
Vergleich der Wertigkeit der Niederfeld-MRT und der Projektionsradiographie für die Diagnosesicherung von Hand- und Handgelenksverletzungen

Ruth Falb



München 2010

Aus dem Institut für Klinische Radiologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorstand: Prof. Dr. Dr. hc. M. Reiser, FACR, FRCR

**Vergleich der Wertigkeit der Niederfeld-MRT und der
Projektionsradiographie für die Diagnosesicherung
von Hand- und Handgelenksverletzungen**

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Ruth Falb
aus Ingolstadt

München 2010

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. hc. M. Reiser, FACP, FRCR
Mitberichterstatter: PD Dr. Peter Biberthaler, PD Dr. Uwe Koedel
Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. M. Treitl
Dekan: Prof. Dr. Dr. hc. M. Reiser, FACP, FRCR
Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2010

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	6
1 Einleitung	7
2 Theoretischer Hintergrund	9
2.1 Definition des akuten und chronischen Hand- und Handgelenksschmerzes	9
2.1.1 Der akute Hand-und Handgelenksschmerz	9
2.1.2 Der chronische Hand- und Handgelenksschmerz	9
2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder	9
2.2.1 Distale Radiusfraktur	9
2.2.2 Skaphoidfraktur (=Kahnbeinfraktur, Fraktur des Os scaphoideum)	10
2.2.3 Sonstige Handwurzelfrakturen (Frakturen der Carpalia)	12
2.2.4 Rupturen und Bandläsionen	12
2.2.5 Diskusverletzungen	16
2.2.6 Raumforderungen	17
2.2.7 Entzündliche und degenerative Prozesse	19
2.3 Radiologische Diagnostik	19
2.3.1 Projektionsradiographie	19
2.3.2 Magnetresonanztomographie (MRT)	21
3 Zielsetzung der Arbeit	31
4 Material und Methoden	33
4.1 Studiendesign	33
4.2 Patientenkollektiv	33
4.3 Behandlungsablauf	33
4.4 Bildgebung	34
4.4.1 Projektionsradiographie	34
4.4.2 Niederfeldkernspintomographie	37
4.5 Allgemeine Bildbefundung	41

Inhaltsverzeichnis

4.6	Ermittlung der Intra-und Interobserver-Variabilität	41
4.7	Datenauswertung	41
4.8	Statistik	43
4.8.1	Allgemeine Statistik	43
4.8.2	Bestimmung der Intra- und Interobserver-Variabilität	43
5	Ergebnisse	45
5.1	Verletzungen knöcherner Strukturen	48
5.1.1	Distale Radiusfraktur	49
5.1.2	Skaphoidfraktur	53
5.1.3	Andere Frakturen	57
5.2	Verletzungen von Weichteilstrukturen	59
5.2.1	Rupturen des Band- und Sehnenapparates	59
5.2.2	Diskusläsion	64
5.2.3	Raumforderungen	70
5.2.4	Sonstige Pathologien der Hand bzw. des Handgelenks	78
5.3	Ergebnisse der Intra- und Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT	83
5.3.1	Ergebnisse der Intraobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT	84
5.3.2	Ergebnisse der Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT	86
6	Diskussion	88
6.1	Studiendesign	88
6.1.1	Auswahl des Patientenkollektives	88
6.2	Interpretation der Ergebnisse	89
6.2.1	Referenzstandards für die Beurteilung bildgebender Verfahren	89
6.2.2	Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der beteiligten Strukturen	91
6.2.3	Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Literatur	94
6.2.4	Interpretation der Ergebnisse der Intra- und Interobserver Variabilität	99
7	Zusammenfassung	103
8	Literaturverzeichnis	105
9	Danksagung	120

Abkürzungsverzeichnis

Niederfeld-MRT	Niederfeld-Magnetresonanztomographie
TFCC	Triangulärer fibrokartilaginärer Komplex
MRT	Magnetresonanztomographie, Kernspintomographie
CT	Computertomographie
MR-Angiographie	Magnetresonanz-Angiographie
Hochfeld-MRT	Hochfeld-Magnetresonanztomographie
LT-Koalition	Lunotriquetale Koalition
DRF	Distale Radiusfraktur
SNAC-wrist	Scaphoid-nonunion-advanced-collapse wrist
STIR	Short-time-inversion-recovery
SL-Band	Skapholunäres Band
SLD	Skapholunäre Dissoziation
CID	Carpal instability dissociative
SL-Dissoziation	Skapholunäre Dissoziation
TFC	Discus triangularis
ARA	American Rheumatism Association
GOA	Gebührenordnung für Ärzte
TR	Repetitionszeit
TE	Echozeit
FoV	Field of view
mT	milli-Tesla
PPW	Positiver prädiktiver Wert
NPW	Negativer prädiktiver Wert
EK	Empfindlichkeitsklasse
Gd-DPTA	Gadolinium-diethylentriaminpentaacetat
ICC	Intra-Klassen-Koeffizient

1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland wird die Zahl der Sport- und Freizeitverletzungen, welche eine ärztliche Versorgung erfordern, auf etwa 1,5 bis 2 Millionen pro Jahr geschätzt [1]. Darunter entfällt ein beträchtlicher Teil auf Hand- und Handgelenksverletzungen [2]. Ein Grund für diese Entwicklung ist das wachsende Interesse an Risikosportarten, wie beispielsweise Inlineskaten, Squash, Mountainbiken oder Snowboarden [3,4]. Mangelndes Training, ungenügende Schutzbekleidung und eine erhöhte Risikobereitschaft sind weitere Faktoren, die Sport- oder Arbeitsunfälle mit schweren traumatischen Verletzungen des Handgelenks und der Handwurzel begünstigen. In der Folge entstehen hohe Kosten durch Arbeitsausfälle, Berufsunfähigkeit und Langzeittherapien. Oft führen nicht diagnostizierte Traumata zu chronischen Handgelenksschmerzen mit Folgeschäden. Die klinische Inspektion und Untersuchung sowie eine sorgfältige Erhebung der Anamnese hinsichtlich Unfallmechanismus und Beschwerdebild liefern wichtige Hinweise auf die vorliegende Verletzung. Um das Risiko von Komplikationen und Folgeschäden zu minimieren, ist bei Traumata des Handgelenks die zeitnahe Durchführung dezidierter bildgebender Verfahren zur Diagnosesicherung von großer Bedeutung. Initiales bildgebendes Untersuchungsverfahren bei traumatischen und chronischen Hand- und Handgelenksverletzungen ist nach wie vor die Projektionsradiographie. Diese ist für die Sicherung der Diagnose allerdings oft unzureichend, da Weichteilstrukturen sowie Verletzungen der Ligamente und des triangulären fibrokartilaginären Komplexes (TFCC) nicht beurteilt werden können. In solchen Fällen macht nach einer Nutzen-Risiko-Abwägung oft der Einsatz weiterführender bildgebender Verfahren wie der Magnetresonanztomographie (MRT)- und Computertomographie (CT) oder der Magnetresonanz-Arthrographie (MR-Arthrographie) Sinn, bevor invasive Maßnahmen wie die Arthroskopie durchgeführt werden. Die MRT zeichnet sich im Gegensatz zur CT und Projektionsradiographie durch ihren hohen Weichteilkontrast aus. Sie ist daher zur Detektion von entzündlichen Prozessen, wie z.B. bei der Rheumatoiden Arthritis, sowie Verletzungen ligamentärer Strukturen besonders gut geeignet. Hinsichtlich der Stärke des Magnetfeldes wird zwischen Hochfeld-Magnetresonanztomographen (Hochfeld-MRT) mit Magnetfeldstärken von 1-3 Tesla, und Niederfeld-Magnetresonanztomographen (Niederfeld-MRT) mit einer Magnetfeldstärke von 0,1 bis 0,5 Tesla unterschieden. Limi-

tierende Faktoren für den Einsatz des herkömmlichen Hochfeld-MRTs sind neben dem großen Platzbedarf hohe Anschaffungs-, Wartungs- und Untersuchungskosten. Zudem handelt es sich um ein geschlossenes System mit geringem Lagerungskomfort, was die Untersuchung klaustrophobisch vorbelasteter Patienten nochmals erschwert. Mittlerweile existieren aber auch dedizierte Niederfeld-MRTs, die ein offenes Design mit deutlich besseren Lagerungsmöglichkeiten aufweisen. Signifikant geringere Anschaffungs- und Betriebskosten machen die Niederfeld-MRT zu einem Diagnostikum, welches bei reduzierter Bildqualität die ausschließliche Untersuchung von Extremitäten und Gelenken erlaubt. Mehrere Studien belegen eine hohe diagnostische Treffsicherheit sowie eine hohe Sensitivität, Spezifität dieser Systeme in der muskulo-skeletalen Bildgebung [5–7]. Der routinemäßige Einsatz eines solchen dedizierten Niederfeldkernspintomographen bei einem chirurgischen Patientengut mit akuten oder chronischen Handgelenksschmerzen bedeutet möglicherweise aufgrund der genannten Vorteile in der Darstellung der weichteiligen Strukturen eine wertvolle und wichtige Ergänzung zur Basisdiagnostik. Dadurch könnte die Zahl ergänzender invasiver Untersuchungsmethoden, wie etwa der Arthroskopie, ggf. vermieden werden und dabei die üblicherweise sehr knappen Untersuchungs-Ressourcen wie der Hochfeld-MRT geschont werden. In der vorliegenden Arbeit wird der Stellenwert einer 0,2 Tesla MRT-Untersuchung in der Diagnosesicherung von Handgelenks- und Handverletzungen untersucht. Mit der Differenzierung des Patientenkollektivs nach der klinischen Diagnose des chronischen und akuten Handgelenkschmerzes sollen zudem Empfehlungen für den Zeitpunkt der Untersuchung herausgearbeitet werden.

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Definition des akuten und chronischen Hand- und Handgelenksschmerzes

2.1.1 Der akute Hand- und Handgelenksschmerz

Bei dem akuten Handgelenkstrauma handelt es sich um eine Verletzung, bei der Schmerzen bis zur 2. Woche nach dem Trauma auftreten [8]. Die Vielzahl der dafür in Betracht kommenden Krankheitsbilder erschwert die adäquate Diagnostik und deren frühzeitige Behandlung, welche für die Vermeidung von Folgeerkrankungen von essentieller Bedeutung ist [9].

2.1.2 Der chronische Hand- und Handgelenksschmerz

Der chronische Handgelenksschmerz ist definiert als eine Beschwerdepersistenz über einen Zeitraum von sechs Wochen hinaus [8].

Krankheitsbilder, welche einen akuten und/oder chronischen Hand- bzw. Handgelenkschmerz verursachen können, werden im folgenden Abschnitt hinsichtlich Epidemiologie, Ätiologie und Klinik genauer dargestellt.

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik des akuten und chronischen Hand- und Handgelenksschmerzes

Frakturen des Handgelenks betreffen in erster Linie den distalen Radius und das Os naviculare, die übrigen Handwurzelknochen sind nur in 20-30 Prozent aller Karpalfrakturen betroffen [9, 10].

2.2.1 Distale Radiusfraktur

Bei der distalen Radiusfraktur handelt es sich um die häufigste Fraktur des Menschen. Sie macht 10-25 Prozent aller Knochenbrüche aus und beträgt in Deutschland mehr als

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

200.000 Fälle pro Jahr [11]. Die Häufigkeit der distalen Radiusfraktur lässt sich in zwei Altersgipfel unterteilen, nämlich nach einem Sturz von älteren Menschen (50. Lebensjahr; 80 Prozent) mit Osteoporose, oder von jungen aktiven Patienten im Alter zwischen 9 und 18 Jahren.

Vom Unfallmechanismus her lässt sich eine Fraktur durch einen Sturz auf den flektierten Handrücken (Smith-Fraktur) von einer Colles- Fraktur durch einen Sturz auf die dorsal extendierte Hand unterscheiden, wobei letztere wesentlich häufiger auftritt. Dabei ist die Stellung des Handgelenks im Moment der Gewalteinwirkung entscheidend für den Frakturverlauf und die Lokalisation des distalen Fragmentes. Die Patienten klagen über Schmerzen im Bereich des distalen Radius, Schwellung und Bewegungseinschränkung im Handgelenk. Bei der distalen Radiusfraktur kommt es nicht selten zu Begleitverletzungen mit Folgeschäden, siehe Tabelle 2.1 [12–20]. Doczi und Renner fanden in einer Studie heraus, dass bei der Erstansicht projektionsradiographischer Aufnahmen etwa 6 % der distalen Radiusfrakturen übersehen werden [21]. Daher ist eine frühzeitige Diagnostik mittels anderer bildgebender Verfahren, wie beispielsweise der MRT oder CT, sowie eine baldige Einleitung einer adäquaten Therapie von großer Bedeutung. Gerade in diesem Zusammenhang rückt die Kernspintomographie aufgrund ihrer ausgezeichneten Darstellung von Weichgewebe und muskuloskelettalem Strukturen in den Vordergrund und kann unter diesen Voraussetzungen zum sicheren Frakturausschluss verwendet werden [22, 23].

Tabelle 2.1: Häufigkeiten der Begleitverletzungen bei der distalen Radiusfraktur mit den entsprechenden Literaturangaben

Häufigkeiten der Begleitverletzungen mit Literaturangaben		
Karpale Instabilität	30% aller DRFs	[12]
SL-Bandverletzungen	32 bis 85% aller DRFs	[13-15, 19]
LT-Bandverletzungen	12 bis 15% aller DRFs	[16, 17]
TFCC-Läsionen	41 bis 58% aller DRFs	[18-20]

2.2.2 Skaphoidfraktur (=Kahnbeinfraktur, Fraktur des Os scaphoideum)

Die Skaphoidfraktur ist die häufigste Handwurzelfraktur, wobei vor allem Männer von 20–40 Jahren betroffen sind [24–27].

Das typische Verletzungsmuster ist ein Sturz auf die dorsal extendierte Hand, in seltenen Fällen auch bei palmar flektierter Hand [28], wobei es bei einer Radialduktion zu ei-

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

nem Bruch im distalen Drittel, und bei einer Ulnarduktion im proximalen Drittel kommt. Die Klinik umfasst eine lokale Schwellung, einen Druckschmerz im Bereich der Tabatiere, einen Stauchungsschmerz über dem Daumenstrahl, sowie eine schmerzhafte Bewegungseinschränkung bei Extension und Radialduktion des Handgelenks [24, 28]. Selbst bei kompletten Frakturen des Skaphoids findet häufig keine Dislokation der Fragmente statt, da die Fragmente durch den extrinsischen Kapsel-Band-Apparat zusammengehalten werden [29]. Dadurch wird die Diagnostik einer frischen Skaphoidfraktur im konventionellen Röntgen beträchtlich erschwert [30–34], wobei Angaben zu der Anzahl der okkulten Skaphoidfrakturen bei unauffälligen Röntgenbildern sehr differieren [27, 31, 35, 36].

Breitenseher et al. gibt die Zahl der okkulten Skaphoidfrakturen im konventionellen Röntgen sogar mit bis zu 65 Prozent an. Per konventionellem Röntgen kann eine Skaphoidfraktur oft erst 6 Wochen nach dem Trauma ausgeschlossen werden, weshalb sich die Durchführung anderer bildgebender Verfahren bewährt hat [37–39]. Die Kernspintomographie ist durch die Darstellung von Frakturzeichen, wie beispielsweise eines Knochenmarködems sowie die Unterbrechung kortikaler und spongiöser Strukturen, in der Diagnostik okkulter Frakturen besonders in den Vordergrund gerückt [40–42]. Mehrere Studien belegen bereits die hohe Sensitivität (95–100%) und Spezifität (100%) der Kernspintomographie in der Diagnostik okkulter Handwurzelfrakturen [23, 43].

Aufgrund der folgenschweren Komplikationen und einer SNAC-wrist (Scaphoid-nonunion-advanced collapse), einer schweren radiokarpalen Arthrose, sowie der Möglichkeit weiterer okkulter Begleitfrakturen, ist es essentiell, das ungefähre Frakturalter sowie die Lage innerhalb des Skaphoids zur Abschätzung des Osteonekrosrisikos genau zu eruieren. Dadurch ist es möglich, eine adäquate Therapie einleiten zu können bzw. bei Frakturausschluss eine langwierige und für den Patienten stark belastende Immobilisation in der Oberarm-Gipsschiene zu vermeiden [24, 44–46]. Auch bei primär negativen radiologischen Befunden, aber klinischem Verdacht einer Skaphoidfraktur, erfolgt eine Ruhigstellung im Gipsverband bis zu sechs Wochen [37].

Je nach Frakturtyp erfolgt bei akut-stabilen Frakturen eine konservative Behandlung und bei akut-instabilen Frakturen eine operative Therapie [28]. Skaphoidfrakturen im mittleren Drittel (ca. 70 %) sind am häufigsten anzutreffen, gefolgt vom proximalen (20 %) und distalen Drittel (10 %) [47]. Besondere Aufmerksamkeit sollte den Skaphoidfrakturen im proximalen Bereich geschenkt werden, da sie aufgrund der schlechten Durchblutungsverhältnisse häufig in einer Pseudarthrose enden.

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

2.2.3 Sonstige Handwurzelfrakturen (Frakturen der Carpalia)

Andere häufige Handwurzelfrakturen sind die des Os triquetums und des Os trapeziums. Frakturen der restlichen Handwurzelknochen sind relativ selten [45, 48]. In Tabelle 2.2 wird die Häufigkeit der Handwurzelfrakturen in absteigender Reihenfolge dargestellt.

Tabelle 2.2: Tabellarische Übersicht der Häufigkeiten der einzelnen Frakturen der Handwurzelfrakturen [49].

Betroffene Struktur	Häufigkeiten
Os scaphoideum	85%
Os triquetum	14,5%
Os trapezium	2,5%
Os hamatum	1,7%
Os pisiforme	1,2%
Os lunatum	1,1%
Os capitatum	0,7%
Os trapezoideum	0,4%

Trotz korrekter projektionsradiographischer Aufnahmen sind frische Handwurzelfrakturen im Nativbild mitunter nicht sicher zu diagnostizieren. Daher sollte bei Beschwerdepersistenz eine CT- oder MRT-Untersuchung in Erwägung gezogen werden [49]. Kernspintomographische Aufnahmen mit fettunterdrückenden Sequenzen, wie beispielsweise Short-time-inversion-recovery-Sequenzen (STIR-Sequenzen), leisten durch eine hohe Sensititität in der Detektion akuter Frakturen und Knochenkontusionen einen wesentlichen Beitrag in der Frakturdiagnostik [40, 50].

2.2.4 Rupturen und Bandläsionen

Nach Lichtman et al und Fisk ist der Handwurzelkomplex ein unter Spannung stehender dynamischer Ring der Handwurzelknochen, wobei die Bänder für einen lückenlosen Zusammenhalt dienen [51–53]. Im folgenden Abschnitt wird aufgrund der Häufigkeit näher auf das skapholunäre Band (SL-Band) eingegangen. Läsionen des skapholunären Bandes treten mit 86 % häufiger auf als Schäden des lunotriquetalen Bandes (14 %) [54]. Etwa 5 % aller karpalen Bandschäden sind traumatisch bedingt, der Rest ist auf Verschleißveränderungen oder alte Verletzungen zurückzuführen [55].

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

Skapholunäres Band (=Ligamentum scapholunatum, SL-Band)

Das SL-Band verläuft zwischen Os scaphoideum und Os lunatum und setzt sich aus einer proximalen, dorsalen und palmaren Komponente zusammen. Der dorsale Anteil ist darunter der kräftigste [56–58]. Das SL-Band ist der wichtigste Stabilisator des Karpus [59, 60]. Mayfield et al. zufolge muss eine Kraft von etwa 4 kN auf das SL-Band einwirken, um es zum Zerreißen zu bringen. Mit seiner Dehnbarkeit von bis zu 200 Prozent ist es hoch elastisch [61, 62]. Vom Pathomechanismus her lassen sich traumatisch bedingte von nicht-traumatischen bzw. degenerativen Mechanismen unterscheiden (Tabelle 2.3 und 2.4) [12, 13, 61–86].

Degenerative Veränderungen im SL-Band, im Sinne von Überbeanspruchung oder rezidivierenden Mikrotraumen, werden häufiger bei der älteren Generation über dem 60. Lebensjahr beobachtet [87–90]. Dieser mechanische Verschleiß stellt sich überwiegend als Perforation des membranösen Drittels des SL-Bandes, auch Pin-Hole-Defekt genannt, dar [66, 86]. Zudem können bei asymptomatischen Patienten auch Läsionen des SL-Bandes ohne bekanntes Trauma in der Vergangenheit vorliegen [91–98]. Auch diese asymptomatischen SL-Band-Verletzungen sind wiederum bei der Hälfte aller Patienten über dem 80. Lebensjahr und eher selten unter dem 20. Lebenjahr vorzufinden [87–90].

Am häufigsten jedoch findet man einen Sturz auf das ausgestreckte Handgelenk oder einen Verschleiß der Bänder als Ursache für eine SL-Ruptur. Diese führt zu einer Entkopplung zwischen Skaphoid und Lunatum, auch skapholunäre Dissoziation (SLD) genannt, wodurch eine dissoziative karpale Instabilität entstehen kann (CID, carpal instability dissociative).

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

Tabelle 2.3: Häufige Pathomechanismen der SL-Bandverletzungen mit entsprechenden Literaturangaben

Traumatisch bedingte Mechanismen	Literatur
Gewalteinwirkung oder Sturz auf:	
dorsalextendierte oder hyperflektierte Hand in Pronation oder Supination	[61, 63]
dorsalextendierten Arm, Handgelenk in Supination und Ulnarduktion	[64, 65]
karpale Supination, Hyperextension und Ulnardeviation	[62, 63]
Axiale Kompression, Palmarflexion, Ulnarabduktion:	
Folge: Rotationssubluxation des Skaphoids	[66]
Axiale Kompression:	
Folge: Verlagerung Os capitatum zwischen Skaphoid und Lunatum	[67]
Hochenergetisches Rotationstrauma als Begleitverletzung bei DRF:	
Hebelwirkung auf Skaphoid, Einstauchung Os lunatum	[68, 69]
Im Rahmen einer Skaphoidfraktur	
	[70, 71]

Tabelle 2.4: Nicht-traumatisch bedingte, seltene Pathomechanismen der SL-Band-Verletzung mit Literaturangaben

Nicht-traumatisch bedingte, seltene Ursachen	Literatur
Arthrotische Veränderungen des Handgelenks	[72, 73]
Entzündungen im Handgelenk oder Handwurzelbereich	[74]
Folge einer in Fehlstellung verheilten DRF	[12, 13]
Ulnaplatz-/ Ulnaminus-Variante	[75–77]
Laxität der Bänder (angeboren, erworben)	[78]
Im Rahmen eines gleichzeitigen Handgelenkganglions	[79, 80]
Gicht, Pseudogicht, Kalziumpyrophosphatablagerungen	[81, 82]
Rheumatoide Arthritis	[83, 84]
Lunatummalazie (Kienböck-Krankheit)	[78, 85]
Neurogene Erkrankungen	[83, 84]
β2-Mikroglobulinämie	[84]
Rezidivierende Mikrotraumen bzw. degenerative Veränderungen	[66, 86]

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

In Tabelle 2.5 ist die Klassifikation der SLD nach Watson et al. [99] veranschaulicht. Folgende Vorgänge spielen sich dabei ab: Die skapholunäre Dissoziation begünstigt eine Kippung des Lunatums nach dorsal sowie eine Rotationssubluxation des Kahnbeins nach palmar [100]. Dadurch kommt es zur Ausbildung einer Arthrose zwischen Skaphoid und Processus styloideus radii und im späteren Verlauf zur Mediokarpalarthrose mit karpalem Kollaps. Dabei kommt es zur Annäherung des Os capitatum an den Radius, auch Scapholunate advanced collapse (SLAC) bezeichnet [101].

Tabelle 2.5: Klassifikation der skapholunären Dissoziation nach Watson et al

Grad der Dissoziation	Klassifikation	Röntgenveränderungen
I	keine Instabilität	keine Röntgenveränderungen, Watson-Test positiv
II	dynamisch	Rotationsfehlstellung des Kahnbeins in der Röntgenkinematographie
III	statisch	Röntgenübersicht: SL-Dissoziation ($>3\text{mm}$) sichtbar, keine Arthrosezeichen
IV	degenerativ	Röntgenübersicht: SL- Dissoziation mit Arthrosezeichen sichtbar (SLAC/SNAC)

Klinisch kann sich eine SL-Bandverletzung asymptomatisch oder symptomatisch darstellen. Hierbei kann ein dorsaler Druckschmerz über der proximalen Handwurzel, evtl. auch über der Tabatiere, oder eine Bewegungseinschränkung in der Handwurzel verzeichnet werden. Zusätzlich können der Watson-Test oder der Skapholunäre Ballottement-Test, Stabilitäts- tests der Handwurzel positiv sein [102]. Die Darstellung einer SL-Bandruptur in gehaltenen projektionsradiographischen Aufnahmen unter Zug und Ulnarduktion im Seitenvergleich gelingt jedoch nicht immer und birgt die Gefahr einer zusätzlichen Traumatisierung. Mittels kontrastmittelgestützten kernspintomographischen Aufnahmen in koronarer Schnittführung gelingt der Nachweis einer SL-Bandverletzung.

Die herausragenden Eigenschaften sowie die hohe Sensitivität (zwischen 86 % und 92 %), Spezifität (100 %) und Genauigkeit (zwischen 96 % und 99 %) kernspintomographischer Untersuchungen in der Diagnostik von SL-Bandverletzungen belegen diverse Studien [103–105].

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

2.2.5 Diskusverletzungen

Der Trianguläre fibrokartilaginäre Komplex (= *TFCC*, ulnokarpaler Komplex) wurde erstmals 1981 durch Palmer beschrieben und setzt sich aus verschiedenen anatomischen Strukturen zusammen (Discus triangularis, Meniscus ulnocarpalis, Lig. ulnolunatum, Lig. ulnotriquetum, Ligg. radioulnare palmare et dorsale, Lig. collaterale carpi ulnare, Sehnscheide des M. extensor carpi ulnaris). Der Discus triangularis (TFC), welcher zwischen dem Processus styloideus ulnae bzw. dem Ligamentum collaterale carpi ulnare und der Incisura ulnaris des Radius lokalisiert ist, stellt zusammen mit seinen Ligamenten und anderen genannten Strukturen einen Teil des triangulären Faserknorpelkomplexes dar [10]. Der TFCC dient einerseits als Puffer zwischen distaler Ulna und den ulnaren proximalen Handwurzelknochen, und andererseits stabilisiert er das distale Radioulnargelenk [106–109]. Eine Verletzung des ulnokarpalen Komplexes ist häufig Ursache einer chronischen Handgelenkschmerzen, der Verletzungsmechanismus kann sowohl traumatisch als auch degenerativ bedingt sein [110]. Während traumatische TFCC-Verletzungen eher bei jungen Menschen auftreten, sind degenerative Prozesse eher bei älteren Patienten zu beobachten. Mikic [111] führte Studien an 180 Leichenpräparaten durch und stellte fest, dass etwa 50 Prozent aller Patienten über dem 60. Lebensjahr TFC-Perforationen aufweisen, wohingegen Patienten unter dem 30. Lebensjahr und Neugeborene keinerlei Perforation des ulnokarpalen Komplexes aufwiesen. Häufige Ursachen für degenerative TFCC-Läsionen sind chronische Überlastung, angeborene Veränderungen, wie beispielsweise eine Ulnaplusvariante, oder posttraumatische Veränderungen der angrenzenden Knochenstrukturen, zum Beispiel eine Radiusminusvariante (Ulnar- Impaction-Syndrom) [107,109,112–116]. TFCC-Perforationen degenerativer Genese sind aufgrund der avaskulären Areale im Zentrum des Discus triangularis zentral lokalisiert, wohingegen traumatisch bedingte TFCC-Läsionen eher im gut durchbluteten peripheren Bereich des Discus triangularis vorzufinden sind [111]. Traumatische TFCC-Läsionen entstehen durch einen Fall auf die pronierte extendierte Hand, ein Rotationstrauma des Unterarmes oder als Begleitverletzung bei einer distalen Radiusfraktur [15,18,106,117,118]. Begleitend kann zudem eine Ruptur des lunotriquetalen Bandes auftreten mit der Folge einer lunotriquetalen Instabilität, wodurch es zu vermehrter Belastung des Ulnabereiches mit einer degenerativen Arthritis des ulnokarpalen und distalen Radioulnargelenkes kommt.

Die Klinik äußert sich in ulnokarpalen Schmerzen, einer Kraftminderung sowie einer Bewegungseinschränkung im Handgelenk aufgrund einer Gelenkblockade [106].

Nach Ätiologie und Lokalisation der TFCC-Läsion entwickelte Palmer 1989 erstmals eine Klassifikation (Tabelle 2.6).

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

Tabelle 2.6: Palmer-Klassifikation der TFCC-Läsionen [110]

Klasse:	Definition:
1.) traumatisch	
A:	Zentraler Einriss mit kleinem Lappen
B:	Abriss an der Ulna mit/ohne Fraktur des Processus styloideus ulnae
C:	Abriss am Os lunatum / Os triquetum
D:	Abriss des Diskus vom Radius mit/ohne Fraktur
2.) degenerativ	
A:	Zentrale Höhenminderung des Diskus ohne Perforation
B:	Zusätzlich Chondromalazie am Os lunatum / Ulnakopf
C:	Perforation des Diskus im zentralen Abschnitt, zusätzlich Chondromalazie am Os lunatum / Ulnakopf
D:	Zusätzlich Ruptur des LT-Bandes
E:	Zusätzlich ulnokarpale Arthritis

Haims et al. [119] sowie Frahm et al. [120] belegten in ihren Studien, dass die Durchführung einer Kernspintomographie zur differentialdiagnostischen Abklärung bei Verdacht auf eine TFCC-Läsion gut geeignet ist und die Kernspintomographie daher zu einem etablierten Untersuchungsverfahren macht. Zentrale und radiale Läsionen sind im MRT vor allem unter intravenöser Kontrastmittelgabe mit gröserer Treffsicherheit zu detektieren [119]. Die hohe Sensitivität (zwischen 88 % und 100 %), Spezifität (zwischen 86 % und 97 %) und Genauigkeit (zwischen 90 % und 97 %) kernspintomographischer Untersuchungen in der Diagnostik von TFCC-Läsionen belegen die gute Einsetzbarkeit dieses Untersuchungsverfahrens [103–105, 121, 122]. Des Weiteren spielt die Erfahrung des Befunders sowie die Kooperationsbereitschaft des Patienten eine wichtige Rolle [123].

2.2.6 Raumforderungen

Raumforderungen im Bereich der Hand können in Weichteiltumoren oder Knochentumoren unterteilt werden. In folgender Abbildung 2.1 sind die unterschiedlichen Arten der Raumforderungen dargestellt.

Nur circa 2 Prozent davon sind maligne, der Rest ist im Wesentlichen benigne [124]. Unter den gutartigen Weichteiltumoren nehmen Ganglien mit etwa 60 Prozent den größten Anteil ein, gefolgt von Lipomen und Riesenzelltumoren [125–127]. Aufgrund der hohen Präsenz von Ganglien wird im folgenden Abschnitt etwas genauer darauf eingegangen.

2.2 Epidemiologie, Ätiologie und Klinik der Krankheitsbilder

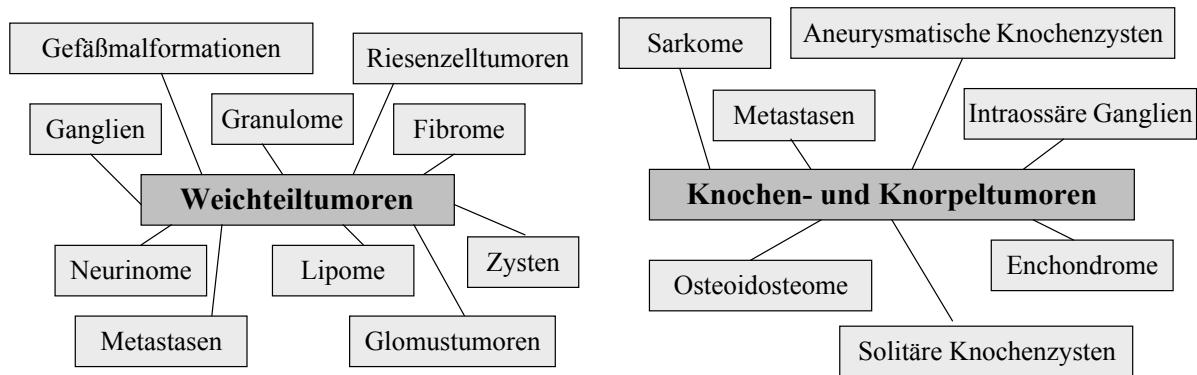


Abbildung 2.1: Unterteilung der Weichteil-, Knochen- und Knorpeltumoren.

Ganglien

Ganglien sind eine der häufigsten benignen Raumforderungen und treten vorwiegend bei dem weiblichen Geschlecht auf. In etwa 30-40 Prozent sind Ganglien im Bereich der Hand bzw. des Handgelenks lokalisiert, davon sind wiederum 60-70 Prozent dorsalseitig vorzufinden [128]. Sie stellen sich als zähe, flüssigkeitsgefüllte Knoten in der Nähe von Gelenken, Sehnen, aber auch intratendinös oder intraossär dar [126]. Die Ätiologie ist noch nicht vollständig geklärt und wird kontrovers diskutiert [79, 129]. Als eine der am häufigsten diskutierten Entstehungsansätze gilt eine mukoide Degeneration und Muzinproduktion durch modifizierte Synovialzellen oder Fibroblasten in der synovialen Kapsel nach einem Weichteiltrauma [130]. Vor allem aber gehen Ganglien des Handgelenks von der Dorsalseite des skapholunären Bandes aus [79, 80]. Hinsichtlich der Klinik können Ganglien entweder asymptomatisch verlaufen oder symptomatisch als palpable oder sichtbare Resistenz, Schmerzen im lokalisierten Bereich, Spannungsgefühl beispielsweise über dem SL-Gelenk, oder als schmerzhafte Hyperextension im Handgelenk in Erscheinung treten [127, 131]. Eine Diagnosestellung ist bei einer sichtbaren oder palpablen raumfordernden Masse relativ einfach. Bei Patienten, bei denen kein Trauma in der Vorgesichte bekannt ist, oder bei okkulten Ganglien, welche weder sichtbar oder palpabel, noch im Röntgenbild zu sehen sind, wird die Diagnose deutlich erschwert [127]. Selbstverständlich kann ein asymptomatisch verlaufendes okkultes Ganglion auch symptomatisch werden und die oben aufgeführten Symtome aufweisen. Steinberg et al. machte die Feststellung, dass etwa 85 Prozent der arthroskopisch und intraoperativ gesicherten okkulten Handgelenkganglien, welche durch einen radialseitig chronischen Schmerz in Erscheinung traten, im Bereich des SL-Bandes

2.3 Radiologische Diagnostik

liegen. Zwar kann die MRT in der Differentialdiagnose von Knochentumoren konventionelle Röntgenaufnahmen nicht ersetzen, jedoch lassen sich zusätzliche Aussagen bezüglich Tumorausdehnung, Lagebeziehung zu normalen Strukturen sowie Infiltrationen gut nachweisen. Nach Hosten et al. ist insbesondere eine Beteiligung des Knochens bzw. der Weichteile (Knochentumoren) mittels Kernspintomographie sensitiv nachweisbar [10]. Vor allem aufgrund der hohen Sensitivität (83 %) und Genauigkeit (80 %) des MRTs in der Detektion von Ganglien, ist besonders bei okkulten Ganglien im Bereich des Handgelenks eine Indikation zur Durchführung einer kernspintomographischen Untersuchung gegeben [132].

2.2.7 Entzündliche und degenerative Prozesse

Andere Ursachen für Schmerzen im Bereich der Hand und des Handgelenks sind mitunter entzündliche, degenerative und nervale Prozesse. Hierunter zählen entzündliche Reizzustände des Sehnengleitgewebes, wie beispielsweise Tendovaginitiden, welche durch Überlastungsschäden oder entzündliche Systemerkrankungen, wie der chronischen Polyarthritis, bedingt werden. Klinisch stellen sich Tendovaginitiden als Rötung, Schwellung und Druckschmerhaftigkeit über dem betroffenen Sehnenfach dar. Die chronische Polyarthritis (Rheumatoide Arthritis) als eigenständiges Krankheitsbild kann zudem auch ursächlich für einen chronischen Handgelenkschmerz sein und lässt sich klinisch anhand der Kriterien der "American Rheumatism Association" (ARA) diagnostizieren. Die Kernspintomographie hat sich sowohl in der Frühdiagnostik der chronischen Polyarthritis (Senstivität: 100 %, Spezifität: 89 %) als auch in der Beurteilung anderer entzündlicher oder degenerativer und neuropathischer Veränderungen als wertvolles Untersuchungsverfahren erwiesen [10, 133–135].

2.3 Radiologische Diagnostik

2.3.1 Projektionsradiographie

Allgemeines zur Projektionsradiographie

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellenstrahlen bzw. ionisierende Strahlen, welche die Fähigkeit besitzen, Materie je nach Dichte zu durchdringen, Filme zu schwärzen und fluoreszierende Stoffe zum Leuchten zu bringen. Die Projektionsradiographie beruht auf der Darstellung von Schwächungsunterschieden der Röntgenstrahlen bei der Durchdringung eines Körpers. Die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlen ist von der an-

2.3 Radiologische Diagnostik

gelegten Spannung in der Röntgenröhre abhängig und wird je nach zu untersuchendem Gewebe verändert. Die Projektionsradiographie ermöglicht die Beurteilung von Kompakta, Kortikalis, Gelenkflächen und Weichteilstrukturen (z.B. Schwellungen, Fettpolster) und ist daher als initiales Untersuchungsverfahren sehr wichtig. Projektionsradiographische Übersichtsaufnahmen werden unabhängig von der weiteren Diagnostik zur Dokumentation des Ausgangsbefundes und als Referenz im Rahmen der Verlaufsbeurteilung angefertigt. In der Frakturdiagnostik, Orthopädie und Rheumatologie wird die sogenannte Hartstrahltechnik (100-150 kV) zur Differenzierung von Weichteil- und Knochengewebe sowie zur Beurteilung entzündlicher und degenerativer Veränderungen angewendet [136].

Vor- und Nachteile der Projektionsradiographie

Ein Vorteil dieser Untersuchungsmethode ist die generelle Verfügbarkeit des Verfahrens sowie die standardisierte Aufnahmetechnik. Dies macht die Projektionsradiographie zu einem attraktiven Untersuchungsverfahren. Des Weiteren ermöglicht die Projektionsradiographie nach Verletzungen eine übersichtliche und schnelle Darstellung von Frakturen und wird für die Dokumentation des Heilungsverlaufes von Frakturen angewandt. Darüberhinaus sind projektionsradiographische Aufnahmen ein nützliches Verfahren zur Kontrolle von Lokalisation und Verankerung von Osteosynthesematerial. Degenerative Veränderungen, z.B. im Rahmen einer Arthrose, sowie entzündliche Prozesse, wie beispielsweise arthritische Direktzeichen oder indirekte Zeichen einer Arthritis können sich veranschaulichen lassen [22]. Nachteile dieser Methode sind die nötige Bleiabschirmung nicht untersuchter Areale gemäß der Strahlenschutzverordnung sowie die Strahlenbelastung, welche bei der Untersuchung von Gelenken in zwei Ebenen ungefähr 0,06mSv beträgt, im Vergleich zu einer Röntgen-Thoraxuntersuchung (in zwei Ebenen) mit 0,30mSv Strahlenbelastung.

Kostenfaktor

Die Projektionsradiographie stellt im Gegensatz zu anderen bildgebenden Verfahren, wie z.B. der MRT oder CT, ein kostengünstiges Untersuchungsverfahren dar. Gemäß der Gebührenordnung für Ärzte (GOA) wurde am Institut für Klinische Radiologie der einfache Satz berechnet. 1 Punkt in der GOA entspricht akutell 5,82873 Cent. Für Standardaufnahmen der Hand oder des Handgelenks in 2 Ebenen sind 220 Punkte (12,82 Euro), für ergänzende Ebenen sind 80 Punkte (4,66 Euro) veranschlagbar [137].

2.3 Radiologische Diagnostik

2.3.2 Magnetresonanztomographie (MRT)

Allgemeines zur Magnetresonanztomographie

Die theoretischen Grundlagen für die Kernspintomographie wurden 1946 von F. Bloch und E. M. Purcell geschaffen. Sie postulierten unabhängig voneinander das Vorhandensein einer Eigenrotation eines Atoms, das sogenannte Spin, und ein daraus entstehendes Magnetfeld. Für diese Erkenntnisse wurden die beiden Forscher 1952 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. Im Jahre 1973 wurden die ersten MRT-Bilder durch C. Lauterbur erzeugt und durch Sir Peter Mansfield weiterentwickelt, wofür die beiden 2003 mit dem Nobelpreis für Physiologie und Medizin ausgezeichnet wurden. Heute ist die Kernspintomographie das wichtigste bildgebende Verfahren in der Diagnostik muskuloskelettaler Strukturen und findet heutzutage routinemäßigen Einsatz im klinischen Alltag [138].

Physikalische Grundlagen der Magnetresonanztomographie

Physikalische Grundlage der Kernspintomographie ist das aus dem Eigendrehimpuls (Spin) von Atomen mit ungerader Nukleonenzahl (z.B. Stickstoff, Wasserstoff, Natrium und Phosphor) entstehende magnetische Moment [139] (Abbildung 2.2).

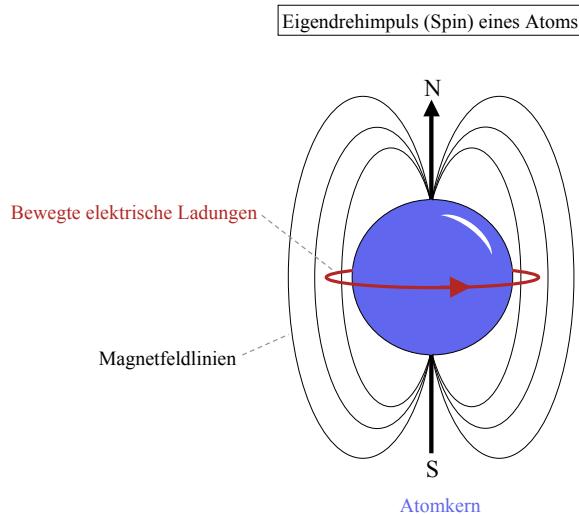


Abbildung 2.2: Die Abbildung stellt die Erzeugung eines Magnetfeldes durch die Eigenrotation eines Atoms dar.

Die Magnetfeldstärke dieses Dipols hängt vom Zustand des Spins und der Art des Atomkerns ab, und bestimmt in der Vektordarstellung dessen Länge, während seine Richtung die

2.3 Radiologische Diagnostik

Orientierung des magnetischen Moments darstellt. Im Normalzustand sind diese Vektoren in einem Gewebe, wie in Abbildung 2.3 verdeutlicht, ungeordnet [140].

Ungeordneter Zustand der magnetischen Momente von Atomen

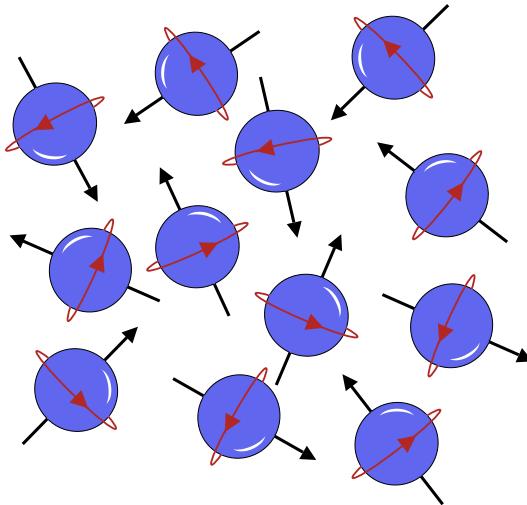


Abbildung 2.3: Die Abbildung zeigt den ungeordneten Zustand der magnetischen Momente von Atomen.

Bei Anlegen eines externen statischen Magnetfeldes erfolgt die Ausrichtung der magnetischen Momente in paralleler oder antiparalleler Richtung [140]. Zudem kommt es zu einer sogenannten Präzessionsbewegung, deren Frequenz proportional mit der Stärke des Magnetfeldes korreliert (Abbildung 2.4) [141].

In einem ein Tesla starken Magnetfeld beträgt die Präzessionsfrequenz 42,53 MHz, und es entsteht eine längs zum externen Magnetfeld ausgerichtete Longitudinalmagnetisierung. Dieses zusätzlich entstandene Magnetfeld wird im kartesischen Koordinatensystem als Vektor in der z-Ebene dargestellt und in Abbildung 2.5 veranschaulicht [142, 143].

Setzt man zusätzlich senkrecht zu dem bestehenden Hauptmagnetfeld B_0 einen Hochfrequenzimpuls (Radiowelle) mit der gleichen Larmorfrequenz ein, so ändern die überzähligen parallelen Kernspins ihre Lage in eine energiereichere Form, d.h. die Protonen werden angeregt [138, 143]. Dieser Vorgang wird auch als Anregung bzw. als Resonanzphänomen bezeichnet, denn aufgrund der senkrechten Einwirkung des Hochfrequenzimpulses verlagert sich der makroskopische Magnetisierungsvektor M_0 in die x-y-Ebene des Koordinatensystems, alle Spins rotieren also um 90° . Die makroskopische Longitudinalmagnetisierung

2.3 Radiologische Diagnostik

Präzessionsbewegungen von Atomen in einem externen Magnetfeld

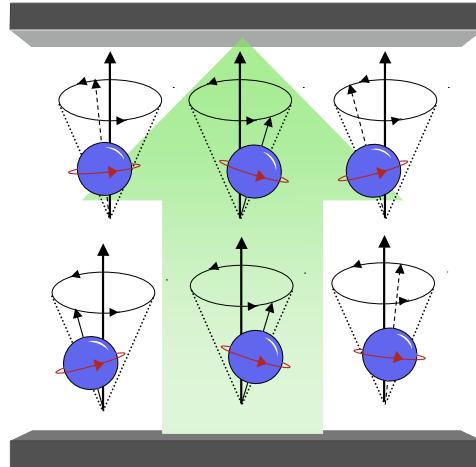


Abbildung 2.4: Ein Atom führt eine Präzessionsbewegung durch, die mit einer Kreiselbewegung vergleichbar ist. In einem externen Magnetfeld verläuft die Kreiselbewegung um die Hauptachse des externen Magnetfeldes.

Die makroskopische Gesamtmagnetisierung M_o

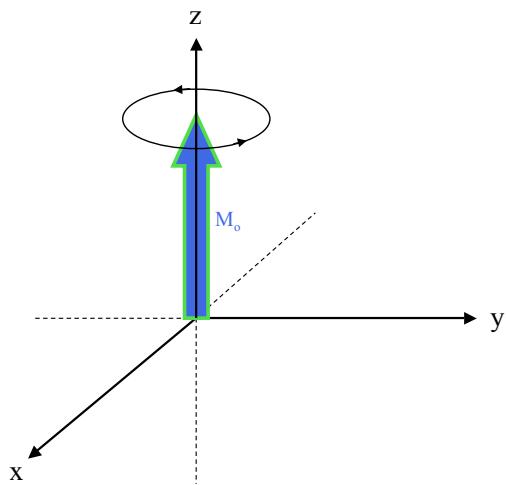


Abbildung 2.5: Der makroskopische Gesamtmagnetisierungsvektor, blau, befindet sich auf der z-Achse und wird auch als Longitudinalmagnetisierung bezeichnet.

2.3 Radiologische Diagnostik

nimmt ab, der Vektor bewegt sich nach transversal auf die x-y-Ebene und es entsteht die Transversalmagnetisierung. Zudem bewirkt der Hochfrequenzimpuls eine Synchronisierung der Protonen, d.h. die Protonen bewegen sich alle auf der gleichen Kreisbahn, sie laufen in Phase, wodurch die Transversalmagnetisierung zunimmt (siehe Abbildung 2.6 A-E) [142]. Lediglich die Richtungsänderung des sich bewegenden Magnetfeldes induziert ein elektromagnetisches Signal (MR-Signal), welches mittels einer Antennenspule gemessen werden kann [138].

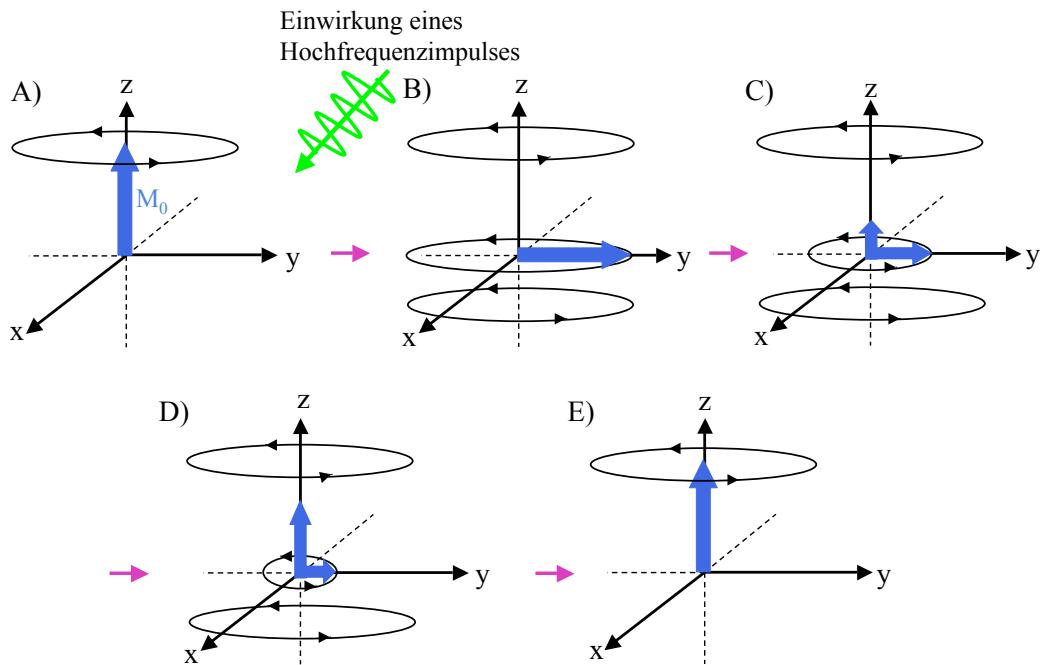


Abbildung 2.6: Veranschaulichung der Wirkung eines Hochfrequenzimpulses auf die Longitudinal- und Transversalmagnetisierung. A) Zustand vor Einwirken eines Hochfrequenzimpulses. B) Zustand nach Einwirken eines 90°-Hochfrequenzimpulses: Zunahme der Transversalmagnetisierung und Präzession der Protonen in Phase, Abnahme der Longitudinalmagnetisierung; C)-E): Nach dem Abschalten des Hochfrequenzimpulses geraten die Protonen ausser Phase, folglicherweise nimmt die Transversalmagnetisierung ab; Erholung der Longitudinalmagnetisierung;

Nach Unterbrechung des Hochfrequenzimpulses geben die antiparallelen Spins ihre Energie ab und kehren in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Die als elektromagnetisches Signal abgegebene Energie kann mit Hilfe einer Antennenspule gemessen werden [142]. Diesen Vorgang der sogenannten Relaxation kann man in eine longitudinale und transversale Komponente unterteilen.

2.3 Radiologische Diagnostik

Die Longitudinal- oder T1-Relaxation wird stark durch die Wechselwirkungen der Spins mit dem untersuchten Gewebe beeinflusst, man bezeichnet sie daher auch als Spin-Gitter-Wechselwirkungen. Über diese Wechselwirkungen wird durch den Hochfrequenzimpuls auf Protonen übertragene Energie in Form von thermischer Energie wieder abgegeben, dabei entstehende elektromagnetische Signale werden detektiert und erlauben eine Bildberechnung.

Unterschiede im gewebespezifischen zeitlichen Verlauf ermöglichen dabei die Differenzierung unterschiedlicher Gewebezusammensetzungen. Genauer ist die Zeitkonstante T1 als spezifische Zeitdauer definiert, welche ein Gewebe nach dem Einwirken eines Hochfrequenzimpulses benötigt, bis circa 63 % der ursprünglichen Längsmagnetisierung erreicht sind. Des Weiteren nimmt die Länge der T1-Zeitkonstante mit der Höhe des externen Magnetfeldes zu, siehe Tabelle 2.7 [138].

Tabelle 2.7: Darstellung der T1- und T2-Werte für unterschiedliche Gewebearten [144].

Gewebeart	T1 (0,2 T) in ms	T1 (1,5 T) in ms	T2 in ms
Liquor	1200	3000	1500
Weiße Hirnsubstanz	390	787	92
Graue Hirnsubstanz	495	921	101
Leber (Normalgewebe)	229	493	43
Niere (Normalgewebe)	395	652	58
Muskel (Normalgewebe)	372	868	47

Im Gegensatz zur T1-Relaxation nimmt bei der T2-Relaxation die Transversalmagnetisierung ab. Physikalische Grundlage sind hier Spin-Spin-Wechselwirkungen. Durch den Hochfrequenzimpuls laufen die Protonen in Phase, Folge ist eine schnellere Präzessionsbewegung und eine Zunahme der Transversalmagnetisierung. Nach Abschalten des Hochfrequenzimpulses nimmt die Phasenkohärenz der Spins und damit der Quermagnetisierungsvektor wieder ab. Der Energieaustausch zwischen den Spins hängt dabei nicht von der Stärke des angelegten Magnetfeldes ab, sondern vielmehr von der Temperatur, der Molekularstruktur des Gewebes und Inhomogenitäten im externen Magnetfeld und den lokalen Magnetfeldern der Spins. Die T2-Relaxation ist diejenige Zeitdauer, bei der die Quermagnetisierung in einem bestimmten Gewebe auf 37 Prozent des ursprünglichen Wertes abgefallen ist [138, 142, 143]. Siehe dazu Abbildung 2.7.

2.3 Radiologische Diagnostik

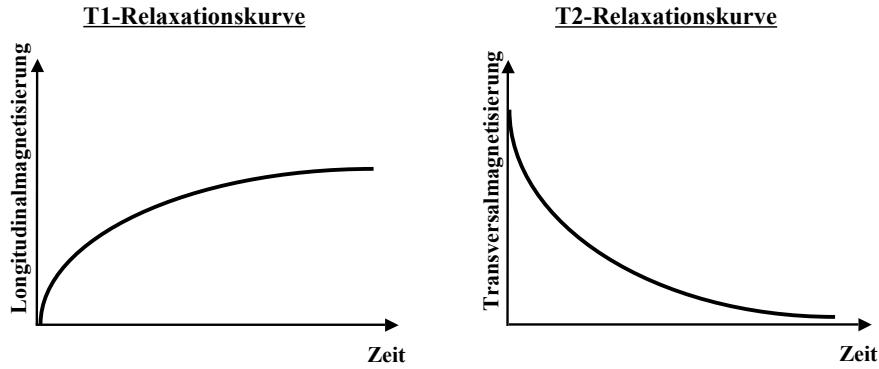


Abbildung 2.7: Links befindet sich die Longitudinale Relaxationskurve (T1-Relaxation), rechts die Transversale Relaxationskurve (T2-Relaxation).

Entstehende Signale können auch hier wieder mit einer Empfängerspule aufgefangen und in Bilddaten umgewandelt werden. Die Bilderzeugung basiert auf dem Prinzip der Ortskodierung, welches im Folgenden erläutert wird.

Durch das externe Magnetfeld präzidieren die Protonen des zu untersuchenden Körpers mit der bereits erwähnten Lamorfrequenz. Der Einsatz von Gradientenspulen erlaubt nun die differenzierte Anregung bestimmter, auf z-, x- und y-Achse definierter Regionen. Der sogenannte Schichtselektionsgradient der z-Achse wird nur während des Einstrahlens des Hochfrequenzimpulses zugeschaltet und dient der Modifizierung des Hauptmagnetfeldes. Die Steilheit dieses Gradienten ist dabei für die spätere Schichtdicke der Bilder mitverantwortlich. Die Definition der x- und y-Achse erfolgt über den Frequenz- und den Phasenkodierungsgradienten. Diese verändern die Präzessionsfrequenzen der Protonen und deren Verhältnis untereinander. Ein spezifischer Hochfrequenzimpuls kann somit eine im dreidimensionalen Raum definierte Zielregion anregen. Nach dem Abschalten der Gradientensysteme bestehende Unterschiede der detektierten Signale hinsichtlich ihrer Lamorfrequenz und Phase erlauben deren räumliche Auflösung. Die Gradientenspulen sorgen letztenlich für die Überlagerung eines starken, räumlich und zeitlich konstanten Magnetfeldes mit einem schwachen, räumlich linear variierenden Magnetfeld. Mittels der Fourier-Transformation, einer Frequenzanalyse, kann anschließend jedem Signal ein spezifischer Ort zugeordnet und ein räumliches Bild erzeugt werden [142]. Hier wird jedem Voxel in Abhängigkeit von der Signalintensität eine Farbinensität zugeordnet, die Größe der Voxel bestimmt dabei die Ortsauflösung [141, 145].

2.3 Radiologische Diagnostik

Bildkontraste und Bildgebungssequenzen

Der Kontrast eines Bildes beruht auf der T1- und T2-Relaxationszeit und der Protonendichte. Je nach Einfluss dieser Variablen auf den Kontrast unterscheidet man T1-, T2- und Protonengewichtete Bilder [139, 142, 143]. Bei der wiederholten Anregung einer Schicht ist außerdem mit der Zeitdauer zwischen den Hochfrequenzimpulsen die Repetitionszeit und mit dem Intervall zwischen Impuls und Messung des Signals die Echozeit definiert. Über die Veränderung dieser Zeiten können Bilder unterschiedlich gewichtet und der Kontrast verändert werden (Tabelle 2.8, 2.9 und 2.10).

Kontrastmittel sind paramagnetische Substanzen und verkürzen T1- und T2-Werte. Dies bewirkt eine Signalverstärkung in T1-gewichteten Bildern, jedoch eine Signalabschwächung in T2-Bildern [142].

Tabelle 2.8: Einfluss der Repetitionszeit (TR) und Echozeit (TE) auf die Wichtungsarten eines MRT-Bildes.

Wichtung	TE	TR
T1-Wichtung	kurz	kurz
T2-Wichtung	lang	lang
PD-Wichtung	kurz	lang

Tabelle 2.9: Zeitliche Dimensionen kurzer und langer Echo- bzw. Repetitionszeiten.

Art der Zeit	kurz (in ms)	lang (in ms)
TR	100-600	>1500
TE	5-30	>60

Tabelle 2.10: Relaxationszeiten von Wasser und Fettgewebe sowie Darstellung der unterschiedlichen Gewebearten auf dem MRT-Bild [142, 144].

Gewebeart	T1-Zeit	T2-Zeit	T1-Wichtung	T2-Wichtung
Fett	kurz	kurz	signalreich (hyperintens)	signalarm (hypointens)
Wasser	lang	lang	signalarm (hypointens)	signalreich (hyperintens)

2.3 Radiologische Diagnostik

Nieder- und Hochfeld-Magnetresonanztomographie

Nieder- und Hochfeldmagnetresonanztomographen unterscheiden sich in ihrer Magnetfeldstärke, in der Art der Magneten und in der Regel auch im prinzipiellen Aufbau der Geräte. Sogenannte Hochfeldkernspintomographen arbeiten aktuell üblicherweise mit Magnetfeldstärken von 1-3 Tesla und sind aus einer Spule aufgebaut. Als Niederfeldkernspintomographen werden Geräte mit einer Magnetfeldstärke von 0,1 bis 0,5 Tesla bezeichnet und bestehen aus einem Permanentmagneten. Die deutlich geringere Feldstärke eines Niederfeldkernspintomographen bedingt allerdings auch ein um den Faktor 3 geringeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis, weshalb die Bildqualität im Vergleich zur Hochfeld-MRT eingeschränkt ist. Unabhängig davon sind Kontrastmessungen zwischen Hoch- und Niederfeldkernspintomographen miteinander vergleichbar. Mehrere Studien, die Gelenke mittels eines Niederfeldkernspintomographen untersuchten, stellten eine akzeptable Treffsicherheit dieser Geräte fest [146, 147].

Vor- und Nachteile der MRT

Vorteile des MRTs sind die freie Wählbarkeit der Schichtebene sowie die fehlende Strahlenbelastung. Aufgrund des hervorragenden Weichteilkontrastes stellt die MRT bei der Diagnostik von Band- und Knorpelverletzungen, entzündlichen Prozessen, tumorösen Raumforderungen, okkulten Frakturen ein wichtiges Untersuchungsverfahren dar und gibt darüberhinaus bei Verwendung von Kontrastmitteln Auskunft über die Vitalität knöcherner Strukturen [9, 42].

Hoch- und Niederfeld-MRTs unterscheiden sich jedoch in betrieblicher bzw. systemimmanenter und diagnostischer Hinsicht. Die entsprechenden Vor- und Nachteile der jeweiligen Systeme werden in Tabelle 2.11 dargestellt.

Vorteile der Niederfeld-MRT Die wesentlichen Vorteile des Niederfeld-MRTs bestehen in der einfachen Installation des 0,2 Tesla-Permanentmagneten, dem minimalen Platzbedarf und das im Vergleich zu anderen Geräten geringe Gewicht. Klaustrophobisch belasteten Patienten wird durch die zureichende Kopffreiheit die Angst vor der Untersuchung genommen. Durch den großzügig bemessenen Lagerungstisch sowie der Verwendung einer Off-center-Handgelenksvolumenspule besteht zudem bei Untersuchungen der oberen Extremität, welche in Rückenlage erfolgen, ein hoher Lagerungskomfort des Patienten [148]. Zum einen ermöglicht der hohe Lagerungskomfort eine Schmerzreduktion im betroffenen

2.3 Radiologische Diagnostik

Tabelle 2.11: Unterschiede zwischen Hochfeld- und Niederfeldkernspintomographie

Hochfeldkernspintomographie	Niederfeldkernspintomographie
Systemimmanente Vorteile:	
Abschaltbares System (Einsatz einer Supraleitenden Magneten)	Niedrige Anschaffungskosten
	Niedrige Energiekosten
	Geringer Platzbedarf
	Keine besondere Raumausstattung wie z.B. Kupferauskleidung nötig
	Relativ geringes Gewicht des Systems → Niedrige Anforderungen an Tragfähigkeit des Untergrundes
Systemimmanente Nachteile:	
Hohe Anschaffungskosten	System nicht abschaltbar (Einsatz eines Permanentmagneten)
Hohe Energiekosten	Ab einer Magnetfeldstärke > 0,5 mT: evtl. Betriebsstörung elektrischer Implantate (z.B. Herzschrittmacher)
Hoher Platzbedarf	
Spezielle Räumlichkeiten erforderlich (Kupferauskleidung)	
Hohes Gewicht des Systems → Hohe Anforderung an die Tragfähigkeit des Untergrundes	
Ferromagnetische Anziehung von Gegenständen durch supramagnetischen Leiter → Gefährdungspotential für Patienten und Untersucher	
Betriebsstörung elektrischer Implantate (z.B. Herzschrittmacher)	
Diagnostische Vorteile:	
Hohe Bildauflösung → hohe räumliche und anatomische Detailgenauigkeit	Bequeme Lagerung in Rückenlage (Lagerung der oberen Extremitäten seitlich neben dem Körper)
Grosses Field of view (FoV) → Gesamtübersicht der untersuchten Entität	Offenes Gerätedesign → Keine Beeinträchtigung klaustrophobisch vorbelasteter Patienten
Möglichkeit der spektralen Fettsättigung (T1-Wichtung) → Hohes Frequenzspektrum	Geringe Lärmbelastung
Hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis	Geringe Auswirkung auf ferromagnetische Fremdkörper im Patienten (z.B. Splitter, Implantate)
Diagnostische Nachteile:	
Unbequeme Lagerung (Bauchlage mit Überkopfposition des Armes; in Ausnahmen auch Rückenlage mit Lagerung der Arme entlang des Körpers)	Geringere Bildauflösung → niedrigere anatomische Detailgenauigkeit bei kleinen Strukturen (z.B. Bänder der Hand)
Beeinträchtigung klaustrophobisch vorbelasteter Patienten	Geringes Field of view (FoV) → Eignung nur für Extremitäten und kleine Untersuchungsvolumina
Hohe Auswirkung auf ferromagnetische Fremdkörper im Patienten (Splitter, Implantate)	Keine spektrale Fettsättigung möglich → Niedrigeres Frequenzspektrum (ABER: STIR-Sequenz möglich!)
Hohe Lärmbelastigung	Niedrigeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis

2.3 Radiologische Diagnostik

Areal, d.h. der Patient kann auch längere Untersuchungszeiten schmerzlos überstehen, und zudem können Bewegungsartefakte vermieden werden. Zum anderen stellt sowohl der hohe Komfort als auch die extrem niedrige Lärmbelastung während einer Untersuchung einen weiteren positiven Aspekt dar, womit unter anderem auch die Patienten-Compliance positiv beeinflusst wird und hohe Patientenakzeptanz findet. Trotz der niedrigen Feldstärke des MRTs wird durch die Gabe von gadoliniumhaltigen Kontrastmitteln eine gute Kontrastierung des Gewebes ermöglicht und kleinste entzündliche Prozesse kommen hervorragend zur Darstellung. Durch die hohe Bildqualität ist eine Diagnosestellung im Anfangsstadium und somit ein positiver Einfluss auf Krankheitsverlauf und Therapie gewährleistet [9, 149]. In der Frühdiagnostik von okkulten Frakturen, wie beispielsweise von okkulten Scaphoidfrakturen, ist die MRT der konventionellen Radiographie überlegen und die frühzeitige Indikation für eine MRT-Untersuchung gegeben [42].

Nachteile der Niederfeld-MRT Nachteile des MRTs ergeben sich einerseits aus dem durch die Bauart des Gerätes reduzierten Field of view Fov von ca. 14 cm, welches zwar für kleine Gelenke völlig ausreicht, aber für beispielsweise das Schultergelenk und die Rota-torenmanschette unzureichend ist. Andererseits entstehen Probleme durch die Off-center-Messungen, wie beispielsweise Magnetfeldinhomogenitäten. Darüberhinaus ist die Untersuchungszeit beim MRT im Vergleich zum konventionellen Röntgen viel länger. Limitierende Faktoren bei der Niederfeld-MRT sind unter anderem der geringe Spuleninnendurchmesser sowie die kleine Magnetöffnung.

Kostenfaktor

Die Anschaffungskosten für einen Niederfeldmagnetresonanztomographen liegen mit ca. 250.000 Euro weit unter denen eines Hochfeld-MRTs. Am Institut für Klinische Radiologie der LMU München sind die Betriebs- und Wartungskosten pro Jahr für das Niederfeld-MRT mit etwa ca. 40.000 Euro relativ gering. Die Untersuchungskosten sind je nach Gelenkregion unterschiedlich und nach dem 1-fachen Satz berechnet. Gemäß GOA sind für MRT-Aufnahmen eines oder mehrerer Gelenke oder Abschnitte von Extremitäten 2400 Punkte (139,89 Euro) veranschlagbar. Ergänzende Serien können mit 1000 Punkten (58,29 Euro), eine Kontrastmittelinkjektion (i.v. mehr als 10 Minuten) mit 130 Punkten (7,58 Euro) in Rechnung gestellt werden. Zusätzlich kann ein Zuschlag von 80 Punkten (6,63 Euro) für die computergesteuerte Analyse berechnet werden [137]. Insgesamt liegen die Kosten für eine Untersuchung mit einem Niederfeld-MRT circa zwischen 146,52 und 212,39 Euro.

3 Zielsetzung der Arbeit

Die Kernspintomographie ist wegen ihres hervorragenden Weichteilkontrastes Untersuchungsverfahren der Wahl bei entzündlichen und tumorösen Prozessen, sowie Sehnen-Band-Verletzungen, okkulten Frakturen, bei Verdacht auf Begleitverletzungen der Weichteile und avaskulären Knochennekrosen [9, 150]. Der Einsatz der Hochfeld-MRT wird in der Routinediagnostik von akuten und chronischen Hand- und Handgelenksschmerzen durch hohe Untersuchungskosten und meist limitierte Untersuchungskapazitäten begrenzt. Das Niederfeld-MRT, als vergleichsweise günstiges Untersuchungsverfahren, bietet hierzu eine Alternative. Ihr Stellenwert in der Routinediagnostik des akuten und chronischen Handgelenksschmerzes wurde allerdings noch nicht ausreichend untersucht.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Wertigkeit der Niederfeld-MRT in der Diagnostik des akuten und chronischen Hand- und Handgelenksschmerzes im Vergleich zur initial durchgeföhrten Projektionsradiographie für ein definiertes Patientenkollektiv. Die Möglichkeiten und Grenzen, sowie die Relevanz eines Niederfeldkernspintomographen in der Routinediagnostik einer chirurgischen Ambulanz sollen herausgearbeitet werden.

Die routinemäßige Einsetzbarkeit der Niederfeld-MRT setzt zudem voraus, dass die Befundung sicher und reproduzierbar ist. Um die Intra- und Interobserver-Variabilität des Verfahrens zu ermitteln, wurden deshalb aus dem Patientengut 44 repräsentative Fälle selektiert und durch zwei Radiologen mit unterschiedlichem Kenntnisstand, welche nicht an der Initialbefundung teilgenommen hatten, in zwei Durchgängen befundet und die entsprechenden Variabilitäten berechnet.

Folgende Fragestellungen wurden vor diesem Hintergrund in der vorliegenden Arbeit bearbeitet.

1. Lässt sich der routinemäßige Einsatz einer Niederfeldkernspintomographie bei akuten und chronischen Handgelenksschmerzen in einer chirurgischen Ambulanz durch eine qualitative Verbesserung der Diagnosesicherung rechtfertigen?
2. Inwieweit differieren die anhand projektionsradiographischer und niederfeldtomographischer Aufnahmen erstellten Diagnosen zwischen den einzelnen Befunden?

Aus diesen Zielsetzungen ergeben sich folgende methodische Anforderungen:

1. Erstellung einer klinischen Datenbank aller Hand- und Handgelenksverletzungen in der Chirurgischen Klinik und Poliklinik des Klinikums Innenstadt der Ludwig-Maximilians-Universität München.
2. Auswertung der Daten mittels statistischer Verfahren sowie deren Interpretation.
3. Ausarbeitung eines Beurteilungsbogens für die Begutachtung eines ausgewählten Patientenkollektivs von 44 Personen mit akutem oder chronischem Hand- und Handgelenksschmerz für die Begutachtung der Aufnahmen durch ein Untersuchungsteam aus zwei Radiologen.
4. Anwendung und Interpretation statistischer Verfahren zur Bestimmung der Intra- und Interobserver-Variabilität.

4 Material und Methoden

4.1 Studiendesign

Die Chirurgische Klinik und Poliklinik des Klinikums Innenstadt der Ludwig-Maximilians-Universität München verfügt sowohl über eine große allgemeinchirurgische Ambulanz mit angegliederter Schockraumversorgung, als auch über zahlreiche Spezialambulanzen, z.B. aus den Bereichen Handchirurgie, Fußchirurgie, Gefäßchirurgie, und weiterer. In einer retrospektiven Analyse wurden Röntgenuntersuchungen im Auftrag der chirurgischen Ambulanz der Klinik an der Nußbaumstraße analysiert und handspezifische Fragestellungen wie Frakturdiagnostik oder Abklärung chronischer Handgelenksprobleme isoliert. Für den Zeitraum von Anfang 2003 bis Ende 2004 konnten auf diese Weise 500 Behandlungsfälle identifiziert werden, welche potentiell in die vorliegende Auswertung hätten eingeschlossen werden können. Nach Ausschluß von Patienten mit fehlenden projektionsradiographischen Untersuchungen ($n = 151$), projektionsradiographischen Verlaufskontrollen ($n = 60$) oder unzureichenden klinischen Informationen zu Anamnese, Klinik und Verlauf ($n = 54$) konnten letztendlich 235 Behandlungsfälle in die vorliegende Auswertung eingeschlossen werden.

4.2 Patientenkollektiv

Das Patientenkollektiv bestand aus 235 Patienten und setzte sich aus 104 (44,3 %) weiblichen und 131 (55,7 %) männlichen Teilnehmern zusammen. Das Durchschnittsalter betrug 41,75 Jahre, die ältesten Patienten waren 84 Jahre, der jüngste war 2 Jahre alt. Die Altersverteilung des Patientenkollektivs ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

4.3 Behandlungsablauf

Der typische Behandlungsgsfall hat sich folgendermaßen dargestellt:

Zuerst wurde anhand der klinischen Untersuchung der Hand bzw. des Handgelenks, die durch einen Arzt in der chirurgischen Ambulanz erfolgte, eine klinische Verdachtsdiagnose gestellt. Daraufhin wurde in Rücksprache mit einem Facharzt der Chirurgie die Indikation

4.4 Bildgebung

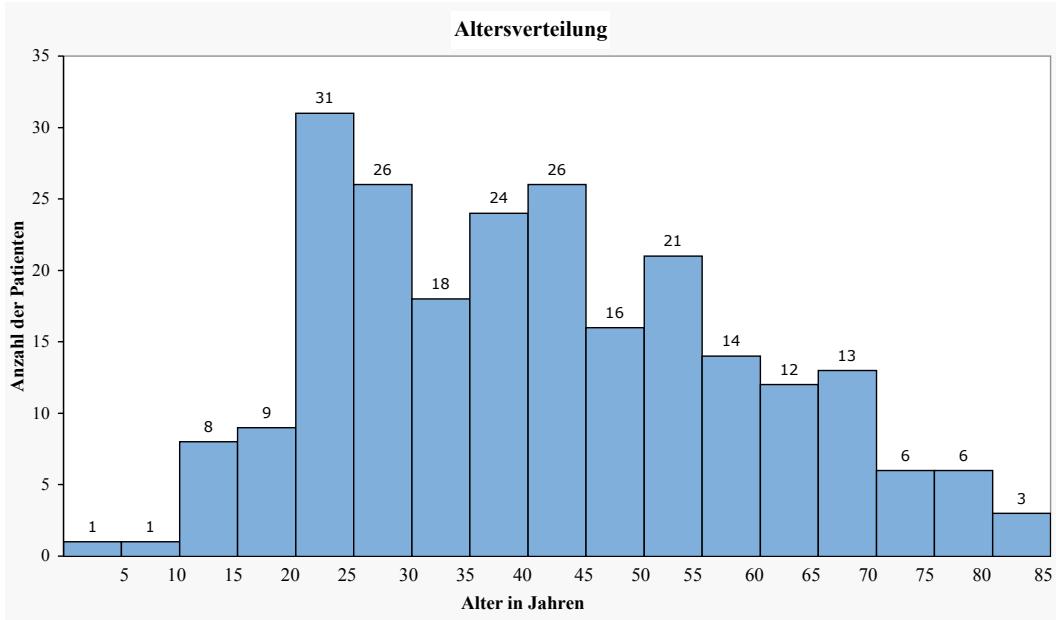


Abbildung 4.1: In diesem Säulendiagramm wird die Altersverteilung des untersuchten Patientenkollektivs dargestellt. Das Durchschnittsalter betrug 41,75 Jahre.

zur Durchführung bildgebender Verfahren wie der Projektionsradiographie und Niederfeldkernspintomographie gestellt. Diese wurden im Institut für klinische Radiologie der LMU unter Einhaltung der gängigen Leitlinien durchgeführt und anschließend befundet.

4.4 Bildgebung

Dafür wurden folgende Untersuchungsverfahren im Institut für Klinische Radiologie der LMU verwendet:

4.4.1 Projektionsradiographie

Grundsätzlich wurden von der betroffenen Entität mindestens zwei projektionsradiographische Aufnahmen in zwei unterschiedlichen Ebenen angefertigt und falls nötig durch weitere Spezialaufnahmen ergänzt. Die Aufnahmen wurden standardmäßig und entsprechend den aufnahmetechnischen Leitlinien gemäß folgendem Röntgenprotokoll (Tabellen 4.1, 4.2) durchgeführt.

4.4 Bildgebung

Tabelle 4.1: Tabellarische Darstellung der Standardaufnahmen des Handgelenks

Standardmäßige Aufnahmen in 2 Ebenen als Basisdiagnostik des Handgelenks	
Handgelenk dorsopalmar:	
<i>Indikationen:</i>	<ul style="list-style-type: none"> Übersichtsaufnahme bei Frakturen, Luxationen, entzündlichen, degenerativen und tumorösen Erkrankungen
<i>Lagerung:</i>	<ul style="list-style-type: none"> Patient sitzt neben dem Tisch, 90° Flexion im Ellenbogengelenk vollständige Auflage des Unterarms und Handgelenks auf dem Lagerungstisch Handgelenk mit volarer Seite auf Kassette aufliegend gestreckte Mittelfinger in Unterarm längsachse
<i>Zentralstrahl:</i>	<ul style="list-style-type: none"> Zentrierung des Zentralstrahls senkrecht auf die Mitte des Radiokarpalgelenks und Kassettenmitte Oberer Kassettenrand ca. 1 Querfinger distal der Metakarpaliaköpfchen
<i>Gütekriterien:</i>	<ul style="list-style-type: none"> vollständige und scharfe Abbildung des Handgelenks (distaler Unterarm, Karpalia, Metakarpaliaköpfchen) Orthograde Projektion des Processus styloideus ulnae an der lateralen Ulnaseite
Handgelenk lateral:	
<i>Indikationen:</i>	<ul style="list-style-type: none"> Übersichtsaufnahme bei Frakturen, Luxationen, entzündlichen, degenerativen und tumorösen Erkrankungen
<i>Lagerung:</i>	<ul style="list-style-type: none"> Patient sitzt seitlich neben dem Tisch 90° Flexion im Ellenbogengelenk seitliche Ablage des gesamten Unterarms auf dem Lagerungstisch seitliche Auflage des Handgelenks mit Kleinfingerseite auf der Kassette Mittelfinger und Daumen gestreckt
<i>Zentralstrahl:</i>	<ul style="list-style-type: none"> Zentrierung des Zentralstrahls senkrecht auf die Mitte des Radiokarpalgelenks und Kassettenmitte Distaler Kassettenrand ca. 2 Querfinger distal der Metakarpaliaköpfchen
<i>Gütekriterien:</i>	<ul style="list-style-type: none"> vollständige und scharfe Abbildung des Handgelenks (distaler Unterarm, Karpalia, Metakarpaliaköpfchen) Projektion von distalem Radius, distaler Ulna und der Metakarpalia II-V aufeinander

4.4 Bildgebung

Tabelle 4.2: Tabellarische Darstellung der Standardaufnahmen der Hand

Standardmäßige Aufnahmen in 2 Ebenen als Basisdiagnostik der Hand	
Hand dorsovolar:	
<i>Indikationen:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Arthrose, Luxation, Fraktur, Fremdkörper, tumoröse und entzündliche Erkrankungen
<i>Lagerung:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Patient sitzt seitlich neben dem Tisch • Unterarm und Handfläche palmarseitig der Kassette aufliegend • Leichte Spreizung der Finger • Grundgelenk des 3. Fingers in Filmmitte
<i>Zentralstrahl:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Zentrierung des Zentralstrahls senkrecht dorso-palmar auf das Mittelfingergrundgelenk
<i>Gütekriterien:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Darstellung der Hand einschließlich Fingerkuppen und Handgelenk • Beurteilung der Interphalangealgelenke sowie der Metakarpophalangealgelenke möglich
Hand schräg:	
<i>Indikationen:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Arthrose, Luxation, Fraktur, Fremdkörper, tumoröse und entzündliche Erkrankungen
<i>Lagerung:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Patient sitzt seitlich neben dem Tisch • Unterarm und Handgelenk liegen schräg, ca. 45°, ulnarseitig in voller Länge auf • Fingerkuppen auf Kassette aufliegend mit leichter Spreizung der Finger
<i>Zentralstrahl:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Zentrierung des Zentralstrahls senkrecht dorsol-palmar zwischen die Mittelfingergrundgelenke II und III
<i>Gütekriterien:</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Vollständige Darstellung der Handwurzelknochen, Mittelhandknochen und Finger

4.4 Bildgebung

Technische Daten der Projektionsradiographie

Für die Untersuchung des Handgelenks und der Hand kam ein digitales Speicherfoliensystem der Firma AGFA-GmbH zum Einsatz. Es wurden Kassetten mit den Formaten 18x24 cm bzw. 24x30 cm verwendet. Die Empfindlichkeitsklasse (EK) der Film-Folien-Systeme der Röntgengeräte lag zwischen 100 und 200, der Fokus-Film-Abstand betrug 105 cm. Bei einer Aufnahmespannung von 50 kV wurden die Untersuchungen auf dem vorgesehenen Lagerungstisch durchgeführt.

4.4.2 Niederfeldkernspintomographie

Untersuchungen der Hand- und des Handgelenks wurden anhand des folgenden Untersuchungsprotokolls (Tabelle 4.3) standardmäßig durchgeführt und evtl. bei speziellen Fragestellungen durch Zusatzsequenzen ergänzt (Tabelle 4.4).

Technische Daten Niederfeldkernspintomographie

Bei den Untersuchungen kam das dedizierte NiederfeldSystem MAGNETOM Jazz (Siemens AG Medizintechnik, Erlangen) zum Einsatz. Es handelt sich hierbei um ein Niederfeld-MRT mit einer Feldstärke von 0,2 Tesla. Die optimale Bauweise des Systems ermöglicht eine einfache Installation des 0,2 Tesla-Permanentmagneten auf einer kleinen Grundfläche von ca. 150 auf 250 cm, bei einem Gewicht von ca. 2000 kg. Insgesamt lässt sich das nach drei Seiten offene System auf einer minimalen Grundfläche von ca. 4m x 4,5m x 2,4m unterbringen. Zusätzlich verfügt das System über einen um 180° schwenkbaren Untersuchungstisch. Der Spuleninnendurchmesser liegt zwischen 80 und 218 Quadratzentimetern, bei einer Magnetfeldöffnung von ca. 40 cm. Die maximale Gradientenfeldstärke liegt bei 20mT/m, die minimale Anstiegszeit beträgt 800ys. Das Field of view (FoV) beträgt in etwa 14 cm. Dual-Phased-Array-Spulen ermöglichen Untersuchungen der Hand, des Handgelenks, des Ellenbogengelenks, des Schultergelenks, sowie des Knie- und Sprunggelenks. Die Untersuchungsdauer betrug in etwa 20-40 Minuten. Das System ermöglicht einen Einsatz unterschiedlichster Sequenzen, wie z.B. STIR (short tau inversion recovery), Gradientenecho-, Spinecho-, als auch Turbo-Spinecho-Sequenzen. Die einfache Bedienung sowie mehrsprachige Anleitungen des Gerätes stellen für das Personal wesentliche Erleichterungen dar. Durch einen grosszügig bemessenen Lagerungstisch besteht zudem bei Untersuchungen der oberen Extremität, welche in Rückenlage erfolgen, ein hoher Lagerungskomfort. Als Kontrastmittel wurde das Gadoliniumpräparat Magnevist in einer Dosis von 0,3ml/kg Körpergewicht verwendet (Abbildung 4.2 und 4.3).

4.4 Bildgebung

Tabelle 4.3: Standardmäßige MRT-Sequenzen in der Diagnostik von Verletzungen des Handgelenks und der Hand

Standardmäßige Sequenzen als Übersichtsaufnahmen						
Indikationen:	<ul style="list-style-type: none"> Als Standardaufnahmen bei allen Hand- und Handgelenksverletzungen wie Frakturen, Distorsionen, Fehlstellungen, Luxationen, Arthrose/Arthritis, Band- und Diskusläsionen, Tendovaginitiden, Tumoren, Raumforderungen, Karpaltunnelsyndrom, Fremdkörpern 					
Lagerung:	<ul style="list-style-type: none"> Arm liegt gestreckt entlang des Körpers 					
Aufnahme:	Gewichtung:	Sequenzen:	Schnittführung:	Schichtdicke:	Nativ / KM:	Fragestellung / Indikation:
1.	T1	SE / GE	koronar	2mm	nativ	Übersichtsaufnahme und Beurteilung von Bändern und TFCC
2.	T2	STIR	koronar	2mm	nativ	Übersichtsaufnahme und Nachweis eines Knochenödems bei Frakturen
3.	T2	TSE	transversal	3mm	nativ	Übersichtsaufnahme und Nachweis eines Ödems in Sehnscheiden, Weichteilen, Ganglien
<i>optional</i>	T1	SE / GE	transversal	3mm	nativ	Übersichtsaufnahme und Nachweis eines Ödems in Sehnscheiden, Weichteilen, Ganglien
<i>optional</i>	T1	SE / GE	sagittal	2mm	nativ	Verdacht auf karpale Gefügestörung, TFCC-Läsion, Sehnenpathologien

4.4 Bildgebung

Tabelle 4.4: Spezielle MRT-Sequenzen in der Diagnostik von Verletzungen des Handgelenks und der Hand

Spezial- bzw. Zielaufnahmen bei bestimmten Fragestellungen						
KM-Gabe:	<ul style="list-style-type: none"> Nach i.v.-Injektion (Gd-DTPA, 0,2 mmol/kg KG) wenn möglich für 20-30 Min. gute Durchbewegung des Handgelenks bis zur Untersuchung 					
Indikationen:	<ul style="list-style-type: none"> Riss im Discus triangularis ulnaris, Bandläsionen Fremdkörper, Kapselrisse 					
Lagerung:	<ul style="list-style-type: none"> Arm liegt gestreckt entlang des Körpers 					
Aufnahme:	Gewichtung:	Sequenz:	Schnittführung:	Schichtdicke:	Nativ / KM:	Fragestellung / Indikation:
	T1	SE / GE	koronar	2mm	mit KM	Verdacht auf entzündliche Prozesse, Raumforderungen, Diskusläsion, Sehnenpathologien
	T1	SE / GE	transversal	3mm	mit KM	Verdacht auf frische Bandläsion
	T1	SE / GE	sagittal	2mm	mit KM	Gute Beurteilung bei Verdacht auf Diskusläsion

4.4 Bildgebung



Abbildung 4.2: Darstellung des offenen Systems des verwendeten Niederfeldkernspintomographen, welcher einen hohen Lagerungskomfort gewährleistet.



Abbildung 4.3: Darstellung der Extremitätenspule des Niederfeldkernspintomographen

4.5 Allgemeine Bildbefundung

4.5 Allgemeine Bildbefundung

Die visuelle Befundung der projektionsradiographischen und kernspintomographischen Aufnahmen der 235 Patienten erfolgte im Konsensus zwischen einem/r Facharzt/-ärztin der Radiologie und einem/r Arzt/Ärztin in der radiologischen Weiterbildung am Institut für Klinische Radiologie der LMU. Unter Berücksichtigung bildmorphologischer und krankheitsspezifischer Aspekte der Aufnahmen erfolgte zuerst eine Beurteilung der projektionsradiographischen Aufnahmen mit anschließender Diagnosestellung. Dabei wurde gegebenenfalls die Empfehlung zur Durchführung einer Untersuchung mittels einer Niederfeld-kernspintomographie geäußert. Nach Beurteilung der kernspintomographischen Aufnahmen wurde entsprechend der Bildmorphologie ebenfalls eine Diagnose gestellt.

4.6 Ermittlung der Intra-und Interobserver-Variabilität

Zur Ermittlung der Intra- und Interobserver-Variabilität wurden zunächst aus den 235 Patienten 44 repräsentative Fälle aus folgenden Erkrankungsgruppen im Rahmen eines Consensus-Readings durch zwei erfahrene Radiologen ausgesucht: akutes Trauma- Distale Radiusfraktur, Skaphoidfraktur, Diskusläsion und Rupturen des Sehnen-/Bandapparates, sowie für den chronischen Hand- bzw. Handgelenksschmerz die Diskusläsion, Entzündungen, Ganglien und Raumforderungen. Es wurden jeweils fünf bzw. sechs Patienten für jede Gruppe selektiert. Dabei wurde die ursprüngliche Diagnose verifiziert und final als Zieldiagnose festgelegt. Zwei weitere Radiologen mit unterschiedlichem Kenntnisstand, welche nicht an der Initialbefundung bzw. an dem Consensus-Reading teilgenommen hatten und hinsichtlich der Krankengeschichte des Patienten geblendet waren, mussten in zwei zeitlich voneinander getrennten Sitzungen mit einem Abstand von zwölf Wochen alle 44 Aufnahmen anhand eines ausgearbeiteten Beurteilungsbogens befunden (Tabelle 4.5). Zielgröße war dabei die zuvor festgelegte Diagnose.

4.7 Datenauswertung

Bei dem gesamten Patientengut ($n = 235$) wurden die durch den Radiologen gestellten Diagnosen acht unterschiedlichen Krankheitsbildern zugeordnet (Distale Radiusfraktur, Skaphoidfraktur, sonstige Handwurzelfrakturen, Bandverletzungen, TFCC-Läsionen, Skaphoidpseudarthrose, Raumforderungen, andere Pathologien), welche in Kapitel 2 näher beschrieben wurden. Die einzelnen Krankheitsbilder wurden wiederum folgendermaßen

4.7 Datenauswertung

Tabelle 4.5: Beurteilungsbogen der Niederfeld-MRT- Aufnahmen für unterschiedliche Befunder/innen zu verschiedenen Zeitpunkten der Inspektion

<u>Beurteilungsbogen</u>		
Name Befunder/in:		
Zeitpunkt der Inspektion:		
Patienten:	Diagnosen im Niederfeld-MRT	
	Hauptdiagnose:	Nebendiagnose:
Patient 1		
Patient 2		
Patient 3		
Patient 4		
Patient 5		
Patient 6		
Patient 7		
Patient 8		
Patient 9		
Patient 10		
Patient 11		
Patient 12		
Patient 13		
Patient 14		
Patient 15		
Patient 16		
Patient 17		
Patient 18		
Patient 19		
Patient 20		
Patient 21		
Patient 22		
Patient 23		
Patient 24		
Patient 25		
Patient 26		
Patient 27		
Patient 28		
Patient 29		
Patient 30		
Patient 31		
Patient 32		
Patient 33		
Patient 34		
Patient 35		
Patient 36		
Patient 37		
Patient 38		
Patient 39		
Patient 40		
Patient 41		
Patient 42		
Patient 43		
Patient 44		

4.8 Statistik

unterteilt: Diagnose “sicher pathologisch“, Diagnose “unsicher“ (Verdacht auf), Befund “unauffällig“ (Ausschluss). Anschließend wurde evaluiert, ob der Befund in der Projektionsradiographie mit dem der Kernspintomographie übereinstimmte oder differierte. Für die ausgewählten 44 Untersuchungsfälle wurden die Beurteilungsbögen bezüglich der Inter- bzw. Intraobserver- Variabilität ausgewertet (siehe Kapitel 4.6).

4.8 Statistik

4.8.1 Allgemeine Statistik

Zur statistischen Auswertung wurde SPSS 16.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) verwendet. Als statistisches Testverfahren wurde der Exakte Test nach Fisher verwendet, welcher von dem britischen Statistiker Ronald Aylmer Fisher begründet wurde. Der Exakte Test nach Fisher ist ein Signifikanztest auf Unabhängigkeit in der Kontingenztafel und liefert auch bei einer geringen Anzahl von Beobachtungen zuverlässige Resultate. Er entspricht im Anwendungsgebiet dem Chi-Quadrat-Test, welcher für unabhängige Variablen mit qualitativen Merkmalen angewendet wird. Die dafür verwendete Kontingenztafel besteht aus einer 3x3 Matrix, in der Befunde der Projektionsradiographie und Niederfeldkernspintomographie miteinander verglichen werden. Hierbei werden dem Merkmal “Befund“ folgende Merkmalsausprägungen zugewiesen: “sicher pathologisch“, “unsicher“, “unauffällig“ je für die Projektionsradiographie und Niederfeldkernspintomographie. Es wurde anschließend geprüft, ob sich die Ergebnisse der Projektionsradiographie und der Niederfeldkernspintomographie signifikant voneinander unterscheiden. Die statistische Signifikanz des Exakten Tests nach Fisher wird als Irrtumswahrscheinlichkeit p ausgedrückt, welche bei einem Wert von $p < 0,001$ als hoch signifikant, bei einem Wert von $p < 0,01$ als sehr signifikant, bei einem Wert $p < 0,05$ als signifikant und bei einem Wert $p > 0,05$ als nicht signifikant gewertet werden.

Des Weiteren wurden für die konventionelle Projektionsradiographie folgende Qualitätsmerkmale für die unterschiedlichen Krankheitsbilder berechnet: Sensitivität, Spezifität, positiver prädiktiver Wert (PPW), negativer prädiktiver Wert (NPW).

4.8.2 Bestimmung der Intra- und Interobserver-Variabilität

Die Intra- und Interobserver-Variabilität wurde ermittelt durch eine Analyse der Intraklassen-Korrelation für beide Auswerter und beide Befundungsdurchgänge. Die Intraklassen-Korrelation nimmt dabei Werte zwischen -1 und +1 an, wobei ein Wert nach +1 eine besonders

4.8 Statistik

starke Übereinstimmung und damit eine niedrige Variabilität bedeutet. Für die Intraklassen-Korrelation gelten die gleichen Signifikanzniveaus wie bereits oben erwähnt.

5 Ergebnisse

Der Vergleich verschiedener Methoden, wie in der vorliegenden Arbeit zwischen der Niederfeld-MRT und der konventionellen Projektionsradiographie, wird üblicherweise anhand einer Feldertafel mit einer Übersicht der analysierten Zustände und der Angabe von Qualitätsmerkmalen der Methode umgesetzt. Üblicherweise handelt es sich um eine Vierfeldertafel und die Angabe von Sensitivität und Spezifität, sowie positivem und negativem prädiktivem Wert. In einer Vierfeldertafel können höchstens vier verschiedene Zustände erfasst werden. Ein im klinischen Alltag wichtiger Parameter, der “(dringende) Verdacht auf“ das Vorliegen einer pathologischen Veränderung, könnte so nicht angemessen dargestellt werden. Eine Einschränkung auf die Zustände “unauffällig“ und “sicher pathologisch“ würde damit wertvolle Informationen unberücksichtigt lassen, die aber durchaus von klinischer Relevanz sind, beispielsweise für die Einleitung weiterer diagnostischer oder therapeutischer Maßnahmen. Auch würden diese Zahlen nicht der tatsächlichen diagnostischen Wertigkeit der konventionellen Projektionsradiographie gerecht werden. Hier kann, wie zum Beispiel bei der distalen Radiusfraktur, nur in 46 % (18/39) der Fälle eine sichere Diagnose gestellt werden. Allerdings werden die restlichen 64 % nicht komplett übersehen, vielmehr wird bei weiteren 30 % (8/39) der Verdacht geäußert. Insgesamt werden bei 76 % (26/39) der Patienten eine Therapie oder zumindest eine eingehende Folgeuntersuchung eingeleitet. Folglich wurde für die Berechnung von Sensitivität und Spezifität, sowie positivem und negativem prädiktiven Wert zwischen dem Zustand unauffällig und auffällig (unsicher plus sicher pathologisch) unterschieden. In der nachfolgenden Vierfeldertafel (siehe Tabelle 5.1) werden die unterschiedlichen Krankheitsbilder bei akutem und chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz mit Angabe der Qualitätsmerkmale (Sensitivität, Spezifität, positiver prädiktiver Wert, negativer prädiktiver Wert) der konventionellen Projektionsradiographie dargestellt.

Tabelle 5.1: Vierfeldertafel mit Qualitätsmerkmalen der konventionellen Projektionsradiographie bei akutem oder chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

Art der Schmerzen	Betroffene Strukturen	Bildgebendes Verfahren	Projektions-radiographie			Qualitätsmerkmale				
			auffällig	unauffällig	gesamt	Sensitivität (%)	Spezifität (%)	PPW	NPW	
Akute Schmerzen (136 Patienten)	Distale Radiusfrakturen	MRT	auffällig	27	13	40	67,50	95,83	0,8710	0,8762
			unauffällig	4	92	96				
			gesamt	31	105	136				
	Skaphoidfrakturen	MRT	auffällig	15	15	30	50	86,8	0,5556	0,8624
			unauffällig	12	94	106				
			gesamt	27	109	136				
	Andere Frakturen	MRT	auffällig	12	18	30	40	94,34	0,6667	0,8475
			unauffällig	6	100	106				
			gesamt	18	118	136				
Chronische Schmerzen (99 Patienten)	Rupturen Bänder/Sehnen	MRT	auffällig	14	43	57	24,56	92,41	0,7	0,6293
			unauffällig	6	73	79				
			gesamt	20	116	136				
	Diskusläsionen	MRT	auffällig	1	46	47	2,13	98,88	0,5	0,6567
			unauffällig	1	88	89				
			gesamt	2	134	136				
	Sonstige Pathologien	MRT	auffällig	25	0	25	100	0	0,1838	n.m.
			unauffällig	111	0	111				
			gesamt	136	0	136				
Raumforderungen	Rupturen Bänder/Sehnen	MRT	auffällig	4	15	19	21,05	97,5	0,6667	0,8387
			unauffällig	2	78	80				
			gesamt	6	93	99				
	Diskusläsionen	MRT	auffällig	1	29	30	3,33	100	1	0,7041
			unauffällig	0	69	69				
			gesamt	1	98	99				
	Sonstige Pathologien	MRT	auffällig	21	21	42	50	75,44	0,6	0,6719
			unauffällig	14	43	57				
			gesamt	35	64	99				
	Raumforderungen	MRT	auffällig	11	33	44	25	96,36	0,8462	0,6163
			unauffällig	2	53	55				
			gesamt	13	86	99				

Da die sichere Diagnosestellung aber ein wichtiges Merkmal einer Untersuchungsmethode ist, wurde diese in einer gesonderten Tabelle aufgeführt (siehe Tabelle 5.2). In dieser Tabelle sind die Häufigkeiten aller sicheren Diagnosen der unterschiedlichen Krankheitsbilder bei akutem oder chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz in den beiden bildgebenden Verfahren übersichtlich dargestellt, ohne Bezugnahme auf den einzelnen Patienten. Außerdem wurden die beiden als "auffällig" zusammengefassten Befunde in der Feldertafel weiterhin differenziert und bei der Betrachtung der einzelnen Krankheitsbilder getrennt aufgeführt. In der statistischen Betrachtung wurde dementsprechend herausgearbeitet, in wie vielen Fällen die Projektionsradiographie entweder unauffällig war, oder zumindest den Verdachtsbefund ergab oder gar zur Diagnosesicherung ausreichte. Dies hat die Darstellung in einer Kreuztabelle mit neun Feldern zur Folge. Die im Ergebnisteil dargestellten Kreuztabellen beziehen sich auf das Patientenkollektiv mit entweder akutem oder chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz. Von insgesamt 235 untersuchten Patienten lag bei 136 Patienten ein akuter, bei 99 Patienten ein chronischer Hand- bzw. Handgelenksschmerz vor.

Für die Angabe oben genannter Qualitätsmerkmale ist der Vergleich der angewandten Methoden auf einen Goldstandard notwendig. Über die herausragenden Eigenschaften der Niederfeld-MRT in der Diagnostik von Knochen-, Sehnen- und Bandverletzungen wurde bereits 1997 von Bonel et al. berichtet [7]. Auch andere Autoren berichteten über die hohe Qualität dieses Untersuchungsverfahrens in der Diagnostik traumatischer Verletzungen der distalen Extremitäten [6, 151–154]. Auch wenn die Literatur eine hohe Sensitivität und Spezifität der Untersuchung mittels Niederfeld-MRT belegt, so erreicht sie sicherlich nicht die Aussagekraft einer invasiven Maßnahme, beispielsweise einer Arthroskopie oder der intraoperativen Befundung durch den Chirurgen. Da dieser Goldstandard praktisch nicht vorhanden ist und der routinemäßige Einsatz einer Arthroskopie vor dem Hintergrund einer Risiko-/Nutzenabwägung nicht vertretbar erscheint, haben sich auch in der Literatur behelfsmäßige Referenzstandards durchgesetzt [155]. Um überhaupt eine orientierende Aussage hinsichtlich des qualitativen Vergleichs von Niederfeld-MRT und konventioneller Projektionsradiographie treffen zu können, wurde, wie auch in der Literatur beschrieben, eine von zwei erfahrenen Ärzten befundete Niederfeld-MRT-Aufnahme als Referenzstandard herangezogen.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

Tabelle 5.2: Übersicht der Häufigkeiten der unterschiedlichen Krankheitsbilder bei akutem oder chronischem Hand-bzw. Handgelenksschmerz

Art der Schmerzen	Betroffene Strukturen	Häufigkeit der Diagnosen im Niederfeld-MRT	Häufigkeit der Diagnosen in der Projektionsradiographie
Akute Schmerzen (136 Patienten)	Distale Radiusfrakturen	39	18
	Skaphoidfrakturen	30	5
	Rupturen Bänder/Sehnen	30	0
	Diskusläsionen	32	0
	Andere Frakturen	28	9
	Sonstige Pathologien	25	0
	Gesamt:	184	32
Chronische Schmerzen (99 Patienten)	Rupturen Bänder/Sehnen	10	1
	Diskusläsionen	17	0
	Raumforderungen	41	6
	Sonstige Pathologien	41	19
	Gesamt:	109	26
Gesamtzahl aller Verletzungen:		293	58

Von den 136 Patienten mit akutem, bzw. den 99 Patienten mit chronischem Hand-bzw. Handgelenksschmerz fiel der Befund der Projektionsradiographie und der Niederfeldkernspintomographie jeweils auffällig oder unauffällig aus (Tabelle 5.3).

Tabelle 5.3: Übersicht aller auffälligen/unauffälligen Befunde in der Projektionsradiographie bzw. Niederfeldkernspintomographie bei akutem oder chronischem Hand-bzw. Handgelenksschmerz

Art der Schmerzen	Art der Bildgebung	Art des Befundes bezogen auf die einzelnen Patienten	
		auffällig	unauffällig
Akute Schmerzen (136 Patienten)	Projektionsradiographie	85	51
	Niederfeld-MRT	125	11
Chronische Schmerzen (99 Patienten)	Projektionsradiographie	46	53
	Niederfeld-MRT	67	32

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

Hierunter wurden die distalen Radiusfrakturen, Skaphoidfrakturen und andere Frakturen aufgeführt, welche durch ein akutes Hand-bzw. Handgelenkstrauma verursacht wurden.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

5.1.1 Distale Radiusfraktur

Bei den 136 Patienten konnte mittels MRT in 39 Fällen eine distale Radiusfraktur gesichert werden. Nur in 46,2 % dieser Fälle war die Fraktur auch in der Projektionsradiographie nachweisbar, in 30,8 % war die Projektionsradiographie unauffällig (falsch-negativ) und in 23,1 % zumindest unsicher im Sinne der Fragestellung. In insgesamt 20 Fällen war hingegen in der Projektionsradiographie eine distale Radiusfraktur gesichert worden, welche sich mittels MRT in 90,0 % sichern ließ. Nur in 2 Fällen lag somit ein falsch-positives Ergebnis vor. In einem Fall (1 %) blieben sowohl die Projektionsradiographie als auch die MRT ohne abschließendes Ergebnis bzw. war der Befund einer distalen Radiusfraktur auch in der MRT allenfalls unsicher. In 2 Fällen (2,1 %) konnte bei unsicherem Befund in der Projektionsradiographie in der MRT eine Pathologie ausgeschlossen werden. Insgesamt liegt ein Signifikanzniveau von $p < 0,001$ vor (Tabelle 5.4). Für die Projektionsradiographie zeigte sich eine Sensitivität von 67,7 %, eine Spezifität von 95,83 %, ein PPW von 0,87 sowie ein NPW von 0,87.

Tabelle 5.4: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für die Distale Radiusfraktur bei Patienten mit Z.n. akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma ($p < 0,001$)

Kreuztabelle: Distale Radiusfraktur bei akutem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE			
			unauffällig	unsicher	sicher pathologisch	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	92	2	2	96
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	95,8%	2,1%	2,1%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	87,6%	18,2%	10,0%	70,6%
	unsicher	Anzahl	1	0	0	1
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	100,0%	,0%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	1,0%	,0%	,0%	,7%
	sicher pathologisch	Anzahl	12	9	18	39
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	30,8%	23,1%	46,2%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	11,4%	81,8%	90,0%	28,7%
	gesamt	Anzahl	105	11	20	136
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	77,2%	8,1%	14,7%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

Nebenbefundlich konnten insgesamt 47 Nebendiagnosen im Niederfeld-MRT diagnostiziert werden (Tabelle 5.5). Am häufigsten konnten hierbei sonstige Pathologien (15 Fälle) diagnostiziert werden, gefolgt von den Diskusläsionen (11 Fälle). Andere Frakturen wurden in insgesamt sieben Fällen, Verletzungen des Band- und Sehnenapparates sowie Skaphoidfrakturen in jeweils sechs Fällen nebenbefundlich festgestellt.

Tabelle 5.5: Art und Häufigkeiten der Nebendiagnosen bei der distalen Radiusfraktur im Niederfeld-MRT

Nebendiagnosen bei der <u>Distalen Radiusfraktur</u> im Niederfeld-MRT	
Art der Nebendiagnose	Häufigkeit der Nebendiagnose im Niederfeld-MRT
Skaphoidfraktur	6
Verletzung des Band-/Sehnenapparates	6
Diskusläsion	11
Raumforderung	2
Andere Frakturen	7
Sonstige Pathologien	15
Gesamt	47

Repräsentative Bilder der Distalen Radiusfraktur in der Projektionsradiographie und der Niederfeldkernspintomographie sind in folgenden Abbildungen 5.1 und 5.2 dargestellt.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen



Abbildung 5.1: Patient, 66 Jahre, Z.n. Sturz. Projektionsradiographie der rechten Handwurzel in 2 Ebenen. Inhomogene Spongiosazeichnung im distalen Radius ohne kortikale Konturunterbrechung. Zur weiteren Abklärung MRT der Handwurzel rechts empfohlen bei V.a. distale Radiusfraktur.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

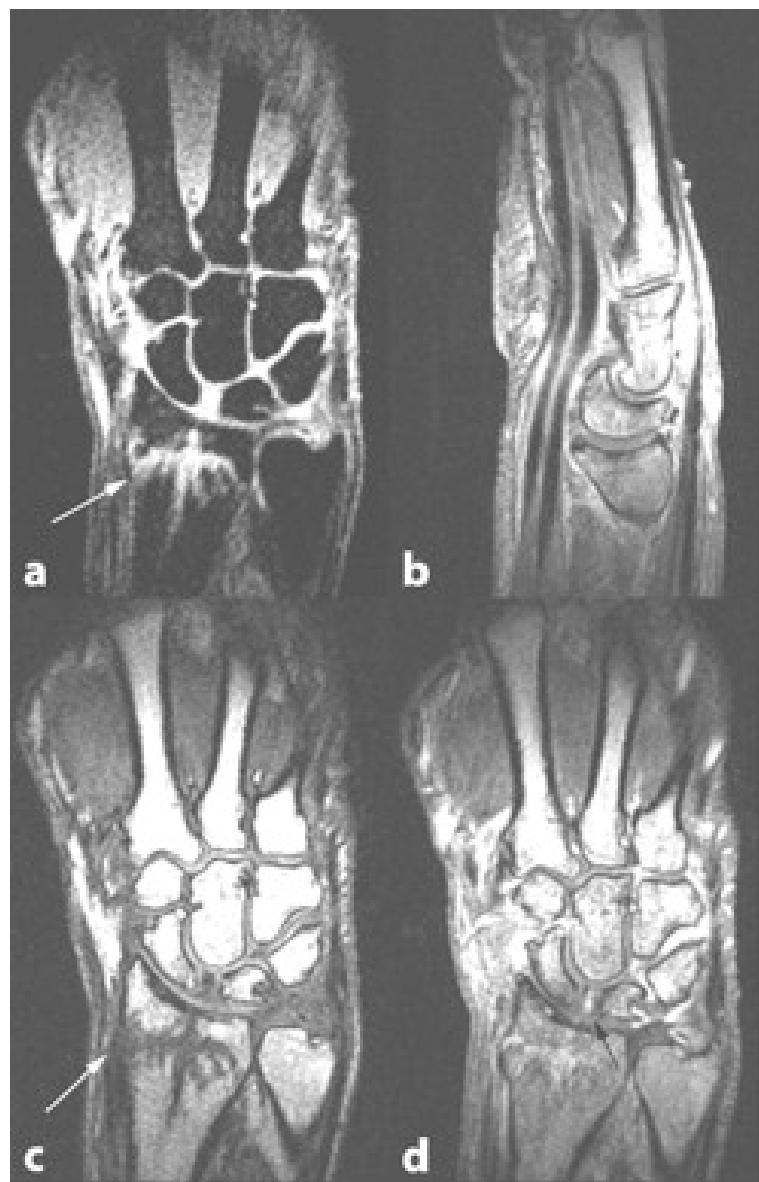


Abbildung 5.2: Niederfeld-MRT des gleichen Patienten. a) STIR coronal, b) T1w nach KM sagittal, c) T1w nativ coronal, d) T1w nach KM coronal. Bereits die STIR-Wichtung zeigt das kreuzförmige Frakturödem des distalen Radius, welches in T1w native signalarm zur Darstellung kommt (weiße Pfeile). Nach Kontrastmittelgabe zeigt sich in T1w eine diffuse carpale Begleit-Synovitis sowie ein bandförmiges Enhancement des SL-Bandes (schwarzer Pfeil) als Hinweis auf begleitende SL-Band-Ruptur. In der sagittalen Schnittführung findet sich eine deutliche DISI-Fehlstellung >15 %.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

5.1.2 Skaphoidfraktur

Bei 30 Fällen konnte bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma in der MRT eine Skaphoidfraktur gesichert werden (Tabelle 5.6). Nur in 5 Fällen war diese auch projekti onsradiographisch sicher nachweisbar (16,7 %). In 50 % dieser Fälle war die Projektionsradiographie als unauffällig befunden worden und in 33,3 % war zumindest der Verdacht auf eine möglicherweise vorliegende Skaphoidfraktur geäußert worden. In 12 Fällen war projekti onsradiographisch der Verdacht auf eine Skaphoidfraktur geäußert worden, was anschließend mittels MRT sicher ausgeschlossen werden konnte (11,3 %). Das Signifikanzniveau liegt hier bei $p < 0,019$. In der Diagnostik einer Skaphoidfraktur konnte für die Projektionsradiographie eine Sensitivität von 50 %, eine Spezifität von 86,8 %, ein PPW von 0,56 sowie ein NPW von 0,86 berechnet werden.

Tabelle 5.6: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für die Skaphoidfraktur bei Patienten mit Z.n. akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma ($p < 0,019$)

Kreuztabelle: Skaphoidfraktur bei akutem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE			
			unauffällig	unsicher	sicher pathologisch	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	94	12	0	106
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	88,7%	11,3%	,0%	100,0%
	sicher pathologisch	Anzahl	15	10	5	30
	% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	50,0%	33,3%	16,7%	100,0%	
	% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	13,8%	45,5%	100,0%	22,1%	
	gesamt	Anzahl	109	22	5	136
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	80,1%	16,2%	3,7%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Nebenbefundlich konnten im Niederfeld-MRT bei der Skaphoidfraktur insgesamt 21 weitere Diagnosen gesichert werden. Die distale Radiusfraktur wurde insgesamt sechsmal diagnostiziert, gefolgt von den Raumforderungen (vier Fälle), sonstigen Pathologien (vier Fälle), Verletzungen des Band- und Sehnenapparates (drei Fälle) und jeweils von zwei Diskusläsionen sowie anderen Frakturen (Tabelle 5.7). In den Abbildungen 5.3, 5.4 und 5.5 werden mögliche Unterschiede zwischen projekti onsradiographischen und kernspintomographischen Aufnahmen hinsichtlich der Darstellbarkeit einer Skaphoidfraktur verdeutlicht.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

Tabelle 5.7: Art und Häufigkeiten der Nebendiagnosen bei der Skaphoidfraktur im Niederfeld-MRT

Nebendiagnosen bei der <u>Skaphoidfraktur</u> im Niederfeld-MRT	
Art der Nebendiagnose	Häufigkeit der Nebendiagnose im Niederfeld-MRT
Distale Radiusfraktur	6
Verletzung des Band-/Sehnenapparates	3
Diskusläsion	2
Raumforderung	4
Andere Frakturen	2
Sonstige Pathologien	4
Gesamt	21



Abbildung 5.3: Patient, 42 Jahre, Z.n. Sturz, Druckschmerz in der Tabatiere. Projektionsradiographie der linken Handwurzel in 2 Ebenen. Unscharfe Abbildung des proximalen Skaphoidpols bei insgesamt aber fehlendem eindeutigen Fraktur nachweis. MRT empfohlen.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

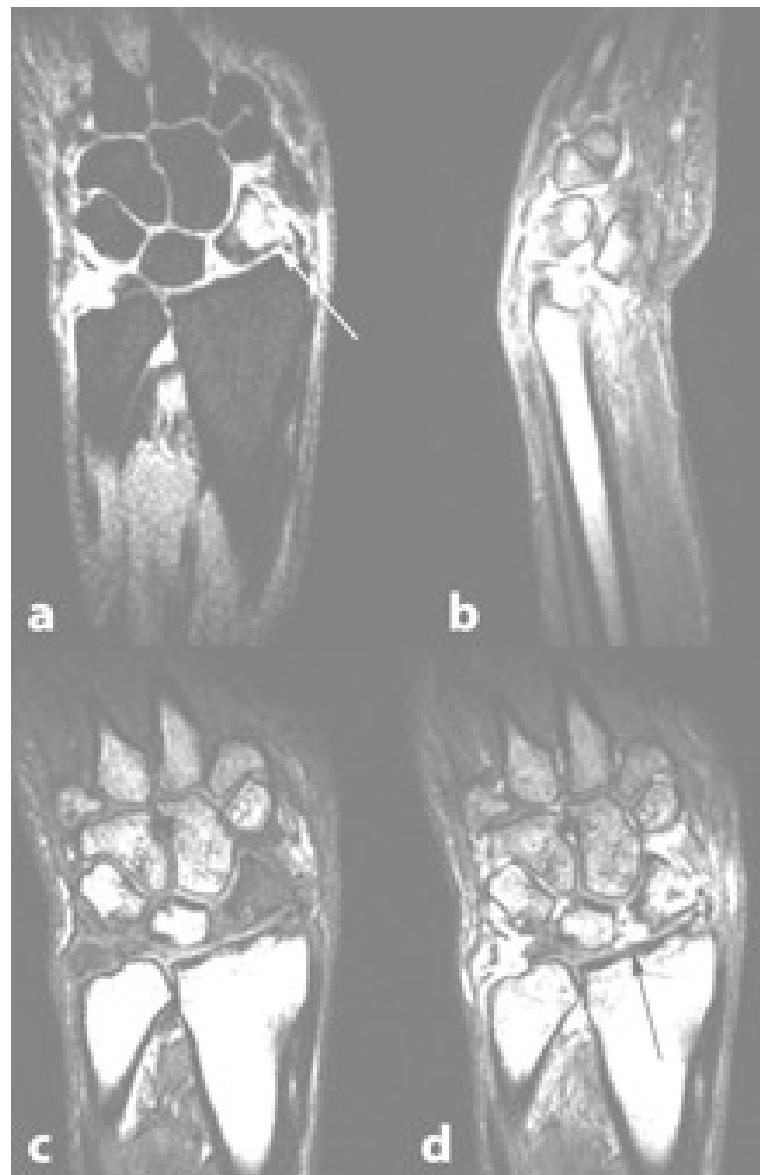


Abbildung 5.4: Niederfeld-MRT des gleichen Patienten. a) STIR coronal, b) T1w nach KM sagittal, c) T1w nativ coronal, d) T1w nach KM coronal. In der STIR-Wichtung zeigt sich ein flächiges Frakturödem des distalen Skaphoidpols in typischer Lokalisation als Hinweis auf Skaphoidfraktur (weißer Pfeil, Abbildung a). In der korrespondierenden T1w nativ stellt sich das Frakturödem zunächst signalarm dar, nach Kontrastmittelapplikation zeigt sich ein fleckförmiges Enhancement als Hinweis auf reparative Vorgänge sowie ein Enhancement im SL-Gelenkspalt und im Bereich des Discus triangularis in der sagittalen Schnittführung. Dies zeigt eine begleitende Ruptur des SL-Bandes sowie eine Läsion des Discus triangularis bei komplexen, projektoradiographisch okkultem Trauma an.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen



Abbildung 5.5: Projektionsradiographie des gleichen Patienten nach operativer Versorgung der Skaphoidfraktur mit Herbert-Schraube.

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

5.1.3 Andere Frakturen

Welche Arten von Frakturen in diese Kategorie mit aufgenommen wurden, zeigt Tabelle 5.8.

Tabelle 5.8: Übersicht der häufigsten anderen Frakturen

Art der Schmerzen	Art der Fraktur	Art des Befundes	
		sicher pathologisch	unsicher
Akute Schmerzen (136 Patienten)	Os triquetum	8	0
	Distale Ulnafraktur	5	0
	Os hamatum	3	0
	Os pisiforme	3	0
	Os lunatum	2	0
	Metacarpalia 5	2	0
	Metacarpalia 2	2	0
	Metacarpalia 3	1	0
	Os trapezium	1	0
	Os capitatum	1	0
	Metacarpalia 4	0	2
	Fraktur D1	0	1
	Gesamtzahl:	28	2

Bei 28 Patienten mit akutem Hand bzw. Handgelenkstrauma lag eine Fraktur der übrigen Ossa carpalia (mit Ausnahme des Os scaphoideum) oder restlichen Knochen der Extremität vor (Tabelle 5.9). In 60,7 % dieser Fälle war die Projektionsradiographie unauffällig. Nur 9 Fälle waren auch projekionsradiographisch sicher nachweisbar und in 2 Fällen war der Befund zumindest unsicher. Bei 6 Patienten war projekionsradiographisch zumindest der Verdacht auf das Vorliegen einer Fraktur der Ossa carpalia bzw. der übrigen Knochen geäußert worden und anschließend mittels MRT ausgeschlossen worden. Das Signifikanzniveau für den exakten Fisher-Test liegt hier bei $p < 0,001$. Die Projektionsradiographie wies in der Diagnostik anderer Frakturen eine Sensitivität von 40 %, eine Spezifität von 94,3 %, einen PPW von 0,67 sowie einen NPW von 0,85 auf.

Bei den im Niederfeld-MRT diagnostizierten anderen Frakturen konnten nebenbefundlich insgesamt 41 weitere Diagnosen gestellt werden. Hier führte die Diskusläsion mit insgesamt 13 Fällen, gefolgt von Verletzungen des Band- und Sehnenapparates und sonstigen Pathologien, welche jeweils mit einer Häufigkeit von neun Fällen vertreten waren. Des Weiteren konnte siebenmal eine distale Radiusfraktur, zweimal eine Skaphoidfraktur und einmal eine Raumforderung als zusätzlich diagnostiziert werden (Tabelle 5.10).

5.1 Verletzungen knöcherner Strukturen

Tabelle 5.9: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für andere Frakturen bei Patienten mit Z.n. akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma ($p < 0,001$)

Kreuztabelle: Andere Frakturen bei akutem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE			
			unauffällig	unsicher	sicher pathologisch	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	100	6	0	106
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	94,3%	5,7%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	84,7%	66,7%	,0%	77,9%
	unsicher	Anzahl	1	1	0	2
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	50,0%	50,0%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	,8%	11,1%	,0%	1,5%
	sicher pathologisch	Anzahl	17	2	9	28
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	60,7%	7,1%	32,1%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	14,4%	22,2%	100,0%	20,6%
	gesamt	Anzahl	118	9	9	136
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	86,8%	6,6%	6,6%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 5.10: Art und Häufigkeiten der Nebendiagnosen bei anderen Frakturen im Niederfeld-MRT

Nebendiagnosen bei <u>anderen Frakturen</u> im Niederfeld-MRT	
Art der Nebendiagnose	Häufigkeit der Nebendiagnose im Niederfeld-MRT
Distale Radiusfraktur	7
Skaphoidfraktur	2
Verletzung des Band-/Sehnenapparates	9
Diskusläsion	13
Raumforderung	1
Sonstige Pathologien	9
Gesamt	41

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

In diese Kategorie fallen die Verletzungen des Band- und Sehnenapparates, Diskusläsionen, Raumforderungen und sonstige Pathologien, welche einen akuten und/oder chronischen Hand- bzw. Handgelenksschmerz verursachen können.

5.2.1 Rupturen des Band- und Sehnenapparates

Eine Übersicht der häufigsten Rupturen zeigt Tabelle 5.11. Hier dominierte die SL-Bandruptur, an zweiter Stelle kamen die Sehnenverletzungen, welche hier nicht weiter unterteilt wurden.

Tabelle 5.11: Übersicht über die häufigsten Rupturen des Band- und Sehnenapparates bei akutem oder chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

Art der Schmerzen	Betroffene Strukturen	Art des Befundes	
		sicher pathologisch	unsicher
Akute Schmerzen (136 Patienten)	SL-Band	19	18
	Sehnenverletzungen	11	9
	Gesamtzahl:	30	27
Chronische Schmerzen (99 Patienten)	SL-Band	5	6
	Sehnenverletzungen	5	3
	Gesamtzahl:	10	9

Rupturen bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma

In insgesamt 30 Fällen konnte mittels MRT bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma eine Verletzung des Sehnen- und Bandapparates nachgewiesen werden (Tabelle 5.12). Dabei war zumindest in 7 Fällen bereits projektoradiographisch der Verdacht auf das Vorliegen einer Bandläsion geäußert worden (23,3%). In 23 Fällen war die Projektoradiographie jedoch unauffällig im Sinne der Fragestellung (76,7%). In 6 Fällen (7,6%) konnte der projektoradiographisch geäußerte Verdacht auf eine Ruptur der intercarpalen Ligamente bzw. der Sehnen mittels MRT sicher ausgeschlossen werden. Jedoch muss festgehalten werden, dass mittels MRT in 27 Fällen (19,9%) keine abschließende Diagnosesicherung möglich war (Signifikanzniveau immer $p < 0,019$). Für die Projektoradiographie konnte eine Sensitivität von 24,6 %, eine Spezifität von 92,4 %, ein PPW von 0,7 sowie ein NPW von 0,63 in der Diagnostik von Rupturen nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma errechnet werden.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

Tabelle 5.12: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für Rupturen bei Patienten mit Z.n. akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma ($p < 0,019$)

Kreuztabelle: Rupturen des Sehnen-Band-Apparates bei akutem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE		
			unauffällig	unsicher	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	73	6	79
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	92,4%	7,6%	100,0%
	unsicher	% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	62,9%	30,0%	58,1%
		Anzahl	20	7	27
	sicher pathologisch	% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	74,1%	25,9%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	17,2%	35,0%	19,9%
	gesamt	Anzahl	23	7	30
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	76,7%	23,3%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	19,8%	35,0%	22,1%
		Anzahl	116	20	136
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	85,3%	14,7%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%

In den Abbildungen 5.6 und 5.7 wird der Unterschied zwischen den beiden bildgebenden Verfahren hinsichtlich ihrer Aussagekraft verdeutlicht.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.6: Patient, 22 Jahre, Z.n. Sturz mit Druckschmerz in der Tabatiere. Projektionsradiographie der Handwurzel. Mäßig dislozierte Skaphoidfraktur rechts bei ansonsten unauffälligen knöchernen Verhältnissen. MRT zum Ausschluß disko-ligamentärer Verletzungen empfohlen.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

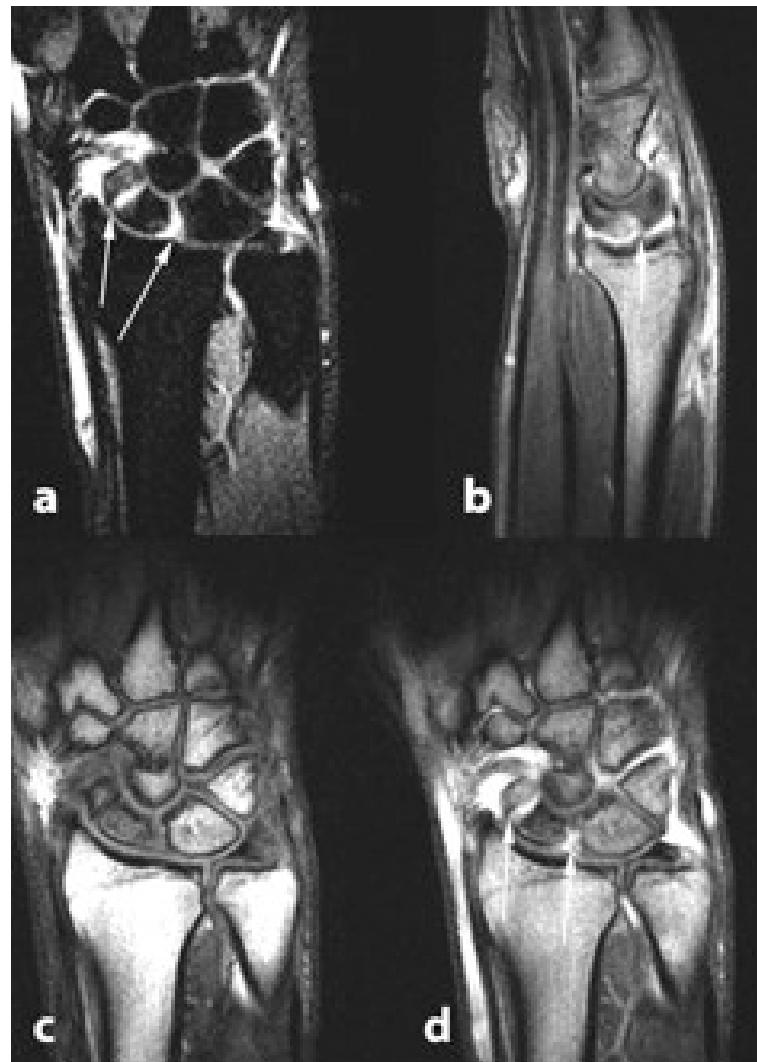


Abbildung 5.7: Niederfeld-MRT des gleichen Patienten. a) STIR coronal, b) T1w nach KM sagittal, c) T1w nativ coronal, d) T1w nach KM coronal. In der STIR-Wichtung zeigt sich Frakturödem des proximalen Skaphoidpols bei bekannter Skaphoidfraktur. Zudem zeigt sich eine deutliche Signalanhebung im SL-Gelenkspalt, welche nach Kontrastmittelapplikation ein deutliches Enhancement aufweist als Zeichen der begleitenden SL-Band-Ruptur.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

Rupturen bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

In 10 von 99 Fällen mit chronischem Handgelenksschmerz konnte als Ursache eine Ruptur des Sehnen-Bandapparates nachgewiesen werden 5.13. Nur einer dieser Fälle war auch projektiionsradiographisch sicher pathologisch. In 93 Fällen war die Projektiionsradiographie unauffällig, wobei in 83,9 % die MRT ebenfalls unauffällig war, in 8,6 % jedoch eine Band- oder Sehnenruptur sicher nachgewiesen werden konnte und in 7,5 % auch die MRT nicht abschließend beurteilbar war. Das Signifikanzniveau für den exakten Fisher-Test liegt hier bei $p < 0,012$. In der Diagnostik von Rupturen bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz errechnete sich für die Projektiionsradiographie eine Sensitivität von 21,1 %, eine Spezifität von 97,5 %, ein PPW von 0,67 sowie ein NPW von 0,84.

Tabelle 5.13: Übersicht der in der Projektiionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für Rupturen bei Patienten mit chronischem Hand- bzw. Handgelenkstrauma ($p < 0,012$)

Kreuztabelle: Rupturen des Sehnen-Band-Apparates bei chronischem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE			
			unauffällig	unsicher	sicher pathologisch	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	78	2	0	80
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	97,5%	2,5%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	83,9%	50,0%	,0%	80,8%
	unsicher	Anzahl	7	1	1	9
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	77,8%	11,1%	11,1%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	7,5%	25,0%	50,0%	9,1%
	sicher pathologisch	Anzahl	8	1	1	10
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	80,0%	10,0%	10,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	8,6%	25,0%	50,0%	10,1%
	gesamt	Anzahl	93	4	2	99
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	94,0%	4,0%	2,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

5.2.2 Diskusläsion

Diskusläsionen bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma

In 32 Fällen konnte mittels MRT bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma eine Verletzung des Discus triangularis nachgewiesen werden (Tabelle 5.14). In nur einem Fall (50 %) war projektionsradiographisch zumindest der Verdacht auf eine Diskus-Verletzung geäussert worden, jedoch auch mittels MRT kein abschließender Befund erhebbar. In insgesamt 15 Fällen (11,0 %) konnte das MRT in der Diagnosesicherung einer Diskusläsion keinen Aufschluss geben. Da sich Verletzungen des Discus triangularis projektionsradiographisch nicht nachweisen lassen, besteht hier entsprechend auch keine Befundkorrelation und das Signifikanzniveau beträgt $p < 0,263$. In der Diagnostik von Diskusläsionen nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma wies die Projektionsradiographie eine Sensitivität von 2,1 %, eine Spezifität von 98,9 %, einen PPW von 0,5 sowie einen NPW von 0,66 auf.

Tabelle 5.14: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für Diskusläsionen bei Patienten mit Z.n. akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma ($p < 0,263$)

Kreuztabelle: Diskusläsionen bei akutem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE		
			unauffällig	unsicher	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	88	1	89
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	98,9%	1,1%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	65,7%	50,0%	65,4%
	unsicher	Anzahl	14	1	15
	% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	93,3%	6,7%	100,0%	
	% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	10,4%	50,0%	11,0%	
	sicher pathologisch	Anzahl	32	0	32
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	100,0%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	23,9%	,0%	23,5%
	gesamt	Anzahl	134	2	136
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	98,5%	1,5%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

Abbildungen 5.8 und 5.9 zeigen ein Beispiel für die unterschiedliche Darstellung einer Diskusläsion nach akutem Handgelenkstrauma in der Projektionsradiographie und Niederkernspintomographie.



Abbildung 5.8: Patientin, 65 Jahre. Z.n. Sturz. V.a. distale Radiusfraktur. Projektionsradiographie der rechten Handwurzel. Projektionsradiographisch kein Anhalt für distale Radiusfraktur. Bei entsprechender Klinik MRT ergänzend empfohlen.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

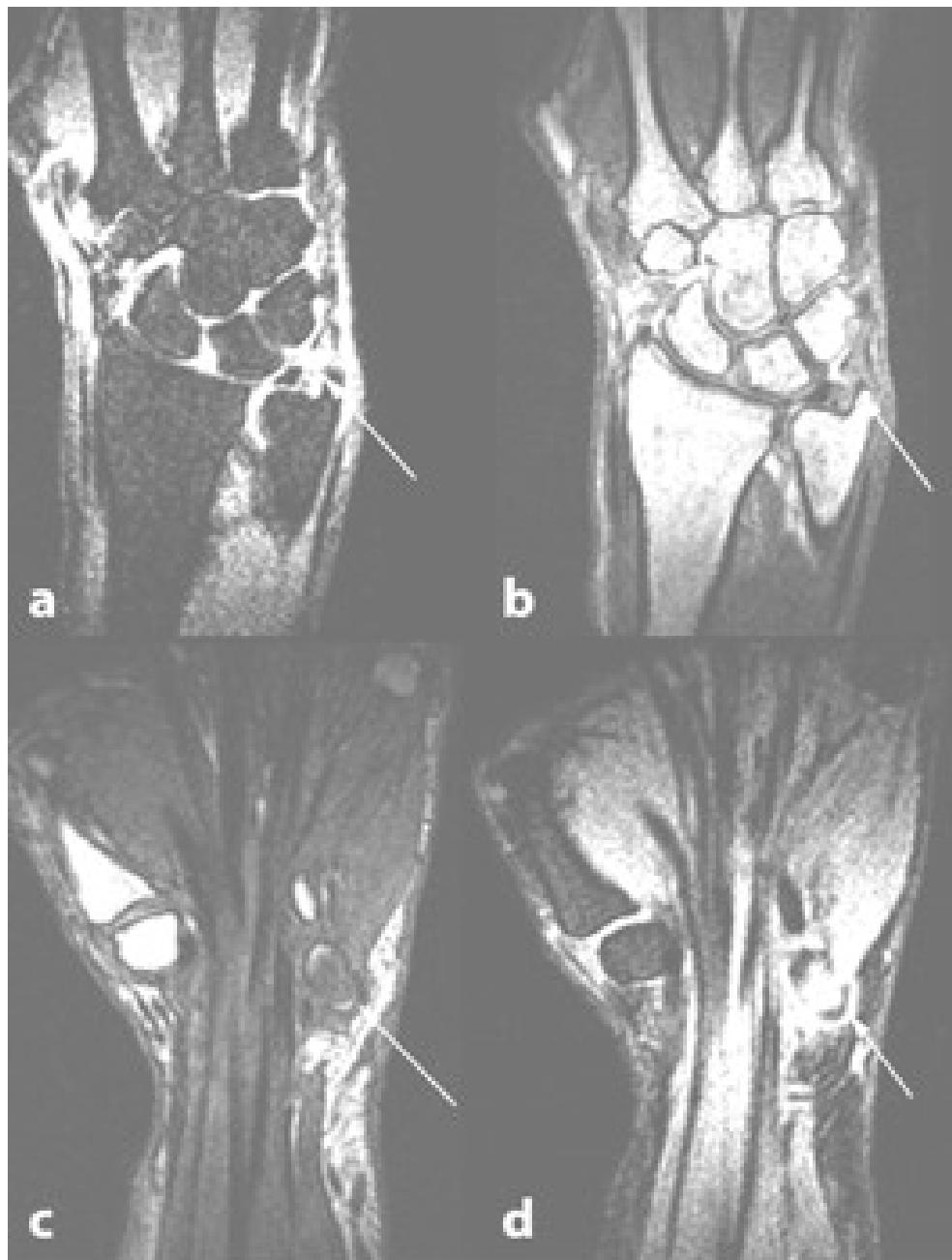


Abbildung 5.9: Niederfeld-MRT der gleichen Patientin. a) STIR coronal, b) T1w nach KM coronal, c) T1w nativ coronal, d) T1w nach KM coronal. In der STIR-Wichtung zeigt sich eine starke Signalanhebung im Bereich der ulnaren Anheftung des Discus triangularis, welche sich nach Kontrastmittelapplikation zart anreichert (weiße Pfeile in Abbildung a und b), vereinbar mit Discus-Ruptur. Des Weiteren findet sich eine begleitende Fraktur des Os pisiforme (weiße Pfeile in Abbildung c und d).

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

Diskusläsionen bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

Bei 17 Patienten mit chronischem Handgelenksschmerz (17,2 %) konnte mittels MRT eine Läsion des Discus triangularis als Ursache nachgewiesen werden. Die Zahl der in der MRT unsicheren Befunde lag hier bei 13,1 % (Tabelle 5.15). Auch hier war die Projektionsradiographie naturgemäß unauffällig und das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,131$.

Die Projektionsradiographie zeigte hier eine Sensitivität von 3,3 %, eine Spezifität von 100 %, einen PPW von 1,0 sowie einen NPW von 0,70.

Tabelle 5.15: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für Diskusläsionen bei Patienten chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz ($p < 0,131$)

<u>Kreuztabelle: Diskusläsionen bei chronischem Handgelenksschmerz</u>			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE		
MRT			unauffällig	unsicher	gesamt
			69	0	69
MRT	unauffällig	Anzahl	69	0	69
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	100,0%	,0%	100,0%
	unsicher	% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	70,4%	,0%	69,7%
		Anzahl	12	1	13
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	92,3%	7,7%	100,0%
	sicher pathologisch	% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	12,2%	100,0%	13,1%
		Anzahl	17	0	17
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	100,0%	,0%	100,0%
	gesamt	% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	17,3%	,0%	17,2%
		Anzahl	98	1	99
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	99,0%	1,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%

Folgende Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen die Aussagekraft der beiden bildgebenden Verfahren hinsichtlich der Diagnostik von Diskusläsionen bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.10: Patientin, 45 Jahre. Chronische Handgelenksbeschwerden rechts seit mehr als 2 Monaten. Projektionsradiographie der Handwurzel. Projektionsradiographisch kein Nachweis einer relevanten Pathologie.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.11: Niederfeld-MRT der gleichen Patientin. a) STIR coronal, b) T1w nativ coronal, c + d) T1w nach KM coronal an 2 verschiedenen Schichtpositionen. In der STIR-Wichtung zeigt sich eine zarte Signalanhebung im Bereich der ulnaren Anheftung des Discus triangularis, welche nach Kontrastmittelapplikation deutlich in verschiedenen Positionen anreichert (weiße Pfeile), vereinbar mit einer Diskus-Ruptur älterer Genese.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

5.2.3 Raumforderungen

Raumforderungen bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

Die am häufigsten diagnostizierten Arten der Raumforderungen sind in Tabelle 5.16 dargestellt. Am häufigsten waren die Ganglien vertreten, wobei die anderen Arten von Raumforderungen in ihrer Häufigkeit weit hinter den Ganglien lagen.

Tabelle 5.16: Übersicht der am häufigsten diagnostizierten Raumforderungen

Art der Schmerzen	Art der Raumforderung	Art des Befundes	
		sicher pathologisch	unsicher
Chronische Schmerzen (99 Patienten)	Ganglien	30	3
	Zysten	7	0
	Enchondrome	2	0
	Riesenzelltumoren	1	0
	Glomustumoren	1	0
	Gesamtzahl:	41	3

Bei 41 Patienten mit chronischem Handgelenksschmerz konnte als Ursache eine Raumforderung im Bereich des Handgelenks nachgewiesen werden (Tabelle 5.17). Nur in 6 Fällen war diese auch projektionsradiographisch sicher nachweisbar. In 73,2 % war die Projektionsradiographie unauffällig und in 12,2 % zumindest unsicher im Sinne der Fragestellung. In drei Fällen blieb die MRT hinsichtlich des Nachweises einer Raumforderung ebenfalls unsicher und konnte nicht abschließend beurteilt werden. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,008$. Für die Projektionsradiographie errechneten sich folgende Qualitätsmerkmale: Sensitivität: 25 %, Spezifität: 96,4 %, PPW: 0,85 und NPW: 0,62.

Folgende Abbildungen 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 und 5.17 verdeutlichen die Aussagekraft der einzelnen bildgebenden Verfahren in der Darstellung von Raumforderungen.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

Tabelle 5.17: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für Raumforderungen bei Patienten chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz ($p < 0,008$)

Kreuztabelle: Raumforderungen bei chronischem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE			
			unauffällig	unsicher	sicher pathologisch	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	53	2	0	55
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	96,4%	3,6%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	61,6%	28,6%	,0%	55,6%
	unsicher	Anzahl	3	0	0	3
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	100,0%	,0%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	3,5%	,0%	,0%	3,0%
	sicher pathologisch	Anzahl	30	5	6	41
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	73,2%	12,2%	14,6%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	34,9%	71,4%	100,0%	41,4%
	gesamt	Anzahl	86	7	6	99
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	86,9%	7,1%	6,1%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

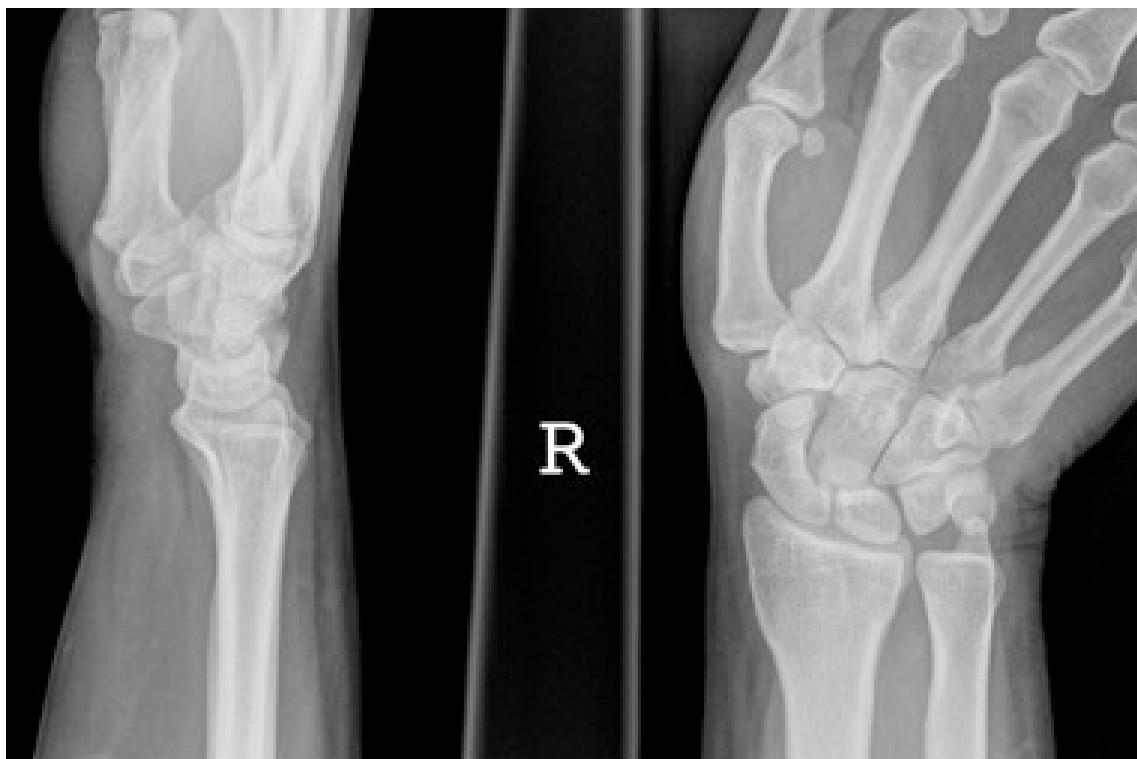


Abbildung 5.12: Patientin, 32 Jahre. Chronische Handgelenksbeschwerden mit tastbarer derber Schwellung am Handrücken auf Höhe der distalen Carpalia-Reihe zwischen dem 2. und 3. Strahl. V.a. Ganglion. Projektionsradiographie der Handwurzel in 2 Ebenen. Projektionsradiographisch kein Nachweis einer Raumforderung oder ossärer Veränderungen.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

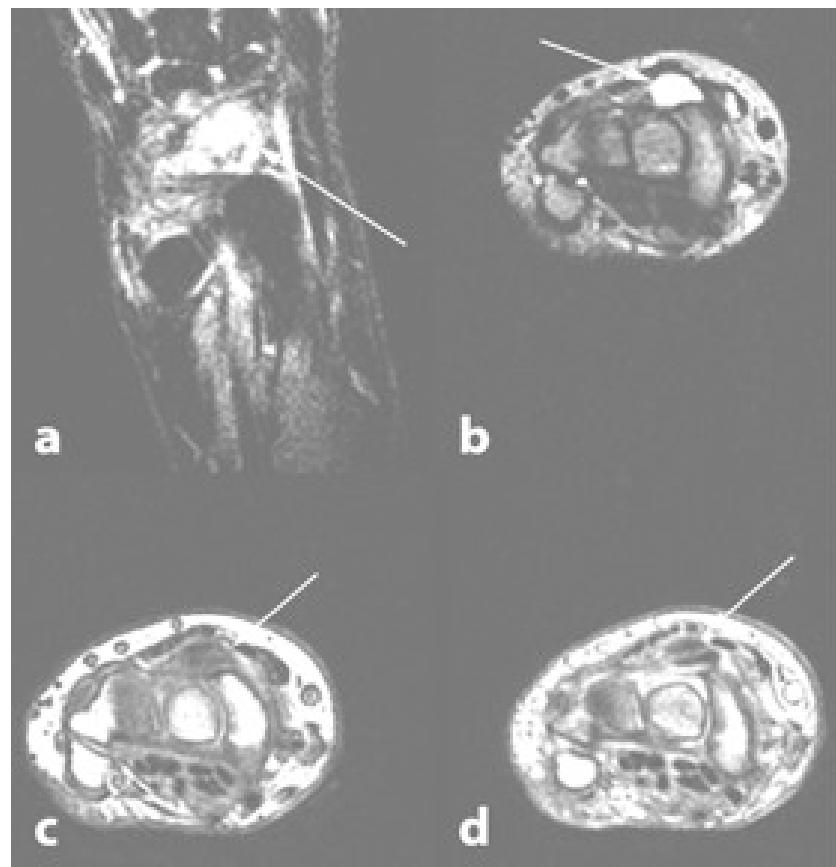


Abbildung 5.13: Niederfeld-MRT des gleichen Patienten. a) STIR coronal, b) T2w transversal, c) T1w native transversal, d) T1w nach KM transversal. In der STIR- und T2-Wichtung zeigt sich eine homogene, randscharf begrenzte Signalanhebung mit Bezug zur 2. und 3. Strecksehne volar auf Höhe der distalen Carpalia-Reihe. In der korrespondierenden T1w native und nach KM zeigt sich die Veränderung zentral homogen signalarm mit randständigem zarten Enhancement. Typischer Befund eines volaren Sehnenscheidenganglions der Strecksehnen.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.14: Patient, 56 Jahre. Seit mehreren Monaten tastbare derbe Schwellung palmarseitig auf Höhe der Grundphalanx von D1. Kein tastbares Schwirren. Projektionsradiographie des ersten Strahles in 2 Ebenen. Bereits projektionsradiographisch Nachweis einer weichteildichten Raumforderung palmarseitig auf Höhe der Grundphalanx von D1. Kein Nachweis von Verkalkungen oder Knochenarrosionen. Duplexsonographisch keine Hypervaskularisierung, kein zystischer Aspekt in der Weichteilsonographie. MRT zur abschließenden Beurteilung erbeten.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.15: Niederfeld-MRT des gleichen Patienten. a) STIR sagittal, b) T1w nach KM transversal, c) T1w nativ sagittal, d) T1w nach KM sagittal. Die Raumforderung wurde zudem im Hautniveau mit einer Nitrokapsel markiert (homogene Raumforderung zwischen D1 und D2). In der STIR-Wichtung zeigt sich relativ homogen signalangehobene Raumforderung im Verlauf der Beugesehne von D1. Diese ist in T1w von intermediärer Signalgebung, reichert nach Kontrastmittelgabe aber homogen und kräftig an. Eine Infiltration benachbarter Strukturen, insbesondere des Knochens, findet sich nicht. Kernspintomographisch vereinbar mit Riesenzelltumor der Beugesehne D1.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.16: Patient, 49 Jahre. Sporadische Schmerzsymptomatik am 3. Strahl der rechten Hand. Projektionsradiographie der rechten Hand in 2 Ebenen. Bereits projekionsradiographisch Nachweis eines Enchondroms des Os metacarpale 3 in typischer Lokalisation und mit typischen popcornartigen zentralen Verkalkungen sowie einer Ballonierung der Kompakta.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

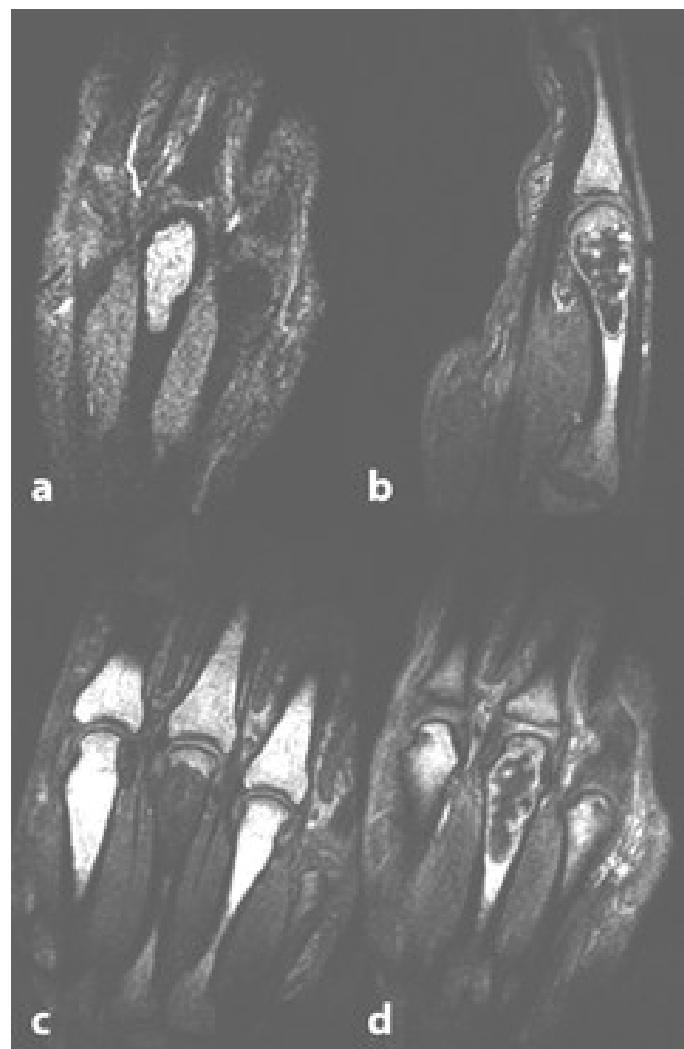


Abbildung 5.17: Niederfeld-MRT des gleichen Patienten. a) STIR coronal, b) T1w nach KM sagittalk, c) T1w nativ coronal, d) T1w nach KM coronal. In der STIR-Wichtung zeigt sich eine relativ homogene, randscharf begrenzte epiphysäre Raumforderung zentral im Köpfchen des Os metacarpale 3. In T1w imponiert die Raumforderung homogen signalarm, die Kortikalis ist ballonierend ausgedünnt. Appositionelles Knochenwachstum findet sich nicht. Nach Kontrastmittelapplikation zeigt sich das typische randständige sowie zentral stippchenartige Enhancement des Enchondroms.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

5.2.4 Sonstige Pathologien der Hand bzw. des Handgelenks

Aufgrund der geringen Einzelfallzahlen wurden folgende Pathologien als Folge eines akuten Handgelenkstraumas oder als Ursache eines chronischen Handgelenksschmerzes zusammengefasst (Tabelle 5.18).

Tabelle 5.18: Häufigkeiten sonstiger Pathologien bei akutem oder chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

Art der Schmerzen	Art der Pathologie	Häufigkeit der Diagnose in der Niederfeldkernspintomographie
		sicher pathologisch
Akute Schmerzen (136 Patienten)	Arthrose	11
	Synovialitis	7
	Tenovaginitis	3
	Phlegmone	1
	Fremdkörper	2
	Lunatummalazie	1
	Gesamt	25
Chronische Schmerzen (99 Patienten)	Arthrose	12
	Synovialitis	16
	Tenovaginitis	9
	Phlegmone	1
	Arthritis	1
	Osteomyelitis	1
	Lunatummalazie	1
	Gesamt	41

Sonstige Pathologien bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma

In 25 Fällen konnten mittels MRT bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma sonstige Pathologien nachgewiesen werden (Tabelle 5.19). Projektionsradiographisch wurde in genau 135 Fällen der Verdacht geäussert, wobei davon 25 Fälle (18,5 %) auch wirklich im MRT positiv waren, aber in 110 Fällen (81,5 %) der Verdacht nicht im MRT bestätigt werden konnte. Das Signifikanzniveau liegt hier bei $p < 1,0$. Die Projektionsradiographie wies in der Diagnostik sonstiger Pathologien nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma eine Sensitivität von 100 %, eine Spezifität von 0 %, einen PPW von 0,18 auf. Die Berechnung des NPW war leider nicht möglich (n.m.), da in der Projektionsradiographie kein richtig-negatives Ergebnis vorlag.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

Tabelle 5.19: Übersicht der in der Projektionsradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für sonstige Pathologien bei Patienten mit Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma ($p < 1,0$)

Kreuztabelle: Sonstige Pathologien bei akutem Handgelenksschmerz			PROJEKTIONSRADIOGRAPHIE		
			unsicher	sicher pathologisch	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	110	1	111
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	99,1%	,9%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	81,5%	100,0%	81,6%
	sicher pathologisch	Anzahl	25	0	25
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	100,0%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	18,5%	,0%	18,4%
	gesamt	Anzahl	135	1	136
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	99,3%	,7%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen

Sonstige Pathologien bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

In 41 Fällen der Patienten mit chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz konnten in der MRT sonstige Pathologien diagnostiziert werden, von denen 19 Fälle (46,3%) bereits projektoradiographisch nachgewiesen werden konnten (Tabelle 5.20). In 2 Fällen wurde in der Projektoradiographie bereits der Verdacht geäussert, welcher sich später in der MRT bestätigte. Die Projektoradiographie lieferte jedoch in 48,8% ein falsch negatives Ergebnis. In nur einem einzigen Fall konnte die MRT keinen Beitrag zur Diagnosesicherung leisten. In 67,2% aller unauffälligen projektoradiographischen Befunde konnte im MRT eine Pathologie ausgeschlossen werden. Die Projektoradiographie lieferte in 13 Fällen ein falsch positives Ergebnis. Das Signifikanzniveau beträgt hier $p < 0,031$. Für die Projektoradiographie konnte hier eine Sensitivität von 50%, eine Spezifität von 75,4%, ein PPW von 0,6 sowie ein NPW von 0,67 berechnet werden.

Tabelle 5.20: Übersicht der in der Projektoradiographie bzw. der Niederfeldkernspintomographie erhobenen Befunde für sonstige Pathologien bei Patienten mit chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz ($p < 0,031$)

Kreuztabelle: Sonstige Pathologien bei chronischem Handgelenksschmerz			PROJEKTORSRADIOGRAPHIE			
			unauffällig	unsicher	sicher pathologisch	gesamt
MRT	unauffällig	Anzahl	43	1	13	57
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	75,4%	1,8%	22,8%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	67,2%	33,3%	40,6%	57,6%
	unsicher	Anzahl	1	0	0	1
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	100,0%	,0%	,0%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	1,6%	,0%	,0%	1,0%
	sicher pathologisch	Anzahl	20	2	19	41
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	48,8%	4,9%	46,3%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	31,3%	66,7%	59,4%	41,4%
	gesamt	Anzahl	64	3	32	99
		% (in Bezug auf die MRT-Diagnose)	64,6%	3,0%	32,3%	100,0%
		% (in Bezug auf die Röntgen-Diagnose)	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Repräsentativ wird in den Abbildungen 5.18 und 5.19 die Aussagekraft der Projektoradiographie und Niederfeld-MRT verdeutlicht.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.18: Patientin, 51 Jahre, chronische Handgelenksschmerzen rechts seit mehr als 4 Monaten. Projektionsradiographie der rechten Hand. Ossär unauffälliger Befund. Darüberhinaus keine Weichteilschwellung oder andere indirekte Hinweise auf einen chronisch-entzündlichen Prozess.

5.2 Verletzungen von Weichteilstrukturen



Abbildung 5.19: Niederfeld-MRT der gleichen Patientin. a) STIR coronal, b) T1w nach KM transversal, c) T1w nativ coronal, d) T1w nach KM coronal. In der STIR-Wichtung zeigt sich eine diffuse Signalanhebung der carpalen synovialen Strukturen, welche nach Kontrastmittelapplikation zudem ein zartes Enhancement aufweist (Abbildung a und c). Zudem zeigt sich in der axialen und coronalen Schnittführung ein Kontrastmittelenhancement der gesamten Beugesehnen. Befund einer carpalen Synovitis und Beugesehnen-Tenosynovitis. Differenzialdiagnostisch muss an eine beginnende rheumatoide Arthritis gedacht werden.

5.3 Ergebnisse der Intra- und Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

5.3 Ergebnisse der Intra- und Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

Es wurden die häufigsten Krankheitsbilder ($n = 44$) je nach klinischem Verlauf herausgesucht und anschließend für jedes Krankheitsbild die Intra- und Interobserver- Variabilität der beiden Befunder berechnet (siehe Tabelle 5.21). Bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz wurde in der Kategorie “Raumforderungen“ eine weitere Differenzierung in “Ganglien“ und “Tumoren“ vorgenommen, um mögliche Differenzen der einzelnen Befunder bezüglich der Diagnosesicherung evaluieren zu können. Zudem wurde aufgrund der geringen Einzelfallzahl in der Kategorie “Sonstige Pathologien“ nur das häufigste Krankheitsbild “Entzündungen“ untersucht.

Tabelle 5.21: Übersicht der verschiedenen Erkrankungsgruppen für Ermittlung der Intra- und Inter- Observer-Variabilität (Intra-bzw. Inter- Klassen-Variabilität)

Art der Schmerzen	Betroffene Strukturen	Häufigkeit der Diagnosen in der Niederfeld-MRT
Akute Schmerzen (22 Patienten)	Distale Radiusfrakturen	6
	Skaphoidfrakturen	6
	Verletzungen des Band- und Sehnenapparates	5
	Diskusläsionen	5
	Gesamt:	22
Chronische Schmerzen (22 Patienten)	Diskusläsionen	6
	Entzündungen	6
	Ganglien	5
	Tumoren	5
	Gesamt:	22
Gesamtzahl aller Verletzungen:		44

5.3 Ergebnisse der Intra- und Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

5.3.1 Ergebnisse der Intraobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

Die Ergebnisse der ermittelten Intra-Observer-Variabilität sind in Tabelle 5.22 aufgelistet.

Tabelle 5.22: Ermittlung der Intra-Observer-Variabilität (Intra-Klassen-Variabilität) der Niederfeld-MRT für die verschiedenen Erkrankungsgruppen. (ICC= Intra-Klassen-Koeffizient)

Art der Schmerzen	Betroffene Strukturen	Intra-Klassen-Koeffizient		p-Wert
		Untersucher 1	Untersucher 2	
Akute Schmerzen (22 Patienten)	Distale Radiusfraktur	0,984	0,996	< 0,0001
	Skaphoidfraktur	0,915	0,931	< 0,001
	Verletzung des Band- und Sehnenapparates	0,397	0,698	< 0,01
	Diskusläsion	0,482	0,754	< 0,01
Chronische Schmerzen (22 Patienten)	Diskusläsion	0,767	0,899	< 0,001
	Entzündung	0,928	0,973	< 0,0001
	Ganglion	0,919	0,956	< 0,0001
	Tumor	0,527	0,781	< 0,01

Ergebnisse der Intraobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT bei Zustand nach akutem Hand-bzw. Handgelenkstrauma

Distale Radiusfrakturen Insgesamt wurden sechs Distale Radiusfrakturen niederfeld-tomographisch beurteilt. Der Intra-Klassen-Koeffizient (ICC) des ersten Befunders betrug 0,984, der des zweiten Befunders 0,996. Das Signifikanzniveau lag hier bei $p < 0,0001$.

Skaphoidfrakturen Bei insgesamt sechs im Niederfeld-MRT untersuchten Skaphoidfrakturen betrug der ICC des ersten Befunders 0,915, der des zweiten Befunders lag bei 0,931. Es konnte ein Signifikanzniveau von $p < 0,0001$ festgestellt werden.

Verletzungen des Band-und Sehnenapparates Im Niederfeld-MRT wurden insgesamt 5 Verletzungen des Band- und Sehnenapparates von den beiden Befunden evaluiert. Bei einem ICC von 0,397 des ersten Befunders und einem ICC von 0,698 des zweiten Befunders lag das Signifikanzniveau bei $p < 0,01$.

5.3 Ergebnisse der Intra- und Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

Diskusläsionen Insgesamt wurden im Niederfeld-MRT fünf Diskusläsionen beurteilt. Davon lag der ICC des ersten Befunders bei 0,482, der des zweiten Befunders bei 0,698. Das Signifikanzniveau betrug $p < 0,01$.

Ergebnisse der Intraobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz

Diskusläsionen Im Niederfeld-MRT wurden sechs Diskusläsionen durch beide Untersucher beurteilt. Der ICC des ersten Untersuchers betrug 0,767, der des zweiten Untersuchers lag bei 0,899. Es konnte ein Signifikanzniveau von $p < 0,001$ berechnet werden.

Entzündungen Insgesamt wurden im Niederfeld-MRT sechs entzündliche Prozesse evaluiert. Bei dem ersten Befunder konnte ein ICC von 0,928 festgestellt werden. Der Intra-Klassen-Koeffizient des zweiten Befunders lag bei 0,973. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,0001$.

Ganglien Es wurden fünf Ganglien im Niederfeld-MRT beurteilt und ein ICC des ersten Befunders von 0,919 festgestellt, der des zweiten Befunders lag bei 0,956. Es wurde ein Signifikanzniveau von $p < 0,0001$ berechnet.

Tumoren Bei fünf im Niederfeld-MRT diagnostizierten Tumoren konnte der erste Befunder einen ICC von 0,527 vorweisen, der Koeffizient des zweiten Befunders betrug 0,781. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,01$.

5.3 Ergebnisse der Intra- und Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

5.3.2 Ergebnisse der Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

Die Ergebnisse der Inter-Observer-Variabilität sind in folgender Tabelle 5.23 aufgelistet.

Tabelle 5.23: Ermittlung der Inter-Observer-Variabilität (Inter-Klassen-Variabilität) der Niederfeld-MRT für die verschiedenen Erkrankungsgruppen. (ICC= Intra-Klassen-Koeffizient)

Art der Schmerzen	Betroffene Strukturen	Inter-Klassen-Koeffizient	p-Wert
Akute Schmerzen (22 Patienten)	Distale Radiusfraktur	0,973	< 0,0001
	Skaphoidfraktur	0,891	< 0,001
	Verletzung des Band- und Sehnenapparates	0,454	< 0,01
	Diskusläsion	0,520	< 0,01
Chronische Schmerzen (22 Patienten)	Diskusläsion	0,803	< 0,001
	Entzündung	0,935	< 0,0001
	Ganglion	0,924	< 0,0001
	Tumor	0,679	< 0,01

Ergebnisse der Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT bei Z.n. akutem Hand- bzw. Handgelenktrauma

Distale Radiusfrakturen Für die durch die beiden im Niederfeld-MRT beurteilten sechs distalen Radiusfrakturen konnte ein ICC von 0,973 bei einem hohen Signifikanzniveau von $p < 0,0001$ festgestellt werden.

Skaphoidfrakturen Insgesamt wurde bei den im Niederfeld-MRT befundenen sechs Skaphoidfrakturen ein ICC von 0,891 und ein Signifikanzniveau von $p < 0,001$ berechnet.

Verletzungen des Band- und Sehnenapparates Insgesamt wurden fünf Verletzungen des Band- und Sehnenapparates niederfeldkernspintomographisch von den beiden Untersuchern befunden. Hier lag der ICC bei 0,454 und das Signifikanzniveau bei $p < 0,01$.

Diskusläsionen Bei den fünf evaluierten Diskusläsionen im Niederfeld-MRT korrelierten die Befunde der beiden Untersucher bei einem ICC von 0,520 und einem Signifikanzniveau von $p < 0,01$.

5.3 Ergebnisse der Intra- und Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT

Ergebnisse der Interobserver-Variabilität im Niederfeld-MRT bei chronischem Hand- bzw. Handgelenkstrauma

Diskusläsionen Die zwei Befunder der sechs niederfeldkernspintomographisch untersuchten Diskusläsionen wiesen einen ICC von 0,803 bei einem Signifikanzniveau von $p < 0,803$ auf.

Entzündungen Es konnte bei den sechs im Niederfeld-MRT untersuchten Entzündungen ein Inter-Klassen-Koeffizient von 0,935 berechnet werden. Das Signifikanzniveau von $p < 0,0001$ ist relativ hoch.

Ganglien Insgesamt konnte bei den fünf im Niederfeld-MRT evaluierten Ganglien ein Signifikanzniveau von $p < 0,0001$ bei einem ICC von 0,924 berechnet werden.

Tumoren Hinsichtlich der niederfeldkernspintomographisch untersuchten fünf Tumoren konnte ein ICC von 0,679 berechnet werden. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,01$.

6 Diskussion

6.1 Studiendesign

6.1.1 Auswahl des Patientenkollektives

Mit $n=235$ ist die Anzahl der untersuchten Patienten vergleichbar mit der anderer Studien. Das ausgewählte Patientenkollektiv entspricht im Hinblick auf das untersuchte Krankheitsspektrum und die Häufigkeit der Erkrankungen in etwa dem Patientengut einer allgemeinen chirurgischen Ambulanz. Der vorliegenden Arbeit liegt ein retrospektives Design zugrunde, d.h. dem Arzt waren sowohl die Röntgenbefunde, als auch die Klinik bei der Durchführung der Niederfeldkernspintomographie bekannt. Durch die Vorkenntnis der Befunde der Projektionsradiographie wäre möglicherweise die Annahme einer falsch-hohen Sensitivität kernspintomographischer Bildaufnahmen denkbar. So ist es eher unwahrscheinlich, dass ein Arzt mit Kenntnis der projektionsradiographisch gestellten Diagnose, diese in darauf folgenden niederfeldkernspintomographischen Aufnahmen übersieht. Durch diese Vorgehensweise erfolgt möglicherweise auch eine Optimierung der niederfeldkernspintomographischen Diagnosesicherung, was deren Durchführung und Auswertung betrifft. Dies hätte beispielsweise eine zusätzliche Kontrastmittelgabe oder eine Erweiterung des Untersuchungsfeldes zur Folge. Auch gilt die Aufmerksamkeit des Untersuchers häufig assoziierten Begleitverletzungen, wie ligamentären Läsionen, was einerseits bedeutend für die Diagnosefindung ist, andererseits aber dem dedizierten Niederfeldkernspintomographen eine falsch-hohe Sensitivität verleiht.

In der vorliegenden Studie handelt es sich um ein selektioniertes Patientenkollektiv, bei dem ausschließlich Patienten in die Studie eingeschlossen wurden, bei denen projektionsradiographische und niederfeldkernspintomographische Aufnahmen vorlagen. Dadurch könnte es zu einer Selektion von Patienten mit komplexen Krankheitsbildern kommen, bei denen eine alleinige Durchführung der Projektionsradiographie nicht ausreichend war. Allerdings ist bei der limitierten Kapazität der Niederfeldkernspintomographie und der großen Zahl $n = 235$ für eine zufriedenstellende statistische Aussagekraft eine routinemäßige kernspintomographische Nachuntersuchung aller projektionsradiographischen Befunde praktisch nicht

6.2 Interpretation der Ergebnisse

realisierbar. Darüberhinaus stellt sich die Frage, ob bei einem eindeutigen Befund in der Projektionsradiographie eine weiterführende Diagnostik überhaupt von klinischer Relevanz ist, ein Sachverhalt, der vor dem Hintergrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit diskutiert werden soll.

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit war die Bearbeitung der Frage, ob und falls ja, wann die routinemäßige Durchführung einer Untersuchung mittels eines dedizierten Niederfeldkernspintomographen einen diagnostischen Nutzen bei akutem oder chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz bringt. Die hohe Anzahl auffälliger Befunde in der Niederfeldkernspintomographie spricht für deren diagnostischen Vorteil gegenüber der Projektionsradiographie. Bei Zustand nach akutem Handgelenkstrauma konnten mittels Niederfeldkernspintomographie im Vergleich zur Projektionsradiographie bei 40 Patienten (32 %) zusätzliche Diagnosen gesichert werden. Auch bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz wurden per Niederfeldkernspintomographie bei 31 Patienten (39,3 %) zusätzliche Diagnosen gestellt als in der initial durchgeführten Projektionsradiographie, was die diagnostische Wertigkeit der Niederfeldkernspintomographie bei akutem oder chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz in einer chirurgischen Ambulanz hervorhebt. Diese Ergebnisse stimmen mit den Schlussfolgerungen von Autoren anderer Studien überein, welche die hohe diagnostische Treffsicherheit des dedizierten Niederfeldkernspintomographen in der muskuloskelettalen Diagnostik [5, 6] hervorheben.

6.2.1 Referenzstandards für die Beurteilung bildgebender Verfahren

Für die Beurteilung eines (neuen) diagnostischen Verfahrens wird die zu untersuchende Methode an einer Referenzmethode gemessen, üblicherweise der Methode der Wahl zum Nachweis einer pathologischen Veränderung, dem Goldstandard. Hierbei steht man bei der Analyse von bildgebenden Verfahren vor drei grundlegenden Problemen: (i) Der sichere Nachweis einer pathologischen Veränderung gelingt letztlich nur durch eine direkte makroskopische oder mikroskopische Begutachtung. (ii) Letztere sind invasiv und können dem Patienten nicht ohne eine eingehende Risiko-/Nutzenabwägung zugemutet werden. (iii) Folglich erfolgt bei der Mehrzahl der durchgeführten Studien keine endgültige Validierung der Methoden und erhobener Befunde und es wird auf Behelfsreferenzen zurückgegriffen.

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Dieses Problem wurde in der Literatur bereits mehrfach diskutiert. Remplik et al. vertraten einen Goldstandard, welcher sich aus dem Ergebnis einer zweifachen Beurteilung einer kernspintomographischen Aufnahme durch zwei erfahrene Auswerter ergab. Auch wenn diese Form der Validierung sicherlich nicht die diagnostische Aussagekraft einer invasiven, beispielsweise intraoperativen Beurteilung durch den Chirurgen besitzt, so erscheint sie doch als Grundlage für den Vergleich von Niederfeld-MRT und konventioneller Projektionsradiographie praktikabel [155].

Hottya et al. und Breitenseher et al. verglichen initial beurteilte Aufnahmen der konventionellen Projektionsradiographie und Niederfeld-MRT mit einer projektionsradiographischen Aufnahme im Verlauf, welche 3 bis 7 Wochen nach der initialen Vorstellung durchgeführt wurde. Diese wurde in Zusammenschau mit dem klinischen Verlauf als Goldstandard für die Diagnostik von Frakturen des Hand- bzw. Handgelenkes definiert [40, 156].

Einige der wenigen Studien zur Qualität kernspintomographischer Untersuchungen mit einer intraoperativen Validierung der Befunde stammt von Totterman et al. [157]. Mittels MRT diagnostizierte TFCC-Läsionen wurden durch eine anschließende Arthroskopie verifiziert.

Zusammenfassend ist die Aussagekraft dieser Studie hinsichtlich der Beurteilung der Sensitivität der Niederfeld-MRT durch den teilweise fehlenden Goldstandard der Diagnosesicherung einzelner Krankheitsbilder eingeschränkt. Es ist also mittels Niederfeld-MRT nicht sicher zu beweisen, ob eine in der Niederfeld-MRT diagnostizierte Läsion auch wirklich dieser Läsion entspricht. Dies wäre zuverlässig mit einer Arthroskopie bzw. intraoperativen Validierung möglich gewesen, jedoch ist dieses Vorgehen nicht immer realisierbar, da nicht für jeden Patienten die Indikation für einen invasiven Eingriff gestellt wird und möglicherweise schon vorangegangene bildgebende Untersuchungsverfahren eine Diagnosesicherung ermöglichen. Auch ist der Vergleich der bildgebenden Verfahren mit intraoperativ erhobenen Befunden in der Literatur zu akutem und chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz die Ausnahme und liegt nur für Untersuchungen einzelner Pathologien wie beispielsweise der TFCC-Läsion vor [104, 157]. Im Unterschied dazu wurde in dieser Arbeit ein breites Spektrum verschiedener pathologischer Veränderungen analysiert. Um die Aussagekraft der konventionellen Projektionsradiographie für unterschiedliche Pathologien vergleichen zu können, macht es daher Sinn, diese auf einen einheitlichen Referenzstandard, wie beispielsweise der dedizierten Niederfeld-MRT, zu beziehen.

Inwieweit die Niederfeldkernspintomographie hinsichtlich der einzelnen Krankheitsbilder einen diagnostischen Vorteil gegenüber der Projektionsradiographie bringt, wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

6.2 Interpretation der Ergebnisse

6.2.2 Interpretation der Ergebnisse hinsichtlich der beteiligten Strukturen

Verletzungen knöcherner Strukturen

Die Projektionsradiographie gilt in der Darstellung ossärer Verletzungen als Methode der Wahl. Jedoch stellt sich die Frage, inwieweit die Niederfeldkernspintomographie einen diagnostischen Zusatznutzen in der Frakturdiagnostik hat.

Distale Radiusfraktur Die distale Radiusfraktur war immerhin in 46,2 % der Fälle projektoradiographisch nachweisbar, und in 30,8 % falsch-negativ. Im Gegenzug war die Projektionsradiographie aber nur in 2,1 % falsch-positiv. Nur in einem einzigen Fall konnte die MRT nicht weiterhelfen. Obwohl die Projektionsradiographie ein lange etabliertes Verfahren ist und die typischen Befundmuster der distalen Radiusfraktur landläufig bekannt sind, war in unserer Untersuchung eine hohe Zahl der distalen Radiusfrakturen radiologisch okkult (30,8 % falsch-negativ). Die hohe Zahl an Nebendiagnosen unterstreicht die Bedeutung der MRT als sinnvolle Zusatzdiagnostik bei dem Verdacht auf eine distale Radiusfraktur.

Skaphoidfraktur Die Skaphoidfraktur ist projektoradiographisch schwer erfassbar. Insofern kann diskutiert werden, ob die dedizierte Niederfeldkernspintomographie bei entsprechender Klinik nicht generell empfohlen werden kann. Andere Studien belegen bereits die Überlegenheit der MRT gegenüber der Projektionsradiographie in der Frühdiagnostik von okkulten Frakturen, eine frühzeitige Indikation für eine MRT-Untersuchung ist dementsprechend gegeben [12]. Zudem stellt die dedizierte Niederfeld-MRT ein relativ kostengünstiges Verfahren dar, deren Kosten sich inklusive initialer Projektionsradiographie auf einen Beitrag zwischen 87 und 92 Euro belaufen. Die alleinige Durchführung einer projektoradiographischen Untersuchung mit einer Verlaufskontrolle nach 14 Tagen mag zwar mit Ausgaben zwischen 24 und 36 Euro als die kostengünstigere Variante erscheinen, jedoch können Begleitverletzungen wie ligamentäre Verletzungen mit diesem Untersuchungsverfahren nur schwer erfasst werden. Da eine Skaphoidfraktur projektoradiographisch erst sicher 14 Tage nach dem Trauma diagnostiziert werden kann, trägt eine zeitnahe Untersuchung mittels Niederfeld-MRT zur frühzeitigen Diagnosesicherung mit entsprechenden therapeutischen Konsequenzen bei. Alleine der projektoradiographische Verdacht auf eine Skaphoidfraktur hat eine Ruhigstellung mittels Gipsverband zur Folge. Könnte man jedoch gleich am Tag des Traumas eine Skaphoidfraktur sicher ausschließen, so würde man dem

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Patienten eine nicht indizierte Immobilisation der Extremität ersparen. So könnte beispielsweise der sichere Ausschluss einer Skaphoidfraktur durch die Niederfeld-MRT unmittelbar nach dem Trauma einen entscheidenden Beitrag zur weiteren Behandlung des Patienten leisten. In diesem Zusammenhang hat die zeitnahe Durchführung einer Niederfeldkernspintomographie einen entscheidenden Einfluss auf das weitere Behandlungskonzept. Die hohe Anzahl an Nebendiagnosen in der Niederfeld-MRT untermauern deren diagnostischen Nutzen in einer chirurgischen Ambulanz.

Andere Frakturen Ebenso wie bei der Skaphoidfraktur gilt, dass eine hohe Zahl an Frakturen der übrigen Carpalia projektionsradiographisch okkult bleibt und sich erneut die Frage stellt, ob die Niederfeld-MRT als ergänzendes Verfahren bei Hand- bzw. Handgelenkstraumata und unklarem projektionsradiographischen Befund bei bestehender Klinik als Routineverfahren indiziert ist.

Hier hat die Niederfeld-MRT klare Vorteile, da diese schneller verfügbar und kostengünstiger gegenüber einer Untersuchung mittels Hochfeld-MRT ist. Alternativ spielt die Computertomographie in der Frakturdiagnostik eine entscheidende Rolle, jedoch können diskoligamentäre Läsionen mit diesem Untersuchungsverfahren nicht nachgewiesen werden, was für die Durchführung einer Niederfeld-MRT spricht. Auch hier empfiehlt sich aufgrund der hohen Anzahl an Nebenbefunden die zeitnahe Durchführung einer Niederfeld-MRT.

Verletzungen von Weichteil- und Knorpelstrukturen

Diverse andere Studien belegen die herausragenden Eigenschaften der Niederfeld-MRT in der Diagnostik pathologischer Veränderungen von Weichteil- und Knorpelstrukturen [6, 7, 158]. Allerdings wurde bislang nicht hinsichtlich der Dauer der bestehenden Beschwerden differenziert. Im Rahmen der vorliegenden Studie soll sowohl für das akute Hand- und Handgelenkstrauma, als auch für den chronischen Hand- bzw. Handgelenksschmerz die hohe Wertigkeit der Niederfeld-MRT in der Diagnosesicherung bestens reproduziert werden.

Rupturen des Band- und Sehnenapparates Die Projektionsradiographie ist hier offenbar von nur geringem Nutzen, wenngleich die hohe Zahl an vermuteten SL-Bandrupturen in der Projektionsradiographie darauf hinweist, dass wir aufgrund der Spezialisierung der Abteilung sehr sensitiv sind. Die Niederfeld-MRT ist hier sicher überlegen und immer indiziert. Jedoch fällt auf, dass die von uns verwendete Niederfeld-MRT bei vorhandener Klinik bei insgesamt 36 Patienten (15,3 %) ebenfalls keine abschließende Diagnose zuließ,

6.2 Interpretation der Ergebnisse

was möglicherweise auf die relativ geringe Auflösung (Voxelgröße) zurückzuführen ist, welche nicht immer eine sichere Unterscheidung der palmaren und volaren Zügel z.B. des SL-Bandes zulässt.

Diskusläsion Die hohe Zahl an unsicheren Befunden in der Niederfeldkernspintomographie zeigt, dass offenbar große Schwächen beim Nachweis von Diskusläsionen bestehen. Zwar kann die Kontrastmittelgabe eine Diskusläsion insbesondere bei längerem Bestehen sicher identifizieren. Da der Diskus in der T1- und T2-gewichteten Sequenz aber überwiegend signalarm zur Darstellung kommt, entgehen unter Umständen kleinere Risse in der nur grob aufgelösten STIR-Sequenz dem Nachweis, da STIR-Sequenzen zum einen den Nachteil eines schlechten Signal-zu Rausch-Verhältnis haben, und zum anderen aufgrund der langen Messzeit eine schwächere Auflösung haben. Umgekehrt kann es sein, dass extradiskale Signalanhebungen, z.B. durch ein Weichteilödem, fälschlicherweise als Diskusläsion gewertet werden.

Raumforderungen Die Niederfeldkernspintomographie ist der Projektionsradiographie hinsichtlich des Nachweises von Raumforderungen sicher überlegen. Dennoch hat die Niederfeldkernspintomographie auch hier wiederum den Nachteil, dass aufgrund der deutlich geringeren Auflösung sowohl der Nachweis, als auch die Artdiagnose von Raumforderungen unter Umständen erschwert sein kann. Dennoch rechtfertigt die hohe Zahl an sicheren Befunden nicht den Schluß, Patienten mit dieser Fragestellung von vorneherein mittels Hochfeldkernspintomographie zu untersuchen. Die Relevanz einer kernspintomographischen Untersuchung bei Verdacht auf eine raumfordernde Struktur, insbesondere Ganglien, wird durch mehrere Studien belegt [10, 132]. Die einerseits hohe Anzahl sicherer Diagnosen und andererseits sehr niedrige Anzahl unsicherer Befunde in der Niederfeldkernspintomographie spricht für deren Durchführung bei Verdacht auf eine Raumforderung.

Sonstige Pathologien In dieser Kategorie wurden wegen ihrer geringen Fallzahl degenerative und entzündliche Prozesse zusammengefasst. Hinsichtlich der Diagnosesicherung konnte bei Zustand nach akutem Hand- bzw. Handgelenkstrauma zwischen den beiden bildgebenden Verfahren kein signifikanter Unterschied ($p = 1,0$) festgestellt werden. Da im klinischen Alltag erfahrungsgemäß entzündliche Veränderungen (vor allem von Weichteilen)

6.2 Interpretation der Ergebnisse

kernspintomographisch erkannt werden können, ist das niedrige Signifikanzniveau wahrscheinlich auf die hohe Sensitivität der Projektionsradiographie für degenerative Prozesse zurückzuführen. Allerdings wurde nur die Hälfte der kernspintomographisch auffälligen Befunde auch in der Projektionsradiographie erkannt. Zudem konnte ca. ein Drittel der als auffällig bewerteten projektionsradiographischen Aufnahmen in der Kernspintomographie nicht bestätigt werden.

Bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz konnte jedoch ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden bildgebenden Verfahren festgestellt werden ($p < 0,031$). Dies ist mitunter auf die hohe Anzahl an entzündlichen Prozessen zurückzuführen, welche erfahrungsgemäß besser in der Kernspintomographie diagnostiziert werden können. Die hohe Anzahl an falsch-negativen Befunden in der Projektionsradiographie untermauert die Relevanz weiterführender bildgebender Verfahren wie der Niederfeldkernspintomographie bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz.

6.2.3 Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Literatur

Der Vergleich der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit Angaben aus der Literatur wird hauptsächlich durch die folgenden Abweichungen im Studiendesign erschwert: (i) Unterschiede in der Auswahl des Patientenkollektivs; (ii) Unterschiede in der Definition und Auswahl der analysierten Verletzungen; (iii) Unterschiede in der methodischen Durchführung der Bildgebung und der Definition des Goldstandards. Trotz der genannten Einschränkungen soll eine Einordnung der Ergebnisse im Kontext der Literatur erfolgen.

Bei Frakturen der oberen Extremität sprechen, mit wenigen Ausnahmen, die Ergebnisse diverser Studien, im Einklang mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, für einen diagnostischen Vorteil der Niederfeld-MRT gegenüber der konventionellen Projektionsradiographie [32, 156, 159–162]. Hottya et al. untersuchten 46 Patienten mit akutem Trauma der oberen Extremität und unauffälliger Projektionsradiographie mittels Niederfeld-MRT [156]. In 21 Fällen konnte die Diagnose einer initial übersehenen Fraktur der oberen Extremität gesichert werden. Die Autoren dieser Studie gaben für die Niederfeld-MRT eine Sensitivität von 100 % und Spezifität von 96 % an, ein positiver und negativer prädiktiver Wert wurde nicht ermittelt. Zusätzlich wurden 21 Begleitverletzungen der Weichteile nachgewiesen, insbesondere Diskusläsionen (n=5), Sehnen- und Bandverletzungen (n=5) sowie posttraumatische Synovitiden (n=7). Die durch die Niederfeld-MRT gewonnenen Zusatzinformationen und gesicherten Diagnosen hatten in 45 % der Fälle eine Änderung des Therapiekonzepts und der Behandlung zur Folge und unnötige Immobilisation konnte

6.2 Interpretation der Ergebnisse

vermieden werden. In der vorliegenden Arbeit konnte bei 46 Patienten (46 %) eine initial mittels konventioneller Projektionsradiographie nicht nachgewiesene Fraktur gesichert werden und bei 100 Patienten mit einer Fraktur fielen insgesamt 99 Zusatzdiagnosen auf. Allerdings wurden von Hottya et al. nur Patienten mit negativer Projektionsradiographie eingeschlossen, was in der vorliegenden Arbeit nicht der Fall ist und einen direkten Vergleich erschwert. Die Schlussfolgerungen der Studie von Hottya et al. hinsichtlich einer vermehrten Anwendung der Niederfeld-MRT stimmen mit möglichen Folgerungen dieser Arbeit überein.

Nikken et al. untersuchten bei 90 Patienten prospektiv den Mehrwert der Niederfeld-MRT hinsichtlich erweiterter Therapiemaßnahmen [159]. 44 Probanden mit akutem Handgelenktrauma erhielten neben der Projektionsradiographie auch eine Niederfeld-MRT. Selbst unter Ausschluss von zusätzlich diagnostizierten Verletzungen, die jedoch keinerlei therapeutische Konsequenz nach sich zogen, wurde ein zusätzlicher Wert der Niederfeld-MRT hinsichtlich der adäquaten Einschätzung und Vorhersage der Notwendigkeit einer Behandlung nachgewiesen. Da die detektierten Weichteilverletzungen dieser Studie meist ohne therapeutische Konsequenz blieben, traf dies insbesondere für projektionsradiographisch okkulte Skaphoid- und distale Radiusfrakturen zu. In dieser Dissertation wurde primär die diagnostische Wertigkeit der Niederfeld-MRT untersucht und die Auswirkungen auf die nachfolgende Therapie wurden im Einzelfall nicht nachvollzogen. Ein direkter Vergleich der Qualitätsmerkmale der angewendeten diagnostischen Methoden ist hier nicht möglich. Allerdings stimmen die gezogenen Schlussfolgerungen mit denen dieser Dissertation dahingehend überein, dass bei akutem Handgelenktrauma, negativer Projektionsradiographie, aber bestehendem klinischen Verdacht die Durchführung einer Niederfeld-MRT gerechtfertigt ist.

Breitenseher et al. führten bei 12 Patienten mit unauffälliger projektionsradiographischer Bildgebung, jedoch mit klinischen Zeichen einer Skaphoidfraktur, sowohl eine 0,2-Tesla-, als auch 1,0-Tesla-MRT durch [163]. Bei 6 Patienten konnten übereinstimmend in beiden MRT-Systemen 7 Frakturen nachgewiesen werden. Die Autoren votieren daher für den Einsatz einer MRT-Untersuchung bei bestehender Klinik und negativer Projektionsradiographie.

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Eine der wenigen Studien, die einen routinemäßigen Einsatz der Niederfeld-MRT in der Diagnostik von Frakturen nicht gerechtfertigt sieht, wurde von Remplik et al. durchgeführt [155]. Ein Vorteil der Niederfeld-MRT bestand nur in der Diagnostik von Frakturen, welche in der Nähe von großen Gelenken lokalisiert waren. Für Frakturen des Vorfußes und der Hand ergab sich kein Vorteil für die Niederfeld-MRT. Laut den Autoren ist somit eine routinemäßige Durchführung der Niederfeld-MRT anstelle einer Projektionsradiographie in der Diagnostik von Frakturen der Extremitäten nicht gerechtfertigt. Eine Ursache für die deutliche Diskrepanz zu anderen Studien liegt sicherlich in der Auswahl des Patientenkollektives. Im Gegensatz zu den oben genannten Studien wurde dieses nach folgenden Kritierien ausgewählt: (i) Vorhandensein von Niederfeld-MRT und Projektionsradiographie; (ii) Nach dem offensichtlichen Nachweis einer ossären Pathologie oder einem unklaren Befund in der MRT wurde nachfolgend eine projektionsradiographische Aufnahme angefertigt ($n=92$); (iii) Von diesen wurden retrospektiv 78 Patienten ausgewählt, bei denen von zwei erfahrenen Radiologen eine zuverlässige Diagnose gestellt werden konnte (Goldstandard). Danach wurden die Aufnahmen erneut jeweils zwei Radiologen zur Beurteilung vorgelegt, allerdings mit Verblindung hinsichtlich der Ergebnisse des "Goldstandards" und der Klinik des Patienten. Die Resultate dieser Reevaluierung wurden für die Berechnung der Sensitivität, Spezifität und der diagnostischen Genauigkeit der bildgebenden Verfahren herangezogen. Bei der Darstellung der Ergebnisse wurde zwischen Knie-, Knöchel-, Vorfuß-, distalen Radius- und Handgelenks-, Mittelhand- und Fingerfrakturen unterschieden. Für die distalen Radiusfrakturen wurde von Remplik et al. für die Projektionsradiographie mit 82,2 % eine höhere Sensitivität als in den Daten dieser Arbeit (67,5 %) berechnet. Die Spezifität wurde dagegen mit 83,3 % vs. 95,8 % etwas niedriger angegeben. Die Genauigkeit der Projektionsradiographie wurde mit 82,4 % angegeben. Allerdings geht nicht klar hervor, ob bei deren Berechnung die Prävalenz dieser Fraktur berücksichtigt wurde [155]. In der vorliegenden Arbeit beläuft sich eine nach diesem Vorbild berechnete Genauigkeit der Projektionsradiographie auf 87,5 % und ist hier etwa 5 % höher. Die detaillierte Gegenüberstellung der Ergebnisse der anderen Pathologien ist wegen deren mangelnden Differenzierung nicht möglich. Allerdings ist auch die Vergleichbarkeit der Studienergebnisse aufgrund der Unterschiede im Studiendesign limitiert. Im Gegensatz zu vielen anderen Studien, unterliegt die Studie von Remplik et al. nicht dem Bias, vornehmlich Patienten mit negativem projektionsradiographischen Befund mittels MRT zu untersuchen und damit eine a priori Benachteiligung der konventionellen Projektionsradiographie zu begünstigen. Umgekehrt erscheint die Auswahl der Patienten in dieser Studie fraglich, so wurde nicht

6.2 Interpretation der Ergebnisse

unterschieden, wie viele der 92 Patienten mit einer klaren Diagnose im MRT nur noch mittels Projektionsradiographie nachuntersucht wurden und bei wie vielen Patienten in der MRT unklare Befunde vorlagen. Die weitere Selektion von 78 Patienten mit einer gesicherten Diagnose legt die Vermutung nahe, dass letztendlich nur offensichtliche Frakturen untersucht wurden. Dass diese dann auch in der Projektionsradiographie auffallen, erscheint vor diesem Hintergrund nicht weiter verwunderlich. Auch ist aus meiner Sicht die Verblindung der Nachuntersucher in Bezug auf die Klinik ein Schwachpunkt, da beispielsweise durch Zusatzinformationen wie Intensität und Lokalisation der Schmerzen eine höhere Treffsicherheit zu erwarten gewesen wäre. Ein weiterer Nachteil dieser Studie ist zudem die mangelnde Beachtung von Weichteilverletzungen, die beispielsweise bei distalen Radiusfrakturen häufig zu beobachten sind (vergleiche 33 Weichteilverletzungen bei 40 distalen Radiusfrakturen).

Da die Beurteilung von Band- und Sehnenstrukturen in der konventionellen Projektionsradiographie nur indirekt möglich ist, existieren hier keine gezielt erhobenen Aussagen hinsichtlich der üblichen Qualitätsmerkmale. Die schlechte Sensitivität und Spezifität der Projektionsradiographie in der Diagnostik von Weichteilverletzungen wird in vergleichenden Studien durch eine Hervorhebung des Mehrwerts einer MRT-Untersuchung deutlich [13–15, 18, 20, 55]. Taouli et al. führten einen Vergleich zwischen 0,2 Tesla-, 1,5 Tesla-MRT und Projektionsradiographie bei 18 Patienten mit rheumatoider Arthritis durch. Zwischen den beiden MRT-Systemen konnte kein signifikanter Unterschied in der Einteilung des Schweregrades der Arthritis festgestellt werden. Eine Beurteilung wichtiger Parameter für den Schweregrad war im Vergleich zur Projektionsradiographie allerdings signifikant besser möglich [164]. Vorteile der MRT für die frühe Detektion von Knochenerosionen und den Nachweis einer Synovitis sind bereits aus früheren Arbeiten bekannt [165–169].

Abschätzung potentieller therapeutischer Konsequenzen in Zusammenschau mit den Daten der Literatur

Aus klinischer Sicht interessiert die Frage nach den potentiellen therapeutischen Konsequenzen, die aus möglicherweise übersehenen Verletzungen resultieren. Oder, im schlechtesten Fall, die Frage nach Folgeschäden, die sich aufgrund einer unterlassenen Behandlung ergeben und mit einer korrekt gestellten Diagnose mit anschließender Therapie hätten vermieden werden können. Das Studiendesign dieser retrospektiven Arbeit erlaubt keine fundierte Bearbeitung dieser Fragestellung. Insbesondere wurden keine prospektiven Daten von randomisiert eingeteilten diagnostischen Gruppen (beispielsweise 1=konventionelle

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Projektionsradiographie, 2=konventionelle Projektionsradiographie und Niederfeld-MRT, 3=Niederfeld-MRT) hinsichtlich der eingeleiteten Therapie und des klinischen Outcome erhoben. Eine solche Studie ist bislang für die Mehrzahl der hier untersuchten Pathologien auch in der Literatur nicht beschrieben. Allerdings gab es zahlreiche Versuche, den Nutzen der Niederfeld-MRT im Sinne einer Therapieoptimierung durch zusätzliche Informationen abzuschätzen. Die hier zu beobachtenden Unterschiede sind erheblich und der Begriff der “optimalen weiteren Behandlung“ bietet Raum für unterschiedliche Interpretationen.

In einer Kohorte von 308 Patienten mit Traumata (62 %) oder rheumatologisch-entzündlichen Fragestellungen (21 %) vermochte die Niederfeld-MRT bei 90 % der untersuchten Patienten, im Vergleich zur klinischen und projektionsradiographischen Untersuchung, zusätzliche Informationen beizutragen, die der optimalen weiteren Behandlung dienten [7].

Hobby et al. analysierten, ob die Durchführung einer MRT eine Änderung der geplanten Behandlungsstrategie bei Patienten mit Handgelenksschmerz zur Folge hat. Bei 55 von 98 Patienten kam es zu einer Änderung der Diagnose. Von den restlichen 43 Patienten konnte die MRT in 23 Fällen die Diagnose zweifelsfrei sichern. Laut den behandelnden Klinikern kam es in 67 Fällen zu einem besseren Krankheitsverständnis und in 45 Fällen zu einer Änderung der Behandlung [170].

In einer Studie von Nikken et al. war eine positive Niederfeld-MRT in der mehrfaktoriellen Varianzanalyse mit einer Odds Ratio von 6,28 prädiktiv für eine weitere Behandlung. Für die Abschätzung der Behandlungsindikation bei akutem Handgelenkstrauma war eine zusätzlich zur Projektionsradiographie durchgeführte Niederfeld-MRT somit von Nutzen [159].

In unserer Kohorte wurden mittels Niederfeld-MRT n=293 Diagnosen gesichert, in der konventionellen Projektionsradiographie dagegen nur n=58 (19 %). Eine Untersuchung der tatsächlichen therapeutischen Konsequenzen im Einzelfall wurde nicht durchgeführt. Es ist anzunehmen, dass viele Verletzungen der Band- und Knorpelstrukturen keine weiteren therapeutischen Maßnahmen außer einer prolongierten Immobilisation zur Folge haben. Diese würde bei fortbestehender Klinik sowieso erfolgen. Auch besteht kein zwingender Zusammenhang von übersehener Diagnose und dem Auftreten von Komplikationen. Beispielsweise ist nicht belegt, dass projektionsradiographisch okkulte distale Radiusfrakturen mit einer erhöhten Komplikationsrate assoziiert sind [159]. Ein Sonderfall sind möglicherweise die Skaphoidfrakturen. Diese sind in der initialen Bildgebung projektionsradiographisch oft unauffällig, ziehen aber, falls nicht adäquat behandelt, oftmals Komplikationen und schmerzhafte Folgeschäden (z.B. Skaphoidpseudarthrose) nach sich [44–46].

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Zusammengefasst liegt die Vermutung nahe, dass in der Kohorte der vorliegenden Arbeit die Niederfeld-MRT einen Beitrag zu der optimalen Behandlung der unterschiedlichen Krankheitsbilder leisten konnte. Inwieweit die potentiell eingeleiteten Therapiemaßnahmen zu einer Verbesserung des klinischen Outcome führten, kann nicht beantwortet werden. D.h. aus diagnostischer Sicht bringt die Niederfeld-MRT mehr Informationen, ob dieser Wissenszuwachs allerdings rein akademischer Natur ohne praktische Relevanz ist, muss in weiteren Studien untersucht werden. Allerdings erscheint die Niederfeld-MRT, wie auch durch andere Studien nahegelegt [40, 159], insbesondere bei projektionsradiographisch unauffälligen Patienten mit klinischen Zeichen einer Handgelenksverletzung als ein wertvolles Zusatzdiagnostikum von potentieller therapeutischer Relevanz.

6.2.4 Interpretation der Ergebnisse der Intra- und Interobserver Variabilität

Methodische Einschränkungen

Untersuchungen der Leistungsfähigkeit diagnostischer Methoden sind essentiell für deren Vergleich. Bei Vorhandensein eines Goldstandards für die Beurteilung des wahren Krankheitsstatus dienen solche Studien oft dazu, die diagnostische Treffsicherheit der Beobachter zu evaluieren [171]. Allerdings ist ein Goldstandard nicht immer vorhanden und der wahre Status der Krankheit ist nicht bekannt. Eine weitere Möglichkeit, die Qualität einer Methode zu evaluieren, ist die Übereinstimmung zwischen verschiedenen Beobachtern zu erfassen (Interobserver Variabilität) [172]. Wie andere quantitative Abschätzungen auch, hängt diese Übereinstimmung von Unterschieden in der analysierten Stichprobe und einer damit verbundenen Variabilität ab [173]. Die Interobserver Variabilität könnte beispielsweise durch die untersuchten Fälle, die Beobachter selbst, die angewandten Methoden und deren Interaktion beeinflusst werden [174]. Laut Sadatsafavi et al. scheint bei den meisten Studien insbesondere die geringe Anzahl an Beobachtern ein Schwachpunkt zu sein. Die Mehrzahl der Veröffentlichungen sei durch die geringe Anzahl der Beobachter in ihrer Aussagekraft limitiert und die Abschätzung der Interobserver Variabilität nicht verlässlich. Eine Literaturrecherche ergab, dass die Beurteilung einer Methode in 93 berücksichtigten Arbeiten von durchschnittlich drei Beobachtern durchgeführt wurde. Eine absolute Empfehlung für die Zahl der einzusetzenden Beobachter wird nicht gegeben. Diese hänge von der zu erwartenden Varianz der Methode und des untersuchten Kollektivs ab, besonders stark aber von der Übereinstimmung der Beurteilung zwischen zwei Beobachtern. Letztere kann, wie beispielsweise bei radiologischen Verfahren, sehr hoch sein [175] und eine Beurteilung durch nur zwei Beobachter kann unter Umständen ausreichend sein [176].

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Auch in der vorliegenden Arbeit wurde die Abschätzung der Inter- und Intraobserver Variabilität auf der Grundlage von der minimal notwendigen Zahl von zwei Beobachtern durchgeführt. Eine Abweichung dieser Werte von der tatsächlichen Qualität der Methode, verursacht durch einen überproportionalen Einfluss der geringen Anzahl von Beobachtern, ist daher nicht auszuschließen.

Intraobserver Variabilität In der Diagnostik des akuten Hand- bzw. Handgelenkschmerzes deuten die hohen Intra-Klassen-Koeffizienten auf eine gute Reproduzierbarkeit der Diagnosesicherung durch einen Untersucher hin. Insbesondere in der Diagnostik von Verletzungen knöcherner Strukturen, wie beispielsweise der distalen Radius- und Skaphoidfraktur, scheint die Niederfeld-MRT ein zuverlässiges bildgebendes Verfahren zu sein. Da die Projektionsradiographie gerade in dieser Frühphase nur eine begrenzte diagnostische Aussagekraft besitzt, scheint hier die routinemäßige, frühzeitige Anwendung der Niederfeld-MRT indiziert zu sein. Hinsichtlich der Diagnosesicherung von häufig auftretenden Begleitverletzungen ligamentärer Strukturen und einer Läsion des Discus triangularis lassen sich zwar noch hoch signifikante Übereinstimmungen der gestellten Diagnosen aufzeigen, allerdings werden diese im Vergleich zu den Frakturen deutlich häufiger übersehen bzw. nicht konsistent erkannt. Für mögliche Schwierigkeiten in der Detektion von Band- und Diskusläsionen sprechen auch die Unterschiede in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zwischen den beiden Untersuchern der vorliegenden Arbeit. Im Fall der Frakturen waren diese minimal, bei den Verletzungen des Band- und Sehnenapparates und Diskusläsionen jedoch recht deutlich. Verschiedene Werte in der Intraobserver Variabilität könnten Unterschiede im Ausbildungsstand und der Erfahrung der befundenden Ärzte (Facharzt versus Assistenzarzt in der Weiterbildung) widerspiegeln. Die sichere Diagnose knöcherner Verletzungen scheint, gemessen an der von Weichteilverletzungen, für eine zuverlässige Detektion ein geringeres Maß an Erfahrung vorauszusetzen. Für die gezielte Untersuchung von Begleitverletzungen könnte somit die Durchführung einer hochauflösenden Hochfeld-kernspintomographie weitere diagnostische Vorteile bringen, was in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht näher untersucht wurde.

In der Diagnostik des chronischen Hand- bzw. Handgelenksschmerzes spielen, im Gegensatz zu der akuten Erkrankung, Pathologien des Binde- und Knorpelgewebes eine bedeutende Rolle. Insgesamt betrachtet fand sich für beide Untersucher eine zufriedenstellende Reproduzierbarkeit der Diagnose, insbesondere für entzündliche Veränderungen. Vor allem Ganglien wurden höchst zuverlässig erkannt und Diskusläsionen konnten im chronischen

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Stadium tendenziell besser erfasst werden als bei frischen Traumata. Dies kann auf Veränderungen in der Gewebestruktur im Rahmen von Heilungs- und Regenerationsprozessen bei chronischen Diskusläsionen zurückgeführt werden. In der Diagnose von Tumoren scheint die Erfahrung des Untersuchers wieder von Bedeutung zu sein. Ein erfahrener Facharzt erreicht auch hier ein hohes Maß an Reproduzierbarkeit seiner Befunde. Allerdings war auch hier der Vergleich mit weiteren Methoden der Diagnosesicherung nicht möglich und nur der Unterschied zwischen den beiden Untersuchern ist ein Hinweis auf die mögliche Überlegenheit anderer Verfahren wie der Hochfeld-MRT.

Interobserver Variabilität Die Analyse der Interobserver Variabilität liefert im Grunde ein ähnliches Bild wie die Intraobserver Variabilität: Insbesondere bei frischen Frakturen, chronisch entzündlichen Veränderungen und Ganglien kann die Diagnose unabhängig vom Ausbildungsstand der untersuchenden Person in der Niederfeldkernspintomographie zuverlässig gestellt werden. Wie bei der hohen Intraobserver Variabilität postuliert, scheint die sichere Diagnosestellung bei akuten Band- und Diskusläsionen sowie Tumoren anspruchsvoller zu sein. Auch wenn für letztere Pathologien noch ein guter Intra-Klassen-Koeffizient berechnet wurde, können zusätzliche diagnostische Maßnahmen hier möglicherweise zur endgültigen Bestätigung der Diagnose noch einen wertvollen Beitrag liefern.

Schlussfolgerungen aus der Analyse der Intra- und Interobserver Variabilität

Bei akutem Handgelenkstrauma ist wegen der Vielzahl an Nebendiagnosen und projektionsradiographisch okkulten Frakturen die Niederfeldkernspintomographie als ergänzendes Diagnostikum aufgrund des guten Kosten-Nutzen-Verhältnisses und der besseren Patientencompliance sicher für den routinemäßigen Einsatz empfehlenswert. Zwar lässt die Computertomographie nach wie vor eine bessere Detektion von Kortikalisstufen oder Avulsionsfrakturen zu, Verletzungen des Band- oder Sehnenapparates können mit diesem Untersuchungsverfahren aber nicht evaluiert werden [9, 149].

Bei chronischem Hand-bzw. Handgelenksschmerz ist der Einsatz der Niederfeldkernspintomographie aber aufgrund der hohen Zahl disko-ligamentärer Verletzungen, die auch in der Niederfeld-MRT nicht oder nicht sicher nachweisbar sind, bzw. in der das genaue Ausmaß nicht einschätzbar ist, eher nicht empfehlenswert. Auch scheint für die zuverlässige Detektion von Band- und Diskusläsionen die Erfahrung des Arztes eine nicht unerhebliche Rolle zu spielen. Hier ist die Hochfeldkernspintomographie auch hinsichtlich der publizierten Literatur ggf. mit MR-Arthrographie vorzuziehen. Allerdings haben wir gerade bei den

6.2 Interpretation der Ergebnisse

Bandläsionen und Diskusläsionen keine Daten zur Spezifität unserer Befunde, da wir keine Korrelation zur Arthroskopie, als Goldstandard, haben. Die Daten der Studie weisen jedoch darauf hin, dass bei Verdacht auf einen entzündlichen Prozess eine kernspintomographische Untersuchung, wie beispielsweise die Niederfeldkernspintomographie, hinsichtlich der Diagnosesicherung von Vorteil ist.

7 Zusammenfassung

In der Bundesrepublik Deutschland entfällt ein beträchtlicher Anteil der Sport- und Freizeitverletzungen auf Hand- bzw. Handgelenksverletzungen. Da diese Verletzungen unentdeckt und unbehandelt nicht selten Folgeschäden oder chronische Schmerzen verursachen und hohe Kosten durch Langzeittherapien nach sich ziehen, ist eine exakte Diagnostik und Darstellung der Läsionen mittels adäquater bildgebender Verfahren von erheblicher Bedeutung.

Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, ob der Einsatz eines dedizierten Niederfeld-MRTs in der Diagnostik von Hand- bzw. Handgelenksverletzungen in einer chirurgischen Ambulanz unter dem Gesichtspunkt der Diagnosesicherung gerechtfertigt ist.

Um diese Frage zu untersuchen, wurden retrospektiv alle Patienten der chirurgischen Poliklinik der LMU München aus dem Zeitraum von Anfang 2003 bis Ende 2004 erfasst, bei denen eine Projektionsradiographie und eine Niederfeld-MRT durchgeführt wurden. Die systematische Dokumentation sämtlicher Haupt- und Nebendiagnosen erlaubte den umfassenden Vergleich der bildgebenden Verfahren hinsichtlich ihrer Sensitivität und Spezifität für unterschiedliche Krankheitsbilder. Deren klinische Einteilung berücksichtigte unter anderem auch den zeitlichen Verlauf der Beschwerden, um Empfehlungen hinsichtlich des Zeitpunktes einer Zusatzuntersuchung mittels der Niederfeld-MRT zu ermöglichen. Ein weiterer wichtiger Schritt für die Beurteilung der diagnostischen Wertigkeit der Niederfeld-MRT war die Untersuchung der Intra- und Interobserver Variabilität.

Die Projektionsradiographie stellt nach wie vor wegen der leichten Verfügbarkeit und der geringen Untersuchungskosten das bildgebende Verfahren der Wahl für die initiale Beurteilung des akuten und chronischen Hand- und Handgelenksschmerzes dar.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit weisen darauf hin, dass aufgrund der hohen Anzahl projektionsradiographisch okkulter Frakturen sowie der hohen Zahl an ossären, diskoligamentären Begleitverletzungen und Nebendiagnosen die Niederfeld-MRT als ergänzendes Diagnostikum für den routinemäßigen Einsatz in einer chirurgischen Ambulanz für die Diagnosesicherung zu empfehlen ist und der Projektionsradiographie signifikant überlegen ist. Allerdings bleibt die Frage, ob der Einsatz der Niederfeld-MRT auch aus therapeutischer Sicht sinnvoll ist und letztendlich zu einer Verbesserung des klinischen Outcome führt, offen.

Die radiologische Erfahrung scheint in der Diagnostik von Frakturen, chronischen Entzündungen und Ganglien eher von untergeordneter Rolle zu sein, da sich in der vorliegenden Arbeit hier kaum Unterschiede in der Diagnosesicherung zwischen einem erfahrenen Facharzt und einem Assistentsarzt in der Weiterbildung zeigten und eine hohe Reproduzierbarkeit der Diagnosesicherung zu verzeichnen war.

Hinsichtlich der Diagnostik von Verletzungen des Discus triangularis sowie des Band- und Sehnenapparates liefert die Niederfeld-MRT wertvolle Zusatzinformationen, die genaue Bestimmung des Ausmaßes der Verletzung und letztendlich eine zuverlässige Diagnosesicherung kann jedoch durch dieses Verfahren nicht immer gewährleistet werden. Zudem setzt die sichere Diagnostik von diskoligamentären Verletzungen möglicherweise einen gewissen Kenntnisstand des Radiologen in der Beurteilung niederfeldkernspintomographischer Aufnahmen voraus, wobei die Diagnostik von Diskusläsionen bei chronischem Handgelenkschmerz im Vergleich zum akuten Trauma tendenziell zuverlässigere Ergebnisse liefert. Gerade in diesem Zusammenhang rückt die diagnostische Aussagekraft der bildgebenden Verfahren, wie der Hochfeld-MRT ggf. mit MR-Arthrographie und der Arthroskopie, als minimal-invasives Untersuchungsverfahren, bei Verdacht auf eine diskoligamentäre Verletzung in den Vordergrund. Auch bei Verdacht auf eine Raumforderung stellt die Niederfeld-MRT aufgrund der hohen Anzahl falsch-negativer Befunde in der Projektionsradiographie ein empfehlenswertes Diagnostikum dar.

Zusammenfassend stellt die dedizierte Niederfeld-MRT in dem untersuchten Patientenkollektiv eine bedeutende Verbesserung in der Diagnostik von akuten Hand- bzw. Handgelenksverletzungen dar. Zudem lässt die Niederfeld-MRT bei chronischem Hand- bzw. Handgelenksschmerz, in Abhängigkeit von der Erfahrung des Untersuchers, eine Detektion von ligamentären und tumorösen Pathologien, sowie Diskusläsionen zu. Über eine Implementierung der Niederfeld-MRT in die routinemäßige Diagnostik nach akutem Trauma sollte nachgedacht werden, insbesondere bei Patienten mit vorhandenen klinischen Verletzungszeichen und unauffälliger Projektionsradiographie. Die Niederfeld-MRT geht im Gegensatz zur Computertomographie nicht mit einer erhöhten Strahlenbelastung für die Patienten einher, bietet einen hohen Patientenkomfort und es ist nur ein minimaler Platzbedarf gegenüber Untersuchungen mittels Hochfeld-MRT notwendig. In künftigen Studien muss geklärt werden, ob eine Verbesserung in der Diagnostik auch zu einer klinisch relevanten Verbesserung der Therapie führt, mit einem günstigeren Krankheitsverlauf assoziiert ist und somit vermehrt in der klinischen Routine eingesetzt werden sollte.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Steinbrück, K. Epidemiology of sports injuries—25-year-analysis of sports orthopedic-traumatologic ambulatory care. *Sportverletz Sportschaden* **13**, 38–52 (1999).
- [2] Campell, S. A. Hand injuries at leisure. *The Journal of Hand Surgery* **10B** (1985).
- [3] Biener, K. *Sportunfälle: Epidemiologie und Prävention* (Hans Huber Verlag, Bern, 1992), 2 edn.
- [4] Wolff, R. *Sportmedizin für Ärzte: Lehrbuch auf der Grundlage des Weiterbildungssystems* (Deutscher Ärzteverlag, Köln, 2007).
- [5] Kersting-Sommerhoff, B., Hof, N., Lenz, M. & Gerhardt, P. MRI of peripheral joints with a low-field dedicated system: a reliable and cost-effective alternative to high-field units? *Eur Radiol* **6**, 561–565 (1996).
- [6] Kersting-Sommerhoff, B. *et al.* MRI of the knee joint: first results of a comparison of 0,2-T specialized system and 1,5-T high field strength magnet. *Rofo* **162**, 390–395 (1995).
- [7] Bonel, H., Frick, A. & Sittek, e. a., H. Examination of the hand and wrist joints with a dedicated low-field MRI device. *Radiologe* **37**, 785–793 (1997).
- [8] Larsen, C. F., Amadio, P. C., Gilula, L. A. & Hodge, J. C. Analysis of carpal instability: I. description of the scheme. *J Hand Surg [Am]* **20**, 757–764 (1995).
- [9] Treitl, M. Bildgebende Diagnostik der Handwurzel. *Radiologie up2date* **1**, 93–1124 (2002).
- [10] Hosten, N., Schneller, A., Lemke, A., Schröder, R. & Felix, R. MRI in the diagnosis and differential diagnosis of radiocarpal diseases and injuries. *Orthopaede* **28**, 833–839 (1999).
- [11] Maschke, S., Glatzel, U., Grützner, A. & Wentzensen, A. Distale Unterarmfrakturen. *Trauma Berufskrankheit* **6**, 204–212 (Sept. 2004).

8 Literaturverzeichnis

- [12] Tang, J. B. Carpal instability associated with fracture of the distal radius. incidence, influencing factors and pathomechanics. *Chin Med J (Engl)* **105**, 758–765 (1992).
- [13] Forward, D. P., Lindau, T. R. & Melsom, D. S. Intercarpal ligament injuries associated with fractures of the distal part of the radius. *J Bone Joint Surg Am* **89**, 2334–2340 (2007).
- [14] Lindau, T., Arner, M. & Hagberg, L. Intraarticular lesions in distal fractures of the radius in young adults. a descriptive arthroscopic study in 50 patients. *J Hand Surg [Br]* **22**, 638–643 (1997).
- [15] Geissler, W. B., Freeland, A. E., Savoie, F. H., McIntyre, L. W. & Whipple, T. L. Intracarpal soft-tissue lesions associated with an intra-articular fracture of the distal end of the radius. *J Bone Joint Surg Am* **78**, 357–365 (1996).
- [16] Shih, J. T., Lee, H. M., Hou, Y. T. & Tan, C. M. Arthroscopically-assisted reduction of intra-articular fractures and soft tissue management of distal radius. *Hand Surg* **6**, 127–135 (2001).
- [17] Hanker, G. J. Radius fractures in the athlete. *Clin Sports Med* **20**, 189–201 (2001).
- [18] Fischer, M., Denzler, C. & Sennwald, G. Carpal ligament lesions associated with fresh distal radius fractures: arthroscopic study of 54 cases. *Swiss Surg* **2**, 269–72; discussion 272–3 (1996).
- [19] Mehta, J. A., Bain, G. I. & Heptinstall, R. J. Anatomical reduction of intra-articular fractures of the distal radius. An arthroscopically-assisted approach. *J Bone Joint Surg Br* **82**, 79–86 (2000).
- [20] Mohanti, R. C. & Kar, N. Study of triangular fibrocartilage of the wrist joint in colles' fracture. *Injury* **11**, 321–324 (1980).
- [21] Doczi, J. & Renner, A. Epidemiology of distal radial fractures in Budapest. A retrospective study of 2241 cases in 1989. *Acta Orthop Scand* 432–433 (1994).
- [22] Euler, E. *et al.* *Handbuch diagnostische Radiologie, Muskuloskelettales System 1* (Springer, Berlin, 2005).

8 Literaturverzeichnis

- [23] Kinzl, L. & Mentzel, M. Wertigkeit bildgebender Verfahren bei Handverletzungen und Akzeptanzmessung mit interaktiver Beteiligung von Tagungsteilnehmern. *Trauma Berufskrankh* **4**, 178–179 (2002).
- [24] Cooney, W. P., Dobyns, J. H. & Linscheid, R. L. Fractures of the scaphoid: a rational approach to management. *Clin Orthop Relat Res* 90–97 (1980).
- [25] Schunk, K. *et al.* Traumatology and diagnosis of scaphoid fracture. *Radioloe* **29**, 61–67 (1989).
- [26] Larsen, C., Brondum, V. & Skov, O. Epidemiology of scaphoid fractures in odense, denmark. *Acta Orthop Scand* **63**, 216–218 (1992).
- [27] Leslie, I. J. & Dickson, R. A. The fractured carpal scaphoid. natural history and factors influencing outcome. *J Bone Joint Surg Br* **63-B**, 225–230 (1981).
- [28] Herbert, T. The fractured scaphoid. *Quality Medical Publishing, St. Louis* (1990).
- [29] Weber, E. R. & Chao, E. Y. An experimental approach to the mechanism of scaphoid waist fractures. *J Hand Surg [Am]* **3**, 142–148 (1978).
- [30] Waizenegger, M., Wastie, M. L., Barton, N. J. & Davis, T. R. Scintigraphy in the evaluation of the clinical scaphoid fracture. *J Hand Surg [Br]* **19**, 750–753 (1994).
- [31] van Buul, M. M. T. *et al.* Diagnosing scaphoid fractures: Radiographs cannot be used as a gold standard! *Injury* **23**, 77–79 (1992).
- [32] Raby, N. Magnetic resonance imaging of suspected scaphoid fractures using a low field dedicated extremity MR system. *Clin Radiol* **56**, 316–320 (2001).
- [33] Abdel-Salam, A., Eyres, K. S. & Cleary, J. Detecting fractures of the scaphoid: The value of comparative X-rays of the uninjured wrist. *J Hand Surg [Br]* **17**, 28–32 (1992).
- [34] Dias, J. J., Brenkel, I. J. & Finlay, D. B. Patterns of union in fractures of the waist of the scaphoid. *J Bone Joint Surg Br* **71**, 307–310 (1989).
- [35] Breitenseher, M. J. & Gaebler, C. Trauma of the wrist. *Eur J Radiol* **25**, 129–139 (1997).

8 Literaturverzeichnis

- [36] Hunter, J. C. *et al.* MR imaging of clinically suspected scaphoid fractures. *AJR Am J Roentgenol* **168**, 1287–1293 (1997).
- [37] Young, M. R., Lowry, J. H., McLeod, N. W. & Crone, R. S. Clinical carpal scaphoid injuries. *Br Med J (Clin Res Ed)* **296**, 825–826 (1988).
- [38] Waizenegger, M., Barton, N. J., Davis, T. R. & Wastie, M. L. Clinical signs in scaphoid fractures. *J Hand Surg [Br]* **19**, 743–747 (1994).
- [39] Brydie, A. & Raby, N. Early MRI in the management of clinical scaphoid fracture. *Br J Radiol* **76**, 296–300 (2003).
- [40] Breitenseher, M. J. *et al.* Radiographically occult scaphoid fractures: value of MR imaging in detection. *Radiology* **203**, 245–250 (1997).
- [41] van Buul, M. M. T., Roolker, W., Verbeeten, B. W. & Broekhuizen, A. H. Magnetic resonance imaging versus bone scintigraphy in suspected scaphoid fracture. *Eur J Nucl Med* **23**, 971–975 (1996).
- [42] Kukla, C., Gaebler, C., Breitenseher, M., S, T. & V, V. Occult fractures of the scaphoid. the diagnostic usefulness and indirect economic repercussions of radiography versus magnetic resonance scanning. *J Hand Surg [Br]* **22**, 810–813 (1997).
- [43] Gaebler, C., Kukla, C., Breitenseher, M. J., Trattnig, S. & Vecsei, V. Diagnosis of occult scaphoid fractures and other wrist injuries. Are repeated clinical examinations and plain radiographs still state of the art? *Langenbecks Arch Surg* **386**, 150–154 (2001).
- [44] Braithwaite, I. J. & Jones, W. A. Scapho-lunate dissociation occurring with scaphoid fracture. *J Hand Surg [Br]* **17**, 286–288 (1992).
- [45] Krimmer, H., Schmitt, R. & Herbert, T. Scaphoid fractures—diagnosis, classification and therapy. *Unfallchirurg* **103**, 812–819 (2000).
- [46] Karle, B. *et al.* Scaphoid fractures-operative or conservative treatment? A CT-based classification. *Handchir Mikrochir Plast Chir* **37**, 260–266 (2005).
- [47] Udolph, A. *Intensivkurs Chirurgie* (Souza-Offtermatt G., K.-H. Staubach, P. Sterk, A. Udolph, 2004).

8 Literaturverzeichnis

- [48] Towfigh, H. *Tscherne Unfallchirurgie. Ellenbogen, Unterarm, Hand. Frakturen und Luxationen.* 2 (Springer, Berlin, 2001).
- [49] Frangen, T., Muhr, G. & Kälicke, T. Handwurzelfrakturen. *Trauma Berufskrankh* **9**, 216–219 (2007).
- [50] Heuck, A. Imaging in sports medicine: hand and wrist. *Eur J Radiol* **26**, 2–15 (1997).
- [51] Lichtman, D. M., Schneider, J. R., Swafford, A. R. & Mack, G. R. Ulnar midcarpal instability-clinical and laboratory analysis. *J Hand Surg [Am]* **6**, 515–523 (1981).
- [52] Fisk, G. R. The influence of the transverse carpal ligament (flexor retinaculum) on carpal stability. *Ann Chir Main* **3**, 297–299 (1984).
- [53] Fisk, G. R. The wrist. *J Bone Joint Surg Br* **66**, 396–407 (1984).
- [54] Katzmaier, P., Wachter, N., Ebinger, T. & Mentzel, M. Ätiologie und Diagnostik von Bandläsionen der proximalen Handwurzelreihe. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* **141**, 1–176 (2003).
- [55] Hempfling, H. Begutachtung von SL- und LT-Band-Schäden. *Trauma Berufskrankh* **10**, 286–299 (2008).
- [56] Berger, R. A. The gross and histologic anatomy of the scapholunate interosseous ligament. *J Hand Surg [Am]* **21**, 170–178 (1996).
- [57] Berger, R. A. & Landsmeer, J. M. The palmar radiocarpal ligaments: a study of adult and fetal human wrist joints. *J Hand Surg [Am]* **15**, 847–854 (1990).
- [58] Berger, R. A., Imeada, T., Berglund, L. & An, K. N. Constraint and material properties of the subregions of the scapholunate interosseous ligament. *J Hand Surg [Am]* **24**, 953–962 (1999).
- [59] Landsmeer, J. M. Studies in the anatomy of articulation. The equilibrium of the intercalated bone. *Acta Morphol Neerl Scand* **3**, 287–303 (1961).
- [60] Linscheid, R. L. Scapholunate ligamentous instabilities (dissociations, subdislocations, dislocations). *Ann Chir Main* **3**, 323–330 (1984).
- [61] Mayfield, J. K. Mechanism of carpal injuries. *Clin Orthop Relat Res* 45–54 (1980).

8 Literaturverzeichnis

- [62] Mayfield, J. K. Wrist ligamentous anatomy and pathogenesis of carpal instability. *Orthop Clin North Am* **15**, 209–216 (1984).
- [63] Weil, W. M., Slade, J. F. & Trumble, T. E. Open and arthroscopic treatment of perilunate injuries. *Clin Orthop Relat Res* **445**, 120–132 (2006).
- [64] Bickert, B., Sauerbier, M. & Germann, G. Scapholunate ligament repair using the mitek bone anchor. *J Hand Surg [Br]* **25**, 188–192 (2000).
- [65] Bloom, H. T., Freeland, A. E., Bowen, V. & Mrkonjic, L. The treatment of chronic scapholunate dissociation: an evidence-based assessment of the literature. *Orthopedics* **26**, 195–203; quiz 204–5 (2003).
- [66] Pechlaner, S. & Putz, R. Traumatic scapho-lunate dissociation. Functional analysis, surgical therapy and results. *Aktuelle Traumatol* **17**, 1–8 (1987).
- [67] Lewis, D. M. & Osterman, A. L. Scapholunate instability in athletes. *Clin Sports Med* **20**, 131–40, ix (2001).
- [68] Schädel-Höpfner, M., Böhringer, G., Junge, A., Celik, I. & Gotzen, L. Arthroscopic diagnosis of concomitant scapholunate ligament injuries in fractures of the distal radius. *Handchir Mikrochir Plast Chir* **33**, 229–233 (2001).
- [69] Mudgal, C. & Hastings, H. Scapho-lunate diastasis in fractures of the distal radius. pathomechanics and treatment options. *J Hand Surg [Br]* **18**, 725–729 (1993).
- [70] Masataka, K. Treatment of scaphoid fractures with carpal instability. *Osaka City Med J* **38**, 89–103 (1992).
- [71] Shin, A. Y., Weinstein, L. P., Berger, R. A. & Bishop, A. T. Treatment of isolated injuries of the lunotriquetral ligament. A comparison of arthrodesis, ligament reconstruction and ligament repair. *J Bone Joint Surg Br* **83**, 1023–1028 (2001).
- [72] Sennwald, G., Kern, H. P. & Jacob, H. A. Arthrosis of the wrist joint due to carpal instability. Therapeutic alternatives. *Orthopaede* **22**, 65–71 (1993).
- [73] Wright, T. W., Dobyns, J. H., Linscheid, R. L., Macksoud, W. & Siegert, J. Carpal instability non-dissociative. *J Hand Surg [Br]* **19**, 763–773 (1994).

8 Literaturverzeichnis

- [74] Willebrand, J. Scapholunate instability. Diagnosis-classification-treatment. *Orthopaede* **28**, 878–882 (1999).
- [75] Czintrom, A. A., Dobyns, J. H. & Linscheid, R. L. Ulnar variance in carpal instability. *J Hand Surg [Am]* **12**, 205–208 (1987).
- [76] Smet, L. D., Vriese, L. D., D’Hoore, K. & Fabry, G. No relation between ulnar variance and scapholunate dissociation. A comparison between 42 patients and 125 controls. *Acta Orthop Scand* **65**, 623–624 (1994).
- [77] Shigematsu, S., Abe, M., Onomura, T., Kinoshita, M. & Inoue, T. Arthrography of the normal and posttraumatic wrist. *J Hand Surg [Am]* **14**, 410–412 (1989).
- [78] Stahl, F. On lunatomalacia. *Acta Chir Scand* **95**, 1–133 (1947).
- [79] Angelides, A. C. & Wallace, P. F. The dorsal ganglion of the wrist: its pathogenesis, gross and microscopic anatomy, and surgical treatment. *J Hand Surg [Am]* **1**, 228–235 (1976).
- [80] Berghoff, R. A. & Amadio, P. C. Dorsal wrist ganglion. Cause of dorsal wrist pain. *Orthopaede* **22**, 30–35 (1993).
- [81] Destot, E. The classic: injuries of the wrist: a radiological study. *Clin Orthop Relat Res* **445**, 8–14 (2006).
- [82] Doi, K., Hattori, Y., Otsuka, K., Abe, Y. & Yamamoto, H. Intra-articular fractures of the distal aspect of the radius: arthroscopically assisted reduction compared with open reduction and internal fixation. *J Bone Joint Surg Am* **81**, 1093–1110 (1999).
- [83] Stäbeler, A., Baumeister, R. & Berger, H. Carpal instability and secondary degenerative changes in lesions of the radio-carpal ligaments with various etiology. *Handchir Mikrochir Plast Chir* **22**, 289–295 (1990).
- [84] Stäbeler, A., Heuck, A. & Reiser, M. Imaging of the hand: degeneration, impingement and overuse. *Eur J Radiol* **25**, 118–128 (1997).
- [85] Buck-Gramcko, D. Scapholunate dissociation. *Handchir Mikrochir Plast Chir* **17**, 194–199 (1985).

8 Literaturverzeichnis

- [86] Tang, J. B., Ryu, J., Omokawa, S. & Wearden, S. Wrist kinetics after scapholunate dissociation: the effect of scapholunate interosseous ligament injury and persistent scapholunate gaps. *J Orthop Res* **20**, 215–221 (2002).
- [87] Viegas, S. F. Atypical causes of hand pain. *Am Fam Physician* **35**, 167–172 (1987).
- [88] Viegas, S. F. *et al.* Load transfer characteristics of the wrist. Part 2. Perilunate instability. *J Hand Surg [Am]* **12**, 978–985 (1987).
- [89] Viegas, S. F. & Ballantyne, G. Attritional lesions of the wrist joint. *J Hand Surg [Am]* **12**, 1025–1029 (1987).
- [90] Viegas, S. F. Ulnar-sided wrist pain and instability. *Instr Course Lect* **47**, 215–218 (1998).
- [91] Metz, V. M., Schimmerl, S. M., Gilula, L. A., Viegas, S. F. & Saffar, P. Wide scapholunate joint space in lunotriquetral coalition: a normal variant? *Radiology* **188**, 557–559 (1993).
- [92] Metz, V. M. & Gilula, L. A. Is this scapholunate joint and its ligament abnormal? *J Hand Surg [Am]* **18**, 746–755 (1993).
- [93] Metz, V. M., Mann, F. A. & Gilula, L. A. Lack of correlation between site of wrist pain and location of noncommunicating defects shown by three-compartment wrist arthrography. *AJR Am J Roentgenol* **160**, 1239–1243 (1993).
- [94] Metz, V. M., Mann, F. A. & Gilula, L. A. Three-compartment wrist arthrography: correlation of pain site with location of uni- and bidirectional communications. *AJR Am J Roentgenol* **160**, 819–822 (1993).
- [95] Wright, T. W., Charco, M. D. & Wheeler, D. Incidence of ligament lesions and associated degenerative changes in the elderly wrist. *J Hand Surg [Am]* **19**, 313–318 (1994).
- [96] Wilson, L. M. F., AJ Gilula. Unidirectional joint communications in wrist arthrography: An evaluation of 250 cases. *AM J Roentgenol* **157**, 105–109 (1997).
- [97] Trumble, T. E., Gilbert, M. & Vedder, N. Isolated tears of the triangular fibrocartilage: management by early arthroscopic repair. *J Hand Surg [Am]* **22**, 57–65 (1997).

8 Literaturverzeichnis

- [98] Trumble, T. E., Gilbert, M. & Vedder, N. Ulnar shortening combined with arthroscopic repairs in the delayed management of triangular fibrocartilage complex tears. *J Hand Surg [Am]* **22**, 807–813 (1997).
- [99] Watson, H. K., Ashmead, D. & Makhlof, M. V. Examination of the scaphoid. *J Hand Surg [Am]* **13**, 657–660 (1988).
- [100] Kauer JMG, L. J. *The hand: Functional anatomy of the wrist*, vol. 1 (Saunders, Philadelphia, 1981).
- [101] Watson, H. K., Weinzweig, J. & Zeppieri, J. The natural progression of scaphoid instability. *Hand Clin* **13**, 39–49 (1997).
- [102] Buckup, K. *Klinische Tests an Knochen, Gelenken und Muskeln* (Georg Thieme Verlag, 2005), 3 edn.
- [103] Zlatkin, M. B. *et al.* Chronic wrist pain: evaluation with high-resolution MR imaging. *Radiology* **173**, 723–729 (1989).
- [104] Potter, H. G. *et al.* The utility of high-resolution magnetic resonance imaging in the evaluation of the triangular fibrocartilage complex of the wrist. *J Bone Joint Surg Am* **79**, 1675–1684 (1997).
- [105] Schmitt, R., Christopoulos, G. & Meier, R. e. a. Direct MR arthrography of the wrist in comparison with arthroscopy: a prospective study on 125 patients. *Rofo* **175**, 911–919 (2003).
- [106] Palmer, A. *The distal radioulnar joint. Anatomy, biomechanics, and triangular fibrocartilage complex abnormalities*. (Philadelphia: WB Saunders, 1987).
- [107] Palmer, A. K. & Werner, F. W. Biomechanics of the distal radioulnar joint. *Clin Orthop Relat Res* 26–35 (1984).
- [108] Palmer, A. K. & Werner, F. W. The triangular fibrocartilage complex of the wrist—anatomy and function. *J Hand Surg [Am]* **6**, 153–162 (1981).
- [109] Ekenstam, F. W., Palmer, A. & Glisson, R. The load on the radius and ulna in different positions of the wrist and forearm. A cadaver study. *Acta Orthop Scand* **55**, 363–365 (1984).

8 Literaturverzeichnis

- [110] Palmer, A. K. Triangular fibrocartilage complex lesions: a classification. *J Hand Surg [Am]* **14**, 594–606 (1989).
- [111] Mikic, Z. D. Age changes in the triangular fibrocartilage of the wrist joint. *J Anat* **126**, 367–384 (1978).
- [112] Werner, F. W., Glisson, R. R., Murphy, D. J. & Palmer, A. K. Force transmission through the distal radioulnar carpal joint: effect of ulnar lengthening and shortening. *Handchir Mikrochir Plast Chir* **18**, 304–308 (1986).
- [113] Darrow, J. C. *et al.* Distal ulnar recession for disorders of the distal radioulnar joint. *J Hand Surg [Am]* **10**, 482–491 (1985).
- [114] Weigl, K. & Spira, E. The triangular fibrocartilage of the wrist joint. *Reconstr Surg Traumatol* **11**, 139–153 (1969).
- [115] Palmer, A. K., Werner, F. W., Murphy, D. & Glisson, R. Functional wrist motion: a biomechanical study. *J Hand Surg [Am]* **10**, 39–46 (1985).
- [116] Friedman, S. L. & Palmer, A. K. The ulnar impaction syndrome. *Hand Clin* **7**, 295–310 (1991).
- [117] Geissler, W. B., Fernandez, D. L. & Lamey, D. M. Distal radioulnar joint injuries associated with fractures of the distal radius. *Clin Orthop Relat Res* 135–146 (1996).
- [118] Palmer, A. Symposium on distal ulnar injuries. *Contemp Orthop* **7**, 81 (1983).
- [119] Haims, A. H. *et al.* Limitations of MR imaging in the diagnosis of peripheral tears of the triangular fibrocartilage of the wrist. *AJR Am J Roentgenol* **178**, 419–422 (2002).
- [120] Frahm, R., Metz, V. & Schmitt, R. *Bildgebende Diagnostik der Hand* (Hippokrates, Stuttgart, 1996).
- [121] Golimb, C. N. *et al.* Tears of the triangular fibrocartilage of the wrist: MR imaging. *Radiology* **173**, 731–733 (1989).
- [122] Pederzini, L. *et al.* Evaluation of the triangular fibrocartilage complex tears by arthroscopy, arthrography, and magnetic resonance imaging. *Arthroscopy* **8**, 191–197 (1992).

8 Literaturverzeichnis

- [123] Blazar, P. E. *et al.* The effect of observer experience on magnetic resonance imaging interpretation and localization of triangular fibrocartilage complex lesions. *J Hand Surg [Am]* **26**, 742–748 (2001).
- [124] Diao, E. & Moy, O. J. Common tumors. *Orthop Clin North Am* **23**, 187–196 (1992).
- [125] Miller, T. T., Potter, H. G. & McCormack, R. R. Benign soft tissue masses of the wrist and hand: MRI appearances. *Skeletal Radiol* **23**, 327–332 (1994).
- [126] Thornburg, L. E. Ganglions of the hand and wrist. *J Am Acad Orthop Surg* **7**, 231–238 (1999).
- [127] Steinberg, B. D. & Kleinman, W. B. Occult scapholunate ganglion: a cause of dorsal radial wrist pain. *J Hand Surg [Am]* **24**, 225–231 (1999).
- [128] Butler, E., Hamill, J., Seipel, R. & de Lorimier, A. Tumors of the hand. A ten-year survey and report of 437 cases. *Am J Surg* **100**, 293–302 (1960).
- [129] Linscheid, R. L., Dobyns, J. H., Beabout, J. W. & Bryan, R. S. Traumatic instability of the wrist. Diagnosis, classification, and pathomechanics. *J Bone Joint Surg Am* **54**, 1612–1632 (1972).
- [130] Nelson, C. L., Sawmiller, S. & Phalen, G. S. Ganglions of the wrist and hand. *J Bone Joint Surg Am* **54**, 1459–1464 (1972).
- [131] Angelides, A. *Operative Hand Surgery. Ganglions of the hand and wrist.* (New York, Churchill Livingstone, 1993), 3 edn.
- [132] Goldsmith, S. & Yang, S. S. Magnetic resonance imaging in the diagnosis of occult dorsal wrist ganglions. *J Hand Surg Eur Vol* **33**, 595–599 (2008).
- [133] Hopfner, S. *et al.* Diagnosis of initial changes in patients suffering from rheumatoid arthritis. Two years follow up control with a low-field magnetic resonance scanner, 3-phase bone scintigraphy and conventional x-ray. *Nuklearmedizin* **43**, 195–202 (2004).
- [134] Tehranzadeh, J., Kerr, R. & Amster, J. Magnetic resonance imaging of tendon and ligament abnormalities: Part I. Spine and upper extremities. *Skeletal Radiol* **21**, 1–9 (1992).

8 Literaturverzeichnis

- [135] Buchberger, W., Judmaier, W. & Bribamer, C. Der Stellenwert von Sonographie und MR-Tomographie in Diagnose und Therapiekontrolle der Karpaltunnelsyndrom. *Fortschr Röntgenstr* 138–143 (1993).
- [136] Bücheler, E., Lackner, K.-J. & Thelen, M. *Einführung in die Radiologie* (Georg Thieme Verlag KG, 2006), 11 edn.
- [137] Lang, M., Schäfer, H. & Vogt, W. *Der GOA-Kommentar*. 2. aktualisierte Auflage (Thieme Verlag, Stuttgart, 2002).
- [138] Kauffmann, Moser & Sauer. *Radiologie*. Nr.3 (Urban Fischer München, Jena, 2006).
- [139] Weishaupt, D., Köchli, V. & Marincek, B. (eds.) *Wie funktioniert MRI?* (Berlin, Heidelberg: Springer, 2003).
- [140] Goretzki, G. *Medizinische Strahlenkunde, Physikalisch-technische Grundlagen*. Nr.2 (Elsevier Urban Fischer München Jena, 2004).
- [141] Brix, G., Kolem, H. & Nitz, W. *Magnetresonanztomographie: Bildkontraste und Bildgebungssequenzen* (Reiser, M and Semmler, W, 2002), 3 edn.
- [142] Schild, H. *MRI made easy* (Schering AG, 1990).
- [143] Siemens Medical Solutions, E. (ed.) *Magnets, Spins and Resonances* (Siemens AG, 2003).
- [144] Nitz, W. *Klinische MR-Bildgebung: Eine praktische Anleitung* (Reimer, P and Parizel, PM and Stichnoth, FA, 2003), 2 edn.
- [145] Laubenberger, T. & Laubenberger, J. *Technik der medizinischen Radiologie: Magnetresonanztomographie* (Laubenberger, T and Laubenberger, J, 1994), 6 edn.
- [146] Trattnig, S. *et al.* MRI on low-field tomography systems (0.2 Tesla). A quantitative comparison with equipment of medium-field strength (1.0 Tesla). *Radiologe* **37**, 773–777 (1997).
- [147] Gerhardt, P., Golder, W., Kersting-Sommerhoff, B. & Hof, N. MR tomography of the extremities using the hemibody system ARTOSCAN. Initial experiences and expectations. *Roentgenpraxis* **47**, 4–13 (1994).

8 Literaturverzeichnis

- [148] Vahlensieck, M. Mri of the wrist: Technical aspects and anatomic variants indicative of disease. *Radioloe* **46**, 649–653 (2006).
- [149] Treitl, M. *et al.* Einsatzmöglichkeiten eines neuen, dedizierten Niederfeld-MRT in der Diagnostik entzündlicher, degenerativer und traumatisierter Gelenke. *Electromedica* **69** *1*, 30–37 (2001).
- [150] Klein, H. M., Vrsalovic, V., Balas, R. & Neugebauer, F. Imaging diagnostics of the wrist: MRI and Arthrography, Arthro-CT. *Rofo* **174**, 177–182 (2002).
- [151] Bohndorf, K. & Kilcoyne, R. Traumatic injuries: imaging of peripheral musculoskeletal injuries. *Eur Radiol* **12**, 1605–1616 (2002).
- [152] Bertlau, T., Christensen, O., Edstrom, P., Thomsen, H. & Lausten, G. Diagnosis of scaphoid fracture and dedicated extremity MRI. *Acta Orthop Scand* 504–508 (1999).
- [153] Klein, M. Reformatted three dimensional fourier transformed gradient-recalled-echo MR imaging of the ankle: spectrum of normal and abnormal findings. *AM J Roentgenol* 831–836 (1993).
- [154] Schick, S. *et al.* Occult fractures of the wrist joint: high resolution image magnification roentgen versus MRI. *Röfo* **170**, 16–21 (1999).
- [155] Remplik, P., Stäbler, A., Merl, T., Roemer, F. & Bohndorf, K. Diagnosis of acute fractures of the extremities: comparison of low-field MRI and conventional radiography. *Eur Radiol* **14**, 625–630 (2004).
- [156] Hottya, G. *et al.* Assessing radiographically occult upper extremity fractures with dedicated extremity MRI. *Emerg Radiol* 339–348 (2000).
- [157] Totterman, S. M., Miller, R. J., McCance, S. E. & Meyers, S. P. Lesions of the triangular fibrocartilage complex: Mr findings with a three-dimensional gradient-recalled-echo sequence. *Radiology* **199**, 227–232 (1996).
- [158] Riel, K. A., Reinisch, M., Kersting-Sommerhoff, B., Hof, N. & Merl, T. 0.2-tesla magnetic resonance imaging of internal lesions of the knee joint: a prospective arthroscopically controlled clinical study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* **7**, 37–41 (1999).

8 Literaturverzeichnis

- [159] Nikken, J. *et al.* Acute wrist trauma: Value of a short dedicated extremity MR imaging examination in prediction of need for treatment. *Radiology* **234**, 116–124 (2005).
- [160] Dorsay, T. A., Major, N. M. & Helms, C. A. Cost-effectiveness of immediate mr imaging versus traditional follow-up for revealing radiographically occult scaphoid fractures. *AJR Am J Roentgenol* **177**, 1257–1263 (2001).
- [161] Bretlau, T., Christensen, O., Edstrom, P., Thomsen, H. & Lausten, G. Diagnosis of scaphoid fracture and dedicated extremity MRI. *Acta Orthop Scand* **70**, 504–508 (1999).
- [162] Gaebler, C. & et al. Magnetic resonance imaging of occult scaphoid fractures. *J Trauma* **41**, 73–76 (1996).
- [163] Breitenseher, M. *et al.* MRT bei radiologisch okkulten Kahnbeinfrakturen. Erste Erfahrungen von 1,0 Tesla (Ganzkörper-Mittelfeldgerät) versus 0,2 Tesla (dediziertes Niederfeldgerät). *Radiologe* **37**, 812–818 (1997).
- [164] Taouli, B. *et al.* Rheumatoid Arthritis of the Hand and Wrist: Comparison of three imaging techniques. *AJR* **182**, 937–943 (2004).
- [165] Savnik, A., Malmskov, H., Thomsen, H. & et al. MRI of the wrist and finger joints in inflammatory joint diseases at 1-year interval. *Eur Radiol* **12**, 1203–1210 (2002).
- [166] Klarlund, M. *et al.* Magnetic resonance imaging, radiography, and scintigraphy of the finger joints: one year follow up of patients with early arthritis- the TIRA group. *Ann Rheum Dis* **59**, 521–528 (2000).
- [167] Backhaus, M., Kamradt, T., Sandrock, D. & et al. Arthritis of the finger joints: a comprehensive approach comparing conventional radiography, scintigraphy, ultrasound, and contrast-enhanced magnetic resonance imaging. *Arthritis Rheum* **42**, 1232–1245 (1999).
- [168] Foley-Nolan, D., Stack, J., Ryan, M. & et al. Magnetic resonance imaging in the assessment of rheumatoid arthritis: a comparison with plain film radiographs. *Br J Rheumatol* **30**, 101–106 (1991).
- [169] Rominger, M., Bernreuter, W. & Alarcon, G. MR imaging of the hands in early rheumatoid arthritis: preliminary results. *Radiographics* **13**, 37–46 (1993).

8 Literaturverzeichnis

- [170] Hobby, J. L. *et al.* Mr imaging of the wrist: effect on clinical diagnosis and patient care. *Radiology* **220**, 589–593 (2001).
- [171] Altman, D. & Bland, J. Diagnostic tests. 1: sensitivity and specificity. *BMJ* **308**, 1552 (1994).
- [172] Kraemer, H. Measurement of reliability for categorical data in medical research. *Stat Methods Med Res* **1**, 183–199 (1992).
- [173] Fleiss, J. *Statistical methods for rates and proportions*, vol. 2 (New York, Churchill Livingstone, 1981).
- [174] Roe, C. & Metz, C. Variance-component modeling in the analysis of receiver operating characteristics index estimates. *Acad Radiol* **4**, 587–600 (1997).
- [175] Beam, C., Layde, P. & Sullivan, D. Variability in the interpretation of screening mammograms by US radiologists. Findings from a national sample. *Arch Intern Med* **156**, 209–213 (1996).
- [176] Sadatsafavi, M., Najafzadeh, M., Lynd, L. & Marra, C. Reliability studies of diagnostic tests are not using enough observers for robust estimation of interobserver agreement: a simulation study. *J Clin Epidemiol* **61**, 722–727 (2008).

9 Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Dr. hc. Reiser dafür, dass ich diese Arbeit an dem von ihm geleiteten Institut für Klinische Radiologie der Ludwig–Maximilians–Universität München durchführen durfte.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Treitl für die konstruktive Betreuung. Mit seiner humorvollen Art war er zu jeder Zeit ein hilfsbereiter und kompetenter Ansprechpartner. Herzlicher Dank gilt ebenfalls Frau Dr. Becker-Gaab für die freundliche Betreuung. Des Weiteren bedanke ich mich für die Vertretung der vorliegenden Arbeit gegenüber der medizinischen Fakultät sowie der Universität.