mit 18% deutlich niedriger ausfiel. Die Verteilung auf die weiteren Kategorien war gleichmäßig mit 9%. Der Unterschied stammt daher am ehesten aus dem Modus der Frakturherzeugung, da eine Fraktur bei Lubahn immer aus gleicher Fallhöhe mit gleichem Gewicht erzeugt wurde. Leider wird in der Publikation von Lubahn nicht berichtet, ob die vorliegenden Frakturen Flexionsfrakturen enthielten. Insgesamt ist auch diese Klassifikation in ihrer Unkompliziertheit anwenderfreundlich, aber spiegelt nicht die heutigen Bedürfnisse an die klinische Praxis wider.

Die *Klassifikation nach Pechlaner* richtet sich maßgeblich nach der radiologischen Kurzbeschreibung der Fraktur mit einem Hinweis auf das Frakturausmaß. In ihrer Vielschichtigkeit beruht diese Klassifikation auf einer detaillierten Studie von distalen Radiusfrakturen, die ebenfalls an Humanpräparaten erzeugt wurden. Zunächst versuchte der Autor Radiusfrakturen in Extensionsmechanismus zu erzeugen und schrittweise die Entstehung zu dokumentieren. In der Anwendung auf unsere Arbeit bestand die Auffälligkeit, dass die vorliegenden Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus häufiger dem Pechlaner Typ II zugeordnet werden mussten. Insbesondere der Subtyp PE II-2B zeigte sich statistisch signifikant häufiger im Vergleich zu den gewöhnlichen Extensionsfrakturen. Die Handhabung der Pechlaner-Klassifikation an den vorliegenden radiologischen Daten verdeutlicht eine erschwerte Anwendbarkeit dieser Klassifikation bei erhöhtem Interpretationsspielraum, da von Seiten der Originalbeschreibung [30] zu erwarten wäre, dass alle artikulären Flexionsfrakturen dem Pechlaner Typ III-2 oder III-3 zuzuordnen sind. Trotz der erschwerten Anwendbarkeit und der Inter- und Intra-Reliabilität bleibt diese Einteilung und insbesondere die Publikationsreihe von Sigurd Pechlaner bemerkenswert aufgrund der detaillierten und schrittweisen Beschreibung in der Entstehung von distalen Radiusfrakturen, die erstmalig deutlich die Möglichkeit der Entstehung von Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus beschreibt [10].

Die *Klassifikation nach Brink und Rikli* zeigte in unserer Analyse keine statistischen Auffälligkeiten in Bezug auf Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus. Auch die Subgruppenanalyse der Typ-B-Frakturen war unauffällig. Zu dieser Klassifikation ist anzumerken, dass Frakturen mit einer „Schlüsselecke“ („*key corner*“) im Bereich der Fovea lunata des Radius nur schwer zu klassifizieren sind, insbesondere wenn keine Tendenz der palmaren Subluxation (dann B2) besteht oder wenn größere Ausläufer von radial in Richtung Fovea lunata verlaufen. Diese müssten folglich als Fraktur des Subtypes B1 eingruppiert werden und entsprächen damit einer Einteilung eines übergroßen Radiusstyloid-Fragmentes. Ansonsten zeigte sich für die Anwender in dieser Arbeit der deutliche Fortschritt in Bezug auf den Nutzen dieser Klassifikation für den klinischen Alltag.

In der, zum aktuellen Zeitpunkt, neuesten *Klassifikation nach Hintringer und Krimmer* spiegelt sich der Forschungsstand der ausführlichen biomechanischen Überlegungen wider. Diese Autoren gehen auch auf die Vorarbeiten von Pechlaner et al. ein und greifen den Aspekt, dass Flexionsfrakturen bei Extensionsmechanismus entstehen können [8,10,39], in ihre biomechanischen Überlegungen mit auf. Erklärt wird dies neben der Stellung des Os capitatum und Os lunatum bei flacherem Extensionswinkel auch über die Betrachtung der Bandstrukturen des Handgelenkes und ihrer Anspannung in gewissen Abschnitten bei der Extension.

In der Anwendung dieser Klassifikation in der vorliegenden Arbeit wurden bei Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus, wie schon in anderen Klassifikationen zuvor, öfter „radiale Schlüsselfragmente“ identifiziert.

Die folgerichtige Notwendigkeit zur Differenzierung palmarer Abscherfragmente, aufgrund der heterogenen Frakturmorphologie, zeigen die Autoren in der ergänzenden Arbeit aus dem Jahr 2021 [51]. Wie auch andere Klassifikation leiten Hintringer und Krimmer aus ihrer Klassifikation ebenfalls Empfehlungen zur weiteren Versorgung der Frakturen ab. Der große relevante Nachteil dieser Klassifikation besteht in der fehlenden alpha-numerischen Verschlüsselung, wie zum Beispiel in der AO-Klassifikation, dadurch bleibt die klinische Nutzung in der internationalen Kommunikation eingeschränkt. Dennoch bringt diese Klassifikation dem individuellen unfallchirurgischen Anwender durch die biomechanischen Überlegungen einen großen Nutzen in der Versorgung des betroffenen Verletzten.

Die weitere Vielzahl von publizierten Klassifikationen (Melone, Sarmiento, Older usw.), die in dieser Arbeit nicht im Einzelnen betrachtet wurden, zeigt die mögliche Variabilität in den Betrachtungsschwerpunkten und verdeutlicht die Heterogenität der distalen Radiusfraktur. Hierin liegt die Herausforderung, eine einheitliche und allgemein anwendbare Klassifikation zu schaffen. Die zunehmende Verfügbarkeit einer zusätzlichen CT-Untersuchung gibt die Möglichkeit zur differenzierten Betrachtung und Würdigung der jeweiligen Fraktur und schafft möglicherweise eine einheitlichere Einteilung mit höherer Reproduzierbarkeit, wozu weitere Studien jedoch noch fehlen. So konnte im Vorherigen gezeigt werden, dass die klinische Forschung es geschafft hat aufgrund verbesserter biomechanischer Überlegungen, nützliche und anwenderfreundliche Klassifikationen zu etablieren, die der distalen Radiusfraktur gerechter werden.

### 4.3 Limitationen

Im Bereich dieser Arbeit sind einige Limitationen insbesondere im Versuchsaufbau zu bemerken.

In erster Betrachtung könnte man im Rahmen der Versuchsdurchführung eine unzureichende wissenschaftliche Sorgfaltspflicht unterstellen, da von den erzeugten 289 Frakturen 161 Frakturen aufgrund einer vergleichbaren benötigten Datenstruktur im Hinblick auf die Dokumentation von Winkeln, potentieller Energie und zugehöriger radiologischer Bildgebung ausgeschlossen werden mussten. Allerdings muss man hier das Studiendesign berücksichtigen und die wissenschaftliche Auswertung der erfassten Daten nach vollständiger Erhebung zum Zwecke der operativen chirurgischen Ausbildung. Eine durch diese Arbeit erfolgte wissenschaftliche retrospektive Auswertung der Daten war nicht das primäre Ziel der Firma Rimasys.

Eine weitere Limitierung besteht in der Präparation der Humanpräparate. Vorwiegend wurde in dieser Arbeit eine Amputation in Höhe des proximalen Drittels des Unterarmschaftes durchgeführt. In wenigen Fällen erfolgte die Amputation mittig im Bereich des distalen Drittel des Humerusschaftes und ebenfalls in wenigen Fällen war der Arm bis zur Artikulation im Schultergelenk intakt und erst auf dieser Höhe in den Versuchsaufbau eingespannt. Auch in der Hauptgruppe, der im proximalen Drittel des Unterarmschaftes amputierten Präparate kann die Aufbereitung des Präparates selbst bereits mögliche Varianzen in den Ergebnissen vorwegnehmen, da es aufgrund verschiedener anatomischer Gegebenheiten zu einer variablen Amputatlänge kommen kann. Daraus resultiert eine Veränderung der einwirkenden Kraft im Handgelenk, sodass wahrscheinlich bei ansonst gleichen Voraussetzungen andere Frakturen entstehen. Eine Auswertung nach den einzelnen Präparationsvarianten und Amputatlängen konnte auf Grund der retrospektiven Datengewinnung nicht erfolgen.

Weiterhin wird die Fraktur durch ein künstliches fallendes Gewicht von proximal her erzeugt. Die Proportionen der Masse und somit der einwirkenden Kraft entsprechen nicht zwangsläufig den anatomischen Verhältnissen eines menschlichen Körpers, auch wenn laut Literatur das Gewicht von 23,0kg als repräsentativ für einen Sturz auf die obere Extremität gilt.

Im Weiteren kann aufgrund des verwendeten Leichenpräparates in unserem Fall zwar die Fraktur am intakten Weichteilmantel erzeugt werden, dennoch können die Muskelspannung und der Abwehrreflex des Lebenden unter keinen Umständen

simuliert werden. Hinzu kommt, dass die Präparate in eine Halterung eingespannt werden mussten und somit die Möglichkeit der anatomischen Roll-Gleitbewegung genommen wurde. Hierzu sei angemerkt, dass Lubahn et al. [35] einen Versuchsaufbau zur Roll-Gleitbewegung konstruierten, um den vorwärts gerichteten Sturz auf das Handgelenk genauer zu simulieren. Jedoch berichteten diese Kollegen, dass in diesem Versuchsaufbau deutlich weniger distale Radiusfrakturen erzeugt werden konnten. Ein weiterer Faktor, der aus der vorliegenden Literaturrecherche nicht suffizient beantwortet werden kann, ist der mögliche Einfluss auf die Lagerung der Präparate bei -20°C. Eine Veränderung der biologischen Strukturen, wie zum Beispiel die Elastizität von Knochen und Bändern durch den Gefrier- und Auftauprozess ist denkbar und kann ebenfalls Einfluss auf die resultierende Fraktur haben.

Zusätzlich kommen biologische Faktoren des Körperspenders hinzu. Nicht erkannte vorherige Verletzungen im Bereich des Handgelenks können zu weiteren Alterationen in der resultierenden Fraktur führen. Die individuellen Knochenqualitäten unterscheiden sich ebenfalls, sodass bei jedem Individuum am Ende, bei sonst gleichen Parametern, eine andere Frakturmorphologie entstehen kann. Hier muss auch das hohe Durchschnittsalter der Körperspender in Betracht gezogen werden. Die Zweigipfligkeit der Altersverteilung bei distalen Radiusfrakturen kann aus diesem Grund nicht repräsentiert werden.

Eine weitere Limitation ist die errechnete potentielle Energie. Für eine bessere Aussage der wirklichen Energieverhältnisse wäre die Dokumentation der kinetischen Energie oder der direkten Kraft im Handgelenk wünschenswert. Die Messung über Sonden im Radiokarpalgelenk selbst würde aber wiederum die strukturelle Integrität des Gelenkes beeinflussen und somit eine Fehlerquelle in sich darstellen.

Da eine anschließende Präparation der Frakturen aufgrund des Studiendesigns entfiel, beschränkt sich die Aussagekraft auf die radiologisch dargestellten knöchernen Verletzungen und kann zu etwaigen nicht knöchernen Begleitverletzungen keine Aussagen treffen.

Im Rahmen der Auswertung der Daten verbleibt eine mögliche Ungenauigkeit in der Klassifikation der distalen Radiusfrakturen aufgrund der möglichen Varianz in der Eingruppierung. Diese Limitationen wurden im zuvor gehenden Abschnitt zu jeder einzelnen Klassifikation bereits erläutert.

#### **4.4 Schlussfolgerung und Ausblick**

Verschiedene technische Limitierungen dieser Arbeit erschweren eine exakte Übertragbarkeit in die klinische Realität. Des Weiteren kann in keinem Versuch die physiologische Abwehrreaktion eines Patienten beim Sturz reproduziert werden, sodass die vorliegenden Frakturen a.e. einem bewusstlos stürzenden Patienten imitieren.

Das primäre Ziel dieser Arbeit, die Beschreibung und Differenzierung von distalen Radiusflexionsfrakturen im Extensionsmechanismus, konnte zuvor verdeutlicht werden. Es lässt sich anhand der vorliegenden Erkenntnisse festhalten, dass eine bisher als „Flexionsfraktur nach Smith“ klassifizierte Fraktur auch bei Extensionsmechanismus entstehen kann, wenn vorgenannte physikalische Parameter erfüllt werden.

Insbesondere ist zu bemerken, dass entgegen zuvor diskutierter Studien hier eine hohe Fallzahl von Frakturen bei intaktem Weichteilmantel eingeschlossen werden konnte. In dieser Arbeit konnte eine größere Anzahl von Flexionsfrakturen (13,9%) identifiziert werden. Insgesamt waren es 8,2% Flexionsfrakturen im Extensionsmechanismus die berichtet werden konnten. In der vergleichbaren Arbeit von Pechlaner aus dem Jahr 2007 differenzierte der Autor die erhaltenen distalen Radiusfrakturen zwischen der AO-Klassifikation und der Pechlaner-Klassifikation, es ergaben sich 5,1% Flexionsfrakturen nach AO-Klassifikation und 6,3% Flexionsfrakturen nach der Pechlaner-Klassifikation [38].

Die Anwendbarkeit von verschiedenen historischen und zeitgenössischen Klassifikationen distaler Radiusfrakturen konnte ebenfalls verdeutlicht werden, auch wenn Flexionsfrakturen unter Extensionsmechanismus nicht immer die passende Kategorisierung finden. Der Nutzen von biomechanischen Überlegungen in der Klassifikation ist deutlich vorteilhafter und bringt dem klinischen Anwender durch Auswahl geeigneter Zugänge und Implantate einen hohen Nutzen für die operative Versorgung.

Darüber hinaus wäre eine weitere differenzierte Betrachtung der Flexionsfraktur in Literatur und Klinik in Zukunft wünschenswert.

## 5 Literatur- und Quellenverzeichnis

1. Koo KOT, Tan DMK, Chong AKS. Distal Radius Fractures: An Epidemiological Review. *Orthop Surg*. 2013;5(3):209-213. doi:10.1111/os.12045
2. Lippisch R, Lucas B, Schüttrumpf JP, Piatek S, Walcher F. Distale Radiusfraktur. *Trauma Berufskrankh*. 2016;18(5):413-420. doi:10.1007/s10039-016-0177-y
3. Thompson PW, Taylor J, Dawson A. The annual incidence and seasonal variation of fractures of the distal radius in men and women over 25 years in Dorset, UK. *Injury*. 2004;35(5):462-466. doi:10.1016/S0020-1383(03)00117-7
4. Die Radiusfraktur | BDC|Online. BDC. Accessed February 23, 2020. <https://www.bdc.de/die-radiusfraktur/>
5. Rupp M, Walter N, Pfeifer C, et al. The Incidence of Fractures Among the Adult Population of Germany—an Analysis From 2009 through 2019. *Dtsch Arzteblatt Int*. 2021;118(40):665-669. doi:10.3238/arztebl.m2021.0238
6. Court-Brown CM, Caesar B. Epidemiology of adult fractures: A review. *Injury*. 2006;37(8):691-697. doi:10.1016/j.injury.2006.04.130
7. Unglaub F, Langer MF, Hohendorff B, et al. Distale Radiusfraktur. *Orthop*. 2017;46(1):93-110. doi:10.1007/s00132-016-3347-5
8. Hintringer W, Rosenauer R, Pezzei C, et al. Biomechanical considerations on a CT-based treatment-oriented classification in radius fractures. *Arch Orthop Trauma Surg*. 2020;140(5):595-609. doi:10.1007/s00402-020-03405-7
9. Matsuura Y, Rokkaku T, Kuniyoshi K, et al. Smith's fracture generally occurs after falling on the palm of the hand. *J Orthop Res Off Publ Orthop Res Soc*. 2017;35(11):2435-2441. doi:10.1002/jor.23556
10. Pechlaner S, Kathrein A, Gabl M, et al. Distal radius fractures and concomitant lesions. Experimental studies concerning the pathomechanism. *Handchir Mikrochir Plast Chir Organ Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Handchir Organ Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Mikrochir Peripher Nerven Gefasse Organ V*. 2002;34(3):150-157. doi:10.1055/s-2002-33682
11. Colles A. On the Fracture of the Carpal Extremity of the Radius. *Edinb Med Surg J*. 1814;10(38):182-186.
12. Smith. A Treatise on Fractures in the Vicinity of Joints, and on Certain Forms of Accidental and Congenital Dislocations. *Medico-Chir Rev*. 1847;6(11):137-152.
13. Dresing DK, Leitlinienkommission der <sup>[1]</sup><sub>[2]</sub> Deutschen Gesellschaft für Unfallchirurgie e.V. (DGU). Distale Radiusfraktur -S2e Leitlinie. 2015;(AWMF-Nr. 012 – 015).
14. Towfigh H, Hierner R, Langer M, Friedel R. *Handchirurgie*. Vol 2. 1. Auflage. Springer-Verlag; 2011.



15. Zeichen J. Distale Radiusfraktur. *Trauma Berufskrankh.* 2014;16(1):112-120. doi:10.1007/s10039-013-1982-1
16. Schmidt HM, Lanz U. *Chirurgische Anatomie der Hand. 2.*, überarbeitete und aktualisierte Auflage. Georg Thieme Verlag KG; 2013. doi:10.1055/b-002-13404
17. Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K. *Prometheus LernAtlas - Allgemeine Anatomie Und Bewegungssystem.* 6. vollständig überarbeitete Auflage. Thieme; 2022.
18. Spies CK, Langer M, Müller LP, Oppermann J, Löw S, Unglaub F. Anatomie und Biomechanik des distalen Radioulnargelenks. *Orthop.* 2018;47(8):621-627. doi:10.1007/s00132-018-3589-5
19. Palmer AK, Werner FW, Murphy D, Glisson R. Functional wrist motion: A biomechanical study. *J Hand Surg.* 1985;10(1):39-46. doi:10.1016/S0363-5023(85)80246-X
20. Hirt B. *Aufbau und Funktion des proximalen und distalen Radioulnargelenks.* 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Thieme Verlag; 2015. doi:10.1055/b-0034-101466
21. Werner FW, Short WH, Fortino MD, Palmer AK. The relative contribution of selected carpal bones to global wrist motion during simulated planar and out-of-plane wrist motion. *J Hand Surg.* 1997;22(4):708-713. doi:10.1016/S0363-5023(97)80133-5
22. Koch P, Nazarian S, Müller ME. *Classification AO Des Fractures.* Springer-Verlag; 1987. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-06263-0>
23. Müller ME, Nazarian S, Koch P, Schatzker J. *The Comprehensive Classification of Fractures of Long Bones.* Springer-Verlag; 1990. doi:10.1007/978-3-642-61261-9
24. Fracture and dislocation compendium. Orthopaedic Trauma Association Committee for Coding and Classification. *J Orthop Trauma.* 1996;10 Suppl 1:v—ix, 1—154.
25. Meinberg E, Agel J, Roberts C, Karam M, Kellam J. Fracture and Dislocation Classification Compendium—2018: *J Orthop Trauma.* 2018;32:S1-S10. doi:10.1097/BOT.0000000000001063
26. Fernandez DL. Distal radius fracture: the rationale of a classification. *Chir Main.* 2001;20(6):411-425. doi:10.1016/s1297-3203(01)00067-1
27. Frykman G. Fracture of the Distal Radius Including Sequelae-Shoulder-Handfinger Syndrome, Disturbance in the Distal Radio-Ulnar Joint and Impairment of Nerve Function: A Clinical and Experimental Study. *Acta Orthop Scand.* 1967;38(sup108):1-61. doi:10.3109/ort.1967.38.suppl-108.01
28. Missakian ML, Cooney WP, Amadio PC, Glidewell HL. Open reduction and internal fixation for distal radius fractures. *J Hand Surg.* 1992;17(4):745-755. doi:10.1016/0363-5023(92)90327-1

29. Pechlaner S, Sailer R, Suckert K, Beck E. Distal radius fractures--forms of fracture and injury pattern. *Unfallchirurgie*. 1988;14(2):86-93.
30. Pechlaner S. Einteilung distaler Radiusfrakturen. *Acta Chir Austriaca*. 1997;29(4):189-193. doi:10.1007/BF02620065
31. Brink PRG, Rikli DA. Four-Corner Concept: CT-Based Assessment of Fracture Patterns in Distal Radius. *J Wrist Surg*. 2016;5(2):147-151. doi:10.1055/s-0035-1570462
32. Rikli DA, Regazzoni P. Fractures of the distal end of the radius treated by internal fixation and early function. A preliminary report of 20 cases. *J Bone Joint Surg Br*. 1996;78(4):588-592.
33. Melone CP. Articular fractures of the distal radius. *Orthop Clin North Am*. 1984;15(2):217-236.
34. Mandziak DG, Watts AC, Bain GI. Ligament contribution to patterns of articular fractures of the distal radius. *J Hand Surg*. 2011;36(10):1621-1625. doi:10.1016/j.jhsa.2011.07.014
35. Lubahn J, Englund R, Trinidad G, Lyons J, Ivance D, Buczek FL. Adequacy of laboratory simulation of in-line skater falls. *J Hand Surg*. 2005;30(2):283-288. doi:10.1016/j.jhsa.2004.11.016
36. Quételet A. Recherches sur le poids de l'homme aux different âges. Published online 1832.
37. US Census Bureau. Racial and Ethnic Diversity in the United States: 2010 Census and 2020 Census. Accessed May 13, 2023. <https://www.census.gov/library/visualizations/interactive/racial-and-ethnic-diversity-in-the-united-states-2010-and-2020-census.html>
38. Pechlaner S, Gabl M, Lutz M, et al. Distal radius fractures--aetiology, treatment and outcome. *Handchir Mikrochir Plast Chir Organ Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Handchir Organ Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft Mikrochir Peripher Nerven Gefasse Organ V*. 2007;39(1):19-28. doi:10.1055/s-2007-964920
39. Pechlaner S. *Handchirurgie I Die Hyperextensionsverletzung des Handgelenkes: experimentelle Untersuchungen und klinische Aspekte*. Einhorn-Press-Verl.; 1999. /digitale-objekte-hbz/storage/2006/01/19/file\_142/1335735.pdf
40. Majima M, Horii E, Matsuki H, Hirata H, Genda E. Load Transmission Through the Wrist in the Extended Position. *J Hand Surg*. 2008;33(2):182-188. doi:10.1016/j.jhsa.2007.10.018
41. Viegas SF, Hoffmann FJ. Palmar lunate dislocation with a dorsal scaphoid fracture variant. *J Hand Surg*. 1988;13(3):440-443. doi:10.1016/S0363-5023(88)80027-3
42. Wegmann K, Harbrecht A, Hackl M, Uschok S, Leschinger T, Müller LP. Inducing life-like distal radius fractures in human cadaveric specimens: a tool for

- enhanced surgical training. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2020;140(3):425-432. doi:10.1007/s00402-019-03313-5
43. Premaor MO, Compston JE, Fina Avilés F, et al. The association between fracture site and obesity in men: A population-Based cohort study. *J Bone Miner Res.* 2013;28(8):1771-1777. doi:10.1002/jbmr.1878
  44. Ong T, Sahota O, Tan W, Marshall L. A United Kingdom perspective on the relationship between body mass index (BMI) and bone health: A cross sectional analysis of data from the Nottingham Fracture Liaison Service. *Bone.* 2014;59:207-210. doi:10.1016/j.bone.2013.11.024
  45. Greenwald RM, Janes PC, Swanson SC, McDonald TR. Dynamic impact response of human cadaveric forearms using a wrist brace. *Am J Sports Med.* 1998;26(6):825-830. doi:10.1177/03635465980260061501
  46. Wæver D, Madsen ML, Rölfling JHD, et al. Distal radius fractures are difficult to classify. *Injury.* 2018;49:S29-S32. doi:10.1016/S0020-1383(18)30299-7
  47. Belloti JC, Tamaoki MJS, Franciozi CE da S, et al. Are distal radius fracture classifications reproducible? Intra and interobserver agreement. *Sao Paulo Med J.* 2008;126:180-185. doi:10.1590/S1516-31802008000300008
  48. Oskam J, Kingma J, Klasen HJ. Interrater Reliability for the Basic Categories of the Ao/Asif's System as a Frame of Reference for Classifying Distal Radial Fractures. *Percept Mot Skills.* 2001;92(2):589-594. doi:10.2466/pms.2001.92.2.589
  49. Windolf J, Hakimi M, Schädel-Höpfner M. Ergebnisse der palmaren winkelstabilen Plattenosteosynthese am distalen Radius. *Trauma Berufskrankh.* 2008;10(2):236-240. doi:10.1007/s10039-007-1320-6
  50. Candela V, Di Lucia P, Carnevali C, et al. Epidemiology of distal radius fractures: a detailed survey on a large sample of patients in a suburban area. *J Orthop Traumatol Off J Ital Soc Orthop Traumatol.* 2022;23:43. doi:10.1186/s10195-022-00663-6
  51. Hintringer W, Rosenauer R, Quadlbauer S. Computed Tomography and Pathobiomechanical-Based Treatment of Volar Distal Radius Fractures. *J Wrist Surg.* Published online July 15, 2021:203-213. doi:10.1055/s-0041-1731819

## 6 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht der Anatomie des Handgelenkes .....	3
Abb. 2: Übersicht der Anatomie des Handgelenks auseinandergezogen .....	5
Abb. 3: Extension und Flexion.....	7
Abb. 4: Radial- Ulnaabduktion .....	8
Abb. 5: Pro- und Supination .....	9
Abb. 6: Colles und Smith Fraktur .....	11
Abb. 7: AO-Klassifikation in der Anwendung am distalen Unterarm.....	13
Abb. 8: Röntgenbild einer Fraktur AO-Typ 2R3-C1.2.....	14
Abb. 9: Ausschnitt aus der originalen Tabelle von Fernandez.....	15
Abb. 10 Röntgenbild einer Fraktur Typ III nach Fernandez .....	16
Abb. 11: Frykman-Klassifikation distaler Radiusfrakturen .....	17
Abb. 12 Röntgenbild einer Fraktur Typ VII nach Frykman.....	18
Abb. 13: Schematische Darstellung der Mayo-Klassifikation .....	19
Abb. 14: Röntgenbilder einer Fraktur Typ II nach Mayo.....	20
Abb. 15: Röntgenbilder einer Fraktur Typ PE III-2.....	22
Abb. 16: Systematik der Brink und Rikli Klassifikation .....	23
Abb. 17: CT-Bildgebung einer Fraktur vom Typ B5 nach Brink und Rikli .....	24
Abb. 18: CT und 3D Modell radiales Schlüsselfragment nach Hintringer-Krimmer.....	26
Abb. 19: Dateneinschluss .....	29
Abb. 20: Unterarmpräparat im Versuchsaufbau.....	31
Abb. 21: Schematische Übersicht des Versuchsaufbau .....	32
Abb. 22: Potentielle Energie und Frakturmorphologie.....	39
Abb. 23: Gewichtsunterschiede.....	40
Abb. 24: Einfluss des Extensionswinkels auf die Radiusgelenkfläche.....	47
Abb. 25: Einfluss der Radial- und Ulnaabduktion auf die Radiusgelenkfläche.....	48
Abb. 26: Beispielhafte Bildgebung eines Hochenergietraumas.....	51

## 7 Tabellenverzeichnis


Tabelle 1: Zusammenfassung der Frakturtypen nach Fernandez.....	15
Tabelle 2: Pechlaner Klassifikation .....	21
Tabelle 3: Hintringer und Krimmer Klassifikation .....	25
Tabelle 4: Ethnische Verteilung der Körperspender.....	37
Tabelle 5: Übersicht der Potentiellen Energie .....	39
Tabelle 6: Übersicht Begleitverletzungen .....	41
Tabelle 7: Verteilung der Frakturmorphologie in der AO-Klassifikation.....	41
Tabelle 8: Subgruppenverteilung der AO-Klassifikation .....	42
Tabelle 9: Ergebnisse der Einteilung nach Frykman .....	43

# 8 Anhang

## 8.1 Körperspendevertrag Medcure

	<b>AUTHORIZATION OF BODY GIFT</b>	<b>For office use only</b>
		Validated by: _____ Date: _____
<b>For assistance please contact us 24/7 at 866-560-2525. Incomplete or inaccurate forms will be returned for correction.</b> <b>IF BEFORE DEATH, this form must be completed by the donor or his/her Power of Attorney for Healthcare.</b> <b>IF AFTER DEATH, this form must be completed by the next of kin.</b>		
Donor's Full Legal Name: _____ <small>(Legal name on file with the Social Security Office; if applicable, include Jr., Sr., II, III, etc.)</small>		
Is the prospective donor currently receiving hospice care or have a life-expectancy of six months or less? <input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO		
Donor's Date of Birth: Month _____ Day _____ Year _____		
My Relationship to the Donor is: _____ <small>(if Power of Attorney send full and complete document) 3. Spouse 4. Adult child 5. Parent 6. Sibling 7. Next degree of kindred 8. Donor's Estate Representative</small>		
<p>I authorize that this whole body donation gift is motivated exclusively by altruistic intentions without monetary compensation or valuable consideration made to me or any family member. I understand an autopsy will NOT be performed to determine the cause or contributing factors that led to the death of the donor. I also authorize the procurement of all necessary tissues, organs, and anatomical specimens, including whole body, for medical research and educational purposes and understand tissue/specimens may be used indefinitely into the future. I understand that the body may be subject to extensive preparation and/or long-term preservation, including but not limited to, removal of the head, arms, legs, hands, feet, spine, organs, tissues, or fluids. No promise or assurance has been given that this donation will benefit a specific use, research, or educational study. This gift may benefit multiple educational, scientific, organ procurement and medical research organizations, for profit or nonprofit, domestic or international, and the education or research institution may perform final specimen disposition.</p> <p><b>I authorize any and all medical information to be released to MEDCURE before or after death, including but not limited to, a complete medical history and blood samples.</b> Blood testing will occur which may include, but is not limited to, HIV, hepatitis B and hepatitis C. Positive blood test results for HIV will be communicated to the Health Department; a positive test for HIV, hepatitis B or hepatitis C will be communicated to the next of kin. <b>Determination of acceptance of donation will be made at the time of passing.</b> Upon acceptance of donation, MEDCURE will be responsible for any costs related to the donation including transportation, cremation, return of partial cremated remains to family or a scattering of cremated remains at sea. MEDCURE reserves the right, at their sole discretion, to decline acceptance of the donation and related charges if it appears unsafe or unsuitable for the purposes consented to herein. The donor will be transported to a MEDCURE facility. All protected health information as defined by the Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA) will remain confidential and be kept in a secure location.</p> <p>The cremated remains returned will not include body tissues, organs, or anatomical specimens procured for medical education or research purposes. An open casket viewing is not possible with whole body donation and no un-cremated remains will be returned. I agree to hold MEDCURE and all associated agents, including specimen end-users, harmless from loss or damage, including incidental and consequential damage which results from the undersigned not having proper legal authority to consent. This donation will benefit medical education, research studies, and training.</p>		
I have had adequate time for consideration, and all my questions have been answered. <input type="checkbox"/> YES		
I further authorize this whole body donation for additional education and research uses, such as weapons testing and personal protective gear (for example military); search, rescue, and recovery operations; forensic pathology and crime scene investigation; educational display; plastination (permanent plastic fixation of body tissues); or automobile safety research. In some cases such research or education may involve destruction of the body or parts of the body. <input type="checkbox"/> YES <input type="checkbox"/> NO		
<b>In all cases MEDCURE MUST have two witness signatures of persons 18 or older. Witnesses cannot be the person consenting to donation. At least one witness must also be a "disinterested party" (not a spouse, child, sibling, parent, grandchild, grandparent, or legal guardian of the prospective donor).</b>		
<b>I understand that signing this document does not guarantee acceptance of donation.</b>		
I hereby verify my understanding of all listed disclosures as indicated by my signature below:		
Signature of Consenter: _____		Print Name: _____
Date: _____	Address of Consenter: _____	City: _____
State: _____	Zip Code: _____	Phone Number: _____
Email: _____		
<b>Signature of Witness #1:</b> _____		<b>Signature of Witness #2:</b> _____
Print Name: _____		Print Name: _____
Date Signed: _____		Date Signed: _____
Relationship to Donor: _____		Relationship to Donor: _____
Please Send Death Certificate to (Name): _____		Relationship to Donor: _____
Street Address: _____		City: _____
State: _____	Zip Code: _____	Phone Number: _____
<small>Form: 101L 08/17 MEDCURE   18111 NE Sandy Blvd.   Portland, OR 97230   Toll Free 1-866-560-2525   Fax 503-257-9101   Email donate@medcure.org</small>		

## 8.2 Körperspendevertrag Science Care

 <b>Donation Authorization</b>	<b>Self</b>
<p>I donate and authorize this gift of my body to Science Care, ("Science Care") for medical research, scientific use or educational purposes to:</p>	
<p><input type="checkbox"/> Science Care, Inc. 21410 N 19th Avenue #126 Phoenix, Arizona <input type="checkbox"/> Science Care of Colorado, LLC. 19301 E 23rd Avenue Aurora, Colorado <input type="checkbox"/> Science Care of California, LLC. 3929 Conant Street Long Beach, California <input type="checkbox"/> Science Care of Florida, LLC. 3902 NW 126th Avenue Coral Springs, Florida</p>	
<p>I understand that my donation will be conducted by the legal entity selected above, and that my donation will be conducted under the laws applicable in the state in which that legal entity is organized. The term "Science Care" throughout this Authorization shall refer to the legal entity selected above.</p>	
<p>I understand the following disclosures as a condition to donation:</p>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. This authorization to proceed with donation is not a contract for services with Science Care, but is an expression of my intention and informed consent for donation.</li><li>2. This gift is being made voluntarily without any obligation of any kind on the part of Science Care.</li><li>3. Acceptance is contingent upon meeting criteria for donation at the time of passing, and is not a guarantee by Science Care.</li><li>4. This gift may be revoked or amended by me, or declined by Science Care for any reason at its sole discretion, prior to the start of recovery and the removal of tissue.</li><li>5. In the event the donation is not accepted by Science Care, the donor or the next of kin will be responsible for making alternative arrangements for final disposition.</li><li>6. This authorization supersedes any other writing of mine. Science Care may rely upon this authorization unless I advise Science Care in writing that I have revoked or modified it.</li><li>7. After the start of recovery and the removal of tissue, there will be no cost associated with donation, including transportation, cremation of unused tissues and the return of cremated remains.</li><li>8. Un-cremated remains will not be returned to the next of kin.</li><li>9. Cremation is a necessary outcome of whole body donation and cremated remains to be returned will likely not be from the whole body and will not include tissue that has been recovered for use in medical research, scientific use or education.</li><li>10. Science Care, its assignee or end users of tissue may arrange for the final disposition of tissues recovered for medical research, scientific use or education in any manner subject to local, state or federal law and may include commingling and cremation or incineration as medical or pathological waste.</li><li>11. Cremated remains not to be returned or resulting from medical research, scientific use or education may be scattered at land or sea or interred in a shared ossuary and will not be recoverable.</li><li>12. Any recovered organs, tissues or parts of the body may be used indefinitely into the future for medical research, scientific use or student or physician education and surgical training, but not for public exhibition, though anonymized photos or video documents may be used for scientific publication or presentation.</li><li>13. No compensation will be given to the donor, the donor's estate, the donor's next of kin or any third party as a result of donating this gift or the outcomes of its use.</li><li>14. There is no guarantee or assurance of any outcomes, nor is there any guarantee or assurance that information relating to any outcomes will be released or otherwise made available to any person or entity, including, but not limited to, the next of kin.</li><li>15. In order to maximize the benefit of donation, the donated gift may be used for multiple purposes at different times and locations.</li><li>16. Extensive surgical preparation of the body may be performed including embalming, long term preservation and the surgical removal of the extremities, arms, legs, hands, feet, head, spine, and/or other organs, tissues or fluids from the body.</li><li>17. To prevent injury and protect life, exposure to destructive forces may be involved including simulated injury, trauma, impact, crash, ballistic or blast for medical research, education, training, forensic pathology, vehicle safety or protective equipment development for transportation, military, sports, or law enforcement use.</li><li>18. Blood will be tested for certain communicable diseases, including, but not limited to, HIV (AIDS) and Hepatitis B &amp; C, and the results of testing for communicable diseases will be disclosed to the appropriate person or entity to the extent that such disclosure is required by law.</li></ol>	
<p style="text-align: right;"><b>INITIAL HERE X</b></p>	
<p style="text-align: center;"><small>Science Care Family Services Phone: 800-417-3747 Fax: 602-331-4344 <a href="http://www.sciencecare.com">www.sciencecare.com</a> <b>IMPORTANT: KEEP A COPY OF THIS DOCUMENT FOR YOUR RECORDS</b> Published Work © 2012 Science Care Page 1 of 3</small></p> <p>5.2.4F28 Self Donation Authorization <span style="float: right;">Rev. 03/08/17</span></p>	



## Donation Authorization

Self

- 19. Science Care is a for-profit company and the tissue end users may be non-profit or for-profit, and tissues may be used either domestically or internationally.
- 20. An open casket viewing during a funeral service will not be possible.

**I verify that I understand all of the 20 disclosures listed above and have had adequate time for consideration with all questions having been answered. INITIAL HERE X \_\_\_\_\_**

Subject to the disclosures set forth above, including Science Care's right to decline the donation for any reason within its sole discretion, I authorize:

- 1. Science Care to accept this donation.
- 2. Science Care to obtain my medical history, including but not limited to, my medical records and autopsy reports.
- 3. Science Care to act as my agent for the purposes of cremation pursuant to a separate written authorization.
- 4. The release from liability of Science Care, its assignees, its end users and its funeral home and cremation service providers, and their respective agents and employees, against loss from any and all claims, demands, or damages which may be made by or declared against it or them (except for willful or intentional misconduct), or by reason of my failure to timely disclose the existence of implanted devices or personal items and the only remedy prior to death that can arise out of this authorization is revocation of the authorization.

**I verify that I understand all of the 4 disclosures listed above and have had adequate time for consideration with all questions having been answered. INITIAL HERE X \_\_\_\_\_**





# Donation Authorization

Self

## Donor Information

Name \_\_\_\_\_  
 Address \_\_\_\_\_  
 City \_\_\_\_\_ State \_\_\_\_\_ Zip Code \_\_\_\_\_  
 Phone \_\_\_\_\_  
 Date of Birth \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

Signed and initialed by the donor and the following witness:

X \_\_\_\_\_  
 Donor Signature Donor Printed Name Date Signed

The witness signing below attests that the authorizing person is over 18 years of age, of sound mind, and free of duress when signing this authorization.

X \_\_\_\_\_  
 Witness Signature

**Questions? Call Science Care 24 Hours a Day at 800.417.3747**  
 Fax: 602.331.4344 Email: [familyservices@sciencecare.com](mailto:familyservices@sciencecare.com)

Office Use Only	_____	_____	_____
	Science Care Representative Printed Name	Science Care Representative Signature	Date Signed

## 9 Danksagung

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. med. M. Schädel-Höpfner für die Überlassung des Themas meiner Dissertation und die gewissenhafte und zuverlässige Unterstützung dieses Forschungsvorhabens. Darüber hinaus stand er mir stets mit hilfreichen Anmerkungen zu dieser wissenschaftlichen Arbeit zur Verfügung.

Besonderer Dank gilt außerdem meinem Zweitbetreuer Herrn PD Dr. med. D. Latz für die Betreuung und Unterstützung bei Konzeption und Umsetzung dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. med. J. Windolf für die Möglichkeit bedanken, in seiner Klinik zu promovieren.

Ein herzlicher Dank geht an die Firma Rimasys – namentlich Herrn R. Holz und Herrn M. Ebinger - für die unentgeltliche Überlassung der Rohdaten für diese Arbeit. Ohne die Unterstützung, Kommentare und Einblicke in den Arbeitsalltag und die Datengewinnung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Weiter danke ich Herrn Prof. Dr. med. M. Langer für die Bereitstellung und Überlassung der herausragenden Bilder und Illustrationen.

Außerdem möchte ich mich bei meinem Kollegen „Delta“ bedanken für die fortwährende moralische Unterstützung diese Arbeit voranzubringen.

Der letzte und herzlichste Dank geht an meine Frau Barbara, für ihren bedingungslosen Rückhalt und die konstante Unterstützung ohne den diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Außerdem danke ich ihr für die mehrfachen Korrekturlesungen.