

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Zentrum für Radiologie und Endoskopie
Klinik und Poliklinik für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und
Nuklearmedizin

Direktor: Prof. Dr. med. Gerhard Adam

Europäische Dual Center Evaluationsstudie hinsichtlich der Notwendigkeit von CT-Aufnahmen zur Diagnosesicherung von Skaphoidfrakturen

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von:

Carolina Vivian Zickert
aus Hamburg

Hamburg 2021

**Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 31.01.2023**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.**

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: PD Dr. Matthias Priemel

Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter: Prof. Dr. Jin Yamamura

Inhalt

1	Einleitung.....	5
1.1	Epidemiologie.....	5
1.2	Anatomie und Biomechanik.....	5
1.3	Verletzungsmechanismus.....	8
1.4	Klassifikation.....	9
1.5	Diagnostik.....	11
1.5.1	Symptome und körperliche Untersuchung.....	11
1.5.2	Konventionelle Röntgendiagnostik.....	12
1.5.2.1	Technische Grundlagen.....	12
1.5.2.2	Anwendung in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen.....	13
1.5.3	Computertomographie.....	15
1.5.3.1	Technische Grundlagen.....	15
1.5.3.2	Anwendung in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen.....	17
1.5.4	Kosten.....	19
1.6	Strahlenexposition.....	19
1.6.1	Relevante Dosiskenngrößen.....	19
1.6.2	Strahlenbelastung.....	21
1.7	Therapie.....	22
1.7.1	Konservative Therapie.....	22
1.7.2	Operative Therapie.....	24
1.8	Komplikationen und Folgeschäden.....	28
1.9	Fragestellung.....	31
2	Material und Methoden.....	31
2.1	Patienten und retrospektive Datenerhebung.....	31
2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik.....	31
2.3	Computertomographie.....	32
2.4	Auswertung der Aufnahmen.....	33
2.5	Statistische Auswertung.....	33
3	Ergebnisse.....	35
3.1	Patientenkollektiv.....	35
3.2	Auswertung der Röntgen- und CT- Befunde.....	36
3.2.1	Befunde und Klassifikation der Fraktur.....	36
3.2.2	Röntgen und CT-Diagnostik.....	37
3.2.3	Vergleich der Beurteilung der Skaphoidfraktur in Röntgen und CT im UKE.....	37
3.3	Therapieverfahren.....	39

3.4	Outcome.....	40
4	Diskussion.....	41
5	Zusammenfassung.....	50
6	Summary	51
7	Abkürzungsverzeichnis.....	52
8	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....	53
8.1	Abbildungen	53
8.2	Tabellen.....	54
9	Literaturverzeichnis.....	55
10	Danksagung	62
11	Lebenslauf	63
12	Eidesstattliche Erklärung.....	64

1 Einleitung

1.1 Epidemiologie

Die Skaphoidfraktur stellt mit bis zu 70 %, die mit Abstand häufigste aller Handwurzelknochenfrakturen dar (Dunn, 1972, Hove, 1993, Papp, 2010). Etwa 2 % aller Frakturen sind Skaphoidfrakturen (Hove, 1999). Dabei frakturiert das Skaphoid zu 60 - 69 % im mittleren Drittel, zu 17 – 32 % im distalen Drittel und zu 3 – 16 % im proximalen Drittel (Brøndum et al., 1992, Hey et al., 2011, Hove, 1999, Jørgsholm et al., 2013, Jørgsholm et al., 2020). In Studien werden Inzidenzen für die Allgemeinbevölkerung zwischen 1,5 und 43 Frakturen pro 100.000 Einwohner pro Jahr angegeben (Duckworth et al., 2012, Garala et al., 2016, Holloway et al., 2015, Hove, 1999, Jørgsholm et al., 2020, Swärd et al., 2019, Van Tassel et al., 2010). Die höchste Inzidenz mit 107 – 151 Frakturen pro 100.000 Personen wurde bei Männern in der Altersgruppe von 20 – 29 Jahren beobachtet (Jørgsholm et al., 2020). Wolf et al. geben eine deutlich höhere Inzidenz für Angehörige des Militärs der Vereinigten Staaten von 121 Frakturen pro 100.000 Personen pro Jahr an. Dieser Unterschied könnte auf einem höheren Anteil von Männern und einem insgesamt jüngeren und aktiveren Kollektiv beruhen (Wolf et al., 2009). Die Frakturursachen waren vor allem Stürze, gefolgt von Kontaktsportarten (Duckworth et al., 2012, Garala et al., 2016).

Crowe et al. geben die Inzidenz für Frakturen der Hand und des Handgelenks mit etwa 7,6 Frakturen pro 100.000 Einwohner in Zentraleuropa und etwa 11,1 Frakturen pro 100.000 Einwohner in Osteuropa im Jahr 2017 an (Crowe et al., 2020).

1.2 Anatomie und Biomechanik

Das Os scaphoideum, auch Skaphoid oder Kahnbein, ist der am weitesten radial gelegene Knochen in der proximalen Handwurzelknochenreihe und stellt eine wichtige Verbindung zwischen der proximalen und distalen Reihe dar. Das Skaphoid ist nach dem Os capitatum der zweitgrößte Handwurzelknochen und der größte Handwurzelknochen in der proximalen Reihe (Langer et al., 2016, Langer et al., 2019, Le Minor and Rapp, 2001, Sendher and Ladd, 2013). Die komplexe Form des Skaphoids wird als unregelmäßig Ellipsoid mit einer leicht sigmoidalen Verdrehung und Biegung beschrieben (Ceri et al., 2004, Krause et al., 1909, Langer et al., 2016, Langer et al., 2019, Watts et al., 2011).

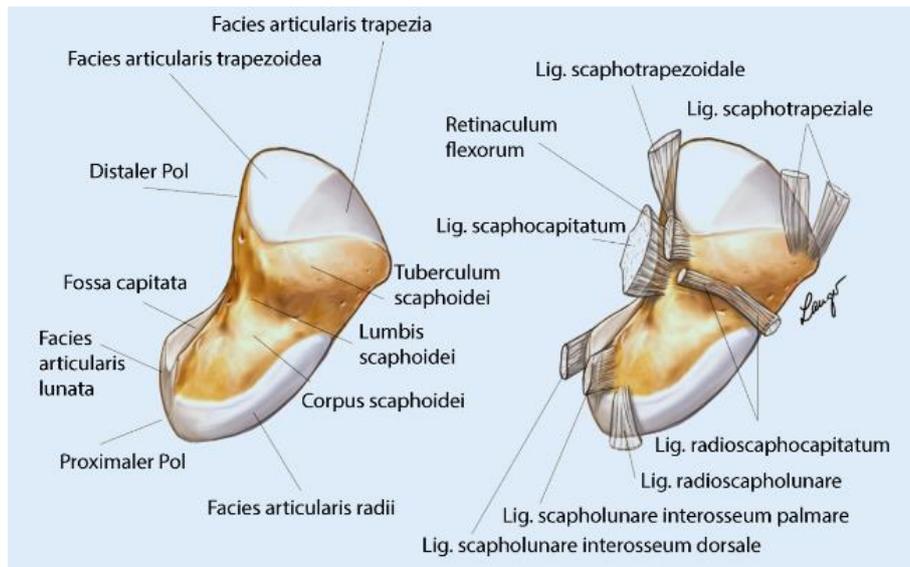


Abb.1 Anatomische Darstellung des Os scaphoideum von palmar (Langer et al., 2016)

Üblicherweise wird das Skaphoid in einen proximalen Pol, einen distalen Pol mit Tuberculum und den dazwischen liegenden mittleren Taillenbereich unterteilt. Am proximalen Pol artikuliert das Skaphoid mit dem Radius und dem Os lunatum. Am distalen Pol befinden sich die Gelenkflächen zum Os trapezium, zum Os trapezoideum und der distale Anteil der Gelenkfläche zum Os capitatum (s. Abb.1 und Abb.2). Der schwer abzugrenzende Taillenbereich ist der schmalste Abschnitt des Skaphoids. An der ulnaren Seite des Taillenbereichs artikuliert das Skaphoid mit dem Os capitatum (Langer et al., 2016, Langer et al., 2019, Schmitt and Lanz, 2014, Watts et al., 2011). Die große Knorpeloberfläche des Skaphoids resultiert aus den vielen Gelenkflächen zu den benachbarten Knochen. Die Angaben über die von Knorpel bedeckte Fläche liegen dabei in der Literatur zwischen 42 – 80 % der Skaphoidoberfläche (Berger, 2001, Botte et al., 1988, Langer et al., 2016, Langer et al., 2019, Sendher and Ladd, 2013, Watts et al., 2011).

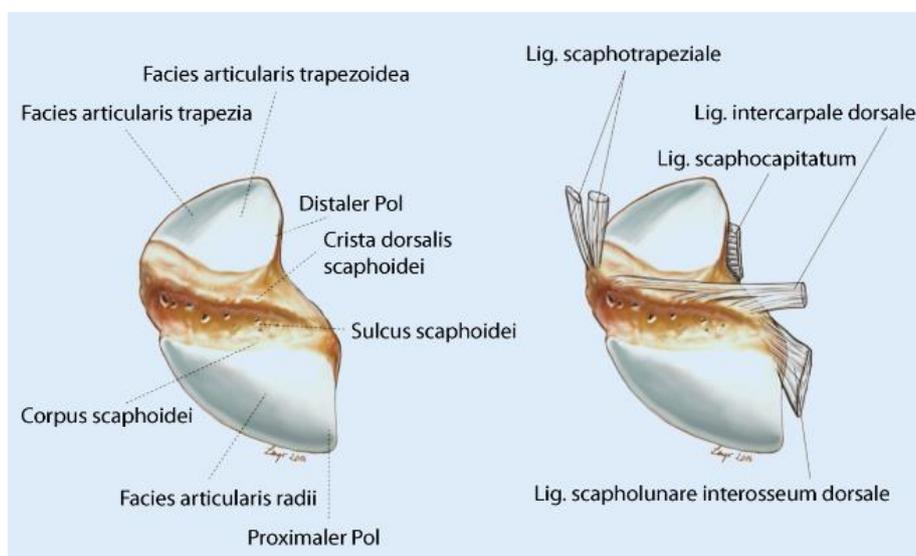


Abb.2 Anatomische Darstellung des Os scaphoideum von dorsal (Langer et al., 2016)

Heinzelmann et al. geben eine durchschnittliche Gesamtlänge des Skaphoids bei Männern von 31,3 Millimeter (mm) an, während das weibliche Skaphoid mit durchschnittlich 27,3 mm kürzer ist. Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Skaphoids bestehen auch in der durchschnittlichen Breite des proximalen Pols und der Taille, jedoch nicht in der Breite des distalen Pols (Heinzelmann et al., 2007). Die Blutversorgung (s. Abb.3) des Skaphoids erfolgt von radial aus der Arteria (A.) radialis. Aufgrund der großflächigen Knorpelüberzüge ist die Fläche in die Blutgefäße ins Skaphoid ziehen können sehr begrenzt. Die proximalen 70 – 80 % des Skaphoids werden retrograd aus dem in eine dorsale Knochenleiste eintretenden Ramus dorsalis scaphoidei versorgt. Die distalen 20 – 30 % des Skaphoids werden aus kleineren Ästen des Arcus intercarpalis palmaris und direkten Ästen der A. radialis zum Tuberculum von palmar versorgt (Gelberman and Menon, 1980, Langer et al., 2016, Langer et al., 2019, Schmitt and Lanz, 2014).

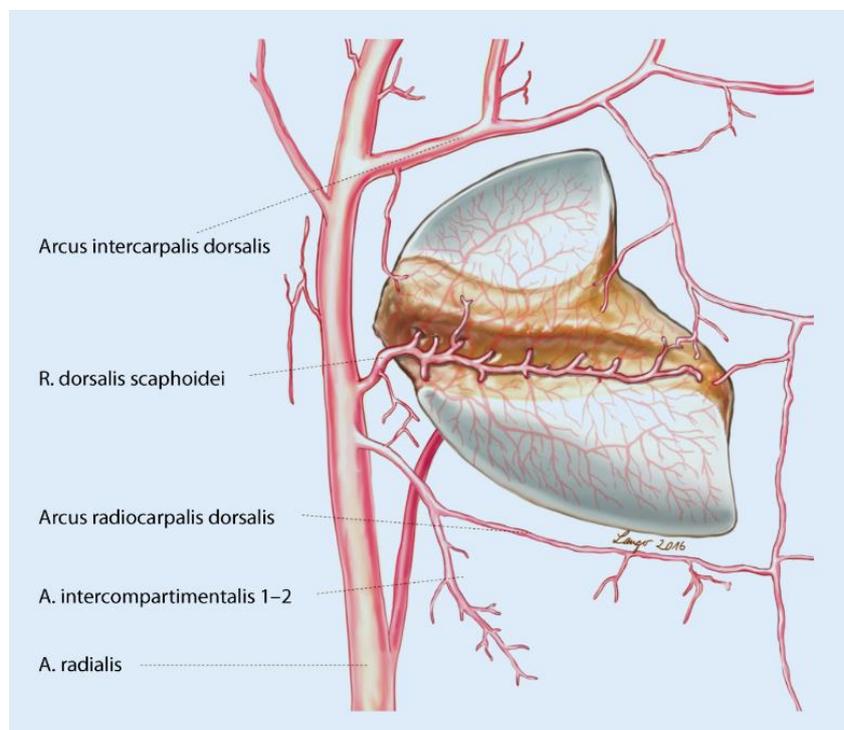


Abb.3 Blutversorgung des Os scaphoideum von dorsal (Langer et al., 2016)

Das Skaphoid ist ein sehr beweglicher Handwurzelknochen und spielt eine wichtige Rolle bei der Biomechanik des Handgelenks. Bei der Flexionsbewegung aus der Neutralposition bewegt sich das Skaphoid etwa 58 Grad (°) in Flexionsrichtung und zudem erfolgen eine Ulnardeviationsbewegung von 18 ° und eine Pronationsbewegung von 10 °. Auch bei der Bewegung aus der Neutralposition in die Extension erfolgt die Bewegung nicht nur in Extensionsrichtung. Neben einer Bewegung von etwa 50 ° in Extensionsrichtung erfolgen Bewegungen von 4 ° in Radialdeviationsrichtung und 6 ° in Supinationsrichtung. Bei der Radialduktion bewegt sich das Skaphoid nur etwa 5 °, während die Hauptbewegung im Mediokarpalgelenk stattfindet. Zusätzlich zeigt das Skaphoid eine Palmarflexion von etwa

13 ° aufgrund der Bewegung vom Os trapezium und Os trapezoideum (Garcia-Elias et al., 1989a, Garcia-Elias et al., 1989b, Langer et al., 2016, Langer et al., 2019).

Diverse Bänder (s. Abb.1 und Abb.2) ermöglichen die Beweglichkeit des Skaphoids. Das v-förmige Ligamentum (Lig.) scaphotrapeziale und das Lig. scaphocapitatum dienen der Stabilisierung des distalen Skaphoids. Das Lig. scapholunatum hat einen dorsalen, mittleren und palmaren Anteil. Der kräftige dorsale Anteil dient vor allem der Stabilisierung des scapholunären Gelenks, während der palmare Anteil an der Steuerung der Rotationsbewegungen von Skaphoid und Os lunatum beteiligt ist. Der mittlere Anteil spielt eine untergeordnete Rolle in der Biomechanik des scapholunären Gelenks. Das Lig. intercarpale dorsale verläuft vom Skaphoid und vom Os trapezium horizontal über das Os capitatum bis zum Os triquetrum. Dabei spielt es eine wichtige Rolle bei der Stabilisierung des Handgelenks (Berger and Garcia-Elias, 1991, Langer et al., 2016, Langer et al., 2019, Schmitt, 2016, Watts et al., 2011).

1.3 Verletzungsmechanismus

Der häufigste Verletzungsmechanismus ist ein Sturz auf den ausgestreckten Arm bei hyperextendiertem Handgelenk (Langer et al., 2019, Sendher and Ladd, 2013). In dieser Stellung ist der distale Skaphoidpol durch das Bandsystem sowie den von außen wirkenden Druck fixiert. Die Kante des Radius wirkt von dorsal wie ein Meißel, während die radioskaphokapitalen Bänder den proximalen Pol nach dorsal drücken. Abhängig von der Stellung des Handgelenks entsteht beim Sturz eine unterschiedliche Krafteinwirkung. Eine Fraktur im distalen Drittel tritt auf, wenn das Handgelenk zusätzlich radialduziert ist, wohingegen eine Fraktur im proximalen Drittel bei einer Ulnarduktion entsteht (s. Abb.4) (Coblentz et al., 2006, Langer et al., 2019, Weber and Chao, 1978).

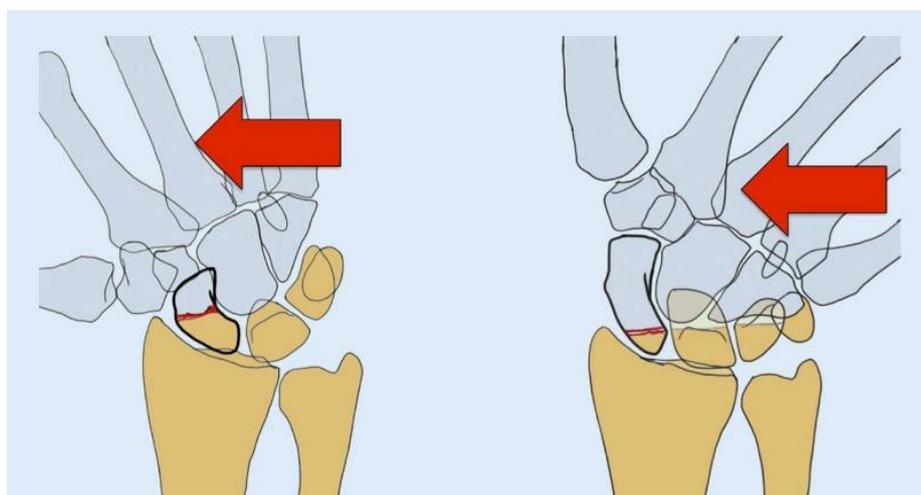


Abb.4 Frakturlokalisierung abhängig von Handgelenkstellung bei Sturz (Langer et al., 2019)

Die spiralförmige Verspannung der proximalen Handwurzelknochenreihe verursacht eine Tendenz des radialen Abschnitts zur Palmar- und eine Tendenz des ulnaren Abschnitts zur Dorsalflexion. Diese unterschiedlichen Tendenzen können bei Skaphoidfrakturen zur Ausbildung einer Humpback-Deformität führen (s. Abb.5). Nach einem initialen Aufklappen der Fraktur folgt meist zunächst eine spontane Reposition, bis es zu einem Aufklappen nach dorsal kommt, sodass lediglich die palmaren Kanten des proximalen und distalen Fragments minimalen Kontakt miteinander haben (Langer et al., 2019).

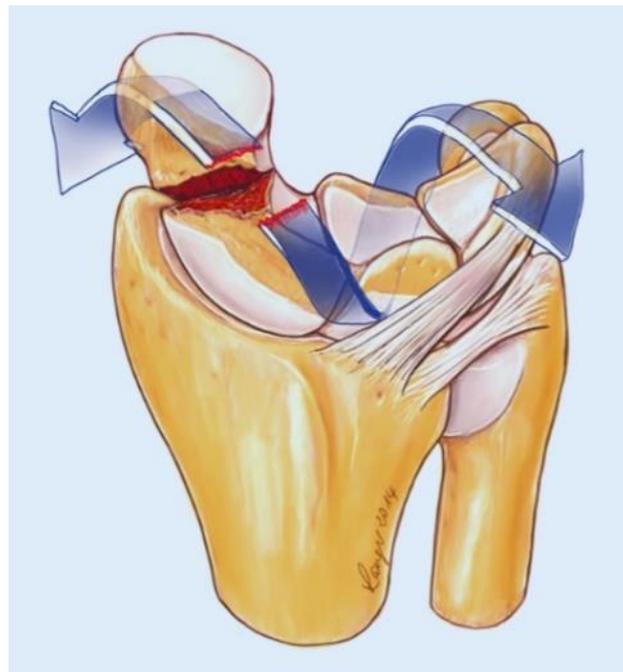


Abb.5 Humpback-Deformität bei Skaphoidfraktur (Langer et al., 2019)

1.4 Klassifikation

Die Klassifikation nach Böhler stellt eine erste therapieorientierende Klassifikation dar, die auch heute noch Anwendung findet. Bei dieser Klassifikation werden die Frakturen anhand der Lokalisation in distale, mittlere und proximale Frakturen eingeteilt (Böhler et al., 1954). Russe unterscheidet bei seiner Klassifikation anhand des Frakturverlaufes horizontal-schräge, quere und vertikal-schräge Skaphoidfrakturen. Obwohl Russe anhand der Klassifikation eine Therapieempfehlung gibt, ist seine Klassifikation vor allem deskriptiv (Russe, 1960). Die Klassifikation nach Herbert und Fisher teilt Skaphoidfrakturen in vier große Gruppen (Typ A – D) und differenziert diese weiter (s. Tab.1).

Typ A	akute stabile Frakturen
A1	nicht dislozierte Tuberkelfraktur
A2	nicht dislozierte Fraktur im mittleren oder distalen Drittel
Typ B	akute instabile Frakturen
B1	Schrägfraktur
B2	Dislozierte Fraktur
B3	Frakturen des proximalen Pols
B4	Perilunäre Luxationsfrakturen
B5	Mehrfragmentfraktur
Typ C	Verspätete Heilung
Typ D	Pseudarthrose

Tab.1 Klassifikation von Skaphoidfrakturen nach Herbert (Herbert and Fisher, 1984)

Frakturtyp A umfasst akute stabile Frakturen, die auch bei konservativer Therapie ein hohes Heilungspotenzial aufweisen. Frakturtyp B umfasst akute instabile Frakturen, die aufgrund eines geringeren Heilungspotenzials operativ versorgt werden sollten (s. Abb.6). Die Frakturtypen C und D umfassen verzögert heilende Frakturen bzw. ausgebildete Pseudarthrosen (Herbert and Fisher, 1984). Krimmer modifizierte die auf Röntgenbildern basierende Klassifikation nach Herbert und Fisher für den routinemäßigen Einsatz computertomografischer Diagnostik (Krimmer et al., 2000). Frakturen im proximalen Drittel gelten aufgrund der retrograden Blutversorgung sowie der mangelnden Stabilität und dem damit verbundenen erhöhten Risiko für die Ausbildung einer Pseudarthrose als instabil (Gelberman and Menon, 1980, Krimmer et al., 2000)

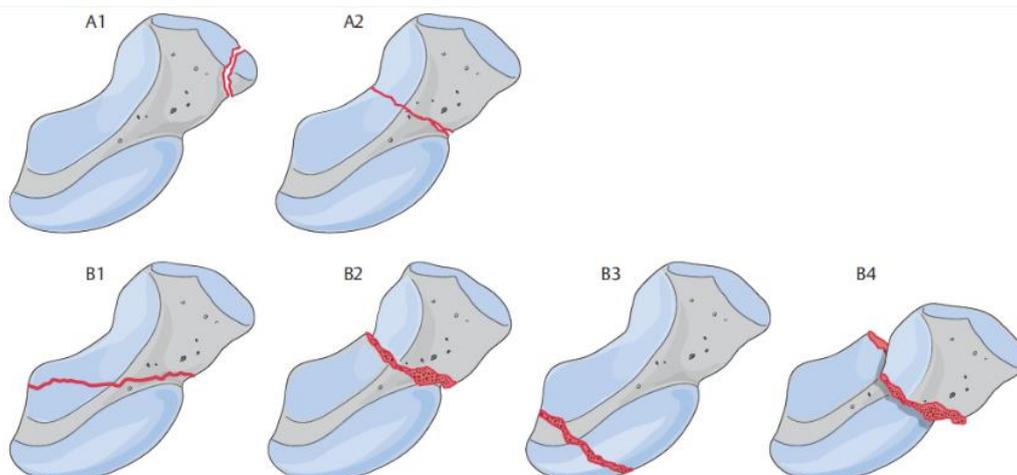


Abb.6 Schema zur CT-basierten Klassifikation der frischen Skaphoidfrakturen, modifiziert nach Krimmer/Herbert (Mehling and Sauerbier, 2013)

1.5 Diagnostik

1.5.1 Symptome und körperliche Untersuchung

Eine akute Skaphoidfraktur verursacht radialseitige dumpfe Schmerzen. Die Schmerzen können durch Bewegung des Handgelenks, insbesondere durch Extension und Radialduktion, verstärkt werden. Zudem können eine lokale Schwellung und Rötung auftreten (Coblentz et al., 2006, Phillips et al., 2004). Bei Verdacht auf eine akute Skaphoidfraktur ermöglicht die körperliche Untersuchung keine sichere Diagnosestellung, sondern dient vor allem einer ersten Einschätzung und der Entscheidung über weitere Diagnostik. Bei der körperlichen Untersuchung werden in der Regel drei Tests durchgeführt. Das Ergebnis jedes einzelnen Tests hat aufgrund der geringen Spezifität nur eine geringe Aussagekraft, die Kombination aller drei Test ermöglicht jedoch eine gute Prognose über das Vorliegen einer Skaphoidfraktur. Sind alle drei Tests positiv haben diese eine hohe Sensitivität bei einer Spezifität von 74 % (Bergh et al., 2014, Parvizi et al., 1998). Bei der Untersuchung testet man die Druckschmerzhaftigkeit des Skaphoids in der Tabatière in Ulnarduktionsstellung, sowie die Druckschmerzhaftigkeit über dem Tuberculum des Skaphoids in Extensionstellung (s. Abb.7). Zudem löst man beim Kompressionstest bei einer Skaphoidfraktur durch Stauchung des Daumens einen Schmerz aus (s. Abb.7) (Bergh et al., 2014, Chen, 1989, Coblentz et al., 2006, Freeland, 1989, Phillips et al., 2004, Reigstad et al., 2015).

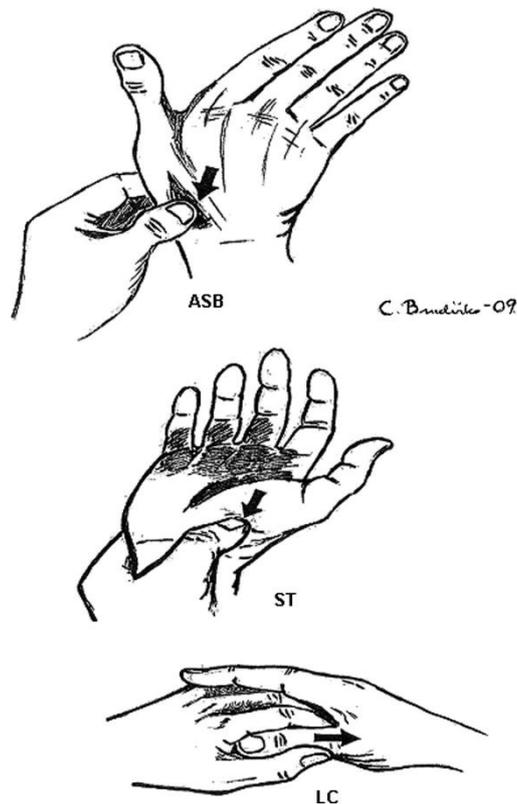


Abb.7 Klinische Untersuchung bei Verdacht auf Skaphoidfraktur; Palpation des Skaphoids über der Tabatière (anatomical snuffbox = ASB), des Tuberculum (scaphoid tubercle = ST) und Kompressionstest (longitudinal compression = LC) (Bergh et al., 2014)

1.5.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

1.5.2.1 Technische Grundlagen

Für die konventionelle Röntgendiagnostik wird eine Röntgeneinrichtung bestehend aus einem Generator und einem Röntgenstrahler mit Röntgenröhre eingesetzt. Zudem benötigt man Stative für den Röntgenstrahler, Rasterwandstative für Stehenaufnahmen und einen Aufnahmetisch. Der Generator dient der Steuerung der Röntgenröhre und liefert Heizstrom für die Glühkathode. Am Generator können die Röhrenspannung in Kilovolt (kV), die Stromstärke in Milliampere (mA) und die Belichtungszeit in Sekunden (s) für die freie Belichtung eingestellt werden und die Aufnahme ausgelöst werden. Um eine optimale Belichtungszeit und eine möglichst kurze Aufnahmezeit zu erreichen wird meist eine Belichtungsautomatik eingesetzt (Hünerbein, 2017).

Die Röntgenröhre und das umgebende Schutzgehäuse bilden den Röntgenstrahler. Zur Isolation der Hochspannung und Kühlung der Röntgenröhre ist die Röntgenröhre im Schutzgehäuse von Öl umgeben. Zudem dient das Schutzgehäuse dem Strahlenschutz

und der Begrenzung des Nutzstrahlbündels. In der Röntgenröhre wird die Röntgenstrahlung mit zwei Elektroden (Anode und Kathode) im Vakuum erzeugt. Durch Anlegen einer Spannung werden Elektronen aus der Kathode in Richtung Anode beschleunigt. In der oberflächennahen Schicht der Anode entsteht aus ca. 1 % der kinetischen Energie die Röntgenbremsstrahlung. Der Rest wird in Wärmeenergie umgewandelt. Die Anode besteht meist aus thermostabilen Wolfram. Die Röntgenstrahlung besteht aus der beim Abbremsen entstehenden Bremsstrahlung und der charakteristischen Strahlung des Anodenmaterials. Die Dosisleistung wird durch die angelegte Heizspannung bestimmt, da bei einer höheren Heizspannung mehr Elektronen aus der Kathode emittiert werden (Hünerbein, 2017, Jäkel and Karger, 2017).

Anhand der Energie teilt man Röntgenstrahlung in weiche Strahlung (< 100 Kiloelektronenvolt [keV]), harte Strahlung (100 keV – 1 Megaelektronenvolt [MeV]) und ultraharte Strahlung (> 1 MeV) ein. Die unterschiedliche Energie, auch als Qualität der Strahlung bezeichnet, wird durch die Röhrenspannung und das Anodenmaterial bestimmt. Beim Durchtritt der Materie wird die Röntgenstrahlung durch Absorption und Streuung abgeschwächt. Bei niedriger Energie findet vor allem Absorption statt, während eine Streuung bei hoher Energie überwiegt. Zur Bildgebung trägt somit nur die energiereiche, die Materie durchdringende Strahlung bei. Die Schwächung der Strahlung ist neben der Strahlenqualität abhängig von der Dicke, Dichte und Ordnungszahl der durchstrahlten Materie. Eine Aufhärtung der Strahlung wird durch Reduktion des niederenergetischen, nicht bildwirksamen Anteils mittels Filterung erreicht. Das Strahlenrelief wird durch die unterschiedlichen austretenden Strahlungsintensitäten gebildet. Dabei bilden nebeneinanderliegende Bereiche mit unterschiedlicher Dosis einen Strahlenkontrast (Hünerbein, 2017, Jäkel and Karger, 2017).

Heutzutage werden hauptsächlich digitale Bildaufnahme- und Bildverarbeitungssysteme genutzt. Bei einem digitalen Bildanalysesystem kommt es kaum zu Fehlbelichtungen, zudem bietet es die Möglichkeit einer unmittelbaren Bilddarstellung, einer Bildnachbearbeitung und digitalen Speicherung, sowie einer Dosisreduktion. Ein solches System hat jedoch hohe Anfangsinvestitionskosten und teilweise eine geringere Ortsauflösung (Hünerbein, 2017).

1.5.2.2 Anwendung in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen

Die konventionelle Röntgendiagnostik dient als Basisdiagnostik bei Verdacht auf eine Skaphoidfraktur. Am gips- und schienenfreien Handgelenk werden drei Standardaufnahmen erstellt. Die dorsopalmare (posterior-anteriore) Aufnahme wird in Neutralstellung bei 90 ° abduziertem Oberarm und gebeugtem Ellenbogen erstellt. Die

seitliche Aufnahme erfolgt in Neutralstellung bei angelegtem Oberarm und 90 ° gebeugtem Ellenbogen (Schmitt and Rosenthal, 2016). Bei der dorsopalmaren und seitlichen Aufnahme liegt die Zentrierung auf dem Handgelenk. Mit der Stecher-Aufnahme, einer dorsopalmar Aufnahme mit Faustschluss und Ulnarduktion, wird versucht das Skaphoid in der Längsausdehnung parallel zur Filmebene zu lagern (Stecher, 1937). Diese drei standardisierten Aufnahmen bieten eine hohe Vergleichbarkeit für Therapiekontrollen und haben die früher übliche Kahnbeinquartettserie bestehend aus einer Stecher-Aufnahme, einer Aufnahme nach Schreck in Schreibfederstellung, sowie Aufnahmen in Extensionsstellung und Hyperpronation abgelöst. Bei freier Belichtung werden die Aufnahmen mit einer Aufnahmespannung von 48 – 55 kV und einem Röhrenstrom von 4 – 5 mA durchgeführt (Schmitt and Krimmer, 2015, Schmitt and Rosenthal, 2016).

Beim Normalbefund stellt sich das Skaphoid mit einer durchgezogenen Kortikalis und einer harmonischen Trabekelstruktur dar (Schmitt and Krimmer, 2015). In etwa 15 – 30 % liegt bei einem unauffälligen Röntgenbild dennoch eine Fraktur, ein Pseudo-Normalbefund, vor (Jørgsholm et al., 2013, Tiel-van Buul et al., 1993, Welling et al., 2008). Ein indirektes und unsicheres Frakturzeichen ist das Skaphoid-Fettstreifen-Zeichen. Bei einem physiologischen Skaphoid verläuft zwischen dem Lig. collaterale radiale carpi und der Sehne des Musculus (M.) extensor pollicis brevis eine 1 mm breite, transparente Fettschicht. Eine Verlagerung oder Obliteration der Fettschicht kann bei Frakturen des Skaphoids, des Processus styloideus radii, sowie des Os metacarpale I auftreten. Sichere Frakturzeichen sind eine Kortikalisunterbrechung oder Stufenbildung der Kortikalis, eine sichtbare Dislokation mit Formänderung des Skaphoids. Bei schweren Handgelenkstraumata kann es zu kombinierten Frakturen, vor allem entlang des „Greater Arc“ am Processus styloideus radii et ulnae, Os capitatum, Os hamatum und Os triquetrum, kommen. Die transskaphoidale perilunäre Luxationsverletzung de Quervain ist eine weitere typische Kombinationsverletzung (Schmitt and Krimmer, 2015, Schmitt and Rosenthal, 2016).

Kann in der Röntgendiagnostik eine Fraktur trotz klinischem Verdacht nicht oder nicht sicher diagnostiziert werden ist zur weiteren Abklärung eine Schnittbilddiagnostik mittels CT oder MRT indiziert. Des Weiteren kann das Ausmaß einer Dislokation nur unzureichend dargestellt werden, sodass zum weiteren Fraktur staging und der Therapieplanung ebenfalls eine Schnittbilddiagnostik indiziert ist (Karle et al., 2005, Schmitt and Krimmer, 2015, Schmitt and Rosenthal, 2016, Welling et al., 2008).

1.5.3 Computertomographie

1.5.3.1 Technische Grundlagen

Die Computertomographie (CT) ist ein Schnittbildverfahren, bei dem mittels Röntgen transversale Schichten erzeugt werden. Aus den Schichten lassen sich Gewebe und Organe überlagerungsfrei zweidimensional darstellen, die dritte Dimension lässt sich aus der Summe der einzelnen Schichten bestimmen. Hounsfield und Cormack entwickelten 1968 das Prinzip der CT. Mit Messzeiten von mehr als 5 Minuten (min) pro Schicht wurden 1971 erste Schädel-CT Geräte eingesetzt, bevor 1974 das erste Ganzkörper-CT-Gerät installiert wurde. Ein CT-Gerät besteht aus einem Patientenlagerungstisch, einem Bedienpult, einem Computer und einer Gantry mit Hochspannungsgenerator, Röntgenröhre, Blendensystem, Kühlung und Detektorsystem (Hünerbein, 2017, Reith, 2011).

Heute verwendete Geräte der 3. und 4. Generation haben eine rotierende Röntgenröhre. Für die Aufnahme einer Schicht wird mithilfe eines Blendensystems ein schmaler, fächerförmiger Röntgenstrahl erzeugt. Die Breite des Strahls entspricht dabei der Schichtdicke, während der Öffnungswinkel am Strahlenkegel an den Patientenquerschnitt angepasst ist, sodass der gesamte Patientenquerschnitt durchstrahlt wird. Bei Geräten der 3. Generation rotieren die Röntgenröhre und die gegenüber angeordneten Detektoren gemeinsam um den Patienten, während bei Geräten der 4. Gen die Röntgenröhre um den Patienten rotiert und die Detektoren stationär im Vollkreis angeordnet sind. Die Messung der Intensitätsunterschiede der geschwächten Röntgenstrahlung nach Durchtritt durch den Körper und deren Umwandlung in elektrische Signale erfolgt an den Detektoren. Im Anschluss werden diese Signale digitalisiert und bei der Bildrekonstruktion weiterverarbeitet (Hünerbein, 2017, Reith, 2011).

Bei den Formen der Bildakquisition unterscheidet man Einzelschicht-CT, Spiral-CT. und Multidetektor- oder Mehrzeilen-CT (MDCT). Die Einzelschicht-CT ist durch eine diskontinuierliche Röhrenrotation und Tischvorschub gekennzeichnet, da sich die Kabel für die Hochspannungszuführung und Messdatenabführung aufrollen und nach einer 360° Umdrehung zunächst zurückgeführt werden müssen. Während der Kabelrückführung erfolgt der Tischvorschub. Bei der Spiral-CT erfolgen die Röhrenrotation und der Tischvorschub kontinuierlich, da aufgrund der Spannungszuführung über ein Schleifenringssystem keine Kabelrückführung nötig ist. Die Röntgenröhre rotiert spiralförmig um den Patienten, während der Tischvorschub kontinuierlich erfolgt. Aus dem aufgenommenen Volumendatensatz können Schichten beliebiger Dicke und in variablen Abstand zueinander rekonstruiert werden. Im Vergleich zur Einzelschicht-CT ist die Untersuchungszeit bei der Spiral-CT kürzer. Mit der MDCT können größere

Untersuchungsvolumina in kürzerer Zeit und mit dünneren Schichten dargestellt werden. Bei der MDCT sind mehrere Detektorzeilen parallel nebeneinander angeordnet, sodass bei einer Röhrendrehung mehrere Untersuchungsschichten errechnet werden können. Die minimale Schichtdicke wird durch die Breite der einzelnen Detektoren bestimmt. Durch Zusammenschaltung mehrerer Detektoren kann die Schichtdicke erhöht werden. Die Rotationsgeschwindigkeit bei einer MDCT ist höher als bei einer Spiral-CT. Eine verbesserte zeitliche Auflösung wird bei Dual-Source-CT-Geräten durch zwei versetzt angeordnete Röntgenstrahler erreicht. Die Röntgenstrahler werden mit unterschiedlicher Spannung angesteuert, sodass ein unterschiedliches Strahlungsspektrum aus einem identischen Projektionswinkel erstellt werden kann. Durch die geringe effektive Rotationszeit sind scharfe Aufnahmen bewegter Strukturen (z.B. Herz-CT mit EKG-Triggerung) möglich (Hünerbein, 2017, Reith, 2011).

Eingesetzte Verfahren zur Bildrekonstruktion sind gefilterte Rückprojektion und iterative Rekonstruktion. Bei der gefilterten Rückprojektion werden die von den Detektoren ermittelten Schwächungswerte der Röntgenstrahlen logarithmiert, gefiltert und wie ein Linienintegral rückprojiziert. Die iterative Rekonstruktion stellt eine andere Form der Berechnung dar. Hierbei wird zunächst ein Rohbild aus den Rohdaten mit der Methode der gefilterten Rückprojektion erstellt. Dieses Rohbild hat ein schlechtes Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Nach Vergleich des Rohbildes mit den gemessenen Daten wird ein Korrekturbild erstellt. Der Korrekturvorgang wird wiederholt bis die Daten des berechneten Bildes mit den gemessenen Daten übereinstimmen. Das Verfahren der iterativen Rekonstruktion ermöglicht durch Herausrechnen des vermehrten Rauschens eine Dosisersparung von bis zu 40 %. Durch Überlagerung aller Projektionen ergibt sich das jeweilige Schichtbild (Hünerbein, 2017, Reith, 2011).

Das Produkt aus dem Flächenelement des zweidimensionalen Bildes (Pixel) und der Schichtdicke bildet das Volumenelement (Voxel). Die Matrixgröße, das gewählte Field of View (FoV) und die Schichtdicke bestimmen die Größe eines Voxel. Meistens weist das entstehende Voxel aufgrund einer breiteren Z-Ebene (Schichtdicke) eine Balkenform auf. Eine Verminderung dieser Anisotropie kann durch Verringerung der Schichtdicke erreicht werden. Annähernd isotrope Voxel können erst durch MDCT-Geräte erreicht werden. Diese ermöglichen eine multiplanare Rekonstruktion. Bei der multiplanaren Rekonstruktion können aus axialen Bilddaten parallele Schichtbilder in einer beliebigen Raumebene rekonstruiert werden. Ungerade Strukturen, wie z.B. Blutgefäße, können anhand gekrümmter Rekonstruktion dargestellt werden (Hünerbein, 2017, Reith, 2011, Schmitt, 2015).

Neben der Gewebeart hängt die Schwächung der Strahlung in einem Voxel auch von der eingesetzten Strahlungsenergie ab. Um den Einfluss der Strahlungsenergie zu eliminieren

und eine bessere Vergleichbarkeit der Gewebe zu erreichen, wird die Hounsfield-Einheit (HE) genutzt. Eine HE ist ein Maß für die Dichte und wird aus dem linearen Schwächungskoeffizienten errechnet. Als Bezugsgröße dienen Wasser (0 HE) und Luft (- 1000 HE). Die unterschiedlichen Dichtewerte werden als Graustufen dargestellt. Da das menschliche Auge weniger Graustufen unterscheiden kann als der gesamte Umfang der CT-Grauskala, werden gewebespezifische Fensterungen eingesetzt. Bei der Fenstertechnik werden nur die zu beurteilenden Organstrukturen als Graustufen dargestellt, während die darüber und darunter liegenden Dichtewerte schwarz bzw. weiß erscheinen. Eine Kontrastanhebung und damit eine verbesserte Darstellung kontrastarmer Strukturen wird durch ein engeres Fenster erreicht. Stimmen die Dichtewerte eines Gewebes annähernd mit denen einer Bezugsgröße (z.B. Wasser, Gehirn) überein, bezeichnet man dies als isodens. Gewebe mit höheren Dichtewerten werden als hyperdens und Gewebe mit niedrigeren Dichtewerten als hypodens bezeichnet (Hünerbein, 2017, Reith, 2011).

Eine CT-Aufnahme hat im Vergleich zur konventionellen Röntgendiagnostik eine deutlich höhere effektive Strahlendosis. Einige technische Neuerungen ermöglichen eine Reduktion der Strahlendosis. Durch den Einsatz eines Nutzstrahlenkegels kann die Strahlenexposition im Randbereich reduziert werden. Zudem kann durch Anpassung der Untersuchungsparameter an die Region des Körpers und durch Anpassung der Spannung an den Körperdurchschnitt (weniger Spannung bei schlanken Patienten) eine Dosisreduktion erreicht werden (Hünerbein, 2017).

Die Vorteile der CT liegen in der überlagerungsfreien Darstellung von Organen, einer hohen Dichteauflösung und besserer Kontrastdarstellung als bei einer konventionellen Röntgenaufnahme. Die CT hat jedoch eine geringere räumliche Auflösung, da es sich um eine rekonstruierte Darstellung handelt. Eine CT-Diagnostik eignet sich besonders für die Darstellung von knöchernen Strukturen, während Weichteile in der Magnetresonanztomographie (MRT oder MR) besser beurteilt werden können (Hünerbein, 2017).

1.5.3.2 Anwendung in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen

Die CT wird in der Regel als zweite bildgebende Diagnostik bei bestehendem Verdacht nach fehlendem Frakturnachweis in der konventionellen Röntgendiagnostik oder zum weiteren Staging der Fraktur durchgeführt. Aufgrund der geringen Größe des Skaphoids und der doppelt-schrägen Ausrichtung sollte das FoV auf 50 – 60 mm begrenzt und eine Schichtdicke von 0,5 oder 0,6 mm (immer unter 1 mm) gewählt werden. Um das Skaphoid in der vollständigen Längsausdehnung zu erfassen, erfolgt die Darstellung in schräg-

sagittaler und schräg-koronarer Ebene. Bei CT-Geräten mit annähernd isotropen Voxel können die Ebenen sekundär mittels multiplanarer Rekonstruktion aus den in axialer Ebene gewonnenen Primärschichten berechnet werden. Bei der Aufnahme schräg-sagittaler Primärschichten liegt der Patient in Bauchlage mit dem Arm über dem Kopf auf dem Untersuchungstisch, dabei sollte der Unterarm in einem 45 ° Winkel zur Längsrichtung des Tisches ausgerichtet sein. Im Anschluss werden schräg-koronare Bilder mittels multiplanarer Rekonstruktion senkrecht auf die erstellten schräg-sagittalen Schichten berechnet (Bain et al., 1995, Coblenz et al., 2006, Krimmer et al., 2000, Schmitt and Krimmer, 2015, Schmitt and Rosenthal, 2016).

In der CT kann eine Frakturlinie im Skaphoid sensitiv durch kortikale und trabekuläre Diskontinuität in mehreren angrenzenden Schichten nachgewiesen werden (Coblenz et al., 2006, Memarsadeghi et al., 2006, Schmitt and Rosenthal, 2016). Die Sensitivität einer CT bei der Diagnostik von Skaphoidfrakturen liegt bei 85 – 95 %, die Spezifität bei 95 – 100 % (Ring and Lozano-Calderon, 2008, Yin et al., 2012). Selten weist der kompakte und spongiöse Knochen keinerlei Dislokation auf und eine Fraktur kann auch in der CT nicht diagnostiziert werden. In diesen Fällen kann der Nachweis mittels MRT erbracht werden. Die MRT hat im Frakturachweis eine Sensitivität von 100 % und eine Spezifität von 80 – 90 %. Im Vergleich mit der CT hat die MRT somit eine höhere Sensitivität, jedoch eine geringere Spezifität (Beeres et al., 2008). Bei bereits nachgewiesener Fraktur dient die CT dem Frakturstaging. Der Frakturverlauf, Dislokationen und Trümmerzonen mit Fragmentinterposition lassen sich mit der CT sehr genau darstellen. Insbesondere die Humpback-Deformität lässt sich in der CT besser darstellen als in der konventionellen Röntgendiagnostik (Coblenz et al., 2006, Karle et al., 2005, Memarsadeghi et al., 2006, Schmitt and Rosenthal, 2016). Zudem werden karpale Begleitverletzungen in der CT häufiger erkannt als im konventionellen Röntgen (Schmitt and Rosenthal, 2016).

Neben der Diagnostik akuter Frakturen wird die CT zur Kontrolle der Frakturkonsolidierung eingesetzt. Physiologischerweise kommt es während der Heilung zunächst in den ersten vier Wochen zu einer Entkalkung der Fragmentränder, bevor eine Remineralisierung einsetzt und eine knöcherne Durchbauung beginnt. Ab der sechsten Woche werden feine Knochenbrücken im Frakturspalt sichtbar. Bei der Heilung von Skaphoidfrakturen kommt es aufgrund des großflächigen Knorpelüberzugs zu kaum einer periostalen Kallusbildung (Amirfeyz et al., 2011, Buijze et al., 2012, Schmitt and Rosenthal, 2016, Singh et al., 2005). Zudem kann die CT auch postoperativ zur Therapiekontrolle eingesetzt werden, da die verwendeten Schrauben kaum Störartefakte verursachen und der überwiegende Teil des Frakturspalts uneingeschränkt beurteilt werden kann. Mit der CT kann eine Schraubenfehlage besser erkannt werden als in der konventionellen Röntgendiagnostik (Schmitt and Krimmer, 2015, Schmitt and Rosenthal, 2016, Sim and Zechner, 1991).

1.5.4 Kosten

Gemäß der Gebührenordnung für Ärzte (GOÄ) werden Röntgenaufnahmen der Hand in zwei Ebenen bei üblichen 2,5fachen Abrechnungssatz mit 32,06 € vergütet. Eine zusätzliche Ebene wird bei üblichen 2,5fachen Abrechnungssatz mit 11,66 € vergütet (Bundesministerium für Gesundheit, 2019).

CT-Untersuchungen der Hand werden gemäß der GOÄ nach dem üblichen 2,5fachen Abrechnungssatz mit 276,86 € vergütet (Bundesministerium für Gesundheit, 2019).

Die Kosten für eine CT-Diagnostik der Hand sind somit mehr als sechsmal so hoch wie eine Röntgendiagnostik in drei Ebenen.

1.6 Strahlenexposition

1.6.1 Relevante Dosiskenngrößen

Die Strahlenwirkung beruht auf der im Gewebe absorbierten Strahlungsenergie. Die physikalische Basisgröße im Strahlenschutz ist die Energiedosis. Die Energiedosis ist als die pro Massenelement absorbierte Energie definiert und wird in der SI-Einheit Joule (J) pro Kilogramm (kg) oder der Einheit Gray (Gy) angegeben. Es gilt somit:

Energiedosis (Gy) = Strahlungsenergie (J) / Masse des bestrahlten Volumenelements (kg)

Bei gleicher Strahlungsintensität ist die Energiedosis abhängig von der atomaren Zusammensetzung des Absorbermaterials, da die Absorption von der Ionisierungsenergie des Atoms abhängig ist. Die wichtigsten Dosisgrößen des Strahlenschutzes sind die Organdosis und die effektive Dosis. Diese rechnerisch ermittelten, massespezifischen Dosisgrößen dienen der Abschätzung des Strahlenrisikos für den Patienten. Beide Dosisgrößen werden in der Einheit Sievert (Sv) angegeben. Die Organdosis, auch Organäquivalenzdosis, wird über die bestrahlten Volumina gemittelt und ist als Produkt der mittleren Energiedosis des bestrahlten Organs oder Gewebes und einem Strahlungswichtungsfaktor definiert. Der Strahlungswichtungsfaktor für Röntgenstrahlung ist eins, sodass die Organdosis bei Röntgenuntersuchungen der mittleren Energiedosis entspricht. Die effektive Dosis wird aus verschiedenen Organdosen berechnet und berücksichtigt die verschiedenen Strahlungsempfindlichkeit der Organe. Sie ist als Produkt aus den Organdosen und den zugehörigen Gewebewichtungsfaktoren definiert. Die effektive Dosis ist ein Maß für das gesamte Risiko für eine Person, das durch eine Strahlenexposition entsteht. Anhand der effektiven Dosis kann das durch verschiedene Strahlungsexpositionen entstehende Gesamtrisiko verglichen werden.

Somit gelten für die Strahlenschutzgrößen:

Organdosis (Sv) = Energiedosis (Gy) x Strahlungswichtungsfaktor

effektive Dosis (Sv) = Organdosen (Sv) x Gewebewichtungsfaktoren

Die relativen Beiträge einzelner Gewebe und Organe an den gesamten, durch stochastische Effekte verursachte Strahlenschäden werden durch die Gewebewichtungsfaktoren (s. Tab.2) dargestellt (Krieger, 2017, Strahlenschutzkommission, 2007).

Gewebe	w_T	w_T
Knochenmark (rot), Kolon, Lunge, Magen, Brust, restliche Gewebe ^a	0,12	0,72
Keimdrüsen	0,08	0,08
Blase, Oesophagus, Leber, Schilddrüse	0,04	0,16
Knochenoberfläche, Gehirn, Speicheldrüsen, Haut	0,01	0,04
Gesamt		1,00

^a restliche Gewebe: Nebennieren, Obere Atemwege, Gallenblase, Herz, Nieren, Lymphknoten, Muskelgewebe, Mundschleimhaut, Bauchspeicheldrüse, Prostata (♂), Dünndarm, Milz, Thymus, Gebärmutter/Gebärmutterhals (♀)

Tab.2 Empfohlene Gewebewichtungsfaktoren nach ICRP 103 (Strahlenschutzkommission, 2007)

In der radiologischen Diagnostik werden integrale Dosisgrößen zur leichteren Abschätzung der Strahlenexposition genutzt. Bei konventionellen Röntgenuntersuchungen wird dafür das Dosisflächenprodukt (DFP) mit der Einheit cGy x Quadratzentimeter (cm²) genutzt. Der Computed Tomography Dose Index (CTDI) dient als Grundlage der Dosisabschätzung in der Computertomografie. Der CTDI entspricht dem Integral über dem Dosislängsprofil einer einzelnen Schicht und ist ein Maß für die absorbierte Dosis einer Schicht und der Streustrahlung. Die praktische Einheit des CTDI ist Milligray (mGy). Das Dosislängenprodukt (DLP) bezieht sich nicht nur auf die absorbierte Dosis einer Schicht, sondern bezieht die Länge des Untersuchungsvolumens mit ein. Es wird durch die Multiplikation des CTDI mit der Länge des Untersuchungsvolumens berechnet (Krieger, 2013, Krieger, 2017).

1.6.2 Strahlenbelastung

Die mittlere effektive Dosis durch radiologische Diagnostik beläuft sich für das Jahr 2015 auf ca. 1,6 Millisievert (mSv) pro Einwohner in Deutschland. In den letzten Jahren ist die mittlere effektive pro-Kopf-Dosis angestiegen. Der Anstieg lässt sich vor allem durch die Zunahme von CT-Untersuchungen erklären (s. Abb.8 und Abb.9) (Bundesamt für Strahlenschutz, 2019b).

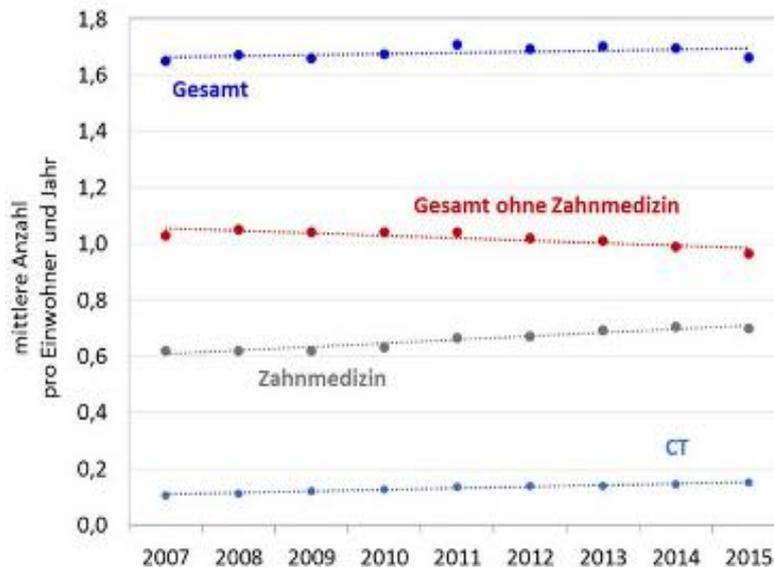


Abb.8 Mittlere effektive Dosis (in mSv) pro Einwohner pro Jahr durch radiologische Diagnostik in Deutschland (Bundesamt für Strahlenschutz, 2019b)

Die effektive Dosis bei Extremitätenaufnahmen ist signifikant kleiner als bei Aufnahmen des Rumpfes. Biswas et al. geben die effektive Strahlendosis für CT-Aufnahmen des Handgelenks mit etwa 0,03 mSv und das CTDIvol mit ca. 15 mGy an (Biswas et al., 2009). Koivisto et al. geben die effektive Strahlendosis für Röntgenaufnahmen des Handgelenks mit 0,0009 mSv und für MDCT-Aufnahmen mit 0,0086 mSv an (Koivisto et al., 2018). Die Dosisreduktion zwischen 2009 und 2018 von 0,03 mSv auf 0,0086 mSv ist am ehesten auf den Einsatz neuerer strahlenärmerer CT-Geräte zurückzuführen. Im Vergleich liegt die natürliche Strahlenbelastung in Deutschland bei durchschnittlich 2,1 mSv pro Person im Jahr. Die natürliche Strahlenbelastung setzt sich aus der inneren Strahlenexposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe aus der Luft oder über die Nahrung und der äußeren Strahlenexposition durch kosmische und terrestrische Strahlung zusammen (Bundesamt für Strahlenschutz, 2019c).

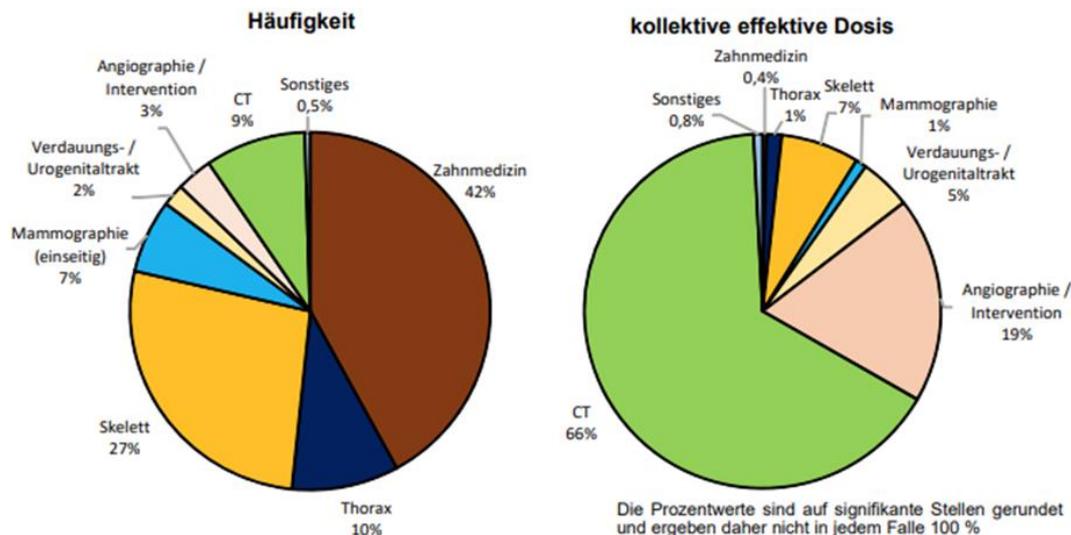


Abb.9 Beiträge zur Gesamthäufigkeit und zur kollektiven effektiven Dosis für verschiedene Untersuchungen in der Röntgendiagnostik 2015 in Deutschland (Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) and Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2017)

1.7 Therapie

1.7.1 Konservative Therapie

Stabile Skaphoidfrakturen können konservativ durch Immobilisierung im Unterarmgips oder Kunststoffverband behandelt werden. Sollte eine operative Therapie nicht durchführbar sein, können in Ausnahmefällen auch instabile Skaphoidfrakturen konservativ behandelt werden. Bei einer akuten Fraktur sollte initial bis zur Abschwellung eine Ruhigstellung des Handgelenks mittels Schiene oder gespaltenem Gips erfolgen, bevor ein zirkulärer Unterarmgips oder Kunststoffverband angelegt wird. Beim klassischen Skaphoid-Gips wird der Daumen bis zum Grundgelenk eingeschlossen und dadurch ebenfalls immobilisiert. Durch die Immobilisierung des Daumens soll zusätzlich eine Bewegung des Skaphoids verhindert werden. Auch ohne Daumeneinschluss kann eine Immobilisierung des Os metacarpale I zu einer teilweisen Ruhigstellung des Daumengrundgelenks führen (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF)- and Leitlinien., 2015, Clay et al., 1991, Dias and Athanatos, 2018, Dias et al., 2005, Dias et al., 2008). Bisherige Studien konnten bei zusätzlicher Immobilisierung des Daumens keine besseren Heilungsraten zeigen (Buijze et al., 2014, Clay et al., 1991).

Hambidge et al. konnten keinen Einfluss einer leichten Extensions- oder Flexionsstellung im Handgelenk auf die Heilung bei Skaphoidfrakturen nachweisen. Eine leichte Extensionsstellung führt jedoch zu einer geringeren Bewegungseinschränkung im Handgelenk (Hambidge et al., 1999). Auch durch zusätzliche Immobilisierung des

Ellenbogengelenks konnten in bisherigen Studien keine höheren Ausheilungsraten erreicht werden. Aufgrund des bestehenden Risikos einer dauerhaften Bewegungseinschränkung des Ellenbogengelenks bei gleichen Ausheilungsraten wird das Ellenbogengelenk bei Skaphoidfrakturen in der Regel nicht immobilisiert (Alho and Kankaanpaa, 1975, Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF)- and Leitlinien., 2015, Doornberg et al., 2011, Gellman et al., 1989).

In mehreren Studien wurden nach 6 – 8 Wochen Immobilisierung bei akuten Skaphoidfrakturen Heilungsraten von > 90 % erreicht (Alho and Kankaanpaa, 1975, Dias et al., 2005, Geoghegan et al., 2009). Rhemrev et al. erreichten eine Ausheilungsrate von 81,7 % nach sechs Wochen und eine weitere von 15,5 % nach 8 – 12 Wochen Immobilisierung bei nicht dislozierten Frakturen (Rhemrev et al., 2009). Geoghegan et al. konnten in ihrer Studie zeigen, dass ein Teil der Skaphoidfrakturen bereits nach vier Wochen im CT eine 50 %ige oder höhere knöcherne Überbrückung und somit eine Heilung aufweist (Geoghegan et al., 2009). In anderen Studien betrug die Zeit der Immobilisierung 8 – 12 Wochen bis zur Ausheilung der Fraktur (Bond et al., 2001, Gellman et al., 1989, Hambidge et al., 1999). Teilweise wurden in den vorhandenen Studien auch instabile Frakturen konservativ behandelt und in das Kollektiv eingeschlossen (Alho and Kankaanpaa, 1975, Dias et al., 2005). Die Kontrolle der Heilung erfolgte klinisch, sowie radiologisch mittels konventionellem Röntgen oder CT (Alho and Kankaanpaa, 1975, Bond et al., 2001, Dias et al., 2005, Gellman et al., 1989, Hambidge et al., 1999, Rhemrev et al., 2009).

Nach aktueller Empfehlung wird das Handgelenk in Deutschland bei nicht dislozierten Frakturen im distalen und mittleren Drittel in der Regel 6 – 8 Wochen ruhiggestellt, um eine Heilung zu erreichen (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF)- and Leitlinien., 2015). Eine klinische und radiologische Kontrolle der Knochenheilung sollte vor Beendigung der konservativen Therapie am gipsfreien Handgelenk erfolgen. Dazu dient primär eine konventionelle Röntgendiagnostik in drei Ebenen. Sollte im Röntgen die Ausheilung nicht sicher bestätigt werden können, wird die konservative Therapie zunächst bis zu einer maximalen Zeit von zwölf Wochen fortgesetzt. Eine erneute Kontrolle mittels CT erfolgt ab der neunten Woche nach dem Unfallereignis. Ein Wechsel des Therapieverfahrens sollte bei ausbleibender Heilung nach zwölf Wochen Immobilisierung erfolgen. Bei Frakturen des Tuberkulum ist meist eine Ruhigstellung von vier Wochen ausreichend. Instabile Frakturen, bei denen eine operative Therapie nicht möglich ist, sollten länger als stabile Frakturen immobilisiert werden. Diese sollten jedoch ebenfalls für maximal zwölf Wochen ruhiggestellt werden (Arsalan-Werner et al., 2016, Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF)- and Leitlinien., 2015, Schmitt and Rosenthal, 2016).

1.7.2 Operative Therapie

Während stabile Skaphoidfrakturen primär konservativ versorgt werden sollten, sollten instabile Skaphoidfrakturen primär operativ versorgt werden. Durch die operative Therapie soll neben einer stabilen Versorgung der Fraktur eine schnellere Heilung erreicht werden (Sauerbier et al., 2013).

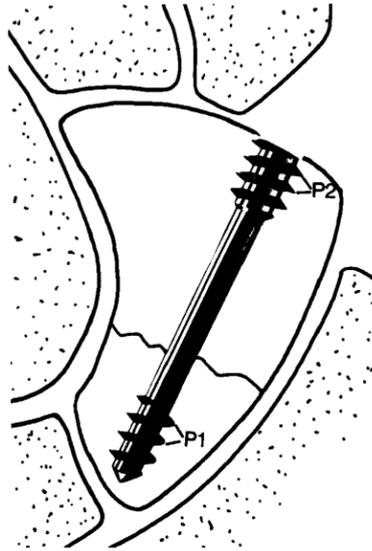


Abb.10 Herbert-Schraube,
Gewindesteigung $P1 > P2$ (Herbert,
1986)

Ende der 1970er Jahre entwickelten Timothy Herbert und William Fischer eine neue intraossär versenkbare Schraube zur operativen Versorgung von Skaphoidfrakturen, da vorherige Möglichkeiten der operativen Versorgung einige Probleme aufwiesen. Bei der Versorgung einer Skaphoidfraktur mittels Kirschner-Draht ist eine zusätzliche Immobilisierung im Gips notwendig. Zudem ist aufgrund der vielen Gelenkflächen eine Plattenosteosynthese des Skaphoids nicht möglich. Im Gegensatz zu herkömmlichen, in den Gelenkspalt vorstehenden Osteosyntheseschrauben, kommt es bei der als Herbert-Schraube bekannten versenkbaren Schraube zu keiner Bewegungseinschränkung. Eine Entfernung der Herbert-Schraube nach Frakturheilung ist deshalb nicht notwendig. Die Herbert-Schraube hat an den Enden jeweils ein Gewinde, diese bewirken eine sichere Fixierung der Fragmente und ermöglichen die Reduzierung der Gesamtlänge, sodass auch kleine Fragmente fixiert werden können. Das vorangehende Gewinde weist eine größere Steigung auf als das Gewinde am Schraubenende (s. Abb.10). Durch die unterschiedliche Steigung der Gewinde werden die Fragmente nach Eindrehen der Schraube zusammengezogen. Der ausgelöste Druck ist abhängig von den Steigungsunterschieden der Gewinde (Herbert and Fisher, 1984).

Zur korrekten Platzierung der Schraube entwickelten Herbert und Fischer zudem ein Zielgerät (s. Abb.11). Mit dem Zielgerät dient dabei der Fixierung der Fragmente, dem Bohren und anschließend dem Einführen der Schraube. Bei der Verwendung des Zielgerätes ist eine Röntgenkontrolle der Schraubenlage nicht notwendig (Herbert and Fisher, 1984). Da für die Verwendung des Zielgerätes und einer korrekten Reposition eine komplette Freilegung des Skaphoids notwendig ist, muss das Skaphoid teilweise aus dem skaphotrapezialen Gelenk subluxiert werden. Bei dieser Operationstechnik kann es zu Verletzungen der Bänder und Schädigung der Blutversorgung und Knorpelflächen kommen (Martini and Schiltenwolf, 1993). Die Nutzung des Zielgerätes ist nicht bei allen Skaphoidfrakturen möglich, sodass zudem die Freihandtechnik eingeführt wurde. Dabei kann vorübergehend ein Kirschner-Draht zur Fixierung eingesetzt werden. Die Freihandtechnik macht eine regelmäßige Röntgenkontrolle während der Operation notwendig um die Schraube korrekt zu platzieren (Herbert, 1986).

Neben der klassischen von Herbert und Fisher entwickelten Herbert-Schraube gibt es kanülierte Doppelgewindeschrauben, die eine Einführung der Schraube über einen Kirschner-Draht ermöglichen. Die meisten verwendeten Schrauben sind zudem selbstschneidend. Eingesetzte Schrauben sind unter anderem die CCS-Schraube, die HCS-Schraube und das HBS-2-System. Als Alternative kann bei stark gekrümmten Varianten des Skaphoids eine Fraktur mittels Kirschner-Draht und zusätzlicher Immobilisierung behandelt werden (Brauer et al., 1997, Krimmer et al., 2000, Sauerbier et al., 2013).

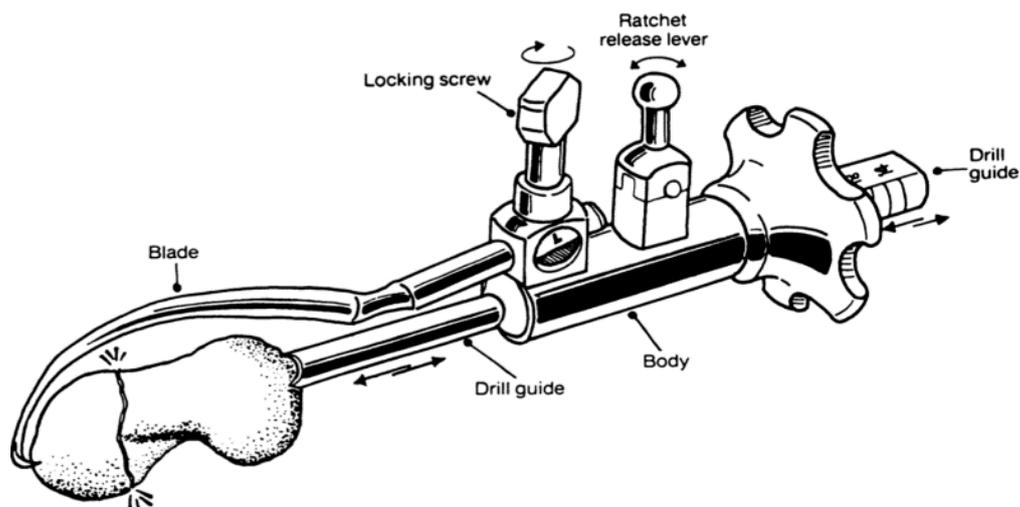


Abb.11 Zielgerät zur Schraubenosteosynthese mittels Herbert-Schraube (Herbert and Fisher, 1984)

Die Wahl des Operationsverfahren ist abhängig von der Lokalisation, der Dislokation, Begleitverletzungen und den individuellen Vorlieben des Operateurs. Stabile Frakturen sowie instabile Frakturen ohne Dislokation oder nach erfolgreicher geschlossener Reposition können minimal-invasiv versorgt werden (Krimmer et al., 2000, Mehling and Sauerbier, 2013, Sauerbier et al., 2013). Frakturen im mittleren oder distalen Drittel können von dorsal oder palmar operiert werden, während die operative Versorgung bei Frakturen im proximalen Drittel immer von dorsal erfolgt (Krimmer et al., 2000, Slade et al., 2002, Soubeyrand et al., 2009).

Das Handgelenk wird beim palmaren Zugang in Dorsalextension und maximaler Ulnarduktion gelagert. Beim minimal-invasiven Verfahren erfolgt der Zugang über eine Stichinzision oder einen maximal 1 cm langen Hautschnitt radiallyseitig über dem skaphotrapezialen Gelenk. Mittels intraoperativen Bildwandlers wird das skaphotrapeziale Gelenk im Vorfeld radiologisch markiert. Unter Durchleuchtung wird der Führungsdraht von palmar-distal nach proximal in der Längsachse des Skaphoids eingebracht. Eine zu palmare oder zu horizontale Lage kann aufgrund der regelrecht auftretenden Abscherung durch das Os trapezium entstehen. Die Drahtlage sollte während des Eingriffs mehrfach in den drei Standardebenen dargestellt werden und gegebenenfalls vor dem Einbringen der Schraube korrigiert werden. Nach Platzierung des Drahtes wird die Schraubenlänge gemessen. Die Schraube hat meist eine Länge zwischen 22 – 24 mm. Der Zieldraht muss überbohrt werden, um die Schraube einzubringen. Bei selbstbohrenden Schrauben entfällt die vorherige Überbohrung. Eine kanülierte Schraube wird über den liegenden Draht eingedreht. Das Ziel ist eine spürbare Kompression und gute Verankerung der Schraube. Bevor die Wunde gesäubert und zugenäht wird, sollte die Schraubenlage radiologisch kontrolliert werden. Postoperativ wird das Handgelenk in der Regel maximal eine Woche in einem sterilen, elastischen Verband ruhiggestellt. Bereits nach wenigen Tagen kann mit physiotherapeutischer Beübung ohne Belastung begonnen werden. Beim minimal-invasiven Verfahren werden die karpalen Bandstrukturen nicht geschädigt (Sauerbier et al., 2013). Beim offenen palmaren Zugang erfolgt eine longitudinale Hautinzision über der Sehne des M. flexor carpi radialis in Richtung des Tuberkulum nach distal-radial. Unter Schonung des Lig. radioscaphocapitatum wird die palmare Kapsel longitudinal inzidiert (Fowler and Ilyas, 2010).



Abb.12 Kontrolle der regelrechten Schraubenlage mittels intraoperativer Durchleuchtung in drei Ebenen (Sauerbier et al., 2013)

Frakturen im proximalen Drittel werden antegrad von dorsal operativ versorgt. Der dorsale Zugang bietet eine sehr gute Frakturübersicht und gute Positionierung der Schraube. Bei der Verschraubung proximaler Frakturen haben sich vor allem kanülierte Mini-Doppelgewindeschrauben bewährt. Um eine gute Übersicht zu bekommen, wird das Handgelenk während der Operation in maximaler Flexion gelagert. Beim offenen dorsalen Zugang erfolgt die longitudinale Hautinzision über dem radioskaphoidalen Gelenkabschnitt, im schrägen Verlauf der Extensor-pollicis-longus-Sehne. Die Sehne des Musculus extensor pollicis longus wird nach radial gezogen. Dabei werden das zweite und dritte Strecksehnenfach im distalen Anteil eröffnet. Nach Inzision der Handgelenkkapsel kann der proximale Skaphoidpol zwischen den radialen und ulnaren Handgelenkstreckern dargestellt werden. Parallel zur Längsachse des Skaphoids wird der Kirschner-Draht unter Bildverstärkerkontrolle in das Skaphoid eingebracht (s. Abb.13). Bei der Verwendung kanülierter Mini-Doppelgewindeschrauben hat der Draht einen Durchmesser von 0,8 – 0,9 mm. Als Orientierung kann die Verlängerung des abduzierten Daumens genutzt werden. Aufgrund der geringen Dimension des proximalen Fragments und um eine Gewindeplatzierung im Frakturspalt zu verhindern, darf der Schraubenkopf nicht zu tief eingedreht werden. Nach Einbringen der Schraube sollte die Schraubenlage radiologisch kontrolliert werden (s. Abb.12). Im Anschluss werden die Handgelenkkapsel und die Strecksehnenfächer rekonstruiert bevor die Haut zugenäht wird (Krimmer et al., 2000, Sauerbier et al., 2013). Nach der Operation sollte das Handgelenk etwa 3 – 6 Wochen ruhiggestellt werden (Mehling and Sauerbier, 2013). Der minimal-invasive dorsale Zugang erfolgt in maximaler Flexion und leichter Ulnardeviation über dem proximalen Pol des Skaphoids. Der Draht wird vom proximalen Pol aus in Richtung des Daumenstrahls eingebracht (Fowler and Ilyas, 2010).



Abb.13 Intraoperative Aufnahme der offenen Reposition von dorsal während temporärer Kirschner-Draht Osteosynthese (Sauerbier et al., 2013)

Alternativ können arthroskopisch assistierte Verfahren genutzt werden. Mittel- und langfristig weisen diese Verfahren keine Vorteile auf, sodass sie nur selten zum Einsatz kommen (Böhringer et al., 2002, Sauerbier et al., 2013)

In seltenen Fällen sind Trümmerzonen, Zysten oder ein Ganglion die Ursache einer Skaphoidfraktur. Um in diesen Fällen das Skaphoid in seiner Form und Länge wiederherzustellen werden eine Spongiosaplastik oder ein kortikospongiöser Knochenspan verwendet (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF)- and Leitlinien., 2015, Krimmer et al., 2000). Bei der operativen Versorgung älterer dislozierter Frakturen (4 – 8 Wochen nach dem Unfall) wird die Frakturzone in der Regel angefrischt (Sendher and Ladd, 2013). Frakturen, die älter als acht Wochen alt sind, können wie Pseudarthrosen mit Knochentransplantationen therapiert werden (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF)- and Leitlinien., 2015). In einzelnen Studien konnte jedoch auch bei Frakturen nach über acht Wochen mittels minimal-invasiver Therapie ein hohes Heilungspotenzial gezeigt werden (Mahmoud and Koptan, 2011).

1.8 Komplikationen und Folgeschäden

Sowohl die konservative Therapie als auch die operative Versorgung der akuten Skaphoidfraktur weisen verfahrensspezifische Risiken und Komplikationen auf. Bei der operativen Versorgung bestehen die allgemeinen Risiken eines chirurgischen Eingriffs, wie Blutungen, Wundheilungsstörungen, Infektionen, Thromboembolien und kosmetische sowie funktionelle Komplikationen bei der Narbenbildung. Zudem kann es zu Gefäß- und Nervenverletzungen, Verletzungen der Beugesehnen und Schraubenfehlagen kommen (Bond et al., 2001, Grewal and King, 2009, McQueen et al., 2008, Saeden et al., 2001, Vinnars et al., 2008). Die allgemeinen Risiken bei der konservativen Therapie entstehen

durch den Einsatz fixierender Verbände. Es kann zu Druckstellen, Weichteilirritationen, Gefühlsstörungen sowie zum Complex Regional Pain Syndrome kommen (Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF)- and Leitlinien., 2015). Nach längerer Immobilisierung kann es zudem vor allem in den ersten drei Monaten zu einer prolongierten Funktionseinschränkung kommen (Adolfsson et al., 2001, McQueen et al., 2008).

Mehrere Studien haben keine signifikanten Unterschiede in der Heilungsrate zwischen der konservativen und operativen Versorgung akuter Skaphoidfrakturen gezeigt. In den meisten dieser Studien wurden nur nicht dislozierte Frakturen eingeschlossen, während McQueen et al. und Saeden et al. in ihre Studien auch einige instabile Frakturen eingeschlossen haben (Adolfsson et al., 2001, Bond et al., 2001, Clementson et al., 2015, McQueen et al., 2008, Saeden et al., 2001, Vinnars et al., 2008). Die in einigen Studien angegebene hohe Rate an Heilungsstörungen bei konservativer Therapie lässt sich auf den Einschluss instabiler Frakturen zurückführen (Clay et al., 1991, Cooney et al., 1980a, Dias et al., 2005). Aufgrund der Möglichkeit einer schnelleren Mobilisierung nach der operativen Versorgung einer Fraktur, haben operierte Patienten meist eine kürzere Krankheitsdauer und erreichen schneller eine vergleichbare Handfunktion wie vor der Verletzung (Adolfsson et al., 2001, Dias et al., 2005, McQueen et al., 2008, Saeden et al., 2001). Langfristig zeigen mehrere Studien eine höhere Rate von Osteoarthritis im skaphotrapezialen Gelenk in der operierten Gruppe (Clementson et al., 2015, Saeden et al., 2001, Vinnars et al., 2008).

Entscheidend für ein gutes funktionelles Ergebnis ohne Spätfolgen sind eine frühzeitige und sichere Diagnosestellung, die darauf begründete Therapie und Verlaufskontrollen der Frakturkonsolidierung (Böhler et al., 1954, Lindström and Nyström, 1990). Abhängig vom Frakturtyp kommt es in 4 – 11 % Fälle zu einer verzögerten Frakturheilung oder Pseudarthrose (Adolfsson et al., 2001, Wozasek and Laske, 1991). Eine Skaphoidpseudarthrose ist als fehlendes Fortschreiten der knöchernen Konsolidierung nach einer Skaphoidfraktur definiert. Radiologisch kann eine fehlende knöcherne Konsolidierung bereits ab acht Wochen und definitiv ab drei Monaten posttraumatisch gestellt werden (Bickert et al., 2014). Die Entstehung einer Pseudarthrose ist von verschiedenen Faktoren abhängig, deren jeweilige Auswirkungen unklar sind. Neben der Frakturlokalisierung, dem Ausmaß der Dislokation und der Fragmentstellung spielen auch die frühe Diagnosestellung und die Behandlungsdauer eine Rolle (Amadio et al., 1989, Clay et al., 1991, Cooney et al., 1980b). Zu Beginn zeigt sich bei gestörter Frakturheilung eine Resorptionszone am Frakturspalt. Ab dem vierten Monat posttraumatisch kommt es zur Demineralisierung. Mit adäquater Therapie und weiterer Ruhigstellung ist die Schädigung im Resorptionsstadium noch reversibel. Im weiteren Verlauf entwickeln sich in beiden Fragmenten pseudozystische Resorptionsareale und zystoide Einschlüsse. Zudem kommt

es zu einer zunehmenden Sklerosierung der ehemaligen Fraktur­ränder (Asmus et al., 2016, Schmitt and Lanz, 2014).

Längerfristig kommt es durch die vorhandene Instabilität zur zunehmenden Arthrose. Aufgrund der intakten Band­verbindung zum Os lunatum dreht sich das proximale Fragment nach dorsal in Flexionsstellung, während das distale Fragment aufgrund des axialen Drucks nach palmar verkippt in Extensionsstellung vorliegt. Infolge der Verkip­pung des distalen Fragments entsteht die Arthrose zunächst am Pro­cessus (Proc.) styloideus radii. Im Verlauf breitet sich die radioskaphoidale Arthrose bis zur Pseudarthrosezone aus (Asmus et al., 2016, Krimmer and Lanz, 2000, Mehling and Sauerbier, 2013). Das proximale Fragment ist typischerweise nicht arthrotisch verändert (Vender et al., 1987). Durch das Fortschreiten der Arthrose kommt es zum karpalen Kollaps, dem Scaphoid Nonunion Advanced Collapse (SNAC) (Krakauer et al., 1994, Mehling and Sauerbier, 2013, Vender et al., 1987). Anhand des Arthroseausmaßes unterscheidet man vier Stadien. Im Stadium I ist nur der Proc. styloideus radii arthrotisch verändert und therapeutisch kann das Skaphoid durch Knochentransplantation und Osteosynthese rekonstruiert werden und gegebenenfalls der Proc. styloideus radii reseziert werden. Im Stadium II ist das gesamte Radioskaphoidgelenk betroffen und im Stadium III besteht zusätzlich eine mediokarpale Arthrose. Ab Stadium II kann das Skaphoid nicht mehr rekonstruiert werden und es können therapeutisch Rettungsoperationen zur Schmerzreduktion und dem Erhalt einer funktionell ausreichenden Handgelenkbeweglichkeit durchgeführt werden. Zu den Rettungsoperationen zählen die palliative Handgelenkdenervation, verschiedene Teilarthrodesen am Handgelenk und die Entfernung der proximalen Handwurzelreihe (Mehling and Sauerbier, 2013, Watson and Ryu, 1986). Eine Entfernung der proximalen Handwurzelreihe kann aufgrund der Arthrose des Kapitatumkopf in Stadium III nicht eingesetzt werden (Krimmer and Lanz, 2000, Sauerbier et al., 2000, Wyrick et al., 1995). Die in Stadium IV bestehende Panarthrose des Handgelenks kann durch vollständige Versteifung therapiert werden (Mehling and Sauerbier, 2013, Weiss and Rodner, 2007). Klinisch präsentieren sich Arthrosen nach Skaphoidfrakturen mit ausgeprägten Schmerzen, einer radiodorsalen Schwellung, Bewegungseinschränkungen und einem Instabilitätsgefühl (Asmus et al., 2016, Mehling and Sauerbier, 2013).

1.9 Fragestellung

In der Diagnostik von Skaphoidfrakturen kommt in Deutschland häufig, ergänzend zur Projektionsradiographie in drei Standardprojektionen (posterior-anterior, lateral und Stecher), die CT zum Einsatz. In anderen Ländern mit einem niedrigeren Brutto-Inlands-Produkt ist es vor allem aus Kosten- und Kapazitätsgründen üblich eine CT-Diagnostik deutlich restriktiver und vor allem zur weiteren Therapieplanung bei Nachweis dislozierter Frakturen im Röntgen einzusetzen.

Diese Arbeit hat das Ziel herauszufinden, ob eine zusätzliche diagnostische CT als Ergänzung zur konventionellen Projektionsradiographie Einfluss auf das klinische Outcome der Patienten mit einer Skaphoidfraktur hat. Zudem wird in dieser Arbeit die diagnostische Genauigkeit der Projektionsradiographie im Vergleich zur Referenzmethode der CT hinsichtlich einer Skaphoidfraktur betrachtet.

2 Material und Methoden

2.1 Patienten und retrospektive Datenerhebung

In diese retrospektive Studie wurden insgesamt 212 erwachsene Patienten und Patientinnen mit einer radiologisch nachgewiesenen Skaphoidfraktur von 2009 – 2019 eingeschlossen. Davon stammen 103 Personen aus dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (UKE) und 109 Personen aus dem Universitätsklinikum St. Kyrill und Method (UKIM) in Skopje (Republik Nordmazedonien) im Rahmen einer interuniversitären Forschungsk Kooperation. Die Erhebung der Patientendaten in Skopje erfolgte durch die Assistenzärztin Marija Stojkova von der Medicinski Fakultet Skopje.

In beiden europäischen Kollektiven wurden jeweils konventionell-radiographische bei allen sowie CT-diagnostische Aufnahmen im UKIM bei einem Teil der Patienten und Patientinnen sowie im UKE bei jedem Patienten und jeder Patientin angefertigt, wobei alle Patientendaten anonymisiert ausgewertet wurden. Neben dem computertomographischen Fraktur nachweis waren die weiteren Einschlusskriterien, eine Projektionsradiographie im Vorfeld der CT und die schriftliche Dokumentation der Therapie sowie des Outcomes der Patienten und Patientinnen.

2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Die Projektionsradiographie des Handgelenks in drei Standardaufnahmen wurde mit einem digitalen Radiographiesystem (Digital Diagnost, Philips, Niederlande) erstellt. Die posterior-anteriore Aufnahme erfolgte bei gebeugtem Ellenbogen sowie 90 ° abduzierten Ellenbogen und die seitliche Aufnahme bei angelegtem Oberarm sowie 90 ° gebeugtem Ellenbogen

(Schmitt and Rosenthal, 2016). Des Weiteren wurde eine Stecher-Aufnahme bei Faustschluss und Ulnarduktion der Hand durchgeführt (Stecher, 1937). Die Aufnahmen wurden mit einer Röhrenspannung von 46 – 55 kV und einem Energieäquivalent, als Produkt aus Anodenstrom der Röntgenröhre (in mA) und Belichtungszeit (in s), von 2 Milliamperesekunden (mAs) erstellt.

Die konventionell-radiologischen Aufnahmen wurden mit einer Befundungssoftware (Centricity PACS, GE Healthcare, USA) auf zur diagnostischen Befundung zugelassenen Befundungsmonitoren ausgewertet.



Abb.14 Röntgenaufnahme des linken Handgelenks eines 58-jährigen Patienten mit einer Typ A-Skaphoidfraktur, UKE



Abb.15 Röntgenaufnahme des rechten Handgelenks eines 42-jährigen Patienten mit einer Typ B-Skaphoidfraktur, UKE

2.3 Computertomographie

Die computertomographischen Aufnahmen wurden aufgrund des retrospektiven Charakters der Studie mit verschiedenen Geräten erstellt. Eingesetzt wurden ein 128-Detektorzeilen Gerät (Ingenuity Elite, Philips Healthcare, Niederlande) in Skopje am UKIM, sowie ein 256-Detektorzeilen Gerät (Brilliance iCT, Philips Healthcare, Niederlande) und ein 384-Detektorzeilen Gerät (Somatom Force, Siemens, Deutschland) in Hamburg am UKE. Die Schichtdicke variierte zwischen 0,6 – 2 mm. Die Röhrenspannung lag bei 120 kV.



Abb.16 CT-Aufnahme des linken Handgelenks eines 58-jährigen Patienten mit einer Typ A-Skaphoidfraktur, UKE

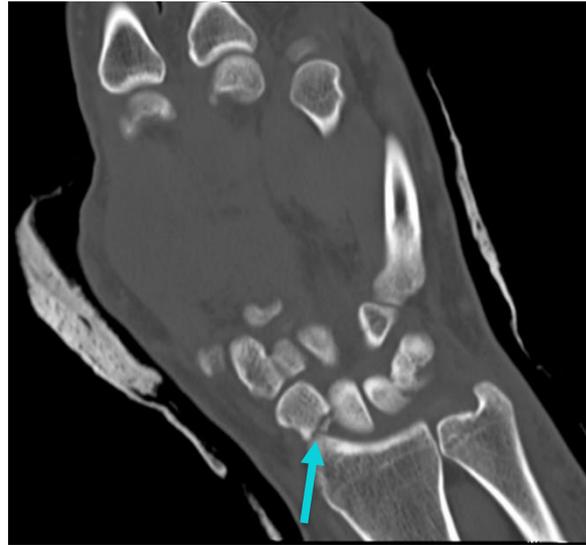


Abb.17 CT-Aufnahme des rechten Handgelenks eines 42-jährigen Patienten mit einer Typ B-Skaphoidfraktur, UKE

2.4 Auswertung der Aufnahmen

Die Röntgen- und CT-Aufnahmen wurden im Rahmen des klinischen Alltags durch einen radiologischen Assistenz- oder Facharzt bzw. eine Assistenz- oder Fachärztin befundet. Alle erhobenen Befunde wurden anschließend von einem radiologischen Oberarzt oder einer Oberärztin geprüft und validiert. Die Klassifikation nach Herbert und Fischer für Röntgenaufnahmen sowie die Klassifikation nach Krimmer für CT-Aufnahmen dienten als Interpretationsgrundlage.

2.5 Statistische Auswertung

Die erhobenen Daten wurden zunächst in einer Excel-Tabelle (Microsoft Office Excel, Microsoft, USA) dargestellt. Die Auswertung fand sowohl in Excel (Microsoft Office Excel, Microsoft, USA) als auch mithilfe der Software IBM SPSS Statistics 25 (IBM Corp. Released 2017. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 25.0. Armonk, USA) statt. In der deskriptiven Statistik werden die kontinuierlichen Ergebniswerte (z.B. Alter) als Mittelwerte mit Standardabweichung (SD) und die kategorischen Werte als Ziffern oder Prozentzahlen angegeben. Der Chi-Quadrat-Test für unverbundene Stichproben wurde verwendet, um die beiden Patientenkollektive auf signifikante Unterschiede kategorischer Variablen zu untersuchen. Dafür wurde das 95 %-Quantil der Chi-Quadrat-Verteilung mit einem Freiheitsgrad ($f = 1$) und ein Signifikanzniveau von $p = 0.05$ festgelegt. Bei erwarteten Häufigkeiten unter fünf wurde der exakte Test nach Fisher eingesetzt. Die Effektstärke wird mit dem ϕ -Koeffizient angegeben und nach Ellis interpretiert (Ellis, 2010).

In einem weiteren Schritt wurde bei 47 Patienten und Patientinnen, bei denen im Röntgen ein sicherer Frakturnachweis erfolgte, die Güte der Röntgenaufnahmen im Vergleich zu denen als Goldstandard definierten CT-Aufnahmen analysiert. Dazu wurden Vierfeldertafeln mit den absoluten Häufigkeiten als richtig-positive, falsch-positive, richtig-negative und falsch-negative Befunde jeweils für Dislokation, Lokalisation und Art sowie Klassifikation erstellt. Bei der Lokalisation und Art wurden zur besseren Vergleichbarkeit zunächst zwei Gruppen gebildet. Dazu wurden jeweils Frakturen im distalen mit Frakturen im mittleren Drittel zusammengefasst, sowie Frakturen im proximalen Drittel mit Schrägfrakturen und perilunären Luxationsfrakturen. Diese Einteilung wurde gewählt, da eine Änderung der Lokalisation innerhalb der jeweiligen Gruppe leitliniengerecht keine diagnostische oder therapeutische Konsequenz aufweist. Es wurden jeweils die Sensitivität, Spezifität, der positive und negative prädiktive Wert sowie der positive und negative Likelihood Ratio (LR) berechnet.

Der Likelihood-Ratio dient der Beurteilung der Güte eines diagnostischen Tests und wird aus Sensitivität und Spezifität prävalenzunabhängig berechnet. Der positive Likelihood-Ratio (LR+) ist als $LR+ = \text{Sensitivität} / (1 - \text{Spezifität})$ definiert und gibt somit den Faktor an wie viel Mal wahrscheinlicher ein positives Testergebnis bei einer erkrankten Person auftritt als bei einer gesunden Person (Bender, 2001, Hilgers et al., 2007).

Der negative Likelihood-Ratio (LR-) ist als $LR- = (1 - \text{Sensitivität}) / \text{Spezifität}$ definiert und gibt an wie viel Mal wahrscheinlicher ein negatives Testergebnis bei einer erkrankten Person auftritt als bei einer gesunden Person (Bender, 2001, Hilgers et al., 2007). Als grobe Einteilung der Testeffizienz kann die Klassifizierung in Tabelle 3 genutzt werden (Bender, 2001).

Testeffizienz	LR+	LR-
sehr gut	> 10	< 0,1
gut	5 – 10	0,1 – 0,2
mäßig	2 – 5	0,2 – 0,5
schlecht	1 – 2	0,5 – 1

Tab.3 Testeffizienz eines diagnostischen Tests (Bender, 2001)

3 Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

Das mittlere Patientenalter lag in der Gruppe aus dem UKE bei 38 Jahren (SD = ± 19 Jahren). Die jüngste Person war zum Untersuchungszeitpunkt 15 Jahre alt und die älteste Person war 93 Jahre alt. Die meisten Patienten und Patientinnen hatten ein Alter zwischen 20 und 40 Jahren (59 %) (s. Abb.18).

In der Gruppe aus dem UKIM lag das mittlere Patientenalter (± SD) bei 33 Jahren (± 18 Jahren). Die jüngste Person dieser Gruppe war 10 Jahre alt und die älteste Person 83 Jahre alt. Die meisten Patienten und Patientinnen waren wie in der Gruppe aus dem UKE zwischen 20 und 40 Jahren alt (46 %) (s. Abb.19).

In der Patientengruppe aus dem UKE lag der Anteil männlicher Patienten bei 80 % und in der Patientengruppe aus dem UKIM bei 79 %. Der Chi-Quadrat-Test zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen bezüglich der Geschlechterverteilung ($\chi^2 = 0.016 < \chi^2_{\text{krit}} = 3.84$, $p \approx .969$, $\phi = -.096$). Sowohl die Patientengruppe aus dem UKE als auch die Patientengruppe aus dem UKIM hatten ein ähnliches Geschlechterverhältnis.

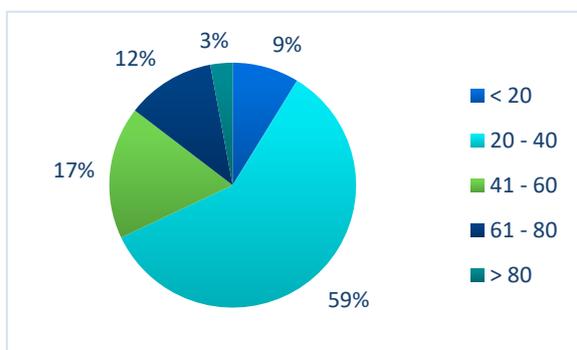


Abb.18 Relative Altersverteilung zum Zeitpunkt der Untersuchung im Patientenkollektiv des UKE

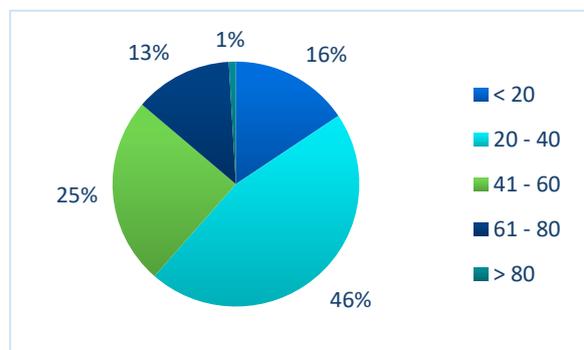


Abb.19 Relative Altersverteilung zum Zeitpunkt der Untersuchung im Patientenkollektiv des UKIM

3.2 Auswertung der Röntgen- und CT- Befunde

3.2.1 Befunde und Klassifikation der Fraktur

Im UKE hatten 78 Personen (76 %) eine Typ-A Fraktur und 25 Personen (24 %) eine Typ B Fraktur. Der Anteil von Patienten und Patientinnen mit einer Typ A Fraktur lag im UKIM mit 83 % etwas höher (s. Abb. 20). Der Chi-Quadrat-Test zeigte keinen signifikanten Unterschied beim Anteil der Typ A Frakturen zwischen den beiden Gruppen ($X = 1.971 < X_{\text{krit}} = 3.84$, $p \approx .1603$). Die beiden Probandengruppen unterschieden sich nicht in dem Anteil an Typ A Frakturen.

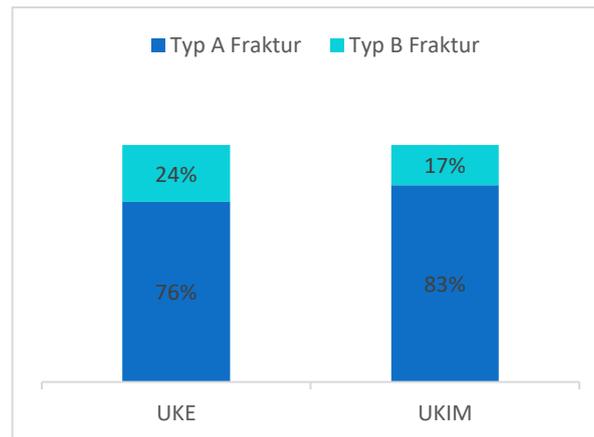


Abb.20 Relative Verteilung der Klassifikation im Vergleich

Bei 15 von 103 Personen (15 %) aus dem UKE und 17 von 109 Personen (16 %) aus dem UKIM konnte eine dislozierte Fraktur nachgewiesen werden. Im UKE wurde eine zusätzliche Unterteilung der instabilen Frakturen vorgenommen. Drei Personen wiesen eine perilunäre Luxationsfraktur auf. Die restlichen Frakturen waren zu 42 % im distalen Drittel, 29 % im mittleren Drittel, 13 % im Übergang vom distalen zum mittleren Drittel, 10 % im proximalen Drittel, 4 % im Übergang vom mittleren zum proximalen Drittel sowie zu 2 % Schrägfrakturen (s. Abb. 21).

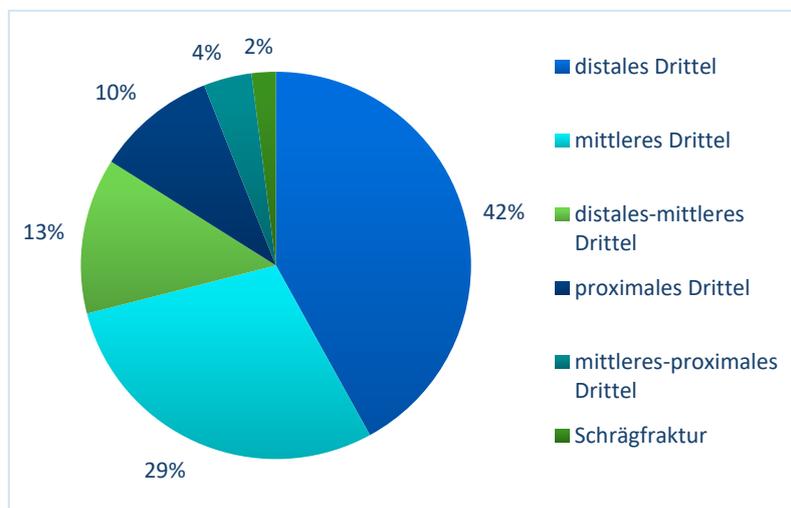


Abb.21 Relative Verteilung der Frakturlokalisation im Patientenkollektiv des UKE

3.2.2 Röntgen und CT-Diagnostik

Im UKIM wurde bei 23 von 109 Personen (21 %) eine CT-Diagnostik durchgeführt. Bei sieben der 23 Personen wurde eine Typ A Fraktur diagnostiziert und bei 16 Personen eine Typ B Fraktur. Eine CT-Diagnostik erfolgte in diesem Patientenkollektiv bei etwa 8 % aller Typ A Frakturen und bei etwa 89 % aller Typ B Frakturen.

In der Patientengruppe aus dem UKE wurden bei allen Patienten und Patientinnen Röntgen- und CT-Aufnahmen erstellt. Zudem konnte eine genauere Betrachtung der Röntgenbefunde vorgenommen werden. Bei 47 von 103 Personen (46 %) konnte bereits im Röntgen eine Fraktur diagnostiziert werden, bei 33 von 103 Personen (32 %) bestand nach der Röntgendiagnostik der Verdacht auf eine Fraktur ohne sicheren Nachweis und bei den übrigen 23 Personen (22 %) konnte im Röntgen keine Fraktur diagnostiziert werden.

Im Chiquadrat-Test konnte ein signifikanter Unterschied mit einer großen Effektstärke zwischen den beiden Patientengruppen in der Anzahl der durchgeführten CT-Aufnahmen gezeigt werden ($\chi^2 = 136.733 > \chi^2_{\text{krit}} = 3.84$, $p < .001$, $\phi = .803$). Das UKE führte demnach signifikant mehr CT-Aufnahmen durch als das UKIM.

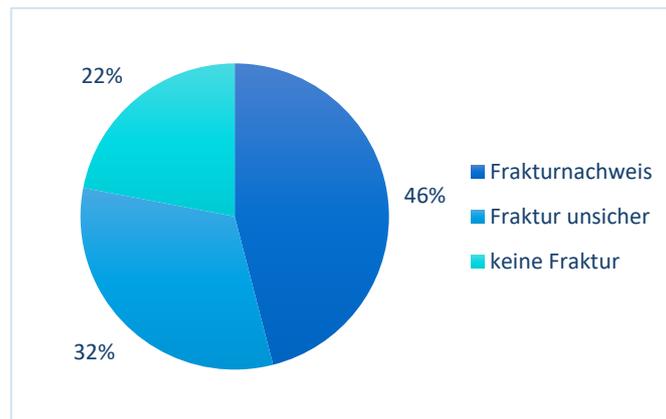


Abb.22 Relative Verteilung der Röntgenbefunde im Patientenkollektiv des UKE

3.2.3 Vergleich der Beurteilung der Skaphoidfraktur in Röntgen und CT im UKE

Bei 47 von 103 Personen (46 %) aus dem UKE konnte im Röntgen bereits sicher eine Fraktur diagnostiziert werden. Im Röntgen wurden 39 von 47 (83 %) als nicht disloziert diagnostiziert, in der CT wurden drei von 39 (8 %) im Röntgen nicht dislozierte Frakturen als disloziert diagnostiziert. Bei acht von 47 Personen (17 %) wurde im Röntgen eine Dislokation diagnostiziert, bei sechs der acht Personen (75 %) wurde die Dislokation in der CT bestätigt (s. Tab.4). Die Sensitivität der Röntgendiagnostik bei der Detektion einer dislozierten Fraktur lag bei 67 % und die Spezifität bei 95 %. Der positiv prädiktive Wert (PPV) des Röntgenbefundes ist 75 % und der negativ prädiktive Wert (NPV) ist 92 %. Der

LR+ zeigte eine sehr gute Testeffizienz mit 12,67 und der LR– zeigt eine mäßige Testeffizienz mit 0,35.

		CT		
		nicht disloziert	disloziert	Summe
Röntgen	nicht disloziert	36	3	39
	disloziert	2	6	8
	Summe	38	9	47

Tab.4 Vierfeldertafel Dislokation, UKE

Bei der Frakturlokalisierung und Art der Fraktur wurden zur besseren Vergleichbarkeit jeweils Frakturen im distalen mit Frakturen im mittleren Drittel zusammengefasst, sowie Frakturen im proximalen Drittel mit Schrägfrakturen und perilunären Luxationsfrakturen. Innerhalb der jeweiligen Gruppe hat eine Änderung der Lokalisation leitliniengerecht keine diagnostische oder therapeutische Konsequenz. Im Röntgen wurde bei 42 von 47 Personen (89 %) eine Fraktur im distalen oder mittleren Drittel diagnostiziert. Davon wurde die Lokalisation bei 39 Personen (92 %) im Röntgen richtig diagnostiziert. Bei zwei Personen wurde in der CT eine im Röntgen nicht entdeckte perilunäre Luxationsfraktur und bei einer Person eine Fraktur im proximalen Drittel diagnostiziert. Bei fünf von 47 Personen (11 %) wurde im Röntgen eine Fraktur im proximalen Drittel, eine Schrägfraktur oder perilunäre Luxationsfraktur diagnostiziert. Davon bestätigte sich die Lokalisation und Art der Fraktur bei drei Frakturen in der CT, bei den anderen beiden Personen wurde statt einer Fraktur im proximalen Drittel eine Fraktur im distalen bzw. mittleren Drittel diagnostiziert. Die Sensitivität des Röntgen bei der Diagnostik der Frakturlokalisierung und Art der Fraktur lag bei 50 % und die Spezifität bei 95 %. Der PPV des Röntgenbefundes ist 60 % und der NPV ist 93 %. Der LR+ zeigt eine sehr gute Testeffizienz mit 10,25 und der LR- zeigt eine schlechte Testeffizienz mit 0,53.

		CT		
		distales/ mittleres Drittel	proximales Drittel/ Schrägfraktur/ perilunäre Luxationsfraktur	Summe
Röntgen	distales/ mittleres Drittel	39	3	42
	proximales Drittel/ Schrägfraktur/ perilunäre Luxationsfraktur	2	3	5
	Summe	41	6	47

Tab.5 Vierfeldertafel Lokalisation und Art, UKE

Bei 34 von 47 Personen (72 %) wurde im Röntgen eine Typ A Fraktur diagnostiziert. Davon bestätigte sich bei 30 Personen (88 %) die Klassifikation in der CT. Bei 13 von 47 Personen (28 %) wurde eine Typ B Fraktur diagnostiziert, davon bestätigte sich die Klassifikation bei 9 der 13 Personen (69 %). Die Sensitivität des Röntgen in der Diagnostik der Klassifikation lag bei 69 % und die Spezifität bei 88 %. Der PPV des Röntgenbefundes ist 69 % und der NPV ist 88 %. Der LR+ zeigt eine gute Testeffizienz mit 5,88 und der LR– zeigt eine mäßige Testeffizienz mit 0,35.

		CT		
		Typ A	Typ B	Summe
Röntgen	Typ A	30	4	34
	Typ B	4	9	13
	Summe	34	13	47

Tab.6 Vierfeldertafel Klassifikation, UKE

3.3 Therapieverfahren

Im Universitätsklinikum in Skopje wurden 13 von 109 Frakturen (12 %) operativ versorgt. Alle operativ versorgten Frakturen waren Typ B Frakturen. Es wurden 13 von 18 (72 %) der Typ B Frakturen operativ versorgt. Bei fünf der 13 Patienten und Patientinnen (38 %) wurde die Fraktur minimal-invasiv operiert.

Im UKE wurden 42 von 103 Patienten und Patientinnen (41 %) operiert. Es wurden 28 von 78 Personen (36 %) mit einer Typ A Fraktur und 14 von 25 Personen (56 %) mit einer Typ B operativ versorgt. Insgesamt wurden in der Patientengruppe im UKE 19 von 42 Operationen (45 %) minimal-invasiv durchgeführt. Davon wiesen 15 Personen eine Typ A Fraktur und fünf Personen eine Typ B Fraktur auf.

Der Chiquadrat-Test zeigte einen signifikanten Unterschied mit einer mittleren Effektstärke bei der Anzahl der durchgeführten Operationen zwischen den beiden Gruppen ($X = 22.942 > X_{krit} = 3.84$, $p < .001$, $\phi = .329$). Beim Anteil der minimal-invasiven Operationen zeigte der Chiquadrat-Test keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($X = 0.185 < X_{krit} = 3.84$, $p \approx .667$).

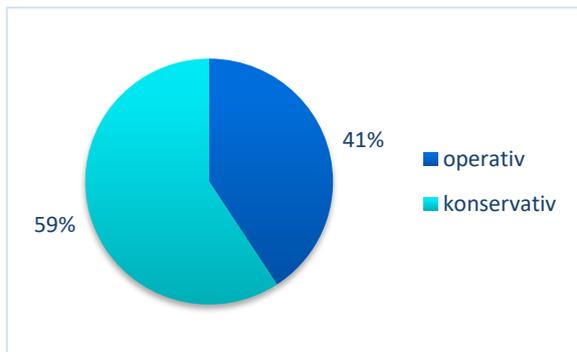


Abb.23 Relative Verteilung des Therapieverfahrens im Patientenkollektiv des UKE

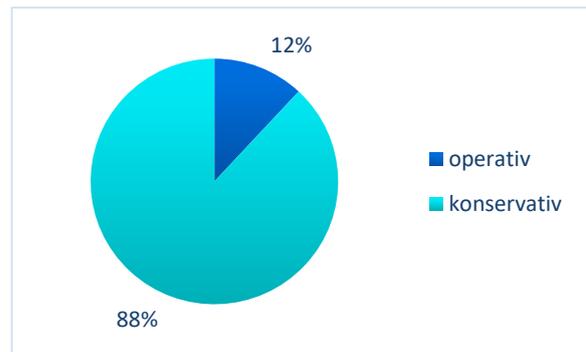


Abb.24 Relative Verteilung des Therapieverfahrens im Patientenkollektiv des UKIM

3.4 Outcome

Im UKIM kam es bei drei Personen (3 %) zu Komplikationen. Bei den drei Personen wurde eine Typ A Fraktur diagnostiziert und die Fraktur konservativ behandelt. Eine Person wies prolongiert Schmerzen bei aktiver und passiver Bewegung des Handgelenks auf. Bei einer anderen Person kam es zu einer Pseudarthrose und bei der dritten Person kam es zu einer Bewegungseinschränkung im Handgelenk.

Im UKE kam es bei fünf Personen (5 %) zu Komplikationen. Zwei der Komplikationen traten bei Personen mit Typ A Frakturen auf. Bei einer Person mit einer operativ versorgten Typ A Fraktur kam es zu einer verzögerten Heilung und bei einer Person mit einer konservativ versorgten Typ A Fraktur entwickelte sich eine Pseudarthrose. Die anderen drei Komplikationen traten bei Personen mit Typ B Frakturen auf. Bei einer konservativ therapierten Typ B Fraktur kam es zu einer verzögerten Frakturheilung. Bei einer operativ versorgten Typ B Fraktur musste das proximale Frakturfragment reseziert werden und bei einer anderen Person kam es postoperativ zur Wundheilungsstörung.

Der exakte Test nach Fisher ($p \approx .489$, $\phi = .055$) zeigte keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen beim Anteil der aufgetretenen Komplikationen.

4 Diskussion

Das Skaphoid ist der am häufigsten frakturierte Handwurzelknochen (Dunn, 1972, Hove, 1993). Als Basisdiagnostik dient neben der körperlichen Untersuchung das konventionelle Röntgen in drei Ebenen (posterior-anterior, seitlich und Stecher-Position) (Schmitt and Rosenthal, 2016, Stecher, 1937). Bei klinischem Verdacht und fehlendem Frakturachweis in der Röntgendiagnostik, sowie zum weiteren Fraktur staging und zur Therapieplanung bei instabilen Frakturen ist eine ergänzende CT-Diagnostik indiziert (Karle et al., 2005, Schmitt and Krimmer, 2015, Schmitt and Rosenthal, 2016, Welling et al., 2008).

Crowe et al. zeigten in ihrer Studie mit 7,6 Frakturen pro 100.000 Einwohner in Zentraleuropa und 11,1 Frakturen pro 100.000 Einwohner in Osteuropa eine ähnliche Inzidenz für das Auftreten von Frakturen der Hand und des Handgelenkes (Crowe et al., 2020). Folglich rechtfertigten die vergleichbaren Inzidenzen der Skaphoidfrakturen im europäischen Vergleich auch eine direkte Gegenüberstellung der evaluierten Studienergebnisse zwischen dem UKE in Deutschland und dem UKIM in Nordmazedonien.

In dieser Arbeit wurde anhand retrospektiv erhobener europäischer Daten aus dem UKE (Deutschland) und dem UKIM (Republik Nordmazedonien) der diagnostische Mehrwert der ergänzenden CT nach initialer konventioneller Radiographie in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen herausgearbeitet. Zudem wurde die diagnostische Genauigkeit der Projektionsradiographie in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen betrachtet. Als Goldstandard diente die CT.

Im Vergleich der beiden Patientengruppen in dieser Studie zeigten sich bei ähnlicher Gruppenzusammensetzung in Bezug auf Geschlecht und Alter der Personen sowie dem Anteil an Typ A Frakturen signifikante Unterschiede in der Anzahl durchgeführter CT-Diagnostik und der Anzahl operativ versorgter Frakturen. Im UKIM wurde bei 21 % der Personen eine CT-Diagnostik durchgeführt. Bei 89 % aller Typ B Frakturen und 8 % aller Typ A Frakturen erfolgte eine CT. Im UKE wurde bei jeder eingeschlossenen Person eine CT-Diagnostik durchgeführt. Clementson et al. hingegen empfehlen eine ergänzende CT-Diagnostik nur bei deutlich sichtbaren Frakturen im Röntgen und Verdacht auf Instabilität oder Dislokation der Fraktur, sowie bei allen Frakturen im proximalen Drittel. Bei nicht dislozierten Frakturen im Röntgen, sowie bei in der MRT diagnostizierten Frakturen empfehlen Clementson et al. keine zusätzliche CT-Diagnostik (Clementson et al., 2020). Im UKE wurde bei 47 Personen (46 %) bereits im Röntgen eine Fraktur gesehen, davon wurde bei 34 Person (72 %) im Röntgen eine nicht-dislozierte Fraktur im mittleren oder distalen Drittel gesehen. Gemäß der Empfehlung von Clementson et al. wäre bei diesen Personen eine ergänzende CT-Diagnostik nicht indiziert gewesen. Jedoch wurde bei vier Personen in der anschließenden CT eine Typ B Fraktur diagnostiziert, sodass bei diesen Patienten

und Patientinnen eine operationsbedürftige Fraktur zunächst konservativ versorgt worden wäre. Die konservative Therapie instabiler Frakturen ist möglich, jedoch besteht ein erhöhtes Risiko für die Ausbildung einer Pseudarthrose (Clay et al., 1991, Singh et al., 2012). Singh et al. geben ein vierfach erhöhtes Risiko für die Ausbildung einer Pseudarthrose bei konservativ behandelten dislozierten Skaphoidfrakturen im Vergleich zu nicht dislozierten Frakturen an (Singh et al., 2012). Eine mögliche verspätete oder ausbleibende Frakturheilung könnte in einer Röntgenkontrolle vor Beendigung der konservativen Therapie diagnostiziert werden. Neben einer Fortsetzung der konservativen Therapie für bis zu 12 Wochen kann eine Heilung auch über eine spätere operative Versorgung der Fraktur erreicht werden. Würde man der Empfehlung von Clementson et al. folgen und bei Personen mit einer Typ A Fraktur im Röntgen keine ergänzende CT-Diagnostik durchführen, hätte dies den Nachteil, dass bei einem Teil der Patienten und Patientinnen eine instabile Fraktur nicht oder erst verspätete diagnostiziert werden würde. Für diese Personen besteht ein erhöhtes Risiko für die Ausbildung einer Pseudarthrose und damit verbundenen weiteren Komplikationen sowie einer längeren Therapiedauer. Im UKIM wurde nur bei 21 % der Frakturen eine ergänzende CT durchgeführt. Davon wurden 70 % der Frakturen als instabile Frakturen klassifiziert. Bei einer Person mit einer stabilen Fraktur im Röntgen, bei dem keine CT durchgeführt wurde, kam es zur Ausbildung einer Pseudarthrose. Diese Zahlen lassen vermuten, dass es nur bei wenigen Patienten und Patientinnen aufgrund einer im Röntgen nicht richtig diagnostizierten instabilen Fraktur zu Komplikationen kommt.

Clementson et al. gehen davon aus, dass eine Fraktur, die im initialen Röntgen nicht nachweisbar ist, keine Dislokation oder Instabilität aufweist. In diesen Fällen empfehlen Clementson et al. die Anlage eines dorsalen Unterarmgips und eine MRT-Diagnostik innerhalb der nächsten 3-5 Tage zur Evaluation einer Fraktur (Clementson et al., 2020). Im UKE wurde bei 33 Personen (32 %) im Röntgen unsicher eine Fraktur gesehen zudem wurde bei 23 Personen (22 %) im Röntgen keine Fraktur gesehen und aufgrund des klinischen Verdachts zusätzlich eine CT durchgeführt. Bei den meisten Personen (79 %) aus dem UKE wurde nach fehlendem oder unsicherem Frakturachweis im Röntgen in der CT eine nicht dislozierte Fraktur im mittleren oder distalen Drittel diagnostiziert. Bei den übrigen 21 % der Personen wurde eine dislozierte Fraktur, eine Schrägfraktur oder eine Fraktur im proximalen Drittel in der CT diagnostiziert. Mehrere Autoren empfehlen aufgrund der genaueren Darstellung der Frakturzone die Durchführung einer CT zur Therapieentscheidung sowie zur Planung einer operativen Versorgung (Amrami et al., 2019, Bäcker et al., 2020, Clementson et al., 2020, Krimmer et al., 2000, Schmitt and Rosenthal, 2016). Somit wäre gegebenenfalls nach Röntgen und MRT noch zusätzlich eine CT notwendig, wenn in der MRT trotz initial fehlendem oder unsicherem Frakturachweis

eine instabile Fraktur diagnostiziert werden würde. Dies würde neben einer Verzögerung der Diagnose und somit einem verzögerten Therapiebeginn auch höhere Kosten bedeuten.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Patientengruppen zeigte sich in dieser Studie in der Anzahl der durchgeführten Operationen. Während im UKE 41 % aller Frakturen operativ versorgt wurden, waren es im UKIM nur 12 % der Frakturen. Im UKIM wurden 72 % der instabilen und keine stabilen Frakturen operiert. Im UKE wurden 36 % der Typ A und 56 % der Typ B Frakturen operiert. Sauerbier et al. empfehlen eine primär konservative Versorgung stabiler Frakturen und eine primär operative Versorgung instabiler Frakturen (Sauerbier et al., 2013). Seit Entwicklung der minimal-invasiven OP-Technik gibt es Überlegungen, auch nicht oder nur minimal dislozierte Frakturen operativ zu versorgen, um eine schnellere Heilung zu erreichen (Bond et al., 2001, Clementson et al., 2015, Clementson et al., 2020). Eine Meta-Analyse mit sechs eingeschlossenen Studien zeigte ein höheres Risiko für die Entwicklung von Komplikationen bei der operativen Versorgung nicht dislozierter Frakturen (Ibrahim et al., 2011). Zudem zeigen mehrere Studien ein erhöhtes Risiko für die Entwicklung einer Osteoarthritis im skaphotrapezialen Gelenk nach operativer Versorgung (Clementson et al., 2015, Saeden et al., 2001, Vinnars et al., 2008). Mehling et al. empfehlen ein minimal-invasives OP-Verfahren für in der CT nicht oder nur kaum dislozierte Frakturen (Mehling and Sauerbier, 2013). Im UKIM wurden 38 % der Operationen minimal-invasiv durchgeführt, bei allen Frakturen lag eine Dislokation vor. Im UKE erfolgten 45 % der Operationen minimal-invasiv, alle minimal-invasiv operierten Frakturen waren nicht dislozierte Frakturen. Bei der Wahl des Therapieverfahrens sollten neben der Frakturklassifikation auch individuelle Faktoren des Patienten oder der Patientin mit einbezogen werden. Nach einer gründlichen Aufklärung über die in Frage kommenden Therapieverfahren inklusive der möglichen Komplikationen sollte gemeinsam mit dem Patienten oder der Patientin eine Entscheidung getroffen werden. Mehrere Studien zeigen, dass eine stärkere Beteiligung am medizinischen Entscheidungsprozess zu einer höheren Patientenzufriedenheit, mehr Wissen über die Erkrankung und zuletzt auch zu einem besseren Outcome führen kann (Coulter and Ellins, 2007, Stacey et al., 2017).

In dieser Studie zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei der Anzahl aufgetretener Komplikationen, bei signifikant mehr durchgeführter CT-Diagnostik und operativer Frakturversorgung im UKE. Im UKIM traten bei drei Personen mit einer konservativ versorgten Typ A Fraktur Komplikationen auf, davon kam es bei einer Person zur Ausbildung einer Pseudarthrose. Weder bei den konservativ noch bei den operativ versorgten Typ B Frakturen traten im UKIM Komplikationen auf. Eine CT wurde bei keinem der Personen mit einer Komplikation zur Diagnostik durchgeführt. Es besteht das Risiko, dass eine instabile Fraktur im Röntgen aufgrund der geringeren Sensitivität in der Diagnostik von Dislokationen, als stabil diagnostiziert wurde. Im UKE traten bei fünf Personen

Komplikationen auf. Davon traten drei Komplikationen bei offen operativ versorgten Frakturen auf. Bei zwei der Personen wurde in der CT eine instabile Fraktur diagnostiziert, sodass die operative Versorgung indiziert war. Bei der dritten Person lag eine stabile Fraktur vor, bei der es nach operativer Versorgung zu einer verzögerten Heilung kam. Unklar ist, ob es bei konservativer Therapie ebenfalls zu einer verzögerten Heilung gekommen wäre. Zudem kam es bei einer konservativ versorgten instabilen Fraktur zu einer verzögerten Heilung und bei einer konservativ versorgten stabilen Fraktur zur Ausbildung einer Pseudarthrose. Aufgrund des höheren Risikos für die Ausbildung einer Pseudarthrose sollten instabile Frakturen primär operativ versorgt werden (Singh et al., 2012).

In dieser Studie konnte in der Patientengruppe aus dem UKE zudem die diagnostische Genauigkeit der konventionellen Röntgendiagnostik im Vergleich zur CT näher betrachtet werden. Bei 46 % der eingeschlossenen Personen konnte bereits im Röntgen eine Fraktur diagnostiziert werden. Davon wurden 28 % in der CT als instabile Frakturen klassifiziert. Hingegen konnte bei 22 % der Personen im Röntgen keine Fraktur gezeigt werden und bei 32 % der Personen konnte im Röntgen nur der Verdacht auf eine Fraktur gestellt werden. Von den im Röntgen nicht diagnostizierten Frakturen wurden 22 % in der CT als instabile Frakturen klassifiziert. Bei den unsicheren Frakturen zeigte sich ein ähnlicher Anteil (21 %) instabiler Frakturen nach der CT. Jørgsholm et al. zeigten in ihrer Studie eine Sensitivität von 70 % für das Erkennen akuter Skaphoidfrakturen im Röntgen (Jørgsholm et al., 2013). Eine höhere Sensitivität von 81 % erreichten Welling et al. in ihrer Studie (Welling et al., 2008). Betrachtet man in der vorliegenden Studie nur die im Röntgen sicher diagnostizierten Frakturen ist die Sensitivität deutlich geringer. Würde man die Frakturen mit einbeziehen, bei denen im Röntgen der konkrete Verdacht auf eine Fraktur gestellt wurde, ergäbe sich eine vergleichbare Sensitivität von 78 %. Die Sensitivität des Röntgen bei der Diagnostik akuter Skaphoidfrakturen ist somit nur mäßig. Von den bereits im Röntgen diagnostizierten Frakturen waren 19 % disloziert. Prognostisch relevant sind vor allem die im Röntgen nicht erkannten dislozierten Frakturen, da diese als instabile Frakturen operativ versorgt werden sollten. Wird im Röntgen eine dislozierte Fraktur diagnostiziert sollte zur Planung der operativen Planung ergänzend eine CT durchgeführt werden (Amrami et al., 2019, Bäcker et al., 2020, Clementson et al., 2020, Krimmer et al., 2000, Schmitt and Rosenthal, 2016). Ein falsch-positives Ergebnis würde somit zwar zu einer zusätzlichen CT-Diagnostik führen, jedoch nicht zu einer anderen Therapie. In dieser Studie ergab sich eine mäßige Sensitivität von 67 % bei jedoch guter Spezifität von 95 % für das Erkennen einer Dislokation im Röntgen. Der NPV von 92 % zeigte zudem eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass eine nicht disloziert diagnostizierte Fraktur im Röntgen auch tatsächlich nicht disloziert ist. Die LR+ zeigt zudem eine sehr gute Testeffizienz für das Erkennen einer Dislokation im Röntgen.

Wird die Fraktur bereits im Röntgen diagnostiziert, ist die Röntgendiagnostik durchaus geeignet, um eine Dislokation zu erkennen, auch wenn nicht alle Dislokationen im Röntgen richtig diagnostiziert werden. Gilley et al. untersuchten die Genauigkeit der Diagnostik von Dislokationen bei akuten Skaphoidfrakturen im Röntgen im Vergleich zur CT. Dazu wurden 35 Röntgen- und CT-Aufnahmen von zwei verblindeten Untersuchern oder Untersucherinnen ausgewertet. In der Studie wurde bei 26 bzw. 34 % der Frakturen in der CT eine Dislokation diagnostiziert, die im Röntgen nicht diagnostiziert wurde. Bei der Beurteilung der Skaphoidfrakturen im Röntgen zeigte sich ein Unterschied zwischen den beiden Untersuchenden, während beide in der CT-Diagnostik komplett übereinstimmten (Gilley et al., 2018). Im Vergleich der beiden Studien zeigt sich bei Gilley et al. eine höhere Rate an im Röntgen nicht diagnostizierten Dislokationen als in dieser Studie. Insgesamt waren in der Studie von Gilley et al. jedoch auch mehr dislozierte Frakturen eingeschlossen. Die Genauigkeit des Röntgen bei der Diagnostik von Dislokationen akuter Skaphoidfrakturen scheint zudem untersucherabhängig zu sein, während die CT-Diagnostik kaum davon abhängig zu sein scheint. Eine ältere Studie von Lozano-Calderon et al. zeigte ebenfalls eine höhere Übereinstimmung zwischen den Untersuchern in der Bewertung von Dislokationen in der CT als im Röntgen. In der Studie ergab sich eine Sensitivität für das Röntgen von 75 % und eine Sensitivität für die CT von 72 % für die Diagnostik von Dislokationen bei akuten Skaphoidfrakturen (Lozano-Calderon et al., 2006). Im Vergleich zeigte sich eine etwas höhere Sensitivität für die Röntgendiagnostik als in der vorliegenden Studie. Ein Problem der Studie von Lozano-Calderon et al. besteht darin, dass es keine Goldstandardmodalität zum Vergleich gab. Die richtige Diagnose von nicht dislozierten Frakturen wurde anhand der klinischen und radiologischen Bewertung des behandelnden Chirurgen oder der behandelnden Chirurgin sowie des Radiologen oder der Radiologin beurteilt, ohne eine weitere Diagnostik durchzuführen. Die richtige Bewertung von dislozierten Frakturen wurde anhand des arthroskopischen Befundes beurteilt (Lozano-Calderon et al., 2006). Eine endgültige Aussage über die Sensitivität und Spezifität von Röntgen und CT kann somit in der Studie nur schwer getroffen werden.

Ähnliche Ergebnisse ergaben sich in der Betrachtung der Frakturlokalisierung. Auch bei der Frakturlokalisierung sind vor allem die im Röntgen nicht erkannten Frakturlokalisationen, welche eine instabile Fraktur bedingen, prognostisch relevant. Bei der Diagnose der Frakturlokalisierung im Röntgen zeigte sich lediglich eine Sensitivität von 50 % bei jedoch guter Spezifität von 95 %. Der NPV von 93 % zeigte zudem eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass eine Fraktur, die im Röntgen im distalen oder mittleren Drittel diagnostiziert wurde, auch tatsächlich dort lokalisiert war. Zudem zeigte der LR+ eine sehr gute Testeffizienz für die Diagnostik der Frakturlokalisierung im Röntgen. Wenn eine Fraktur schon im Röntgen diagnostiziert wird, ist die Röntgendiagnostik somit auch zur Diagnostik der

Frakturlokalisierung geeignet. Zur besseren Vergleichbarkeit und aufgrund der relativ geringen Fallzahlen wurden in dieser Studie jeweils die Frakturlokalisationen zusammengefasst, die eine stabile bzw. instabile Fraktur bedingen, da eine Änderung der Frakturlokalisierung innerhalb der jeweiligen Gruppe keine Auswirkungen auf das weitere Vorgehen hätte. Um eine bessere Aussage über die Genauigkeit der Diagnostik von Frakturlokalisationen im Röntgen treffen zu können, könnte man die Frakturlokalisationen in einer weiteren Studie getrennt voneinander betrachten.

Zudem wurde in dieser Studie die Diagnostik der Frakturklassifikation im Röntgen im Vergleich zur CT analysiert. In der Patientengruppe aus dem UKE lag bei 72 % eine Typ A Fraktur vor. Prognostisch relevant sind bei der Frakturlokalisierung vor allem die im Röntgen nicht diagnostizierten Typ B Frakturen. Die Sensitivität für die Röntgendiagnostik in Bezug auf die Frakturklassifikation war mäßig bei 69 % und die Spezifität bei 88 %. Der NPV lag bei 88 %. Anders als wenn man die Dislokation oder Lokalisation einer Fraktur einzeln betrachtet, zeigt der LR+ für die Diagnostik der Klassifikation nur eine gute Testeffizienz. Die diagnostische Genauigkeit des Röntgen bei der Frakturklassifikation ist somit geringer als bei der isolierten Betrachtung von Dislokation oder Lokalisation.

Neben der zuverlässigen Diagnose einer akuten Fraktur, sowie einer möglichen Dislokation und der Frakturlokalisierung müssen bei der Diagnostik von Skaphoidfrakturen unter realen Bedingungen eines Krankenhauses auch weitere Faktoren, wie eine möglichst geringe Strahlendosis und eine möglichst kosteneffiziente Auswahl der Diagnoseverfahren berücksichtigt werden. In den letzten Jahren ist die mittlere effektive pro-Kopf-Strahlendosis in Deutschland vor allem durch den vermehrten Einsatz von CT-Diagnostik angestiegen (Bundesamt für Strahlenschutz, 2019b). Brenner et al. äußern in ihrer Studie die Befürchtung, dass die zunehmende Anzahl von CT-Diagnostik zukünftig gesundheitliche Probleme verursachen könnte. Um diesem Problem entgegenzuwirken, schlagen Brenner et al. drei Maßnahmen vor. Die erste Maßnahme ist die Reduzierung der verursachten Strahlendosis durch CT-Diagnostik, die zweite Maßnahme ist das Ersetzen einer CT-Diagnostik durch eine andere weniger Strahlen verursachende Bildgebung und die dritte Maßnahme ist die Anzahl durchgeführter CT-Diagnostik zu reduzieren. Brenner et al. äußern jedoch auch, dass bei medizinisch notwendiger CT die dadurch gewonnene Information höher wiegt als das durch die Strahlenwirkung verursachte Risiko (Brenner and Hall, 2007). Mechanismen zur Reduktion der Strahlenbelastung werden bereits vielfach eingesetzt. In mehreren Studien konnte gezeigt werden, dass durch die Verwendung von automatischen Modulationssystemen bei weiterhin guter Bildqualität eine deutliche Dosisreduktion erreicht werden kann (Dougeni et al., 2012, Kubo et al., 2014, Moser et al., 2017, Seki et al., 2016). Mittels iterativer Rekonstruktion kann durch Herausrechnen des vermehrten Rauschens neben einer deutliche Dosisreduktion auch eine zusätzliche

Reduktion von Bildartefakten erreicht werden (Gervaise et al., 2013, Gervaise et al., 2012, Hünerbein, 2017, Kalmar et al., 2014). Gervaise et. al geben jedoch auch zu bedenken, dass eine weitere Reduktion der Strahlendosis nicht zu Lasten einer schlechteren Bildqualität gehen sollte, da bei zu schlechter Bildqualität der diagnostische Nutzen einer CT nicht mehr erfüllt wäre (Gervaise et al., 2013). Im UKE wird die iterative Rekonstruktion seit September 2012 bei allen CT-Untersuchungen eingesetzt. Mit neueren technischen Möglichkeiten könnte die verursachte Strahlendosis durch CT zukünftig weiter reduziert werden, sodass die CT gegebenenfalls die Röntgendiagnostik weitestgehend verdrängen könnte. Bei der Risikoabwägung bezüglich der verursachten Strahlendosis durch die eingesetzte Diagnostik sollte auch das Patientenalter mit einbezogen werden. Bei älteren Menschen ist die Auswirkung bei gleicher Strahlendosis geringer als bei jüngeren Menschen. Eine strahlenbedingte Krebserkrankung entsteht in der Regel erst nach einer jahre- oder sogar jahrzehntelangen Latenzzeit (Bundesamt für Strahlenschutz, 2019a).

Nimmt man die in der Studie von Koivisto et al. angegebene effektive Strahlendosis als Grundlage, liegt die während der Studie verursachte effektive Strahlendosis in der Patientengruppe des UKIM insgesamt bei 0,2959 mSv. Davon wurden 0,1978 mSv durch die CT-Diagnostik bei 21 % der Personen verursacht. Im Vergleich dazu wurde im Patientenkollektiv des UKE eine effektive Strahlendosis von 0,9785 mSv verursacht (Koivisto et al., 2018). Würde man die von Biswas et al. angegebene effektive Strahlendosis für CT-Diagnostik des Handgelenks bei älteren CT-Geräten als Grundlage nehmen, ist die durch die CT-Aufnahmen verursachte Strahlendosis deutlich höher. Am UKIM läge die insgesamt verursachte effektive Strahlendosis bei 0,7881 mSv und am UKE bei 3,1827 mSv (Biswas et al., 2009). In der Diagnostik von Skaphoidfrakturen wird der größte Anteil der effektiven Strahlendosis durch CT-Aufnahmen verursacht. Die größte Reduktion der Strahlenbelastung kann somit durch einen restriktiveren Einsatz von CT-Diagnostik erreicht werden.

Als weiterer Aspekt sollten bei der Entscheidung über die eingesetzte Diagnostik auch die verursachten Kosten betrachtet werden. Im Vergleich zur Röntgendiagnostik in drei Ebenen liegen die verursachten Kosten durch eine CT-Diagnostik mehr als sechsmal so hoch. Werden bei Personen sowohl Röntgen als auch CT eingesetzt, liegen die verursachten Kosten pro Person in Deutschland bei etwa 320 € für die Primärdiagnostik (Bundesministerium für Gesundheit, 2019). Weitere Kosten entstehen bei Vorliegen einer akuten Skaphoidfraktur für die Bildgebung zur Heilungskontrolle im Verlauf. Die größte Kosteneinsparung könnte durch den restriktiveren Einsatz von CT-Diagnostik erreicht werden. Hätte man bei allen Personen in der Patientengruppe des UKE, bei denen im Röntgen eine stabile Fraktur diagnostiziert wurde, keine ergänzende CT durchgeführt, läge die Kostenersparnis bei 9423,24 € in diesem Patientenkollektiv. Eine weitere Möglichkeit

zur Kostenreduktion, ohne auf eine Schnittbildgebung zu verzichten, wäre es direkt eine CT durchzuführen und auf die initiale Röntgendiagnostik zu verzichten. Hätte man bei allen Patienten und Patientinnen aus dem UKE in dieser Studie direkt eine CT ohne vorherige Röntgendiagnostik durchgeführt worden, läge die Kostenersparnis in diesem Patientenkollektiv bei 4503,16 €.

Insgesamt würde der Verzicht auf eine routinemäßige, ergänzende CT für einen Großteil der Patienten und Patientinnen eine Reduzierung der Strahlenbelastung sowie eine Einsparung von Kosten bedeuten. Werden bei einer Person sowohl Röntgen als auch CT durchgeführt, ist die Person einer Strahlendosis von 0,0095 mSv ausgesetzt (Koivisto et al., 2018). Die Kosten für die bildgebende Diagnostik lägen bei etwa 320 € (Bundesministerium für Gesundheit, 2019). Für einen Patienten oder Patientin mit einer im konventionellen Röntgen diagnostizierten stabilen Skaphoidfraktur würde ein Verzicht auf eine ergänzende CT eine Reduktion der verursachten Strahlendosis um 0,0086 mSv sowie der Kosten um 276,88 € bedeuten. Würde man im Anschluss an die konservative Therapie eine Röntgenkontrolle durchführen wäre die Strahlendosis mit 0,0018 mSv im Vergleich zu einer initialen Röntgen- und CT-Diagnostik immer noch deutlich geringer. Die Kosten für eine zweimalige Röntgendiagnostik sind mit 87,44 € ebenfalls deutlich geringer als bei einer ergänzenden CT.

Eine weitere Bedeutung kommt der Röntgendiagnostik als Initialbildgebung zu. Die Anforderungen an eine initiale Bildgebung sind neben der kosteneffizienten und allgemeinen Verfügbarkeit eine möglichst hohe Sensitivität und Spezifität, zudem sollten durch die Diagnostik möglichst keine Folgeschäden verursacht werden. Bei diesen Anforderungen gibt es keine ideale Erstdiagnostik ohne falsch-positive und falsch-negative Ergebnisse. Die Vor- und Nachteile des jeweiligen Tests sollten kritisch gegeneinander abgewogen werden (Maxim et al., 2014). Aktuell gibt es wohl keine bessere Initialbildgebung für die Detektion akuter Skaphoidfrakturen und anderer knöcherner Verletzungen des Handgelenkes als die Röntgendiagnostik. Aufgrund der höheren Strahlenbelastung und der hohen Kosten ist die CT als allgemeine Erstdiagnostik bei Verdacht auf eine Skaphoidfraktur nicht geeignet.

Aus dieser Studie lässt sich schließen, dass durch den restriktiveren, aber fokussierteren Einsatz von CT-Aufnahmen bei der Diagnostik akuter Skaphoidfrakturen eine genauso sichere, aber strahlenärmere und kosteneffizientere Frakturdiagnostik erreicht werden könnte. Dies könnte vor allem dadurch erreicht werden, indem eine ergänzende CT nur bei im Röntgen diagnostizierten instabilen Frakturen zur Planung der operativen Versorgung, sowie bei klinischem Frakturverdacht und fehlendem Nachweis in der konventionellen Röntgendiagnostik durchgeführt wird. Der Vergleich mit der Patientengruppe aus Skopje zeigt, dass es auch bei restriktiverem Einsatz einer ergänzenden CT-Diagnostik zu keinem

signifikanten Unterschied in der insgesamt geringen Komplikationsrate kommt. Durch Röntgen-Verlaufskontrollen nach konservativer Therapie könnten zudem die wenigen Fälle, bei denen eine Knochenheilung nicht stattgefunden hat, detektiert und einer weiteren Behandlung zugeführt werden. Bei geringer Symptomatik und unpassendem Verletzungsmechanismus sollte nach negativem Röntgen aufgrund des fehlenden klinischen Verdachts in der Regel keine ergänzende CT-Diagnostik durchgeführt werden.

Die Limitationen dieser Studie sind vor allem durch den retrospektiven Charakter der Studie sowie die Einschlusskriterien bedingt. In der Patientengruppe aus dem UKE wurden nur Personen eingeschlossen, bei denen sowohl eine Röntgen- als auch eine CT-Diagnostik vorlag, sodass keine Aussage über die tatsächliche Häufigkeit einer ergänzenden CT-Diagnostik getroffen werden kann. Aufgrund der fehlenden weiterführenden Diagnostik nach negativer Röntgendiagnostik mittels CT oder MRT in der Patientengruppe aus dem UKIM bleibt unklar ob und wenn bei wie vielen Personen eine akute Skaphoidfraktur nicht diagnostiziert wurde. Das Auftreten einer möglichen Osteoarthrose kann aufgrund des limitierten Nachverfolgungszeitraumes in dieser Studie nicht beurteilt werden. Zudem ist in dieser Studie die MRT-Diagnostik, welche in der Diagnostik akuter Skaphoidfrakturen zunehmend an Bedeutung gewinnt, nicht betrachtet worden.

Um eine fundiertere Aussage über das beste Vorgehen treffen zu können, müsste man eine prospektive Studie durchführen, in die alle Patienten und Patientinnen mit Verdacht auf eine Skaphoidfraktur eingeschlossen werden sollten.

5 Zusammenfassung

Das Skaphoid ist der am häufigsten frakturierte Handwurzelknochen. Als Basisdiagnostik dient neben der körperlichen Untersuchung das konventionelle Röntgen in drei Ebenen (posterior-anterior, seitlich und Stecher-Position). Bei klinischem Verdacht und fehlendem Frakturachweis in der Röntgendiagnostik, sowie zum weiteren Fraktur staging und zur Therapieplanung bei instabilen Frakturen eine CT-Diagnostik indiziert. Bei akuten Skaphoidfrakturen unterscheidet man stabile Typ A Frakturen, die ein hohes Heilungspotenzial bei konservativer Therapie aufweisen, von instabilen Typ B Frakturen, welche primär operativ versorgt werden sollten. Zu einer verzögerten Frakturheilung oder Pseudarthrose kommt es abhängig vom Frakturtyp in 4 – 11 % der Fälle.

Das Ziel dieser retrospektiven Studie war es den diagnostischen Mehrwert einer ergänzenden CT nach initialer konventioneller Röntgendiagnostik sowie die diagnostische Genauigkeit der Projektionsradiographie im Vergleich zur CT in der Diagnostik akuter Skaphoidfrakturen zu evaluieren.

Hierzu wurden die Daten von insgesamt 212 erwachsenen Patienten und Patientinnen aus zwei europäischen Universitätskliniken, dem UKIM in Skopje und dem UKE in Hamburg, retrospektiv ausgewertet.

Bei signifikant mehr durchgeführter ergänzender CT-Diagnostik (Chiquadrat-Test: $X = 136.733 > X_{krit} = 3.84$, $p < .001$, $\phi = .803$) sowie operativer Versorgung (Chiquadrat-Test: $X = 22.942 > X_{krit} = 3.84$, $p < .001$, $\phi = .329$) am UKE zeigte sich kein signifikanter Unterschied bei der Anzahl aufgetretener Komplikationen zwischen den beiden Patientengruppen (exakter Test nach Fisher: $p \approx .489$, $\phi = .055$). Die Beurteilung der diagnostischen Genauigkeit der Projektionsradiographie im Vergleich zur CT zeigte eine Sensitivität von 67 % und eine Spezifität von 95 % für das Erkennen einer Dislokation, eine Sensitivität von 50 % und eine Spezifität von 95 % bei der Diagnose der Frakturlokalisierung sowie eine Sensitivität von 69 % und eine Spezifität von 88 % in der Diagnostik der Frakturklassifikation.

Aus dieser Studie lässt sich schlussfolgern, dass durch den restriktiveren, aber fokussierteren Einsatz ergänzender CT-Aufnahmen bei der Diagnostik akuter Skaphoidfrakturen eine ebenso sichere, jedoch strahlenärmere und kosteneffizientere Frakturdiagnostik erreicht werden könnte. Der Vergleich mit der Patientengruppe aus Skopje zeigt, dass es auch bei restriktiverem Einsatz einer CT-Diagnostik zu keinem signifikanten Unterschied in der Komplikationsrate kommt. Durch Röntgenverlaufskontrollen nach konservativer Therapie könnte eine nicht erfolgte Frakturheilung detektiert und der Patient einer weiteren Therapie zugeführt werden.

6 Summary

The scaphoid is the most common carpal bone fracture. Among the clinical examination the conventional radiography in three projections is the most important basis diagnosis. If the initial radiography is negative an additional computed tomography is recommended for further diagnosis as well as for the evaluation of the fracture morphology and displacement. The computed tomography is also used for planning an operative treatment. The most common classification system for acute scaphoid fractures is the Herbert classification, which is based on the expected instability of the fracture. Type A fractures are classified as stable with a great potential to heal with conservative treatment. While type B fractures are classified as unstable and should be treated surgical. A delayed union or non-union is seen in 4 – 11% of all acute scaphoid fractures and depends on the type of fracture.

The aim of this study was to evaluate the added value of an added computed tomography after an initial conventional radiography for the diagnosis of an acute scaphoid fracture. On top of that the accuracy of a conventional radiography was evaluated in comparison with the computed tomography.

Therefore, the data of 212 patients from to European university clinics, the UKIM in Skopje and the UKE in Hamburg, were analysed retrospectively.

Our results show that there were significant more computed tomography (chiquadrat-test: $X = 136.733 > X_{krit} = 3.84$, $p < .001$, $\phi = .803$) and significant more surgical treatments (chiquadrat-test: $X = 22.942 > X_{krit} = 3.84$, $p < .001$, $\phi = .329$) in the group from the UKE, but there wasn't a significant difference in the appeared complications (exact test after Fisher: $p \approx .489$, $\phi = .055$) between the two groups. The conventional radiography showed a sensitivity of 67 % and a specificity of 95 % in the detection of a dislocation, a sensitivity of 50 % and a specificity of 95 % in the diagnosis of the fracture location and a sensitivity of 69 % and a specificity of 88 % in the diagnosis of the fracture classification.

In summary, we suggest that due to a more restrictive but more focused use of added computed tomography in the diagnosis of acute scaphoid fractures it is possible to reach a as well secure and more cost-efficient diagnosis of an acute scaphoid fracture with less radiation exposure. The comparison with the group from Skopje showed that there won't be a significant difference in the complication rate when the computed tomography is more restrictively used. With a second conventional radiography after conservative treatment a delayed union or non-union could be seen and treated further on.

7 Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
CT	Computertomographie
CTDI	Computed Tomography Dose Index
DFP	Dosisflächenprodukt
DLP	Dosislängenprodukt
EBM	einheitlicher Bewertungsmaßstab
FoV	Field of Fiew
Gy	Grey
HE	Hounsfield-Einheiten
J	Joule
kg	Kilogramm
keV	Kiloelektronenvolt
kv	Kilovolt
Lig.	Ligamentum
LR+	positive Likelihood Ratio
LR-	negative Likelihood Ratio
M.	Musculus
m ²	Quadratmeter
mA	Milliampere
mAs	Milliamperesekunde
MDCT	Multidetektor- oder Mehrzeilen-CT
MeV	Megaelektronenvolt
mGy	Milligray
min	Minute
Mm	Millimeter
MRT oder MR	Magnetresonanztomographie
mSv	Millisievert
NPV	negativ prädiktiver Wert
PPV	positiv prädiktiver Wert
Proc.	Processus
s	Sekunden
SD	Standardabweichung
SNAC	scaphoid nonunion advanced collapse
Sv	Sievert
UKE	Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
UKIM	Universitätsklinikum der Universität St. Kyrill und Method in Skopje
°	Grad

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

8.1 Abbildungen

Abb. 1 Anatomische Darstellung des Os scaphoideum von palmar	6
Abb. 2 Anatomische Darstellung des Os scaphoideum von dorsal.....	6
Abb. 3 Blutversorgung des Os scaphoideum von dorsal	7
Abb. 4 Frakturlokalisierung abhängig von Handgelenkstellung bei Sturz	8
Abb. 5 Humpback-Deformität bei Skaphoidfraktur	9
Abb. 6 Schema zur CT-basierten Klassifikation der frischen Skaphoidfrakturen, modifiziert nach Krimmer/Herbert	10
Abb. 7 Klinische Untersuchung bei Verdacht auf Skaphoidfraktur: Palpation des Skaphoids über der Tabatière (anatomical snuffbox = ASB), des Tuberculum (scaphoid tubercle = ST) und Kompressionstest (longitudinal compression = LC).....	12
Abb. 8 Mittlere effektive Dosis (in mSv) pro Einwohner pro Jahr durch radiologische Diagnostik in Deutschland	21
Abb. 9 Beiträge zur Gesamthäufigkeit und zur kollektiven effektiven Dosis für verschiedene Untersuchungen in der Röntgendiagnostik 2015 in Deutschland	22
Abb. 10 Herbert-Schraube, Gewindesteigung P1 > P2.....	24
Abb. 11 Zielgerät zur Schraubenosteosynthese mittels Herbert-Schraube	25
Abb. 12 Kontrolle der regelrechten Schraubenlage mittels intraoperativer Durchleuchtung in drei Ebenen	27
Abb. 13 Intraoperative Aufnahme der offenen Reposition von dorsal während temporärer Kirschner-Draht Osteosynthese	28
Abb. 14 Röntgenaufnahme des linken Handgelenks eines 58-jährigen Patienten mit einer Typ A-Skaphoidfraktur, UKE	32
Abb. 15 Röntgenaufnahme des rechten Handgelenks eines 42-jährigen Patienten mit einer Typ B-Skaphoidfraktur, UKE	32
Abb. 16 CT-Aufnahme des linken Handgelenks eines 58-jährigen Patienten mit einer Typ A-Skaphoidfraktur, UKE	33
Abb. 17 CT-Aufnahme des rechten Handgelenks eines 42-jährigen Patienten mit einer Typ B-Skaphoidfraktur, UKE	33
Abb. 18 Relative Altersverteilung zum Zeitpunkt der Untersuchung im Patientenkollektiv des UKE	35

Abb. 19 Relative Altersverteilung zum Zeitpunkt der Untersuchung im Patientenkollektiv des UKIM	35
Abb. 20 Relative Verteilung der Klassifikation im Vergleich	36
Abb. 21 Relative Verteilung der Frakturlokalisation im Patientenkollektiv des UKE	36
Abb. 22 Relative Verteilung der Röntgenbefunde im Patientenkollektiv des UKE	37
Abb. 23 Relative Verteilung des Therapieverfahrens im Patientenkollektiv des UKE	40
Abb. 24 Relative Verteilung des Therapieverfahrens im Patientenkollektiv des UKIM	40

8.2 Tabellen

Tab. 1 Klassifikation von Skaphoidfrakturen nach Herbert	10
Tab. 2 Empfohlene Gewebewichtungsfaktoren nach ICRP 103	20
Tab. 3 Testeffizienz eines diagnostischen Tests	34
Tab. 4 Vierfeldertafel Dislokation, UKE	38
Tab. 5 Vierfeldertafel Lokalisation und Art, UKE	38
Tab. 6 Vierfeldertafel Klassifikation, UKE	39

9 Literaturverzeichnis

- ADOLFSSON, L., LINDAU, T. & ARNER, M. 2001. Acutrak screw fixation versus cast immobilisation for undisplaced scaphoid waist fractures. *J Hand Surg Br*, 26, 192-5.
- ALHO, A. & KANKAANPAA 1975. Management of fractured scaphoid bone. A prospective study of 100 fractures. *Acta Orthop Scand*, 46, 737-43.
- AMADIO, P. C., BERQUIST, T. H., SMITH, D. K., ILSTRUP, D. M., COONEY, W. P., 3RD & LINSCHIED, R. L. 1989. Scaphoid malunion. *The Journal of hand surgery*, 14, 679-687.
- AMIRFEYZ, R., BEBBINGTON, A., DOWNING, N. D., ONI, J. A. & DAVIS, T. R. 2011. Displaced scaphoid waist fractures: the use of a week 4 CT scan to predict the likelihood of union with nonoperative treatment. *J Hand Surg Eur Vol*, 36, 498-502.
- AMRAMI, K. K., FRICK, M. A. & MATSUMOTO, J. M. 2019. Imaging for Acute and Chronic Scaphoid Fractures. *Hand Clin*, 35, 241-257.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT DER WISSENSCHAFTLICHEN MEDIZINISCHEN FACHGESELLSCHAFTEN (AWMF)- & LEITLINIEN., S. K. 2015. *Leitlinie Skaphoidfraktur* [Online]. Available: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/012-016l_S3_Skaphoidfraktur_2015-10.pdf [Accessed 07.10.2019].
- ARSALAN-WERNER, A., SAUERBIER, M. & MEHLING, I. M. 2016. Current concepts for the treatment of acute scaphoid fractures. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 42, 3-10.
- ASMUS, A., LAUTENBACH, M., SCHACHER, B., KIM, S. & EISENSCHENK, A. 2016. Skaphoidpseudarthrose. *Der Orthopäde*, 45, 951-965.
- BÄCKER, H. C., WU, C. H. & STRAUCH, R. J. 2020. Systematic review of diagnosis of clinically suspected scaphoid fractures. *Journal of wrist surgery*, 9, 081-089.
- BAIN, G. I., BENNETT, J. D., RICHARDS, R. S., SLETHAUG, G. P. & ROTH, J. H. 1995. Longitudinal computed tomography of the scaphoid: a new technique. *Skeletal Radiol*, 24, 271-3.
- BEERES, F. J., RHEMREV, S. J., DEN HOLLANDER, P., KINGMA, L. M., MEYLAERTS, S. A., LE CESSIE, S., BARTLEMA, K. A., HAMMING, J. F. & HOGERVORST, M. 2008. Early magnetic resonance imaging compared with bone scintigraphy in suspected scaphoid fractures. *J Bone Joint Surg Br*, 90, 1205-9.
- BENDER, R. 2001. Interpretation von Effizienzmaßen der Vierfeldertafel für Diagnostik und Behandlung. *Medizinische Klinik*, 96, 116-121.
- BERGER, R. & GARCIA-ELIAS, M. 1991. General anatomy of the wrist. *Biomechanics of the wrist joint*. Springer.
- BERGER, R. A. 2001. The anatomy of the scaphoid. *Hand Clin*, 17, 525-32.
- BERGH, T. H., LINDAU, T., SOLDAL, L. A., BERNARDSHAW, S. V., BEHZADI, M., STEEN, K. & BRUDVIK, C. 2014. Clinical scaphoid score (CSS) to identify scaphoid fracture with MRI in patients with normal x-ray after a wrist trauma. *Emerg Med J*, 31, 659-64.
- BICKERT, B., KREMER, T. & KNESER, U. 2014. Operative Therapie der Skaphoidpseudarthrose. *Obere Extremität*, 9, 271-275.
- BISWAS, D., BIBLE, J. E., BOHAN, M., SIMPSON, A. K., WHANG, P. G. & GRAUER, J. N. 2009. Radiation exposure from musculoskeletal computerized tomographic scans. *J Bone Joint Surg Am*, 91, 1882-9.
- BÖHLER, L., TROJAN, E. & JAHNA, H. 1954. Behandlungsergebnisse von 734 frischen einfachen Brüchen des Kahnbeinkörpers der Hand. *Reconstr Surg Traumatol*, 2, 86-111.
- BÖHRINGER, G., SCHÄDEL-HÖPFNER, M., LEMKE, T. & GOTZEN, L. 2002. Die Bedeutung der Arthroskopie bei der Skaphoidfraktur. *Aktuelle Traumatologie*, 32, 218-222.

- BOND, C. D., SHIN, A. Y., MCBRIDE, M. T. & DAO, K. D. 2001. Percutaneous screw fixation or cast immobilization for nondisplaced scaphoid fractures. *J Bone Joint Surg Am*, 83, 483-8.
- BOTTE, M. J., MORTENSEN, W. W., GELBERMAN, R. H., RHOADES, C. E. & GELLMAN, H. 1988. Internal vascularity of the scaphoid in cadavers after insertion of the Herbert screw. *J Hand Surg Am*, 13, 216-20.
- BRAUER, R., DIERKING, M. & WERBER, K. 1997. Die Anwendung der Herbert-Schraube mit der Freehand-Methode zur Osteosynthese der frischen Skaphoidfraktur. *Der Unfallchirurg*, 100, 776-781.
- BRENNER, D. J. & HALL, E. J. 2007. Computed tomography--an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med*, 357, 2277-84.
- BRØNDUM, V., LARSEN, C. F. & SKOV, O. 1992. Fracture of the carpal scaphoid: frequency and distribution in a well-defined population. *European journal of radiology*, 15, 118-122.
- BUIJZE, G. A., GOSLINGS, J. C., RHEMREV, S. J., WEENING, A. A., VAN DIJKMAN, B., DOORNBERG, J. N. & RING, D. 2014. Cast immobilization with and without immobilization of the thumb for nondisplaced and minimally displaced scaphoid waist fractures: a multicenter, randomized, controlled trial. *J Hand Surg Am*, 39, 621-7.
- BUIJZE, G. A., WIJFFELS, M. M., GUITTON, T. G., GREWAL, R., VAN DIJK, C. N. & RING, D. 2012. Interobserver reliability of computed tomography to diagnose scaphoid waist fracture union. *J Hand Surg Am*, 37, 250-4.
- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ. 2019a. *Nutzen und Risiko der Röntgendiagnostik* [Online]. Available: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/diagnostik/roentgen/nutzen-risiko.html> [Accessed 06.02.2021].
- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ. 2019b. *Röntgendiagnostik: Häufigkeit und Strahlenexposition* [Online]. Available: <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/diagnostik/roentgen/haeufigkeit-exposition.html> [Accessed 21.10.1029].
- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ. 2019c. *Wie hoch ist die natürliche Strahlenbelastung in Deutschland?* [Online]. Available: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/natuerliche-strahlenbelastung/natuerliche-strahlenbelastung.html> [Accessed 31.05.2020].
- BUNDESAMT FÜR STRAHLENSCHUTZ (BFS) & BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ BAU UND REAKTORSICHERHEIT (BMUB). 2017. *Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2015 : Unterrichtung durch die Bundesregierung* [Online]. Available: http://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2017072814312/1/Parlamentsbericht_2015.pdf [Accessed].
- BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT. 2019. *Gebührenordnung für Ärzte* [Online]. Available: http://www.gesetze-im-internet.de/go_1982/ [Accessed 16.08.2020].
- CERI, N., KORMAN, E., GUNAL, I. & TETIK, S. 2004. The morphological and morphometric features of the scaphoid. *J Hand Surg Br*, 29, 393-8.
- CHEN, S. C. 1989. The scaphoid compression test. *J Hand Surg Br*, 14, 323-5.
- CLAY, N. R., DIAS, J. J., COSTIGAN, P. S., GREGG, P. J. & BARTON, N. J. 1991. Need the thumb be immobilised in scaphoid fractures? A randomised prospective trial. *J Bone Joint Surg Br*, 73, 828-32.
- CLEMENTSON, M., BJÖRKMAN, A. & THOMSEN, N. O. 2020. Acute scaphoid fractures: guidelines for diagnosis and treatment. *EFORT open reviews*, 5, 96-103.
- CLEMENTSON, M., JORGSHOLM, P., BESJAKOV, J., THOMSEN, N. & BJÖRKMAN, A. 2015. Conservative Treatment Versus Arthroscopic-Assisted Screw Fixation of Scaphoid Waist Fractures--A Randomized Trial With Minimum 4-Year Follow-Up. *J Hand Surg Am*, 40, 1341-8.
- COBLENZ, G., CHRISTOPOULOS, G., FRÖHNER, S., KALB, K. H. & SCHMITT, R. 2006. Skaphoidfraktur und -pseudarthrose. *Der Radiologe*, 46, 664-676.

- COONEY, W. P., 3RD, DOBYNS, J. H. & LINSCHIED, R. L. 1980a. Nonunion of the scaphoid: analysis of the results from bone grafting. *The Journal of hand surgery*, 5, 343-354.
- COONEY, W. P., DOBYNS, J. H. & LINSCHIED, R. L. 1980b. Fractures of the scaphoid: a rational approach to management. *Clin Orthop Relat Res*, 90-7.
- COULTER, A. & ELLINS, J. 2007. Effectiveness of strategies for informing, educating, and involving patients. *Bmj*, 335, 24-7.
- CROWE, C. S., MASSENBURG, B. B., MORRISON, S. D., CHANG, J., FRIEDRICH, J. B., ABADY, G. G., ALAHDAB, F., ALIPOUR, V., ARABLOO, J. & ASAAD, M. 2020. Global trends of hand and wrist trauma: a systematic analysis of fracture and digit amputation using the Global Burden of Disease 2017 Study. *Injury prevention*, 26, i115-i124.
- DIAS, J. J. & ATHANATOS, L. 2018. 25 Acute Scaphoid Fractures. In: BOECKSTYNS, M. E. H. & RICHTER, M. (eds.) *Fractures of the Hand and Carpus*. 2018 ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- DIAS, J. J., DHUKARAM, V., ABHINAV, A., BHOWAL, B. & WILDIN, C. J. 2008. Clinical and radiological outcome of cast immobilisation versus surgical treatment of acute scaphoid fractures at a mean follow-up of 93 months. *J Bone Joint Surg Br*, 90, 899-905.
- DIAS, J. J., WILDIN, C. J., BHOWAL, B. & THOMPSON, J. R. 2005. Should acute scaphoid fractures be fixed? A randomized controlled trial. *J Bone Joint Surg Am*, 87, 2160-8.
- DOORNBURG, J. N., BUIJZE, G. A., HAM, S. J., RING, D., BHANDARI, M. & POOLMAN, R. W. 2011. Nonoperative treatment for acute scaphoid fractures: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Trauma*, 71, 1073-81.
- DOUGENI, E., FAULKNER, K. & PANAYIOTAKIS, G. 2012. A review of patient dose and optimisation methods in adult and paediatric CT scanning. *Eur J Radiol*, 81, e665-83.
- DUCKWORTH, A. D., JENKINS, P. J., AITKEN, S. A., CLEMENT, N. D., COURT-BROWN, C. M. & MCQUEEN, M. M. 2012. Scaphoid fracture epidemiology. *J Trauma Acute Care Surg*, 72, E41-5.
- DUNN, A. W. 1972. Fractures and dislocations of the carpus. *Surg Clin North Am*, 52, 1513-38.
- ELLIS, P. D. 2010. *The essential guide to effect sizes: Statistical power, meta-analysis, and the interpretation of research results*, Cambridge University Press.
- FOWLER, J. R. & ILYAS, A. M. 2010. Headless compression screw fixation of scaphoid fractures. *Hand Clin*, 26, 351-61, vi.
- FREELAND, P. 1989. Scaphoid tubercle tenderness: a better indicator of scaphoid fractures? *Arch Emerg Med*, 6, 46-50.
- GARALA, K., TAUB, N. A. & DIAS, J. J. 2016. The epidemiology of fractures of the scaphoid: impact of age, gender, deprivation and seasonality. *Bone Joint J*, 98-b, 654-9.
- GARCIA-ELIAS, M., AN, K. N., COONEY, W. P., 3RD, LINSCHIED, R. L. & CHAO, E. Y. 1989a. Stability of the transverse carpal arch: an experimental study. *J Hand Surg Am*, 14, 277-82.
- GARCIA-ELIAS, M., COONEY, W. P., AN, K. N., LINSCHIED, R. L. & CHAO, E. Y. 1989b. Wrist kinematics after limited intercarpal arthrodesis. *J Hand Surg Am*, 14, 791-9.
- GELBERMAN, R. H. & MENON, J. 1980. The vascularity of the scaphoid bone. *J Hand Surg Am*, 5, 508-13.
- GELLMAN, H., CAPUTO, R. J., CARTER, V., ABOULAFIA, A. & MCKAY, M. 1989. Comparison of short and long thumb-spica casts for non-displaced fractures of the carpal scaphoid. *J Bone Joint Surg Am*, 71, 354-7.
- GEOGHEGAN, J. M., WOODRUFF, M. J., BHATIA, R., DAWSON, J. S., KERSLAKE, R. W., DOWNING, N. D., ONI, J. A. & DAVIS, T. R. 2009. Undisplaced scaphoid waist fractures: is 4 weeks' immobilisation in a below-elbow cast sufficient if a week 4 CT scan suggests fracture union? *J Hand Surg Eur Vol*, 34, 631-7.

- GERVAISE, A., OSEMONT, B., LECOCQ, S., NOEL, A., MICARD, E., FELBLINGER, J. & BLUM, A. 2012. CT image quality improvement using adaptive iterative dose reduction with wide-volume acquisition on 320-detector CT. *European radiology*, 22, 295-301.
- GERVAISE, A., TEIXEIRA, P., VILLANI, N., LECOCQ, S., LOUIS, M. & BLUM, A. 2013. CT dose optimisation and reduction in osteoarticular disease. *Diagn Interv Imaging*, 94, 371-88.
- GILLEY, E., PURI, S. K., HEARNS, K. A., WEILAND, A. J. & CARLSON, M. G. 2018. Importance of Computed Tomography in Determining Displacement in Scaphoid Fractures. *J Wrist Surg*, 7, 38-42.
- GREWAL, R. & KING, G. J. 2009. An evidence-based approach to the management of acute scaphoid fractures. *J Hand Surg Am*, 34, 732-4.
- HAMBIDGE, J. E., DESAI, V. V., SCHRANZ, P. J., COMPSON, J. P., DAVIS, T. R. & BARTON, N. J. 1999. Acute fractures of the scaphoid. Treatment by cast immobilisation with the wrist in flexion or extension? *J Bone Joint Surg Br*, 81, 91-2.
- HEINZELMANN, A. D., ARCHER, G. & BINDRA, R. R. 2007. Anthropometry of the human scaphoid. *J Hand Surg Am*, 32, 1005-8.
- HERBERT, T. J. 1986. Use of the Herbert bone screw in surgery of the wrist. *Clin Orthop Relat Res*, 79-92.
- HERBERT, T. J. & FISHER, W. E. 1984. Management of the fractured scaphoid using a new bone screw. *J Bone Joint Surg Br*, 66, 114-23.
- HEY, H. W. D., CHONG, A. K. S. & MURPHY, D. 2011. Prevalence of Carpal Fracture in Singapore. *The Journal of hand surgery*, 36, 278-283.
- HILGERS, R.-D., BAUER, P. & SCHEIBER, V. 2007. *Einführung in die medizinische Statistik*, Springer-Verlag.
- HOLLOWAY, K. L., MOLONEY, D. J., BRENNAN-OLSEN, S. L., KOTOWICZ, M. A., BUCKI-SMITH, G., MORSE, A. G., TIMNEY, E. N., DOBBINS, A. G., HYDE, N. K. & PASCO, J. A. 2015. Carpal and scaphoid fracture incidence in south-eastern Australia: an epidemiologic study. *Archives of osteoporosis*, 10, 1-6.
- HOVE, L. M. 1993. Fractures of the hand. Distribution and relative incidence. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg*, 27, 317-9.
- HOVE, L. M. 1999. Epidemiology of scaphoid fractures in Bergen, Norway. *Scand J Plast Reconstr Surg Hand Surg*, 33, 423-6.
- HÜNERBEIN, R. 2017. Radiologische Verfahren. In: REISER, M., KUHN, F.-P. & DEBUS, J. (eds.) *Duale Reihe Radiologie*. 4., vollständig überarbeitete Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- IBRAHIM, T., QURESHI, A., SUTTON, A. J. & DIAS, J. J. 2011. Surgical versus nonsurgical treatment of acute minimally displaced and undisplaced scaphoid waist fractures: pairwise and network meta-analyses of randomized controlled trials. *J Hand Surg Am*, 36, 1759-1768.e1.
- JÄKEL, O. & KARGER, C. 2017. Physikalische Grundlagen. In: REISER, M., KUHN, F.-P. & DEBUS, J. (eds.) *Duale Reihe Radiologie*. 4., vollständig überarbeitete Auflage ed.: Georg Thieme Verlag.
- JØRGSHOLM, P., OSSOWSKI, D., THOMSEN, N. & BJÖRKMAN, A. 2020. Epidemiology of scaphoid fractures and non-unions: A systematic review. *Handchirurgie-Mikrochirurgie- Plastische Chirurgie*, 52, 374-381.
- JØRGSHOLM, P., THOMSEN, N. O., BESJAKOV, J., ABRAHAMSSON, S. O. & BJÖRKMAN, A. 2013. The benefit of magnetic resonance imaging for patients with posttraumatic radial wrist tenderness. *J Hand Surg Am*, 38, 29-33.
- KALMAR, P. I., QUEHENBERGER, F., STEINER, J., LUTFI, A., BOHLSSEN, D., TALAKIC, E., HASSLER, E. M. & SCHÖLLNAST, H. 2014. The impact of iterative reconstruction on image quality and radiation dose in thoracic and abdominal CT. *European journal of radiology*, 83, 1416-1420.
- KARLE, B., MAYER, B., KITZINGER, H., FRÖHNER, S., SCHMITT, R. & KRIMMER, H. 2005. Kahnbeinfrakturen-wann operativ, wann konservativ? CT-basierte Klassifikation. *Handchirurgie- Mikrochirurgie- Plastische Chirurgie*, 37, 260-266.

- KOIVISTO, J., VAN EIJNATTEN, M., KILJUNEN, T., SHI, X. Q. & WOLFF, J. 2018. Effective Radiation Dose in the Wrist Resulting from a Radiographic Device, Two CBCT Devices and One MSCT Device: A Comparative Study. *Radiat Prot Dosimetry*, 179, 58-68.
- KRAKAUER, J. D., BISHOP, A. T. & COONEY, W. P. 1994. Surgical treatment of scapholunate advanced collapse. *The Journal of hand surgery*, 19, 751-759.
- KRAUSE, W., VON BARDELEBEN, K. H. & DISSE, J. 1909. *Skelet der oberen und unteren Extremität*, Fischer.
- KRIEGER, H. 2013. *Strahlungsmessung und Dosimetrie*, Springer.
- KRIEGER, H. 2017. *Grundlagen der Strahlungsphysik und des Strahlenschutzes*, Springer-Verlag.
- KRIMMER, H. & LANZ, U. 2000. Der posttraumatische karpale Kollaps. *Der Unfallchirurg*, 103, 260-266.
- KRIMMER, H., SCHMITT, R. & HERBERT, T. 2000. Kahnbeinfrakturen – Diagnostik, Klassifikation und Therapie. *Der Unfallchirurg*, 103, 812-819.
- KUBO, T., OHNO, Y., KAUCZOR, H. U. & HATABU, H. 2014. Radiation dose reduction in chest CT--review of available options. *Eur J Radiol*, 83, 1953-61.
- LANGER, M. F., OECKENPOHLER, S., BREITER, S., WAHNERT, D. & WIESKOTTER, B. 2016. [Anatomy and biomechanics of the scaphoid]. *Orthopade*, 45, 926-937.
- LANGER, M. F., UNGLAUB, F., BREITER, S., UEBERBERG, J., WIESKOTTER, B. & OECKENPOHLER, S. 2019. [Anatomy and pathobiomechanics of the scaphoid]. *Unfallchirurg*, 122, 170-181.
- LE MINOR, J. M. & RAPP, E. 2001. Relative weights of the human carpal bones: biological and functional interests. *Ann Anat*, 183, 537-43.
- LINDSTRÖM, G. & NYSTRÖM, A. 1990. Incidence of post-traumatic arthrosis after primary healing of scaphoid fractures: a clinical and radiological study. *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)*, 15, 11-13.
- LOZANO-CALDERON, S., BLAZAR, P., ZURAKOWSKI, D., LEE, S. G. & RING, D. 2006. Diagnosis of scaphoid fracture displacement with radiography and computed tomography. *J Bone Joint Surg Am*, 88, 2695-703.
- MAHMOUD, M. & KOPTAN, W. 2011. Percutaneous screw fixation without bone grafting for established scaphoid nonunion with substantial bone loss. *J Bone Joint Surg Br*, 93, 932-6.
- MARTINI, A. & SCHILTENWOLF, M. 1993. Mittelfristige Ergebnisse in der Behandlung von Kahnbeinpsuedarthrose und-fraktur mit der Herbertschraube. *Aktuelle Traumatologie*, 23, 317-323.
- MAXIM, L. D., NIEBO, R. & UTELL, M. J. 2014. Screening tests: a review with examples. *Inhalation toxicology*, 26, 811-828.
- MCQUEEN, M. M., GELBKE, M. K., WAKEFIELD, A., WILL, E. M. & GAEBLER, C. 2008. Percutaneous screw fixation versus conservative treatment for fractures of the waist of the scaphoid: a prospective randomised study. *J Bone Joint Surg Br*, 90, 66-71.
- MEHLING, I. & SAUERBIER, M. 2013. Skaphoidfrakturen und Skaphoidpsuedarthrosen. *Zeitschrift für Orthopädie und Unfallchirurgie*, 151, 639-660.
- MEMARSADEGHI, M., BREITENSEHER, M. J., SCHAEFER-PROKOP, C., WEBER, M., ALDRIAN, S., GABLER, C. & PROKOP, M. 2006. Occult scaphoid fractures: comparison of multidetector CT and MR imaging--initial experience. *Radiology*, 240, 169-76.
- MOSER, J. B., SHEARD, S. L., EDYVEAN, S. & VLAHOS, I. 2017. Radiation dose-reduction strategies in thoracic CT. *Clin Radiol*, 72, 407-420.
- PAPP, S. 2010. Carpal bone fractures. *Hand Clin*, 26, 119-27.
- PARVIZI, J., WAYMAN, J., KELLY, P. & MORAN, C. G. 1998. Combining the clinical signs improves diagnosis of scaphoid fractures. A prospective study with follow-up. *J Hand Surg Br*, 23, 324-7.
- PHILLIPS, T. G., REIBACH, A. M. & SLOMIANY, W. P. 2004. Diagnosis and management of scaphoid fractures. *Am Fam Physician*, 70, 879-84.

- REIGSTAD, O., THORKILDSEN, R., GRIMSGAARD, C., MELHUUS, K. & ROKKUM, M. 2015. Examination and treatment of scaphoid fractures and pseudarthrosis. *Tidsskr Nor Laegeforen*, 135, 1138-42.
- REITH, W. 2011. Computertomographie. In: VOGL, T. J., REITH, W. & RUMMENY, E. J. (eds.) *Diagnostische und Interventionelle Radiologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- RHEMREV, S. J., VAN LEERDAM, R. H., OOTES, D., BEERES, F. J. & MEYLAERTS, S. A. 2009. Non-operative treatment of non-displaced scaphoid fractures may be preferred. *Injury*, 40, 638-41.
- RING, D. & LOZANO-CALDERON, S. 2008. Imaging for suspected scaphoid fracture. *J Hand Surg Am*, 33, 954-7.
- RUSSE, O. 1960. Fracture of the carpal navicular. Diagnosis, non-operative treatment, and operative treatment. *J Bone Joint Surg Am*, 42-a, 759-68.
- SAEDEN, B., TORNKVIST, H., PONZER, S. & HOGLUND, M. 2001. Fracture of the carpal scaphoid. A prospective, randomised 12-year follow-up comparing operative and conservative treatment. *J Bone Joint Surg Br*, 83, 230-4.
- SAUERBIER, M., BICKERT, B., TRÄNKLE, M., KLUGE, S., PELZER, M. & GERMANN, G. 2000. Operative Behandlungsmöglichkeiten bei fortgeschrittenem karpalen Kollaps (SNAC/SLAC wrist). *Der Unfallchirurg*, 103, 564-571.
- SAUERBIER, M., SCHÄDEL-HÖPFNER, M. & MEHLING, I. M. 2013. Die Behandlung der frischen Skaphoidfraktur. *Handchir Scan*, 02, 313-333.
- SCHMITT, R. 2015. Computertomografie. In: SCHMITT, R. & LANZ, U. (eds.) *Bildgebende Diagnostik der Hand*. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- SCHMITT, R. 2016. Bandverletzungen an der Handwurzel. *Der Radiologe*, 56, 1087-1106.
- SCHMITT, R. & KRIMMER, H. 2015. Skaphoidfrakturen. In: SCHMITT, R. & LANZ, U. (eds.) *Bildgebende Diagnostik der Hand*. 3., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- SCHMITT, R. & LANZ, U. 2014. *Bildgebende Diagnostik der Hand*, Georg Thieme Verlag.
- SCHMITT, R. & ROSENTHAL, H. 2016. Bildgebende Diagnostik der Skaphoidfraktur nach der aktuellen S3-Leitlinie. *Handchirurgie Scan*, 5, 243-258.
- SEKI, S., KOYAMA, H., OHNO, Y., MATSUMOTO, S., INOKAWA, H., SUGIHARA, N. & SUGIMURA, K. 2016. Adaptive iterative dose reduction 3D (AIDR 3D) vs. filtered back projection: radiation dose reduction capabilities of wide volume and helical scanning techniques on area-detector CT in a chest phantom study. *Acta Radiol*, 57, 684-90.
- SENDHER, R. & LADD, A. L. 2013. The scaphoid. *Orthop Clin North Am*, 44, 107-20.
- SIM, E. & ZECHNER, W. 1991. Computertomographie nach operativer Versorgung von Kahnbeinfrakturen und-pseudarthrosen bei liegenden Implantaten. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 23, 67-73.
- SINGH, H. P., FORWARD, D., DAVIS, T. R., DAWSON, J. S., ONI, J. A. & DOWNING, N. D. 2005. Partial union of acute scaphoid fractures. *J Hand Surg Br*, 30, 440-5.
- SINGH, H. P., TAUB, N. & DIAS, J. J. 2012. Management of displaced fractures of the waist of the scaphoid: meta-analyses of comparative studies. *Injury*, 43, 933-9.
- SLADE, J. F., 3RD, GUTOW, A. P. & GEISSLER, W. B. 2002. Percutaneous internal fixation of scaphoid fractures via an arthroscopically assisted dorsal approach. *J Bone Joint Surg Am*, 84-A Suppl 2, 21-36.
- SOUBEYRAND, M., BIAU, D., MANSOUR, C., MAHJOUB, S., MOLINA, V. & GAGEY, O. 2009. Comparison of percutaneous dorsal versus volar fixation of scaphoid waist fractures using a computer model in cadavers. *J Hand Surg Am*, 34, 1838-44.
- STACEY, D., LÉGARÉ, F., LEWIS, K., BARRY, M. J., BENNETT, C. L., EDEN, K. B., HOLMES-ROVNER, M., LLEWELLYN-THOMAS, H., LYDDIATT, A. & THOMSON, R. 2017. Decision aids for people facing health treatment or screening decisions. *Cochrane database of systematic reviews*.
- STECHE, W. 1937. Roentgenography of the carpal navicular bone. *Am J Roentgenol*, 37, 704-705.

- STRAHLENSCHUTZKOMMISSION, I. 2007. Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007 ICRP-Veröffentlichung 103 Verabschiedet im März 2007. *Deutsche Ausgabe. März.*
- SWÄRD, E. M., SCHRIEVER, T. U., FRANKO, M. A., BJÖRKMAN, A. C. & WILCKE, M. K. 2019. The epidemiology of scaphoid fractures in Sweden: a nationwide registry study. *Journal of Hand Surgery (European Volume)*, 44, 697-701.
- TIEL-VAN BUUL, M. M., VAN BEEK, E. J., BORM, J. J., GUBLER, F. M., BROEKHUIZEN, A. H. & VAN ROYEN, E. A. 1993. The value of radiographs and bone scintigraphy in suspected scaphoid fracture. A statistical analysis. *J Hand Surg Br*, 18, 403-6.
- VAN TASSEL, D. C., OWENS, B. D. & WOLF, J. M. 2010. Incidence estimates and demographics of scaphoid fracture in the U.S. population. *J Hand Surg Am*, 35, 1242-5.
- VENDER, M. I., WATSON, H. K., WIENER, B. D. & BLACK, D. M. 1987. Degenerative change in symptomatic scaphoid nonunion. *The Journal of hand surgery*, 12, 514-519.
- VINNARS, B., PIETREANU, M., BODESTEDT, A., EKENSTAM, F. & GERDIN, B. 2008. Nonoperative compared with operative treatment of acute scaphoid fractures. A randomized clinical trial. *J Bone Joint Surg Am*, 90, 1176-85.
- WATSON, H. K. & RYU, J. 1986. Evolution of arthritis of the wrist. *Clinical orthopaedics and related research*, 57-67.
- WATTS, A., MCLEAN, J., FOGG, Q. & BAIN, G. 2011. Scaphoid anatomy. Thieme Medical Publishers.
- WEBER, E. & CHAO, E. 1978. An experimental approach to the mechanism of scaphoid waist fractures. *The Journal of hand surgery*, 3, 142-148.
- WEISS, K. E. & RODNER, C. M. 2007. Osteoarthritis of the wrist. *The Journal of hand surgery*, 32, 725-746.
- WELLING, R. D., JACOBSON, J. A., JAMADAR, D. A., CHONG, S., CAOILI, E. M. & JEBSON, P. J. 2008. MDCT and radiography of wrist fractures: radiographic sensitivity and fracture patterns. *AJR Am J Roentgenol*, 190, 10-6.
- WOLF, J. M., DAWSON, L., MOUNTCASTLE, S. B. & OWENS, B. D. 2009. The incidence of scaphoid fracture in a military population. *Injury*, 40, 1316-9.
- WOZASEK, G. E. & LASKE, H. 1991. [The ligaments of the scaphoid bone]. *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 23, 18-22.
- WYRICK, J. D., STERN, P. J. & KIEFHABER, T. R. 1995. Motion-preserving procedures in the treatment of scapholunate advanced collapse wrist: proximal row carpectomy versus four-corner arthrodesis. *The Journal of hand surgery*, 20, 965-970.
- YIN, Z. G., ZHANG, J. B., KAN, S. L. & WANG, X. G. 2012. Diagnostic accuracy of imaging modalities for suspected scaphoid fractures: meta-analysis combined with latent class analysis. *J Bone Joint Surg Br*, 94, 1077-85.

10 Danksagung

Ich möchte mich hiermit bei Herrn Prof. Dr. med. Gerhard Adam für die Möglichkeit bedanken im Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie und Nuklearmedizin des Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf meine Doktorarbeit durchzuführen.

Außerdem danke ich Herrn Prof. Dr. Jin Yamamura für die hypothetische Ausarbeitung des Themas der Doktorarbeit sowie für die hilfreiche Kritik während der Anfertigung der Dissertation.

Besonders möchte ich meinem Betreuer Herrn PD Dr. Maxim Avanesov für die Unterstützung, Beratung und die sehr gute und zielführende Zusammenarbeit danken.

Danken möchte ich auch Marija Stojkova für die Erhebung der Daten am Universitätsklinikum St. Kyrill und Method in Skopje.

Zudem möchte ich meiner Freundin Nina für das geduldige Korrekturlesen und die statistische Beratung danken.

Ein besonderer Dank gilt auch meiner Familie, die mich immer unterstützt und für mich da ist, wenn ich sie brauche.

11 Lebenslauf

Lebenslauf aus datenschutzrechtlichen Gründen nicht enthalten

12 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: