

Aus dem Fachbereich Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

Zentrum der Radiologie
Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie
Direktor: Prof. Dr. med. Thomas J. Vogl

**Effektivität und Effizienz der hochauflösenden MRT
in der Diagnostik akuter Handgelenksverletzungen**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
Frankfurt am Main

vorgelegt von

Sabine Keim
aus Frankfurt am Main

Frankfurt am Main

2002

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Josef M. Pfeilschifter

1. Referent: Univ.-Prof. Dr. med. Thomas J. Vogl

2. Referent: Univ.-Prof. Dr. med. Ekkart Wernicke

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Dezember 2003

In Dankbarkeit
für die großartige und liebevolle Unterstützung
an meine Eltern

INHALTSVERZEICHNIS.....	I
I ZIELSETZUNG.....	1
II EINLEITUNG.....	3
II.1 Grundlagen der konventionellen Radiologie.....	3
II.1.1 Physikalische Grundlagen.....	3
II.1.2 Aufnahmen des Handgelenkes.....	4
II.2 Grundlagen der Magnetresonanztomographie.....	5
II.2.1 Physikalische Grundlagen.....	6
II.2.2 Spin-Gitter-Relaxationszeit T1.....	9
II.2.3 Spin-Spin-Relaxationszeit T2.....	10
II.2.4 Kernrelaxation im biologischen Gewebe.....	10
II.2.5 Bildintensität und Signal-Rausch-Verhältnis.....	12
II.2.6 MR-Bildgebungssequenzen.....	12
II.2.7 TR- und TE-Zeiten.....	13
II.3 Grundlagen der Anatomie und Biomechanik.....	14
II.3.1 <i>Handgelenk</i>	14
II.3.1.1 Anatomisches Modell und Biomechanik.....	14
II.3.1.1.1 Winkel und Gelenke.....	15
II.3.1.1.2 Bänder.....	16
II.3.1.1.3 Discus triangularis.....	19
II.3.1.1.4 Normvarianten.....	20
II.3.1.2 Allgemeine Frakturenlehre.....	20
II.3.1.3 Konventionelle Röntgenanatomie.....	24
II.3.1.4 MR-Anatomie.....	27
II.3.2 <i>Distaler Unterarm</i>	30
II.3.2.1 Klassifikation der Frakturen des distalen Unterarmes.....	30
II.3.2.2 Klinische Untersuchung.....	33
II.3.2.3 Therapieprinzipien.....	34
II.3.3 <i>Handwurzelknochen</i>	34
II.3.3.1 Klassifikation der Frakturen der Handwurzelknochen.....	35
II.3.3.2 Klinische Untersuchung.....	38

II.3.3.3	Therapieprinzipien	39
III	MATERIAL UND METHODEN	42
III.1	Probandenuntersuchungen	43
III.2	Patientenuntersuchungen.....	44
III.2.1	Patientenmanagement und Patientenaufklärung	44
III.2.2	Untersuchungstechnik und Sequenzen.....	47
III.3	Bildmorphologische Auswertkriterien	49
III.3.1	Konventionelle Röntgendiagnostik	49
III.3.2	MRT	51
III.4	Statistik und Datenanalyse	52
IV	ERGEBNISSE.....	55
IV.1	Probandenuntersuchungen	55
IV.2	Patientenuntersuchungen.....	60
IV.2.1	Klinisches Bild	60
IV.2.2	Konventionelle Röntgendiagnostik	63
IV.2.3	MRT	67
IV.3	Einfluss der MRT auf die Dauer der Arbeitsunfähigkeit	72
V	DISKUSSION	82
V.1	Patientenuntersuchungen.....	82
V.2	Qualitätsmanagement	90
V.3	Dokumentation anderer Untersuchungsverfahren.....	92
V.3.1	Arthrographie	92
V.3.2	Sonographie.....	93
V.3.3	Skelettszintigraphie	93
V.3.4	Computertomographie.....	94
V.3.5	Sonstiges.....	95
V.4	Ausblick	95
VI	ZUSAMMENFASSUNG.....	97

SUMMARY	99
VII LITERATUR.....	101
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	112
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen.....	112
Verzeichnis der Abkürzungen.....	114
LEBENS LAUF	117
DANKSAGUNG.....	119
EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG	120

I ZIELSETZUNG

Seit den ersten Veröffentlichungen über kernspintomographische Untersuchungen des Handgelenkes hat die MRT einen immer höheren Stellenwert in der Diagnostik muskuloskelettaler Läsionen der Handwurzelknochen und des distalen Unterarmes erreicht [64]. Moderne operative Verfahren der Handchirurgen erfordern eine optimierte Bildgebung. Die Bedeutung einer zeitnahen, adäquaten Therapieplanung und Therapie wurde erkannt [21]. Der diagnostische Wert der Kernspintomographie bei chronischen Schmerzen in komplexen Gelenken zum Beispiel bei Verdacht auf avaskuläre Nekrosen (AVN), Pseudarthrosen und rheumatoider Arthritis ist belegt [7, 68, 72]. Bei Akutverletzungen mit klinisch verdächtigen, radiologisch jedoch okkulten Frakturen der Handwurzel und des distalen Unterarmes wird der Stellenwert der MRT gegenwärtig noch diskutiert [42, 120].

Das Ziel der vorliegenden Studie ist die prospektive Evaluierung der diagnostischen Wertigkeit der Magnetresonanztomographie in der Akutdiagnostik okkulten Frakturen des distalen Unterarmes sowie der Handwurzelknochen.

Die Komplexität von Handgelenkstraumata erfordert ferner eine möglichst spezifische Darstellung des Bandapparates und der übrigen Weichteile. Es soll untersucht werden, inwieweit mit hochauflösender Spulentechnologie Übereinstimmungen der MRT mit der konventionellen Röntgendiagnostik beobachtet oder Zusatzinformationen gewonnen werden können. Ziel ist, anhand von Probandenuntersuchungen die Sequenzen experimentell zu evaluieren, deren Kontrastverhalten die detaillierte Auswertung begleitender Weichteilverletzungen ermöglicht.

Die Empfehlung, nach initial negativen Röntgenaufnahmen bei bestehender klinischer Symptomatik mit dem Verdacht auf eine Fraktur unmittelbar eine MRT-Untersuchung durchzuführen, scheitert häufig an dem Vorwurf der hohen Kosten sowie des zeitlichen Aufwandes. Während einige Autoren von einer praktikablen Dauer der kernspintomographischen Untersuchung sprechen [18, 46, 76, 90, 129], schließen andere auf Grund des Zeitaufwandes die MRT als Routinediagnostikum aus [70]. Die Voraussetzung für die Etablierung der Kernspintomographie in der Akutversorgung von Handgelenksverletzungen ist daher ein optimiertes Untersuchungsprotokoll, das mit einer Mindestanzahl von Sequenzen eine maximale, zeitsparende und in der Routine anwendbare Diagnostik zulässt. Ein entsprechendes Protokoll soll im Rahmen der vorliegenden

Dissertation erarbeitet, die Notwendigkeit einzelner Sequenzen überprüft und der zeitliche Aufwand der MRT-Untersuchung minimiert werden.

Die Dauer der Arbeitsunfähigkeit und deren Auswirkung auf Arbeitgeber und Krankenkassen ist bisher nur in wenigen Studien untersucht worden [18, 76]. Im Falle einer Krankschreibung sind vom Unternehmen gesetzliche Personalzusatzkosten zu leisten, von denen die Entgeltfortzahlungskosten und anteilige Krankengeldkosten einen bedeutenden betriebswirtschaftlichen Faktor darstellen. Wegen der wirtschaftlichen Bedeutung soll schließlich der Einfluss des frühen Einsatzes der Kernspintomographie auf das therapeutische Management untersucht und mögliche Auswirkungen auf den Zeitraum der Arbeitsunfähigkeit diskutiert werden.

II EINLEITUNG

II.1 Grundlagen der konventionellen Radiologie

Konventionelle Röntgenaufnahmen liefern rasch und übersichtlich Informationen zu Frakturen mit fraglicher Gelenkbeteiligung, Fragmentdislokation und Achsenfehlstellung. Im Rahmen der Akutversorgung Schwerverletzter sowie zur Ergebnisdokumentation bei Abschluss der Therapie sind konventionelle Röntgenbilder unverzichtbar. Allerdings ergeben sich Limitationen der Übersichtsaufnahmen in Bereichen komplexer Skelettanatomie, durch Überlagerung von Weichteilen und in der Beurteilung von Weichteilverletzungen.

II.1.1 Physikalische Grundlagen

Röntgenstrahlen sind Bremsstrahlen, die entstehen, wenn energiereiche Elektronen auf die Anode auftreffen. Bei dem Aufprall entstehen elektromagnetische Schwingungen, die sich von Licht- und Wärmestrahlen durch höhere Wellenlängen unterscheiden.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c beträgt wie bei allen elektromagnetischen Schwingungen 300000 km/s und wird als das Produkt aus Wellenlänge α und Frequenz ν beschrieben:

Gleichung II-1

$$c = \alpha \times \nu$$

Ein Kathodendraht wird erhitzt und liefert hierbei Elektronen, die durch eine angelegte Spannung (30-150 kV) auf die Anode zu beschleunigt werden. Ihre kinetische Energie wird dabei in *Strahlungs- oder Röntgenstrahlungsenergie* umgewandelt (1%). Beim Aufprall auf die Anode entstehen Röntgenstrahlen, die durch ein Fenster in der Röntgenröhre auf den Patienten respektive das zu untersuchende Organ gelenkt werden. Diese sogenannte charakteristische Röntgenstrahlung (Brems-) wird von Elektronensprüngen auf Schalen niedrigeren Energieniveaus und dabei freiwerdenden Energiebeträgen erzeugt. Sie besteht aus vielen verschiedenen Wellenlängen, die zusammen ein kontinuierliches Spektrum bilden. Die Zusammensetzung des Spektrums ist von der kinetischen Energie der Kathodenelektronen und damit von der Röhrenspannung abhängig. Durch die Abbremsung entsteht weiterhin

Wärmeenergie (99%) durch die Wechselwirkung der Kathodenstrahlelektronen mit den elektrischen Kraftfeldern der Hüllenelektronen und des Kerns.

Die unterschiedlichen Gewebedichten absorbieren die Röntgenstrahlen, so dass auf dem Röntgenfilm ein Negativbild des untersuchten Organs dargestellt wird. Um die Strahlenbelastung niedrig zu halten, werden Verstärkungsfolien eingesetzt, die von Röntgenstrahlen angeregt, selbst Licht abgeben und somit den Film schwärzen. Auf einer mit Silberbromidkristallen beschichteten lichtempfindlichen Emulsionsschicht wird während der sogenannten Elektronenphase der Bildentstehung ein Bromatom in ein Bromion und ein Elektron gespalten. Die Elektronen bilden negative Zentren, an die sich Silberionen anlagern, die in einem Reduktionsvorgang zu elementarem Silber oxidiert werden. Die nachfolgende Entwicklung dient dazu, das latente Bild mit einer Verstärkung um das 1-100 millionenfache sichtbar zu machen.

Technisch wird das Röntgenbild schließlich nach zwei Kriterien beurteilt: zum einen nach dem *Kontrast*, der von der Beschaffenheit des Objekts, insbesondere den Dichte- und Dickeunterschieden und der Ordnungszahl abhängig ist, ebenso wie von der Strahlenqualität und der am Bildempfänger wirksamen Streustrahlung. Zum anderen nach der *Zeichenschärfe*, der eine geometrische Unschärfe als Folge der Vergrößerung des darzustellenden Objekts, eine Bewegungsunschärfe sowie eine innere Unschärfe wegen der Eigenstruktur des Bildauffangsystems (Dicke der Schicht) zu Grunde liegen kann.

II.1.2 Aufnahmen des Handgelenkes

In der Röntgendiagnostik stehen uns unterschiedliche Aufnahmetechniken zur Verfügung. Jedes Organ sollte immer in zwei Ebenen dargestellt werden. Die *dorsopalmare Aufnahme* wird im posterioranterioren Strahlengang durchgeführt und dient der Darstellung des distalen Unterarmes, des Handgelenkes, der Handwurzelknochen, der Mittelhandknochen und der Finger. In Ulnadeviation können Skaphoidfrakturen erkannt werden. Die *seitliche Aufnahme* spielt in der Beurteilung von Karpalluxationen (perilunäre Luxation) und Luxationen der Ossa metacarpalia und Phalangen eine Rolle. Frakturen vor allem des Os triquetrum sowie der Metacarpalia und Phalangen und die Längsachsenanordnung des 3. Fingerstrahls, Os Capitatum, Os lunatum und Radius können geprüft werden.

Neben der Standarduntersuchung des Handgelenkes in zwei Ebenen dienen klinisch orientierte Spezialeinstellungen der übersichtlichen und überlagerungsfreien Darstellung

komplexer anatomischer Verhältnisse, wie sie unter anderem im Bereich der Handwurzel vorliegen. Die sogenannte *Skaphoid- oder Kahnbeinserie* besteht aus vier Aufnahmen in vier Projektionen (Abbildung II-11). Sie kann eine initial okkulte Fraktur sichtbar machen. Hilfreich kann hierbei die Beurteilung des „Kahnbein-Fettstreifenzeichens“ sein, einer 1mm breiten, ulna-konvexbögig verlaufenden Fettschicht entlang des Lig. collaterale carpi radiale und der Sehne des M. extensor policis brevis, die durch ein Frakturhämatom im Rahmen einer Skaphoidfraktur verstrichen, gradlinig oder radial- konvexbögig verschoben ist [26]. Alternativ zur Skaphoidserie wird durch die Zielaufnahme nach Stecher unter Faustschluss und Ulnarduktion eine optimale Längsprojektion des Os scaphoideum ermöglicht.

Die *Schrägaufnahme* in Supination dreht das Os pisiforme aus der Ebene heraus und zeigt das Gelenk zwischen Os pisiforme und Os triquetrum. Eine verdeckte Fraktur des Erbsenbeins kann auf diese Weise dargestellt werden. In Pronation dient die Schrägaufnahme der Darstellung der Ossa trapezium und trapezoideum, des Os hamatum und der Dorsalfläche des Os triquetrum. Die *gehaltenen Aufnahmen (Abduktions- und Adduktionsaufnahmen)* dienen zum Nachweis von Bandläsionen. Die in maximaler Dorsalextension durchgeführte *Karpaltunnelaufnahme* stellt den Hamulus ossis hamati, das Os pisiforme und die Palmarfläche des Os trapezium dar.

II.2 Grundlagen der Magnetresonanztomographie

Die Arbeitsgruppe der Harvard Universität Edward Purcell, Pound und Torrey wiesen im Winter 1945/46 erstmals magnetische Kernresonanz an Festkörpern und Flüssigkeiten nach. Weiterhin untersuchte Purcell die Ausrichtung schwach magnetischer Teilchen sowie deren Resonanzfrequenz und Magnetismus. Etwa zur gleichen Zeit entdeckten Felix Bloch, Hansen und Packard unabhängig davon die magnetische Induktion, den Vorläufer der magnetischen Kernresonanz (NMR) an der Stanford Universität. In Anerkennung an ihre wissenschaftlichen Erkenntnisse erhielten Purcell und Bloch 1952 den Nobelpreis für Physik [110, 111].

In den 50er und 60er Jahren war man an der in-vitro Erforschung der molekularen Struktur homogener Proben interessiert. Paul Lauterbur beschrieb 1972 als erster die Grundlagen der Magnetresonanztomographie (im englischen Sprachgebrauch damals „Zeugmatographie“), sein erstes MR-Bild veröffentlichte er 1973. Analog zu dem von Hounsfield kurz zuvor entwickelten Verfahren für die Computertomographie (CT) ließ sich auch bei der Kernspintomographie aus mehreren entsprechend ausgewählten Projektionen ein

Querschnittbild des Körpers erstellen. Die erste kernspintomographische Untersuchung des Menschen konnte 1977 erfolgreich durchgeführt werden.

II.2.1 Physikalische Grundlagen

Beim Verfahren der Magnetresonanztomographie macht man sich die Eigendrehimpulse der Atomkerne zunutze, die rotierenden Kreiseln gleichen. Enthält ein Atomkern unpaare Protonen, Neutronen oder beides, so besitzt er einen Drehimpuls, den sogenannten Kernspin. In Kernen paariger Nukleonenzahlen heben sich die Spins auf, so dass der Drehimpuls Null ist. Da die Atomkerne elektrisch geladen sind, erzeugen sie ein magnetisches Moment. Dieses Magnetische Dipolmoment μ ist eine physikalische Vektorgröße, welche die Intensität und Richtung des magnetischen Feldes in der Umgebung des Kerns und somit die Stärke des Dipols beschreibt. Es ist proportional zur Fläche A des Magnetfeldes und der Ladung i :

Gleichung II-2

$$\mu = i \times A$$

Die magnetischen Eigenschaften einer Materie können eine Magnetfeldänderung bewirken. Der Vorgang wird als Magnetisierung M bezeichnet und ist proportional zu der von außen einwirkenden magnetischen Feldstärke B und der Suszeptibilität X :

Gleichung II-3

$$M = X \times B$$

Sobald magnetische Dipole in ein Magnetfeld gebracht werden, sind sie der Kraft des Feldes ausgesetzt, wobei eine Ausrichtung stattfindet. Nach der Quantentheorie können Protonen in zwei Positionen verharren, die sich um 180° unterscheiden, nämlich parallel oder antiparallel zum äußeren Magnetfeld (Abbildung II-1). Mit der parallelen Ausrichtung wird ein niedrigeres Energieniveau eingenommen. Sie ist etwas häufiger als die antiparallele Ausrichtung: bei einer Million Atomen und einer Magnetfeldstärke von einem Tesla ist ein Atom mehr in der parallelen Ausrichtung. Nur diese überzähligen, parallel ausgerichteten Atome weisen kernmagnetische Eigenschaften auf; parallel und antiparallel ausgerichtete Atome von jeweils derselben Zahl kompensieren sich (Abbildung II-2).

Abbildung II-1

Protonen in ungeordneter Bewegung verhalten sich wie kleine Magneten.

Nach Anlage eines äußeren Magnetfeldes (B_0) findet eine parallele und eine antiparallele Ausrichtung statt. Die parallele Ausrichtung ist durch ein niedrigeres Energieniveau gekennzeichnet.

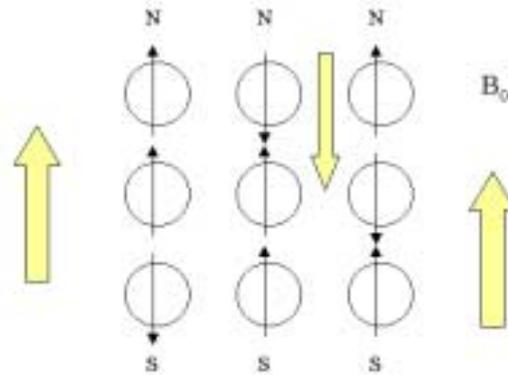
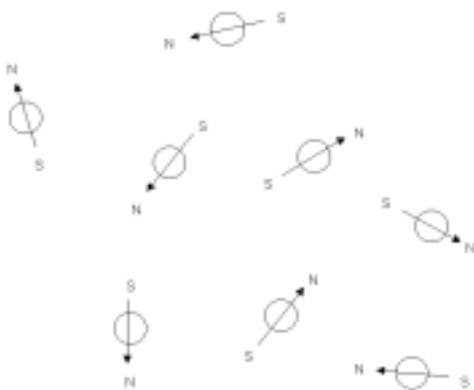
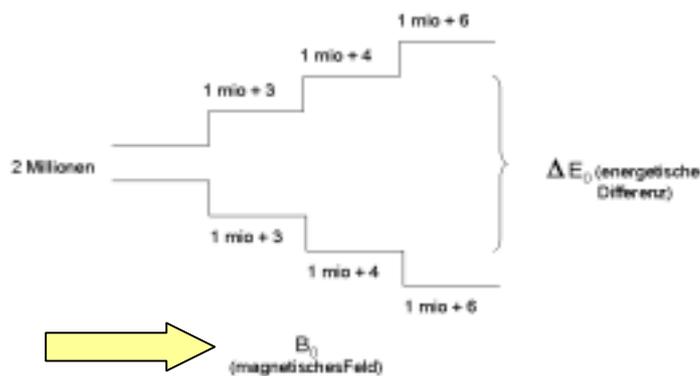


Abbildung II-2

Die Protonen oszillieren ständig zwischen der parallelen und der antiparallelen Ausrichtung hin und her, die Anzahl der parallel ausgerichteten Protonen überwiegt leicht. Je stärker das Magnetfeld B_0 , desto größer die Anzahl der parallel ausgerichteten Protonen und desto größer die Differenz im Energielevel.



Die Kerne rotieren vor der Ausrichtung um ihre Achse (Abbildung II-3). Die genaue Ausrichtung der Elementarmagnete zum magnetischen Feld bildet einen konstanten Winkel α in dem die Kerne zusätzlich eine Kreisbewegung um die Feldlinien des äußeren

Magnetfeldes ausführen. Die Abweichung von der Gleichgewichtsachse (z-Achse des kartesischen Koordinatensystems), die per definitionem in die Richtung der magnetischen Feldstärke B weist, bewirkt eine rotierende Bewegung von M um B . Diese wird als Präzession bezeichnet. Die Präzessions- oder Larmorfrequenz f_p ist proportional zur spezifischen Feldstärke eines Atomkerns und lässt sich mittels der Larmorgleichung errechnen:

Gleichung II-4

$$f_p = B \gamma / 2\pi$$

f_p =Larmorfrequenz

B =magnetische Feldstärke

γ =gyromagnetisches Verhältnis (Konstante)

π =Konstante (3,1415927)

Die Larmor- oder Resonanzfrequenz ist die Basis für die magnetische Resonanz: sind eingestrahlte Hochfrequenzimpulse (HF-) mit der Eigenfrequenz der Kerne im Magnetfeld identisch, absorbieren die Atomkerne HF-Energie. Die Resonanzfrequenz der Kerne entspricht der Larmorfrequenz, die wie beschrieben proportional zur magnetischen Feldstärke ist und durch die Erhöhung von B zunimmt. Des weiteren erhöht sich mit wachsendem B die Nettomagnetisierung, d.h. der Anteil antiparallel ausgerichteter, energiereicherer magnetischer Momente:

Gleichung II-5

$$N_{\text{antiparallel}} / N_{\text{parallel}} = e^{-\mu B / k t}$$

e =Konstante (2,7183)

μ =magnetisches Moment

B =magnetische Feldstärke

k =Boltzmann-Konstante ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

t =absolute Temperatur

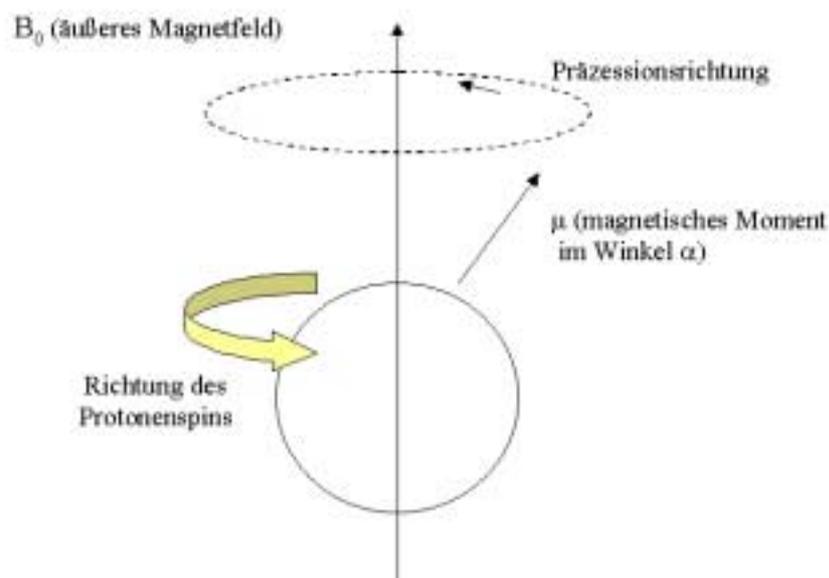
Je mehr Protonen zur Nettomagnetisierung beitragen, um so höher ist das von ihnen abgegebene Signal. Ein konstantes Rauschen im System vorausgesetzt, resultiert aus einer Erhöhung der magnetischen Feldstärke also ein höheres Nettosignal (*Signal-Rausch-Verhältnis*).

Die Nettomagnetisierung stellt sich parallel zu einem starken äußeren Magnetfeld ein und lässt sich deshalb nicht ohne weiteres beobachten. Erst eine Ablenkung der magnetisierten Elementarteilchen in der Probe oder dem zu untersuchenden Gewebe von der *Gleichgewichtsachse* und der *Relaxationszeit*, während der die Elementarteilchen wieder in die ursprüngliche Feldrichtung zurückkehren und die zuvor absorbierte Energie

zurückstrahlen, erlauben, Signale der Protonen aufzunehmen und in ein Bild weiterzuverarbeiten. Die Abweichung von der Gleichgewichtsachse wird von einem zweiten magnetischen Feld produziert, das als Gegenwirkung zum Hauptfeld angelegt wird und dessen Magnetisierungsvektor sich von der z-Achse weg in Richtung der y-Achse bewegt. Die Rückkehr der Protonen in ihren Gleichgewichtszustand erzeugt ein Induktionsfeld, dessen Spannungsverlauf über die HF-Spule gemessen wird, und geht mit dem Übergang der zuvor gewonnenen Energie in Radiowellen oder der Energieabgabe an benachbarte Moleküle einher: den Energieverlust bezeichnet man als *Relaxationsprozess*.

Abbildung II-3

Eigenspin der Kerne um ihre Achse



II.2.2 Spin-Gitter-Relaxationszeit T1

In der Kernspinresonanz gibt es zwei voneinander unabhängige Messungen der Relaxationszeiten. Die erste ist die longitudinale oder Spin-Gitter-Relaxationszeit T1. T1 ist die Zeit, in der die longitudinale Magnetisierung auf 63% ihres ursprünglichen Wertes nach einem 90° Impuls zurückkehrt. Mit dem Magnetisierungsvorgang ist ein Wärmeübergang von den Kernspins auf das Molekülgerüst verbunden, die longitudinale Relaxationszeit wird deshalb auch als „thermische“ Relaxationszeit bezeichnet.

II.2.3 Spin-Spin-Relaxationszeit T2

Die zweite Relaxationszeit ist die transversale oder Spin-Spin-Relaxationszeit T2. T2 ist die Zeit, in der 63% des Maximalwertes der Quermagnetisierung nach Einstrahlen eines 180° Impulses wieder erreicht sind. Im Gegensatz zu der T1-Relaxation tritt die T2-Relaxation ohne Energieübertragung ein. T2 ist die Zeitkonstante, innerhalb welcher die Atomkerne ihre Spinvektoren in der transversalen Ebene verteilen oder ihre Phasenbeziehung zueinander verlieren, nachdem ein Radiofrequenzimpuls angelegt wurde.

II.2.4 Kernrelaxation im biologischen Gewebe

Für das MR-Verfahren sind nur die Elemente von Bedeutung, die im Kern unpaare Nukleonen aufweisen: Wasserstoff (^1H), Kohlenstoff (^{13}C), Fluor (^{19}F), Natrium (^{23}Na) und Phosphor (^{31}P). Aufgrund der Häufigkeit ihres Vorkommens in einer Vielzahl von Verbindungen werden Wasserstoffatome zur bildhaften Darstellung der verschiedenen Organsysteme des Körpers genutzt (Tabelle II-1).

Abhängig vom

- molekularen Aufbau
- der Dichte
- der molekularen Beweglichkeit
- der Temperatur
- der Viskosität

verhalten sich die Kernrelaxationszeiten T1 und T2 in verschiedenen biologischen Geweben unterschiedlich. Während T2 mit zunehmender Viskosität immer kleiner wird, kann T1 bei zunehmender Viskosität wieder länger werden. Ebenso werden T1 und T2 in empfindlicher Weise von der Proteinkonzentration einer Lösung beeinflusst: größere Moleküle wirken gewöhnlich stärker relaxationszeitverkürzend als kleinere Moleküle. Die Signalintensität verschiedener Gewebe in T1- und T2-gewichteten Sequenzen zeigt Tabelle II-2.

T1- und T2-Relaxationszeiten charakterisieren die meisten in der MR-Bildgebung erfassten Gewebe. Sie bestimmen die Geschwindigkeit, mit der ein Signal abklingt und dadurch die Intensität der Pixel im Bild; damit stellen sie den Hauptmechanismus für den Bildkontrast dar. Innerhalb der Relaxationszeiten gilt, dass sich Substanzen mit einer kurzen T1-Relaxationszeit in T1-gewichteten Bildern heller darstellen als solche mit einer längeren;

umgekehrt stellen sich Substanzen mit einer kürzeren T2-Relaxationszeit in T2-gewichteten Bildern dunkler dar als solche mit längeren Zeiten.

Alle MR-Sequenzen sind mehr oder weniger T1- bzw. T2-gewichtet, ein reiner T1- oder T2-Kontrast lässt sich nicht darstellen. Eine T1-gewichtete Aufnahme zeichnet sich durch eine höhere Spezifität aus, während T2-gewichtete Bilder eine hohe Sensitivität aufweisen. Die Aufnahmezeiten sind bei T1-Wichtungen um den Faktor drei bis vier kürzer als bei T2-betonten Bildern.

Tabelle II-1

Wassergehalt des menschlichen Gewebes

Gewebeart	Wasser (Massenanteil %)
Graue Gehirnmasse	8
Weißer Gehirnmasse	72
Niere	81
Herz	80
Lunge, Milz, Muskel	79
Haut	79
Leber	17
Knochen	13

Tabelle II-2

Signalintensität in verschiedenen Geweben

Gewebe	T1-gewichtet	T2-gewichtet
Kortikalis/Kompakta	0	0
Fett (Mark)	3	2-3
Hyaliner Knorpel	2	2
Bänder, Sehnen	0	0
Muskel	2	2
(Gelenks-) Flüssigkeit	1	3

0: kein Signal

1: schwache Signalintensität (SI)

2: mittelstarke SI

3: starke SI

II.2.5 Bildintensität und Signal-Rausch-Verhältnis

Das *Signal-Rausch-Verhältnis* ist definiert als die Bildintensität des Gewebes dividiert durch die Standardabweichung des Rauschlevels in homogenen Bereichen des Bildes. Vier Faktoren determinieren das Signal-Rausch-Verhältnis eines beliebigen Gewebes: (a) die T1-Relaxationszeit, (b) die T2-Relaxationszeit, (c) die Protonendichte, d.h. die Anzahl der Protonen in einem Voxel (Gewebevolumen) und (d) die Protonenbewegung (Fluss in Gefäßen). Es wird des weiteren von der magnetischen Feldstärke, der Empfängerspule, der Schichtdicke, dem field of view (FOV), der Matrix und der Anzahl der Mittelung der Signale (number of signal averages: NSA) beeinflusst.

Ein weiterer Parameter, der *Signal-Sensitivitäts-Faktor* wird von der Spulengeometrie und der Positionierung der Spule beeinflusst. Im Allgemeinen gilt, dass die höchste Sensitivität erreicht wird, wenn die Empfängerspule so nah wie physiologisch möglich am zu untersuchenden Gewebevolumen positioniert wird. *Oberflächenspulen* dienen der verbesserten Darstellung bestimmter Körperbereiche. „Ringspulen“ werden aufgelegt, „zylinderförmige“ Spulen umhüllen Extremitätenbereiche. Es werden nur Details des oberflächennahen Gewebe abgebildet. Sie dienen ausschließlich zum Empfang der Resonanzsignale; angeregt wird mit der *Körperspule* (Body coil).

Zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses mittelt man die Signale mehrerer Messungen (Akquisitionen, averages), so dass statistisch zufällig verteilte Rauschanteile sich gegenseitig aufheben. Eine einfache Vergrößerung des Messvolumens, allerdings unter Inkaufnahme einer Verschlechterung der räumlichen Auflösung, sowie die Verwendung von Oberflächenspulen und eine höhere Magnetfeldstärke kann das S/R-Verhältnis ebenfalls verbessern.

II.2.6 MR-Bildgebungssequenzen

Es existieren viele unterschiedliche Messesequenzen für die MRT, die je nach Fragestellung und der zu untersuchenden Körperregion zum Einsatz kommen.

Als das „Arbeitspferd“ der MR-Bildgebung gilt die *Spin-Echo-Sequenz* (SE-Sequenz). Die SE-Sequenz wird von einem 90° Impuls erzeugt, dem nach einer Verzögerungszeit t ein weiterer Impuls mit 180° folgt. Lokale Magnetfeldinhomogenitäten führen nach dem 90° Impuls zu unterschiedlichen Umlauffrequenzen. Es kommt zur Dephasierung der Vektoren.

Bei dem zweiten Impuls werden die Atomkerne um 180° um die y-Achse transversal rotiert, wodurch die Kerne erneut in der transversalen Ebene zum Liegen kommen, allerdings in umgekehrter Reihenfolge. Daraus resultiert, dass die langsamer präzedierenden Atomkerne jetzt vor den schneller präzedierenden sind. Da alle Atomkerne in einer konstanten, wenn auch unterschiedlichen Geschwindigkeit präzedieren, kommen sie auf diese Weise zu einem Zeitpunkt $2t$ in Phase, deren Höhepunkt man als Rephasierung bezeichnet. Dem Höhepunkt folgt ein erneuter Phasenverlust. Aus der Wechselwirkung zwischen Phasenhöhepunkt und Phasenverlust resultiert ein Echo.

Die *Echozeit TE* (time to echo) ist definiert als die Zeit vom 90° Impuls bis zum Zentrum des Echos und ist gleich der zweifachen Verzögerungszeit. Durch Variieren dieses Parameters können T2-Eigenschaften akzentuiert werden. Das Intervall zwischen dem ersten 90° Impuls und den nachfolgenden bezeichnet man als *Wiederholungszeit TR* (time to repeat). Die Zeit zwischen den 90° Impulsen und den 180° Impulsen ist gleich der Zeit zwischen 180° Impuls und Echomaximum. Je nach Wahl der Geräteparameter (Echozeit TE, Pulswiederholzeit TR) ermöglicht die SE-Technik unterschiedliche Wichtungen: T1-, T2- und protonendichtegewichtet (PD)-Wichtung.

Andere Methoden wie Saturation Recovery (SR) oder Inversion Recovery (IR) haben den Nachteil, dass sie nur T1-gewichtete Bilder liefern und lange dauern. Kürzere Messzeiten können mit FLASH und FFE-Schnellbildverfahren erreicht werden. Allerdings ist die Bildqualität dieser Sequenzen für die Handgelenksdiagnostik nicht zufriedenstellend. Sie finden Anwendung in der Abdominaldiagnostik.

II.2.7 TR- und TE-Zeiten

Die Manipulation der TR- und TE-Zeiten kann den Bildkontrast in Abhängigkeit von der Protonendichte verändern. Ein kurzes TR beträgt 500 ms oder weniger, längere TR's liegen zwischen 1500 und 5000 ms. Die Länge des TR beeinflusst den T1-Bildbeitrag zum Bildkontrast. Ein kurzes TR betont, ein langes TR eliminiert den T1-Bildkontrast, allerdings unter Beeinträchtigung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Der T2-Beitrag zum Bildkontrast wird durch die Länge des TE beeinflusst. Kurze TE's mit 35 ms unterbetonen die T2-Wichtung während lange TE's zwischen 70-135 ms den T2-Bildkontrast überbetonen.

Ein stark T1-gewichtetes Bild kann nicht durch den Ausschluss des T2-Bildkontrastes oder der Protonendichte entstehen, allerdings ist es möglich, die Bildsequenzen so zu justieren,

dass der Bildkontrast primär auf einem T1-Beitrag beruht: kurzes TR und kurzes TE sind hierfür erforderlich. Entsprechend führen lange TR- und TE-Zeiten zu stark T2 betonten Bildern. Langes TR und kurzes TE erzeugen ein „gemischtes Bild“, das durch eine sogenannte *protonengewichtete Sequenz* erzeugt wird. Diese Bilder zeichnen sich durch ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis aus, haben aber einen niedrigeren Bildkontrast als rein T1- oder T2-gewichtete Bilder.

Da die meisten pathologischen Veränderungen mit einer Verlängerung der T2-Zeiten einhergehen, kommt der Abbildung der transversalen Relaxationszeiten ein hoher diagnostischer Stellenwert zu [80, 94, 103].

II.3 *Grundlagen der Anatomie und Biomechanik*

II.3.1 Handgelenk

Im folgenden Abschnitt wird zunächst die Anatomie des Handgelenkes sowie die Darstellung im konventionellen Röntgen und im MRT besprochen (II.3.1). Im weiteren Verlauf werden der distale Unterarm und die Handwurzelknochen als zwei Untereinheiten des Handgelenkes getrennt voneinander behandelt (II.3.2, II.3.3)

II.3.1.1 Anatomisches Modell und Biomechanik

Die Röhrenknochen des distalen Radius und Ulna und die sogenannten kleinen, irregulären Nichtröhrenknochen des Karpus bilden als funktionelle Einheit das Handgelenk (*Articulatio manus*).

Skaphoid, Ossa lunatum, triquetrum und pisiforme bilden die proximale Handwurzelreihe, die durch interossäre Bänder rotationsstabil miteinander verbunden ist und als funktionelle Einheit betrachtet werden kann. Die distale Handwurzelreihe bestehend aus Ossa trapezium, trapezoideum, capitatum und hamatum weist dagegen kaum Beweglichkeit auf. In diesem Zusammenhang wird häufig von einem sogenannten Ringkonzept gesprochen, welches unter Spannung stehend bei einer Verletzung entweder des Knochens oder des Bandapparates aufplatzt und infolge einer natürlichen Bewegungstendenz der Knochen instabil wird [74]. Unterschieden werden *Articulatio radioulnaris distalis*, *Articulatio radiocarpalis* (proximales

Handgelenk), *Articulatio mediocarpalis* (distales Handgelenk), *Articulationes intercarpales*, *Articulationes carpometacarpales* und schließlich *Articulationes intermetacarpales*.

In der *Articulatio radioulnaris distalis* artikuliert die *Circumferentia articularis* des *Caput ulnae* mit der *Incisura ulnaris* des *Radius*. Zwischen *Processus styloideus ulnae* und der ulnaren Seite des *Radius* dient der trianguläre fibrocartilaginäre complex (TFCC) der Verbindung zwischen den inkongruenten Gelenkflächen von *Radius*, *Ulna* und *Ossa lunatum* und *triquetrum*. Das an Pronations- und Supinationsbewegungen beteiligte Gelenk ist über die *Facies articularis carpalis radii* und den *Diskus* mit der proximalen Handwurzelreihe verbunden (ausgenommen *Os pisiforme*) und bildet das proximale Handgelenk. Es handelt sich hierbei um ein Ellipsoidgelenk mit zwei Freiheitsgraden. Diesem steht das distale Handgelenk mit einem wellenförmig verlaufenden Gelenkspalt zwischen proximaler und distaler Handwurzelreihe gegenüber (verzahntes Scharniergelenk). Während die *Articulationes intercarpales* der proximalen Reihe eine geringe Verschieblichkeit der Knochen untereinander erlauben, werden die *Articulationes intercarpales* der distalen Reihe sowie die *Articulationes carpometacarpales* und *Articulationes intermetacarpales* durch den straffen Bandapparat der *Ligg. intercarpalia* zu *Amphiarthrosen*.

An der *Palmarflexion* ist vorwiegend das proximale, an der *Dorsalextension* das distale Handgelenk beteiligt. *Flexions-* und *Extensionsbewegung* finden also in beiden Gelenken statt, weshalb man zur mechanischen Vereinfachung eine transversal durch das *Os capitatum* verlaufende *Summationsachse* annehmen kann. Aus der *Neutral-0-Stellung* beträgt die *Palmarflexion* ungefähr 80° , die *Dorsalextension* 70° . *Radial-* und *Ulnarabduktion* (*Radial-* und *Ulnardeviation*) finden überwiegend in der *Articulatio radiocarpalis* statt. Der Umfang der *Radialabduktion* beträgt 15° , der Umfang der *Ulnarabduktion* 40° aus der Mittelstellung (*Unterarmachse* und *Achse des Mittelfingers* bilden eine Gerade). Durch die Kombination aus *Pronations-* und *Supinationsbewegung* und *Palmarflexion* und *Dorsalextension* ist die *Zirkumduktion* der Hand möglich [108].

II.3.1.1.1 Winkel und Gelenke

Die Beurteilung der Normalmorphometrie des Karpus erfolgt mit Hilfe verschiedener Winkel und Fluchtlinien, deren Bestimmung eine korrekte Einstellung bei der Röntgenaufnahme voraussetzt. Der distale *Radius* bildet in der posterior-anterioren (pa) Aufnahme einen radioulnaren Neigungswinkel von im Durchschnitt 25° , in der seitlichen Aufnahme ist die

Gelenkfläche des Radius um 10° nach palmar geneigt: palmarer Neigungswinkel (Abbildung II-8). Der Processus styloideus radii überragt den der Ulna um 9-12 mm. Diese anatomisch physiologische Längenvariante von Radius und Ulna bezeichnet man als Ulnavariante. Das in gleicher Höhe Gegenüberstehen der radialen und ulnaren Gelenkfläche über dem Os lunatum bezeichnet man als Normalstellung, das Tieferstehen als Ulna-minus-Variante und das Höherstehen als Ulna-plus-Variante. Der radioulnare Gelenkspalt in der dorsopalmaren Projektion beträgt 2 mm.

Weiterhin existieren vier *karpale Winkel*, deren zur Winkelmessung benötigte Verbindungslinien jeweils durch die Mitten der proximalen und distalen Gelenkflächen der beteiligten Knochen laufen: Os lunatum, Os scaphoideum und Os capitatum (Tabelle II-3).

Tabelle II-3

Karpale Winkel: Normalwerte und Schwankungsbereiche

Winkel	Normalwert	Schwankungsbereich
Radioulnarer	0	-15° bis $+15^\circ$
Radioscaphoidaler	45	30° bis 60°
Scapholunärer	47	30° bis 60°
Kapitolunärer	0	-15° bis $+15^\circ$

II.3.1.1.2 Bänder

Die Kenntnis der karpalen Ligamente ist Voraussetzung für das Verständnis der physiologischen und pathologischen Röntgenanatomie. Die Gliederung nach funktionellen Gesichtspunkten ist komplex und differenziert zwischen interossär, palmar-proximal und palmar-distal sowie dorsal V-förmig verlaufenden Bändern. Nach anatomischen Aspekten unterscheidet man *extrinsische*, zwischen Unterarm bzw. Metakarpus einerseits und Karpus andererseits verlaufende Bandstrukturen, von *intrinsischen Ligamenten*, welche die Handwurzelknochen untereinander verbinden. Die wichtigsten extrinsischen Bänder sind die Ligg. radioscaphocapitatum, radiolunotriquetrum, radiolunatum brevis und die dorsalen radiokarpalen Bänder. Ligg. scapholunatum und lunotriquetrum stellen die primären Stabilisatoren des intrinsischen Bandapparates dar. Sie verlaufen interossär und verhindern so

eine Verschiebung der Handwurzelknochen untereinander [125]. Fast alle Ligamente im Karpusbereich verlaufen intrakapsulär, die Gelenkkapsel, die an der Knorpelknochengrenze angeheftet ist, wird durch die Bänder verstärkt, weshalb es nicht selten zu traumabedingten knöchernen Ausrissen kommt.

Das palmare, stärkere Trageband sowie die gegensinnig wirkende sog. Gelenkschleuder, die von proximal-radial nach distal-ulnar verläuft, verhindern das Abgleiten der geneigten Gelenkflächen. Beidseitige Kollateralbänder verstärken zusätzlich die Gelenkkapsel. Der komplexe Bandapparat des Handgelenkes gewährleistet dessen Stabilität.

Zur Erklärung der Karpusinstabilität entwickelten Lichtmann et al. die *Karpusringtheorie*. Sie beschreibt die Handwurzel als eine funktionelle Einheit aus proximaler Karpusreihe als zwischengeschaltetem (intercalated), durch interossäre Bänder fest fixiertem Segment und Bereichen kontrollierter Mobilität: Gelenk zwischen Os scaphoideum und Os trapezium (radiales Glied) sowie zwischen Os triquetrum und Os hamatum (ulnares Glied). Eine Unterbrechung dieses Rings auf knöcherner und/oder ligamentärer Seite kann zu einer unkontrollierten Beweglichkeit führen. Es kommt zu modifizierten karpalen Winkeln. Die Dorsalkippung des Os lunatum mit einer Vergrößerung des skapholunären Winkels auf $>60^\circ$ bezeichnet man als *dorsal intercalated segment instability (DISI)*, die Palmarkippung mit einer Winkelverkleinerung auf $<30^\circ$ als *volar* oder *palmar intercalated segment instability (VISI oder PISI)* (Abbildung II-4) [45].

Das Vorliegen einer karpalen Gefügestörung lässt sich auf der pa-Aufnahme anhand dreier nahezu parallel verlaufender Linien nach Gilula und Yin (1996) durch die proximale Handwurzelreihe, die distalen Konturen der proximalen und die distale Handwurzelreihe prüfen. Die M-Konfiguration dient dem Nachweis einer karpometakarpalen Luxation (Abbildung II-5).

Die radiokarpalen sowie radioulnaren (Sub-) Luxationsformen sind Zeichen schwerer, komplexer ligamentärer Zerreißungen. Per definitionem liegt bei Erhalt von mehr als 50% des radioulnaren Gelenkkontaktes eine Subluxation vor, während bei weniger als 50% eine Luxation aufgetreten ist. Frakturbegleitend sei die transskaphoideo-perilunäre Luxation De Quervain bei der Galeazzifraktur als häufigste Kombinationsfraktur zu nennen. Abzugrenzen hiervon sind die isolierten Luxationen ohne Fraktur. Die Einteilung karpaler Gefügestörungen orientiert sich an der proximalen Handwurzelknochenreihe und erfolgt nach Lanz und Schmitt in

- Dissoziative Gefügestörungen (carpal instability dissociative=CID)
 - (1) Skapholunäre Dissoziation
 - (2) Lunotriquetrale Dissoziation
- Nicht-dissoziative Gefügestörungen (carpal instability non-dissociative=CIND)
 - (1) Radiokarpale Gefügestörung
 - (2) Mediokarpale Gefügestörung
 - (3) Ulnare Translokation
- Komplexe Gefügestörungen (carpal instability complex=CIC)
 - (1) Perilunäre Luxation (dorsal oder palmar)
 - (2) Transskaphoidale perilunäre Luxationsfraktur
- Axiale Gefügestörungen
 - (1) Ulnare Dissoziation
 - (2) Radiale Dissoziation
 - (3) Kombiniert ulna-radiale Dissoziation

Man unterscheidet am Karpus drei Gelenkkompartimente: das mediokarpale, das radiokarpale und das distale radioulnare Kompartiment (DRUG). Sie spielen im Rahmen der Arthrographie eine Rolle (V.3.1) [14, 21, 32, 91].

Abbildung II-4

Das Os lunatum (L) ist mit einer rot gestrichelten, das Os scaphoideum (S) mit einer durchgehenden und das Os capitatum (C) mit einer punktierten Markierung hervorgehoben.

Der skapholunäre Winkel (SL) vergrößert sich von physiologischen 30-60° auf >60° bei der DISI-Deformität durch das „Vorklappen“ des Os scaphoideum (1a wird zu 1b) und das nach distal Kippen des Os lunatum (2a wird zu 2b). Der Mechanismus wird durch die Pfeile angedeutet. Ein SL-Winkel <30° kennzeichnet eine VISI-Deformität: Palmarkippung des Mondbeins und Dorsalkippung des Os capitatum sind charakteristisch

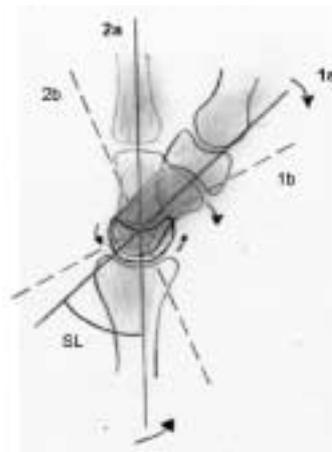
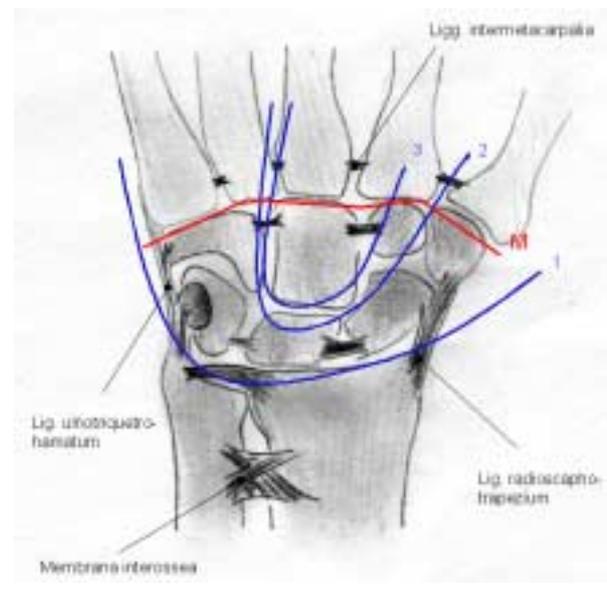


Abbildung II-5

Bänder und Karpalbögen nach Gilula und Yin. Liegt eine karpale Gefügestörung vor, kommt es zur Diskontinuität der Bögen (1-3).

Die M-förmig konfigurierte Karpometakarpallinie (M) ergibt sich aus dem zickzackförmigen Verlauf durch die Karpometakarpalgelenkspalten.



II.3.1.1.3 Discus triangularis

Eine Kombination aus Band- und Diskuskomplex stellt der **trianguläre fibrocartilaginäre complex (TFCC)** dar, der eine Pufferzone zwischen distaler Ulna, distalem Radioulnargelenk und proximaler Handwurzelreihe (Os lunatum und Os triquetrum) bildet.

Der ulnokarpale Komplex ist eine vielschichtig und kompliziert aufgebaute Struktur:

- Discus triangularis
- Ligg. Ulnolunatum, ulnotriquetrum, collaterale carpi ulnare, radioulnare palmare et dorsale
- M. ulnocarpalis
- Sehnscheiden des M. extensor carpi ulnaris

Bei Läsionen dieses Komplexes stehen ulnarseitige Handgelenksbeschwerden sowie mechanische Instabilität im distalen Radioulnargelenk im Vordergrund. Diagnostisch kann invasiv die vergleichende Arthrographie in Mehrkompartimenttechnik und/oder Arthroskopie angewandt werden. Konventionelle Nativaufnahmen dienen dem Ausschluss knöcherner Verletzungen, während bei geeigneter Sequenzwahl auch die MRT der nicht-invasiven Begutachtung von Diskusläsionen dient [93].

Degenerative Veränderungen initial und anschließende Perforation des TFCC können in Folge des *Ulna-Impaction-Syndroms* auftreten (II.3.1.1.4). Degenerative Veränderungen des TFCC werden nach Palmer in fünf Subkategorien 2A-2E eingeteilt [97, 98].

II.3.1.1.4 Normvarianten

Normvarianten des distalen Unterarmes sind zum einen akzessorische Knochenanlagen der Processi styloidei radii et ulnae, zum anderen unterscheidet man konnatale, nicht-traumatisch bedingte „Verlängerungen“ oder „Verkürzungen“ der Ulna gegenüber dem Radius, sogenannte *Plus-* bzw. *Minusvarianten*, von traumatisch bedingten *Ulnavorschüben* bzw. *Ulnaverkürzungen*. Plusvariante und Ulnavorschübe gehen häufig mit dem sogenannten Ulna-Impaction-Syndrom einher, das die Entstehung degenerativer Vorgänge an TFCC, Ossa lunatum et triquetrum, Ulna und DRUG aufgrund einer pathologisch gesteigerten axialen Kraftübertragung (>20%) vom Unterarm zum Handgelenk über die Ulna bezeichnet.

Einige Normvarianten sind im konventionellen Röntgen leicht mit einem pathologischen Befund zu verwechseln. Hierzu zählen Kompaktinseln (bone islands), über 23 akzessorische Knochenelemente (Os centrale carpi scaphoidei [138], 1% Häufigkeit nach Pfitzner et al, Os radiale externum scaphoidei, Epitrapezium scaphoidei, Os styloideum trapezoidei) und karpale Verschmelzungen (Koalitionen, Synostosen). Bei der häufigsten lunotriquetralen Synostose werden diverse Varianten nach der Vollständigkeit der Verschmelzung unterschieden (Typen A-E). Ebenso gehören Teilungen der Karpalia zu den Normvarianten. Pfitzner nannte die bekanntesten Teilungen nach absteigender Häufigkeit in folgender Reihenfolge: am häufigsten sind Teilungen des Skaphoids gefolgt von denen des Os triquetrum und Os pisiforme. Teilungen der Ossa trapezium, trapezoideum und capitatum sind seltener. Hinzu kommen Überlagerungserscheinungen, die als vermeintliche Sklerosierungslinien imponieren aber auf Gefäßkanäle und Kantenüberlappungen zurückzuführen sind [21].

II.3.1.2 Allgemeine Frakturenlehre

Die Kontinuitätsunterbrechung eines Knochens bezeichnet man als *Fraktur*, wobei man nach dem Grad des Ausmaßes zwischen vollständigen und unvollständigen Frakturen unterscheidet. Eine Spaltbildung ohne vollständige Durchtrennung des Knochens wird als *Fissur* bezeichnet. Eine Fraktur entsteht beim Überschreiten der Elastizitätsgrenze durch direkte (Schlag, Stoß) oder indirekte (Biegung, Drehung, Stauchung, Abriss) Gewalteinwirkung. Nach der *Ätiologie* unterscheidet man drei Formen der Frakturen:

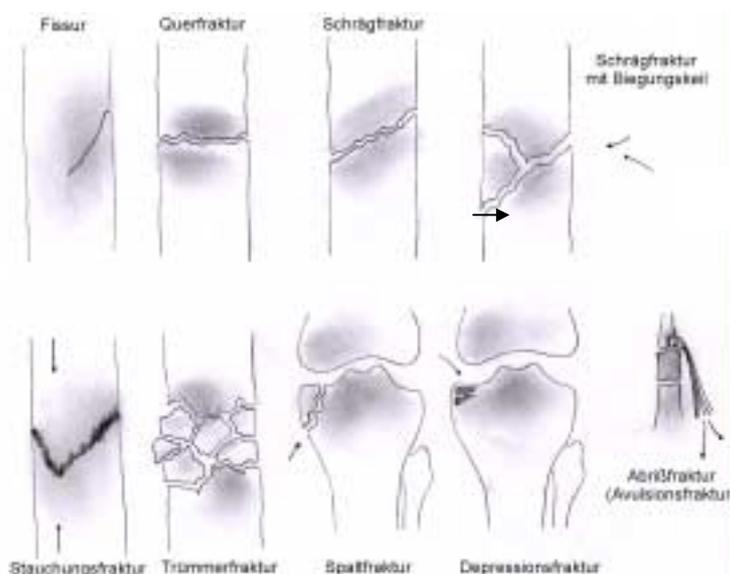
- Traumatische Fraktur
- Ermüdungsfraktur
- Pathologische Fraktur

Während die traumatische Fraktur auf die momentane mechanische Überbelastung des Knochens zurückzuführen ist, wird die Ermüdungsfraktur entweder von rezidivierender Überbeanspruchung (Stress) oder durch eine Vorschädigung des Knochens in der Regel durch Osteoporose (Insuffizienzfraktur) hervorgerufen. Pathologische Frakturen treten aufgrund lokaler Veränderungen des Knochengewebes zum Beispiel durch Zysten oder osteolytische Metastasen bereits bei inadäquaten Krafteinwirkungen auf und stellen eine Sonderform der Insuffizienzfraktur dar. Eine Ausnahme bilden knochenbildende primäre und sekundäre Knochentumoren (Osteosarkom und osteoblastische Metastasen). Vor allem bei letzteren sind pathologische Frakturen eine Rarität.

Höhe und Richtung der einwirkenden Kraft spiegeln sich in der Morphologie der Frakturtypen wieder. Der Stauchungsbruch (Kompressionsfraktur) entsteht durch Kompression in der Längsrichtung des Knochens. Die Spongiosa wird geschädigt. Die Abrissfraktur, auch Zugbruch oder Traktionsfraktur genannt, führt durch übermäßigen Band- oder Muskelzug zu einem Abriss eines Knochenfragments einschließlich des Band- oder Muskelsehnenansatzes. Schub- und Abscherbrüche entstehen an der Grenze zwischen abgestütztem und nicht abgestütztem Knochen. Knorpel-Knochen-Abspaltungen, die bei gelenknahen Frakturen zu sehen sind, bezeichnet man als Flake-Frakturen (Abbildung IV-7). Abbildung II-6 fasst die wichtigsten Frakturtypen zusammen.

Abbildung II-6

Überblick über die wichtigsten Frakturtypen



Gehen Frakturen mit Frakturen der Gelenkfläche und Knorpeldefekten einher, so unterscheidet man solche ohne (chondrale Frakturen) und mit anheftenden knöchernen Fragmenten (osteochondrale Frakturen, „Flake-Frakturen“). Bei Kindern überwiegen die chondralen, bei Erwachsenen die osteochondralen Frakturen. Häufigste Ursache von Frakturen der Gelenkflächen sind Drehtraumen oder Supinations- oder Pronationstraumen. Eine Subluxation beschreibt die partielle Verschiebung einer Gelenkfläche nach dem plötzlichen Einwirken einer dislozierenden Kraft, die komplette Verschiebung wird als Luxation bezeichnet. Bei Verletzungen der Gelenkflächen mit intaktem Knorpel differenziert man zwischen subchondralen Impaktionen mit eingesunkenen subchondralen Knochenanteilen parallel zur Gelenkfläche und subchondralen spongiösen Frakturen (bone bruise), einem im MRT nachweisbaren Knochenmarksödem, das nicht als klassische Fraktur gewertet wird.

Im Kindesalter beobachtet man zusätzlich besondere Frakturtypen: einseitig hervorgewölbte Kortikalisveränderungen durch Stauchung im Bereich der Metaphyse bezeichnet man als Wulstfraktur. Hiervon unterscheidet man die Grünholzfraktur, die sich einseitig durch eine Unterbrechung der Kortikalis, gegenüberliegend jedoch durch eine intakte Kortikalis und einen durchgehenden Periostschlauch auszeichnet. Wichtig ist die Beurteilung der Beteiligung der Epiphyse und der Wachstumsfuge. Die Klassifikation nach Salter und Harris Typ I-V zeigt Abbildung II-7 (Typisierung nach Aitken 0-III in Klammern). Inadäquat behandelte posttraumatische Verletzungen bei Kindern können zu Wachstumsstörungen in Form eines potentiellen, passageren Wachstumsschubes sowie einer Wachstumsverzögerung führen.

Bei der *Frakturheilung* unterscheidet man zwischen primärer und sekundärer Knochenbruchheilung. Die primäre oder direkte Knochenbruchheilung setzt den Kontakt und die Fixation der Fragmente sowie die Immobilisation der Fraktur und eine ausreichende Blutversorgung und Vitalität der Fragmente voraus und ist durch das Fehlen von Kallus charakterisiert. Das direkte Vordringen der Haversschen Systeme ermöglicht eine „Kontakt-“, später „Spaltheilung“. Im Gegensatz dazu werden bei der sekundären oder indirekten Knochenbruchheilung zunächst die peri- bzw. endostalen Mesenchymzellen aktiviert, die eine manschettenförmige desmale Knochenneubildung zur Wiederherstellung der ursprünglichen Struktur konstruieren. Ein stadienhafter Verlauf mit einer „Entzündungsphase“ (ersten Tage), „Granulationsphase“ (3. bis 4. Woche), „Kallushärtung“ (4. Wo bis ca. 4. Monat) und einer „Modeling-“ sowie „Remodeling-Phase“ (ab 4. Monat) korreliert, teilweise zeitversetzt mit pathologisch-anatomischen Röntgenbefunden.

Gelenkbeteiligung, verlangsamter Knochenstoffwechsel bei älteren Menschen, inkonsequente oder inadäquate Ruhigstellung sowie große Weichteilverletzungen und damit verbundene schlechte Perfusionsverhältnisse können eine *verlangsamte* Knochenheilung evozieren. Von einer *verzögerten* Knochenheilung spricht man bei einem Überschreiten der durchschnittlichen Zeit der Frakturheilung bis auf das Doppelte der vorgegebenen Zeitspanne (Tabelle II-4). Die *gestörte* Knochenbruchheilung kann in einer *Pseudarthrose* münden. Man unterscheidet drei Formen der Pseudarthrose:

- Hypertrophische Form
- Atrophische Form
- Defektpseudarthrose

Ätiologisch ist die Pseudarthrose auf mangelhafte Ruhigstellung, größeren Verlust von Knochensubstanz, mangelnde Blutversorgung, Interposition von Bindegewebe im Frakturspalt und Infektion mit Sequesterbildung zurückzuführen. Ist der Knochen nach einer Fraktur oder Luxation nicht mehr ausreichend arteriell mit Blut versorgt, kann es zur *Osteonekrose* kommen. Häufigste Lokalisation neben Femurkopf und Humeruskopf ist das Os scaphoideum. Weitere Komplikationen sind die Inaktivitätsosteoporose, die auf lange Immobilisationszeiten zurückzuführen ist, sowie die posttraumatische Arthrosis deformans bei Mitbeteiligung der Gelenkflächen und posttraumatische Zystenbildung aus abgekapselten Hämatomen.

Abbildung II-7

Einteilung der Frakturen mit Beteiligung der Wachstumsfuge nach Salter und Harris (I-V). In Klammern ist die Typisierung nach Aitken (0-III) angegeben.

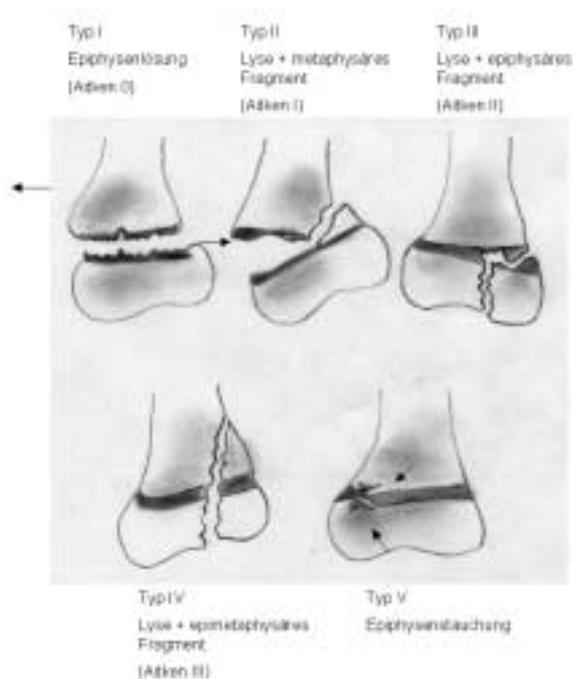


Tabelle II-4

Angaben zur durchschnittlichen Dauer einer Frakturheilung

Fraktur	Mittlere Heilungsdauer (Wochen)
Schädel Klavikula Humeruskopf Radiusköpfchen Distaler Unterarm Mittelhand/-fuß	3-6
Humerusschaft Unterarmschaft Distaler Unterschenkel	6-8
Tibiaschaft Femurschaft	8-10
Handwurzel Schenkelhals Becken Distaler Femurschaft/Tibiakopf Fußwurzel	10-14

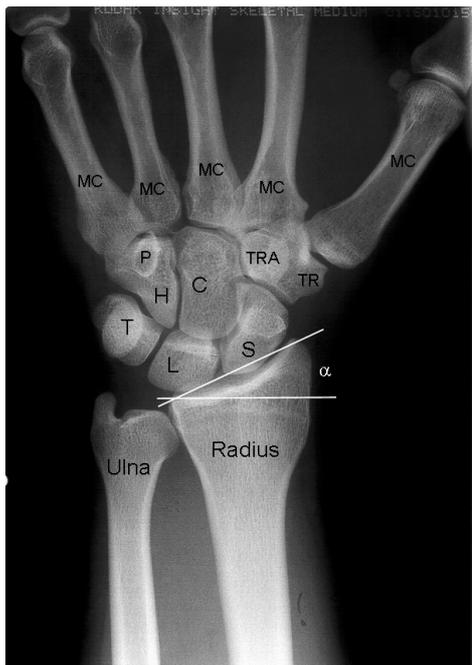
II.3.1.3 Konventionelle Röntgenanatomie

Die korrekte standardisierte Projektion des distalen Unterarmes und der Handwurzel in *Neutralstellung* ist Voraussetzung für die richtige Diagnose und anschließend adäquate Therapie. Für die posterioranteriore Aufnahme sollte der Arm in 90° Abduktion in der Schulter und 90° Beugung im Ellenbogengelenk bei komplett aufliegendem Handgelenk gelagert werden. Die korrekte seitliche Aufnahme setzt die Adduktion im Schultergelenk und ebenfalls eine 90° Beugung im Ellenbogengelenk voraus. Inkorrekte Lagerungen bei diesen Röntgenaufnahmen können zu Fehldiagnosen führen. Für die Handwurzelknochen existieren Spezialaufnahmen, die unter II.1.2 bereits genannt wurden.

Abbildung II-8

Aufnahme in zwei senkrecht zueinander stehenden Ebenen. Die normale Stellung der distalen Radiusgelenkfläche zeigt einen Winkel α von 15-35° (linkes Bild). In der seitlichen Projektion beträgt der palmare Neigungswinkel β der radialen Gelenkfläche 10° (rechtes Bild).

- | | |
|----------------------|------------------------|
| (S) Os scaphoideum | (C) Os capitatum |
| (L) Os lunatum | (H) Os hamatum |
| (T) Os triquetrum | (P) Os pisiforme |
| (TR) Os trapezium | (MC) Ossa metacarpalia |
| (TRA) Os tapezoideum | |

**Abbildung II-9**

Das scaphopisocapitate Aligement (SPC) gilt als Qualitätskriterium einer seitlichen Handgelenksaufnahme. Die Grenzen des Os scaphoideum (S), Os pisiforme (P) und Os capitatum (C) sollten sichtbar und voneinander differenzierbar sein.

Ein weiteres Kriterium der exakten Einstellung ist die weitgehende Verlängerungssachse durch das Zentrum des distalen Unterarmes, des Os lunatum, des Os capitatum und des 3. Fingerstrahles (schwarze Linien).



Abbildung II-10

Spezialaufnahme: Ulnadeviation zur Darstellung des Os scaphoideum sowie des skapholunären Bandapparates.

**Abbildung II-11**

Kahnbeinserie: die Aufnahmen werden in lateraler Projektion sowie mit der geschlossenen Faust in 45°-Winkelung und in dorso-volarer Projektion angefertigt.



II.3.1.4 MR-Anatomie

Abbildung II-12

Übersichtssequenz (Localizer) Körperspule

Der Patient liegt in Rückenlage, die Füße nach vorne gerichtet (feet first supine). Die Bilder zeigen eine Übersichtsaufnahme mit der Körperspule. Markiert ist das Handgelenk (roter Kreis).

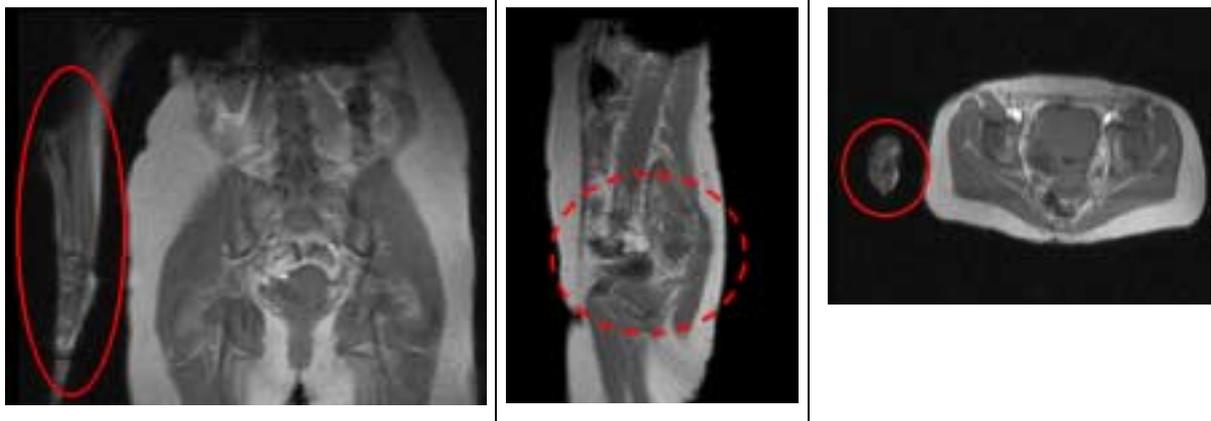


Abbildung II-13

Übersichtssequenz (Localizer) Handspule

Im nächsten Schritt wird mit der Handspule eine detailliertere Übersichtsequenz erstellt. Auf dieser Sequenz ist das Handgelenk in koronarer, sagittaler und transversaler Schnittführung zu sehen. Dargestellt ist die nun folgende Planung der transversalen (gelb) oder koronaren (rot) endgültigen Schnittführung.

Entscheidend ist die exakte Winkelung der Schichten zu den anatomischen Verhältnissen von Radius, Ulna und Handwurzelknochen. Eine sorgfältig geplante transversale Übersicht (rechts) ermöglicht die unmittelbare Planung der endgültigen koronaren Schnittführung, ohne zunächst eine gesamte transversale Serie anfertigen zu müssen. Dies erspart Zeit und Kosten, die transversale Serie war zudem diagnostisch nicht entscheidend.

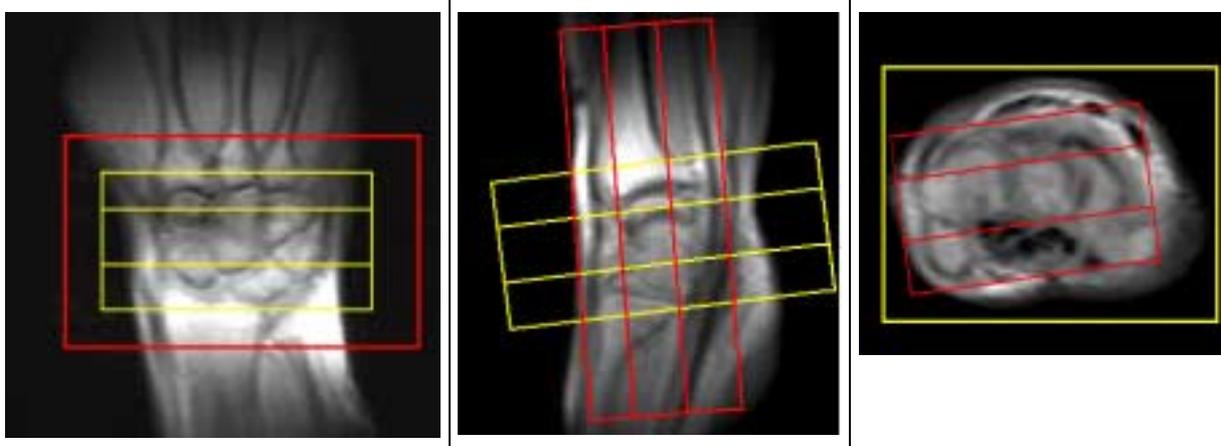


Abbildung II-14

T1-gewichtete Aufnahme, transversale Schichtorientierung

TR=520, TE=18, 20 Schichten, flip angle=90°, gap=0,2 mm, distance factor 10%, slice thickness 2 mm, matrix 512x512, 1 acquisition

- | | |
|----------------------|------------------------|
| (S) Os scaphoideum | (C) Os capitatum |
| (L) Os lunatum | (H) Os hamatum |
| (T) Os triquetrum | (P) Os pisiforme |
| (TR) Os trapezium | (MC) Ossa metacarpalia |
| (TRA) Os tapezoideum | |

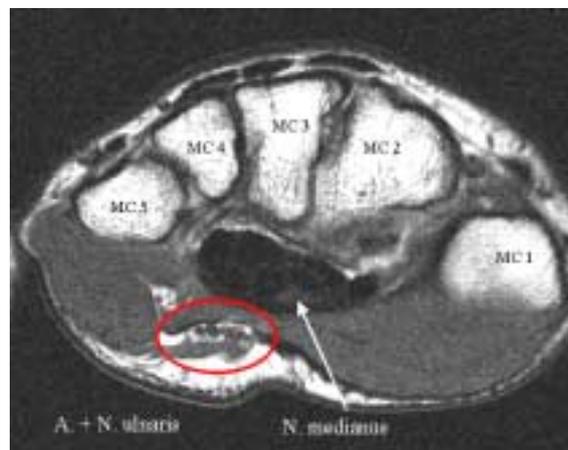
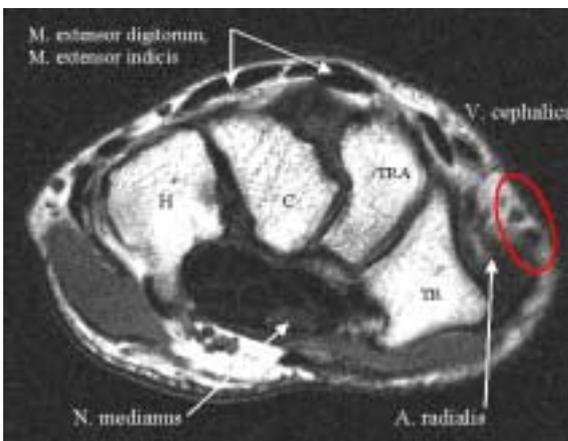
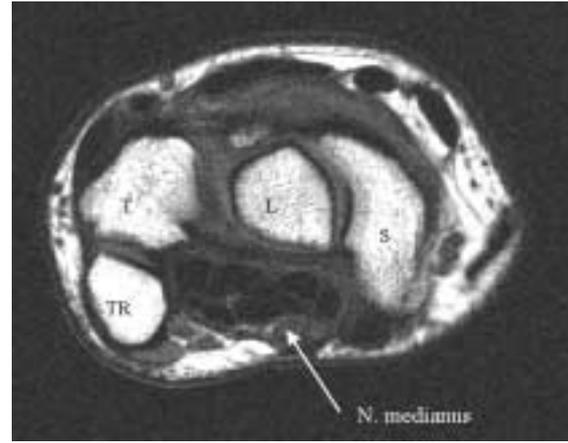
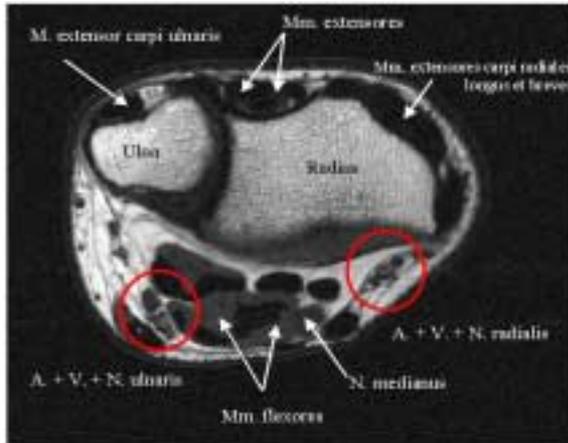
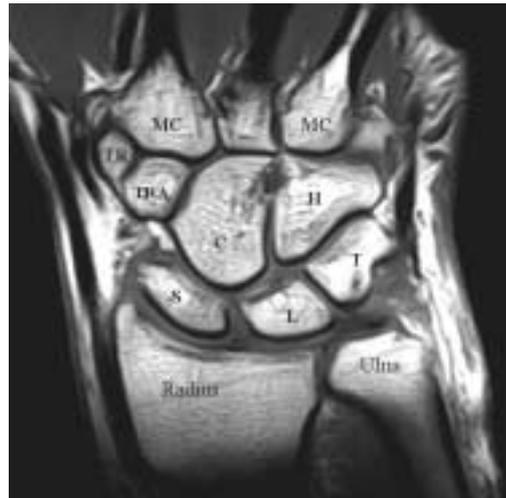


Abbildung II-15

T1-gewichtete Aufnahme, koronare Schichtorientierung

TR=548, TE=18, 15 Schichten, flip angle=90°, gap=0,2 mm, distance factor 10%, slice thickness 2 mm, matrix 358x512, 1 acquisition

**Abbildung II-16**

T2-gewichtete Aufnahme, koronare Schichtorientierung

fettgesättigte Turbo-Spin-Echo (TSE)- Sequenz, TR=4040, TE=103, 15 Schichten, gap=0,2 mm, distance factor 10%, slice thickness 2 mm, matrix 256x256, FOV 80 mm, 2 acquisitions

**Abbildung II-17**

Protonendichte Sequenz, koronare Schichtorientierung

protonendichte (PD), fettgesättigte Turbo-Spin-Echo (TSE)-Sequenz, TR=4040, TE=17, 15 Schichten, gap=0,2 mm, distance factor 10%, slice thickness 2 mm, matrix 256x256, FOV 80 mm, 2 acquisitions



II.3.2 Distaler Unterarm

Verletzungen des distalen Unterarmes werden klassischerweise durch einen Sturz auf den ausgestreckten Arm hervorgerufen (90%) [59]. Frakturen des distalen Radius machen ein sechstel aller Frakturen im Ambulanzbereich aus [115].

II.3.2.1 Klassifikation der Frakturen des distalen Unterarmes

Frakturen des distalen Unterarmes sind die häufigsten Frakturen im Erwachsenenalter. Mit 85% sind die Hyperextensionsbrüche, die durch einen Sturz auf die dorsalextendierte Hand entstehen, häufiger als die Hyperflexionsbrüche. Lebensalter, Geschlecht (Osteoporosegefahr, Frauen sind siebenmal häufiger betroffen als Männer) sowie die Form der Gewalteinwirkung bestimmen das Ausmaß des Traumas und der Fraktur. Speziell am Radius unterscheidet man Biegungsbrüche der Metaphyse, Stauchungsbrüche der Epiphyse und Abscherbrüche der Gelenkfläche. Der Grad der Stabilität wird durch den Frakturverlauf definiert. Hieraus resultiert das therapeutische Vorgehen. Zu den sicheren Zeichen der Instabilität einer distalen Unterarmfraktur gehören der Bruch des Processus styloideus ulnae sowie radioulnare (Sub-) Luxationen und Frakturen im distalen Radioulnargelenk (Tabelle II-5).

Tabelle II-5

Radiologische Zeichen der Instabilität distaler Unterarmfrakturen:

Sichere Zeichen

Unsichere Zeichen

Bruch des Processus styloideus ulnae
(=ulnare Desinsertion)

Radioulnare (Sub-) Luxation, Fraktur im distalen
Radioulnargelenk (=radioulnare Separation)

Metaphysäre Trümmerzone

Abscher- bzw. Luxationsfraktur

Verkürzung des Radius >3 mm

Dorsale Abkippung des distalen
Radiusfragmentes >20°

Man unterscheidet am distalen Unterarm (a) extra- von (b) intraartikulären Frakturen.

- (a) Verläuft eine Frakturlinie ca. 3-4 cm proximal des radiokarpalen Gelenkspaltes ohne Beteiligung der Articulatio radiocarpale bzw. radioulnare, so bezeichnet man die Fraktur als extraartikulär (Frykman I, II).

- (b) Entsprechend liegt bei intraartikulären Frakturen eine Beteiligung des radiokarpalen (Frykman III, IV), radioulnaren (Frykman V, VI) Gelenkspaltes und/oder beider Gelenkspalte (Frykman VII, VIII) vor.

Basierend auf der konventionellen Röntgendiagnostik existieren verschiedene Klassifikationen. In der *Klassifikation nach Melone (Grad I-IV)* ist die Richtung der Fragmentdislokation ein entscheidender Faktor, weshalb diese Einteilung vor allem in der chirurgischen Diagnostik gebräuchlich ist.

Die *AO-Klassifikation* unterteilt in drei Haupt- sowie drei Untergruppen nach morphologischen und prognostischen Gesichtspunkten. Die exakte Unterteilung ist für den alltäglichen Gebrauch umständlich [14] (Tabelle II-6).

Tabelle II-6

A0-Klassifikation nach Müller et al.

Die Zusatzziffern 1-3 beschreiben die Schwere der Fraktur bzw. Dislokationsrichtung:

ohne Dislokation

mit Dislokation nach dorsal

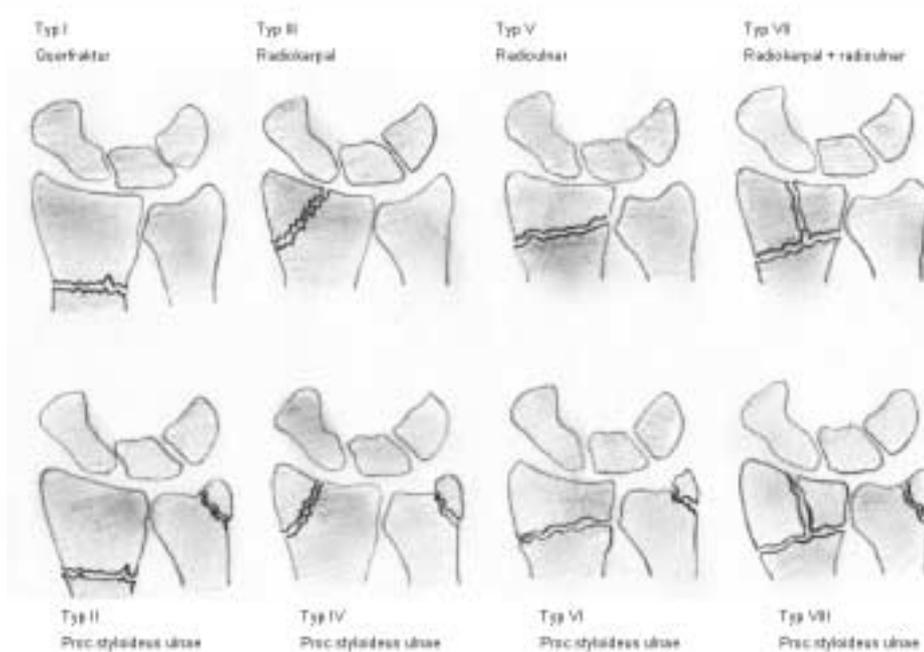
mit Dislokation nach palmar

A: rein extraartikuläre Frakturen	B: einfach oder partiell intraartikuläre Frakturen	C: mehrfach oder vollständig intraartikuläre Frakturen
A ₁ : der Ulna, bei intaktem Radius	B ₁ : des Processus styloideus radii	C ₁ : mit erhaltener Gelenkkongruenz
A ₂ : des Radius ohne metaphysäre Trümmerzone oder Eintauchung	B ₂ : mit Verschiebung des Fragmentes nach dorsal	C ₂ : mit zerstörter Gelenkkongruenz aber einfacher Metaphysenfraktur
A ₃ : des Radius mit metaphysärer Trümmerzone oder Eintauchung	B ₃ : mit Verschiebung des Fragmentes nach palmar	C ₃ : mit zerstörter Gelenkkongruenz und mehrfacher Metaphysenfraktur

Als Klassifikation zur Beurteilung der Gelenkbeteiligung und Stabilität hat sich die Systematik nach Frykman (I-VIII) etabliert. Das Ausmaß der Gelenkbeteiligung und die Prüfung der Stabilitätszeichen lassen prognostische Aussagen zu. Die häufigste Fraktur des menschlichen Körpers ist mit 25% aller Frakturen die Colles-Fraktur, Frykman-Klassifikation I (Abbildung II-18).

Abbildung II-18

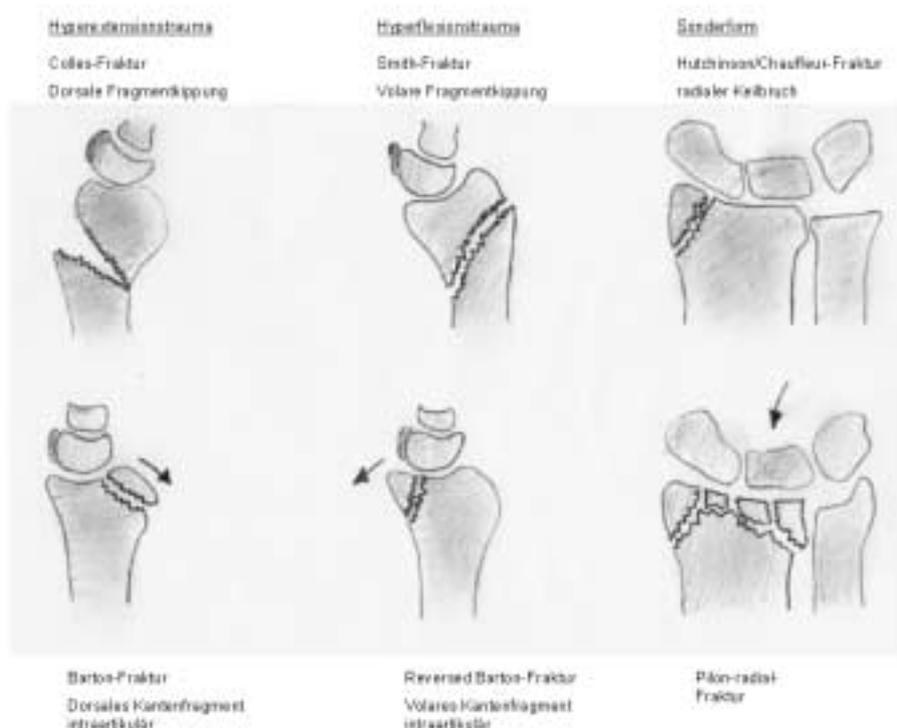
Klassifikation nach Frykman (I-VIII)



Die Hyperextensionstraumata nach *Colles* (dorsal) und *Barton* (volar), die Hyperflexionstraumata nach *Smith* („reversed Colles“, volar) und „reversed Barton“ (volar) sowie die Sonderformen nach *Hutchinson/Chauffeur* und *Pilon* sind ältere Systematisierungen, die besonders die klinischen Aspekte sowie die Dislokationsrichtung berücksichtigen, jedoch die Differenzierung in extra- und intraartikuläre Frakturtypen sowie prognostisch wichtige Aspekte wie die Beteiligung des *Processus styloideus ulnae* unbeachtet lassen (Abbildung II-19).

Abbildung II-19

Klassifikation nach Colles und Barton



II.3.2.2 Klinische Untersuchung

Verletzungen des distalen Unterarmes gehen häufig mit einem dauerhaften und/oder evozierten Druckschmerz auf der dorsalen Seite des Unterarmes proximal des *Processus styloideus radii* einher. Eine Bewegungseinschränkung bei Dorsalextension und/oder Ulna-flexion ist charakteristisch. Häufig ist zeitweise eine Schwellung vorhanden. Sichere

Frakturzeichen sind Dislokation, abnorme Beweglichkeit und Krepitation (Tabelle II-7). Insgesamt ist die klinische Untersuchung zwar verletzungstypweisend, jedoch sind wegen der Dokumentation Röntgenaufnahmen unerlässlich. Bei der häufigen metaphysären Biegungsfraktur des distalen Radius (*loco typico*) sind die Bajonett- und Fourchette-Stellung charakteristisch.

Tabelle II-7

Frakturzeichen
Sichere Frakturzeichen

Unsichere Frakturzeichen

Deformität/Dislokation Abnorme Beweglichkeit Tastbares Knochenreiben (Krepitation) Offene Fraktur Nachweis im Röntgen	Schmerz Funktionsausfall Schwellung und/oder Hämatom
---	--

II.3.2.3 Therapieprinzipien

Stabile Frakturen ohne oder mit nur geringer Gelenkbeteiligung können konservativ behandelt werden. Die erforderliche Ruhigstellung kann bis zu 12 Wochen bei einer Fraktur des Os scaphoideum betragen. Dislozierte Frakturen werden in Bruchspalt- oder Regionalanästhesie reponiert. Instabile Frakturen und Verletzungen mit ligamentären Schäden werden operativ mit Kirschnerdraht, Schrauben- oder Plattenosteosynthesen versorgt. Trümmerfrakturen werden mit einem Fixateur externe stabilisiert bevor ein Verfahrenswechsel durchgeführt wird.

II.3.3 Handwurzelknochen

Die Handwurzelknochen, Karpalia, bilden eine proximale und eine distale Reihe aus jeweils vier Knochen. Die häufigste Verrenkung der Handwurzel ist die *perilunäre Luxation*. Sie kommt sowohl isoliert als auch in Kombination mit Frakturen des Os scaphoideum (De Quervainsche Luxationsfraktur), des Os capitatum, des Os triquetrum und des Processus styloideus radii vor. Hierbei tritt das Os lunatum aus der proximalen Handwurzelreihe heraus und umschließt nicht mehr den Kopf des Os capitatum (seitliche Aufnahme konventionelles Röntgen) [104].

Da jeder Knochen Besonderheiten aufweist, soll nur auf die wichtigsten Charakteristika eingegangen werden.

Dem *Kahnbein* (*Os scaphoideum*) wird funktionell eine Schlüsselstellung im Bewegungsablauf des Handgelenkes zugewiesen: es weist Artikulationen zu fünf Nachbarknochen auf und ist an allen Bewegungen des Handgelenkes beteiligt. Gemeinsam mit dem *Os lunatum*, den *Ossa metacarpalia* sowie dem TFCC sorgt es zu einem Anteil von 48% in Neutralstellung und 40% in Funktionalstellung für die Kraftübertragung zwischen Radius und Daumenstrahl [56].

Die Nekrose des *Mondbeines* (*Os lunatum*), früher als Lunatummalazie oder Morbus Kienböck bezeichnet, ist nach der Hüftkopfnekrose, der Osteochondritis dissecans und dem Knochenmarksinfarkt die häufigste Knochennekrose. Sie betrifft vor allem junge Männer im Alter zwischen dem 20. und 40. Lebensjahr. Als ätiopathogenetisches Moment wird Minus-, seltener die Plusvariante der Ulna und Schädigungen des ulnokarpalen Komplexes (auch TFCC) diskutiert. Verschiedene Stadien I-IV der Mondbeinnekrose werden im konventionell-radiologischen Bild von Decoulx et al. (1977) unterschieden (Tabelle II-8). Auch das Mondbein ist entscheidend an der Kraftübertragung beteiligt. Während in Neutralstellung noch 50% der Kraft über die Fossa radioscapoidea fließen, verlagert sich in der Funktionalstellung das Gewicht mit mehr als 52% auf die Fossa radiolunata [56]. Die Verschmelzung des Mondbeines mit dem Dreiecksbein stellt die häufigste Synostose dar, gefolgt von der Koalition zwischen *Os capitatum* und *Os hamatum*.

Tabelle II-8

Stadien der Lunatummalazie nach Decoulx (1977)

Stadium I	Keine sichtbaren radiologischen Veränderungen
Stadium II	Verdichtung des Mondbeines bei noch erhaltener Kontur
Stadium III	Mosaikartiges Aussehen durch ein Nebeneinander von Sklerose und Osteolyse, die Form ist weitestgehend erhalten
Stadium IV	Deformierung des Mondbeines mit zusätzlicher Arthrose der Handwurzel

II.3.3.1 Klassifikation der Frakturen der Handwurzelknochen

Frakturen und Luxationen der Handwurzelknochen haben einen Anteil von 6% an der Gesamtzahl aller Verletzungen der funktionellen Einheit Handgelenk und Hand, die der Ort

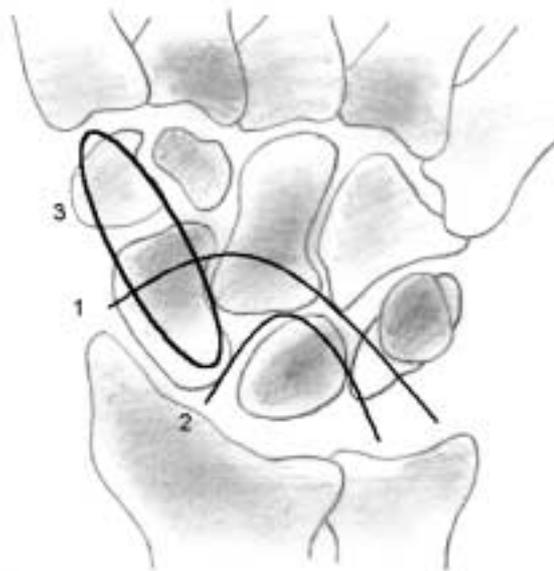
der häufigsten Verletzungen des menschlichen Skelettes ist. Obwohl Brüche der Mittelhandknochen und Phalangen insgesamt überwiegen, stellt die Skaphoidfraktur die zweithäufigste Fraktur des distalen Unterarmes nach der distalen Radiusfraktur loco typico dar. Das Kahnbein gehört zur „vulnerablen“ Zone der Handwurzel (Abbildung II-20). Isolierte Frakturen der übrigen Handwurzelknochen sind mit <1-15% seltener. Klassifikationen wie bei den Frakturen des distalen Unterarmes existieren nicht.

Abbildung II-20

„Vulnerable“ Zone des Karpus:

Der durch den „kleinen“ (2) und den „großen“ (1) Bogen eingegrenzte Bereich kennzeichnet die „vulnerable“ Zone des Karpus, in der sich die meisten Luxationen, Frakturen und Luxationsfrakturen ereignen (mit 3).

Der „kleine“ Bogen umfährt die Luxationszone, der „große“ die Luxationsfrakturzone.



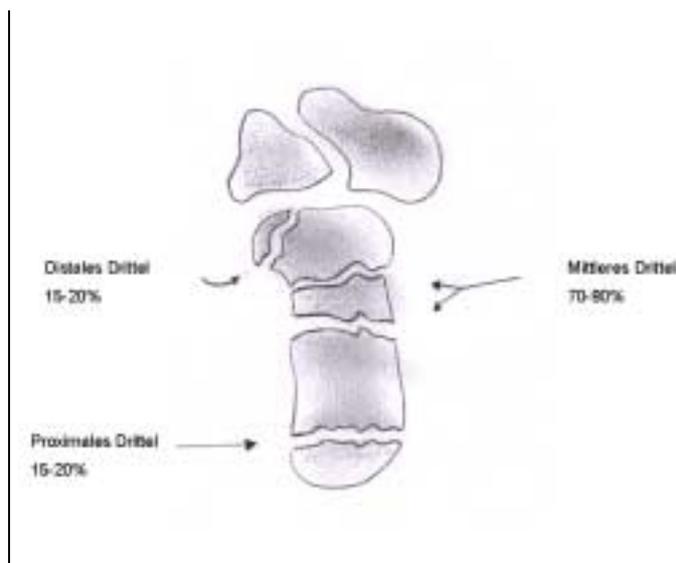
70% der Frakturen an den Handwurzelknochen betreffen das *Os scaphoideum* (Kahnbein), das Verhältnis zur distalen Radiusfraktur beträgt 1:10. Über einen Zeitraum von 7 Jahren diagnostizierten Larsen et al. 273 Skaphoidfrakturen. Der jährliche Durchschnitt der Inzidenz einer Kahnbeinfraktur lag bei 8/100000 Frauen und 38/100000 Männern. Verletzungsursache war zu 69% ein Sturz auf die Hand [79].

Grundsätzlich werden schräge, transversale (quere) und vertikal-schräge Frakturverläufe unterschieden. Die Häufigkeitsverteilung zeigt Abbildung II-21. Vor allem der proximale Teil des Kahnbeins neigt zur Pseudarthroseausbildung und/oder schlechten Wiederdurchbauung des Knochens, was unter anderem auf die Gefäßversorgung dieses Knochens von distal über einen palmaren und dorsalen Ast der A. radialis zurückzuführen ist, die keinerlei Anastomosen zu dem proximalen Teil des Knochens aufweist [7, 21]. Frakturen des proximalen Pols und dislozierte Frakturen gelten als instabil und sollten operativ versorgt

werden. Frakturen des mittleren oder distalen Pols sowie nicht dislozierte Frakturen mit einer Diastase von $< 1\text{mm}$ gelten als stabil und werden konservativ behandelt. Die Anfälligkeit des Kahnbeins zur Pseudarthroseausbildung und Nekrotisierung und die multiplen und schwerwiegenden Komplikationen durch das verzögerte oder Nicht- Erkennen einer Fraktur sind in der Literatur vielbeschrieben [68, 74, 76].

Abbildung II-21

Häufigkeitsverteilung der Skaphoidfrakturen: am häufigsten ist eine Quer- oder Schrägfraktur des Kahnbeines im mittleren Drittel des Knochens. Vor allem der proximale Pol ist stark gefährdet, eine Pseudarthrose zu entwickeln.



Das *Os lunatum* (*Mondbein*) frakturiert selten horizontal oder vertikal, häufig findet man isolierte Kompressionsfrakturen nach starker axialer Krafteinwirkung oder ligamentäre Abrissfrakturen. Ähnlich wie das *Os scaphoideum* weist auch das *Os lunatum* eine Prädisposition zur Ausbildung von Knochennekrosen auf, die auf die nicht kollateralisierbare Endstreckenversorgung dieses Knochens nur von palmar aus dem Ast der *A. ulnaris* und der *A. interossea anterior* und nicht von dorsal (*A. radialis*) in 20% aller Menschen zurückzuführen ist.

Ulnaseitige Direkttraumen oder axiale Krafteinwirkungen auf das *Os triquetrum* (*Dreiecksbein*) können zu Längs- oder Querfrakturen sowie in etwa 90% aller Fälle zu dorsalen Abrissfrakturen des *Lig. radiotriquetrum* oder *Lig. intercarpale dorsale* führen.

Des weiteren führen ulnaseitige Traumata zu linearen (Längs- und Quer-) Frakturen, Trümmer- oder Impressionsfrakturen des *Os pisiforme* (*Erbsenbein*). Häufig werden Frakturen dieses Knochens begleitend zu Radius-, *Os Triquetrum*- und *Os hamatum*-Frakturen beobachtet.

Vertikal- oder Horizontalfrakturen sowie radiale osteoligamentäre Abrissfrakturen der *Ossa trapezium* bzw. *trapezoideum* (*kleines und großes Vieleck*) entstehen durch axiale Stauchungstraumen des Daumen- bzw. Zeigefingerstrahles. Isolierte Frakturen des Os trapezoideum sind relativ selten. Bei den Abrissfrakturen der Ossa triquetrum, trapezium und trapezoideum ist immer an die Differentialdiagnose eines akzessorischen Knochenelementes zu denken.

Hyperextensionstraumata führen zu Längs- und Querfrakturen des *Os capitatum*, häufig kombiniert mit einem Abriss des Hornes des Os lunatum oder einer Kompressionsfraktur dieses Knochens. Als Variante der perilunären Luxationsfraktur De Quervain kann es zum Os-scaphoideum-Os-capitatum-Syndrom mit transkapitalem Frakturverlauf kommen.

Vertikal- oder Horizontalfrakturen des *Os hamatum* (*Hakenbeins*) sind selten, während Hamulusabbrüche sowie dorsale Abrissfrakturen aufgrund axialer Krafteinwirkung über die Ossa metacarpalia IV und V häufiger sind. Mit geeigneten Spezialaufnahmen wie der Karpaltunnelaufnahme sind Frakturen des Hamulus ossis hamati leichter zu diagnostizieren, Frakturen des Hamatum-Körpers sind auf Übersichtsaufnahmen häufig nicht zu erkennen. In Bezug auf den verzögerten Heilungsablauf bestehen Analogien zum Os scaphoideum [21].

II.3.3.2 Klinische Untersuchung

Zeichen eines lokalen Traumas im Handwurzelbereich sind häufig minimal, unspezifisch und subjektiv [7, 104, 132].

Bei der Untersuchung des *Kahnbeins* sind die Druckempfindlichkeit und Schwellung der anatomischen Tabatiere (snuffbox), Schmerzen vor allem auf der radialen Seite und dem radialen Handrücken, Schmerzen bei der Stauchung des Daumens, Pronationsbewegung und Ulnadeviation, schmerzhaftes Umwendbewegungen, seltener auch Extensions- und Flexionseinschränkungen die charakteristischen Zeichen, die auf eine Fraktur des Knochens hinweisen. Des weiteren wird das sog. „clamp-sign“ beschrieben, bei dem Daumen und Zeigefinger der gesunden Hand das Handgelenk der kranken zangenartig umgreifen.

Die klinische Symptomatik der anderen Handwurzelknochenverletzungen projiziert sich meist auf die anatomisch naheliegenden Strukturen, das Ausmaß der Bewegungseinschränkung ist vom Anteil des verletzten Bereichs an der jeweiligen Bewegung abhängig.

Aufgrund der Häufigkeit sei an dieser Stelle die klinische Symptomatik der Os lunatum-Nekrose kurz beschrieben, die allerdings oft sehr verspätet einsetzt. Die Frühdiagnostik der Nekrose stellt eine radiologische Herausforderung dar [21]. Die Symptomatik beginnt häufig mit einem Belastungsschmerz und einer Bewegungseinschränkung in Extensions- sowie Flexionsrichtung. Auf dem Handrücken dominiert ein Druckschmerz.

II.3.3.3 Therapieprinzipien

Bei der Auswahl der Therapie zur Behandlung einer Handwurzelknochenfraktur muss man grundsätzlich berücksichtigen, ob die Fraktur disloziert ist oder die Fragmente anatomisch physiologisch geordnet sind. Die nicht dislozierten Frakturen gelten als *stabil* und können *konservativ* behandelt werden, wobei die Gipstragezeit je nach betroffenem Knochen 4-14 Wochen betragen kann. Die intraossäre Verschraubung nicht-dislozierter Frakturen des Kahnbeins ermöglicht die frühzeitige Mobilisation des Handgelenkes im Vergleich zur konservativen Versorgung und ein früheres Nachlassen der klinischen Beschwerden, wirkt sich jedoch nach Adolfsson et al. auf die Heilungsrate oder den Zeitraum bis zur Durchbauung des Knochens nicht aus [3, 73]. Dislozierte Frakturen, Luxationsfrakturen mit ausbleibender automatischer Reposition oder Frakturen mit einem drohenden avitalen Knochenfragment gelten als *instabil*. Ihre Therapie sollte *operativ* erfolgen, die Stabilisierung wird mit Schrauben, Platten oder Kirschnerdrähten erreicht.

Die Vielzahl der therapeutischen Ansätze soll in dieser Arbeit am Beispiel der Skaphoidfraktur als die häufigste aller Handwurzelknochenfrakturen verdeutlicht werden. Die Therapie der Lunatummalazie (Kienböck's disease) ist ähnlich komplex und erfordert je nach Stadium eine der unten genannten Maßnahmen [5].

Die *frische Kahnbeinfraktur* wird, wenn sie nicht disloziert ist, mit einem 6-wöchigen Oberarmgips und im Anschluss mit einem 4 bis 6-wöchigen Unterarmgips versorgt. Ob die Verwendung eines Oberarmgipses bei stabilen Frakturen notwendig ist, wird in der Literatur diskutiert. Hinweise auf ein bei der Supinationsbewegung erzeugtes Schermoment im Skaphoid weisen auf die Wichtigkeit eines Oberarmgipses hin, der eine höhere Durchbauungsrate ermöglicht. Andere Studien hingegen zeigen, dass die alleinige Ruhigstellung mit einem Unterarmgips ausreicht [4, 23, 44, 58]. Die Gipsimmobilisation führt in etwa 90% der Fälle zur erfolgreichen Ausheilung der Fraktur, sie kann jedoch aufgrund der

langen Immobilisationszeit zu Muskelatrophie, Gelenkskontrakturen und Inaktivitätsosteopenie führen [55].

Dislozierte Frakturen oder Frakturen im proximalen Drittel des Skaphoids gelten als instabil und erfordern ein operatives Vorgehen. Eine Verschraubung des Skaphoids erfolgt mit der 1984 von Herbert und Fisher eingeführten Technik der Herbert Schraube [61]. Es existieren dorsale und palmare Zugangswege. Kirschnerdrähte können verwendet werden, um die knorpelüberzogenen Kanten zu schützen. Die Verwendung von Ender-Platten (1986) wird aufgrund des Knorpelüberzugs des Skaphoids zu 2/3 und der damit verbundenen Gefahr der Arthrose kaum verwendet. Die Erforderlichkeit einer postoperativen Immobilisation ist ebenfalls umstritten und wird von nicht erforderlich [61] über 2,7 Wochen bis 3 Monaten angegeben [7].

Eine zu frühe Remobilisation des frakturierten Knochens kann zur verzögerten oder Nicht-Durchbauung des Knochens mit Pseudarthrose und/oder Gelenkinstabilität führen (DISI/VISI-Instabilität, persistierende Schmerzbelastung und Bewegungseinschränkung). Die Nicht-Durchbauung (non-union) geht mit chronischen Schmerzen und in 93% der Fälle mit einer Osteoarthritis einher.

Veraltete Kahnbeinpseudarthrosen führen unbehandelt längerfristig zu asymmetrischer Kraftübertragung, Aufweitungen karpaler Winkel und Fehlstellungen der einzelnen Knochen des Karpus. Der bänderbedingten Instabilität (SLAC-wrist, Scapholunate advanced collapse) steht die die knöchernen Struktur betreffende SNAC-wrist (scaphoid nonunion advanced collapse) gegenüber. Der entstandene karpale Kollaps verläuft stadienhaft nach dem Arthroseausmaß:

Tabelle II-9

Arthroseausmaß nach Watson und Ryu zur Stadieneinteilung SNAC/SLAC wrist I-III

Stadium	Arthroseausmaß
I	Arthrose beschränkt auf den Processus styloideus radii
II	Arthrose Radioskaphoidalgelenk
III	Mediokarpale Arthrose

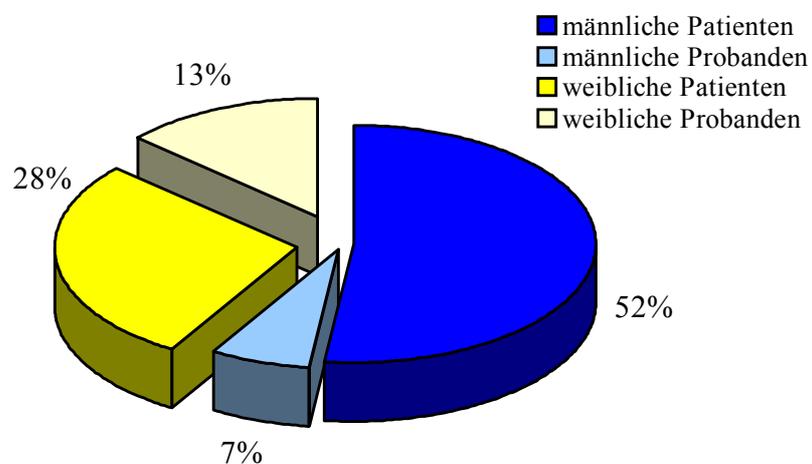
Man unterscheidet einen *kurativen* Therapieansatz, der sich auf frühe Stadien (bis Stadium I) des karpalen Kollaps nach Watson und Ryu beschränkt, von einem *palliativen* Ansatz in den späteren Stadien (Stadien II-III), bei dem sog. Rettungsoperationen („salvage procedures“) angewendet werden. Kurativ interpositioniert man verschiedene Formen vaskularisierter und nicht vaskularisierter Knochenblocks (bone graft) und erreicht somit eine Rekonstruktion des karpalen Gefüges mit Aufrichtung des Skaphoids und verhindert einen progredienten Verlauf der Pseudarthrose durch den „frischen“ knöchernen Durchbau [34, 41, 67]. Palliative Maßnahmen sind mit einer Einschränkung der Bewegungsfreiheit verbunden. Gängige Verfahren sind die Mediokarpale Teilarthrodese, die aufgrund der Restbeweglichkeit der Vollarthrodese vorgezogen wird, die radiale Styloidektomie, die Entfernung der proximalen Handwurzelreihe sowie die teilweise oder vollständige Entfernung des nekrotisierten Skaphoids. Um der Handgelenkesinstabilität und dem übermäßigen Funktionsverlust der Hand vorzubeugen, können Silikonimplantate oder Allografts die entstandene „Lücke“ füllen (Replacement), es sei an dieser Stelle auf die Komplikation der Silikonsynovialitis hingewiesen [74]. Eine weitere Möglichkeit ist die Sehneninterpositionsarthroplastik, wobei an die Stelle des entfernten Fragmentes ein Sehnenknäuel eingebracht wird. Das Einführen eines Weichteillappens in die aneinanderreibenden Knochenfragmente (Bentzon’s Operation), die Denervation zum Erlangen der Schmerzfreiheit sowie die „Verschmelzung“ der Knochen der proximalen Reihe sind ältere Verfahren [7, 41, 67, 105, 134, 135].

III MATERIAL UND METHODEN

Der vorliegenden Promotionsarbeit liegt ein Gesamtkollektiv von 75 Personen, 15 Probanden (5 männliche und 10 weibliche Probanden im Alter von 24-56 (Mittelwert 41,8) Jahren) sowie 60 Patienten (62 Handgelenke) (39 männliche und 21 weibliche Patienten im Alter von 12-83 (Mittelwert 35,03) Jahren) zugrunde (Diagramm III-1). Die prospektive Erfassung der Daten erfolgte im Zeitraum von Januar 2000 bis Juni 2001. Probandenstudien dienten zunächst der Evaluierung der optimalen Sequenzparameter und Schichtorientierung. Nach Ausarbeitung eines klinischen Untersuchungs- (Abbildung III-1) und radiologischen Sequenzprotokolls (Tabelle IV-2) wurden die Patientenuntersuchungen durchgeführt. Einschlusskriterien waren der Verdacht auf eine frische Fraktur des distalen Unterarmes und/oder der Handwurzelknochen bei unauffälligem oder unklaren Röntgenbefund und auffälliger Klinik (Schmerzen, Bewegungseinschränkung). Ausschlusskriterien waren bekannte Handgelenkstraumata, chronische Degeneration des Handgelenkes (Arthrose, Osteonekrosen), das Tragen eines ferromagnetischen Körpers (Herzschrittmacher, große Metallimplantate) sowie Schwangerschaft, Platzangst, mangelnde Compliance oder Verweigerung des Patienten. 6 Patienten erfüllten die Ausschlusskriterien. Gründe hierfür waren in vier Fällen bekannte alte Handgelenksverletzungen und in zwei Fällen das Nichterscheinen zum Untersuchungstermin.

Diagramm III-1

Geschlechterverteilung im Gesamtkollektiv (60 Patienten und 15 Probanden)



III.1 Probandenuntersuchungen

Zur Evaluation eines geeigneten Studienprotokolls für die Handgelenksregion wurden Probandenuntersuchungen durchgeführt. Das Probandenkollektiv bestand aus 15 Probanden. Die Untersuchung erfolgte nach der Aufklärung und schriftlichen Einverständniserklärung ohne Kontrastmittel. Anamnestisch wurden frühere Handgelenkstraumata ausgeschlossen. Die diagnostische Bildqualität wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dabei muss die Untersuchungszeit möglichst gering gehalten werden, um eine hohe Patientencompliance zu erreichen und so Bewegungsartefakte zu vermindern.

Die Probandenstudien dienten der Evaluierung der optimalen Positionierung des Handgelenkes in der Spule und der exakten Winkelung der Schichten auf den Übersichtssequenzen. Hierzu wurde mit einem FOV von 100 mm und einer Matrix von 512x512 mm in transversaler und koronarer Schnitfführung (TR=520, TE=18, flip angle=90, gap=0,2, distance factor 10%, 1 aquisition) untersucht. Zur detaillierten Darstellung des Verbandes der Knochen und Bänder wurde eine Schnitfführung parallel zur Längsachse der Unterarmknochen und Handwurzelknochen sowie der ligamentären Strukturen gewählt.

Alle 15 Probanden wurden anschließend mit jeweils 12 Sequenzen untersucht: zwei verschiedene Matrixeinstellungen (512x512 und 256x256) mit jeweils drei verschiedenen Schichtdicken (1,5-2,5 cm) in T1- und T2-gewichteten Sequenzen. Die Schichtdicke (SD) wurde anhand der Darstellbarkeit einer knöchernen Struktur und eines Bandes in 1,5 mm, 2 mm und 2,5 mm SD protokolliert und bewertet. Es wurde evaluiert, auf wie vielen Schichten einer Sequenz mit der jeweiligen Schichtdicke das Os lunatum (stellvertretend für Knochen) beurteilt werden kann. Hierzu wurde der maximale Durchmesser des Os lunatum in der transversalen Schnitfführung bestimmt und durch die Schichtdicke plus den Distanzfaktor (10%) dividiert. Die Visualisierbarkeit des Lig. scapholunatum war das Kriterium für die diagnostische Wertigkeit bezüglich der Darstellung des ligamentären Apparates. Mit einem Score von 1-3 wurde die Qualität der Darstellung insgesamt bewertet. Eine 1 wurde für die beste, eine 3 für die im Vergleich schlechteste Bildqualität vergeben.

Die Kontrastauflösung des Bildes ist eine Kombination aus der räumlichen Auflösung und den Kontrasten zwischen den abgebildeten Strukturen. Sie terminiert die diagnostische Bildqualität. Eine hohe räumliche Auflösung ist für die Beurteilung feiner Strukturen wie die

der Handwurzelknochen und -bänder essentiell. Sie lässt sich mittels folgender Gleichung errechnen:

Gleichung III-1

Räumliche Auflösung (mm) = FOV (mm) / Matrix

FOV=field of view

Die Qualität der räumlichen Auflösung nach Variation der Matrix und des FOV wurde überprüft.

III.2 Patientenuntersuchungen

III.2.1 Patientenmanagement und Patientenaufklärung

Bei allen 60 Patienten (62 Handgelenke) wurde zunächst eine Anamnese erhoben, eine klinische Untersuchung durchgeführt und die Ergebnisse in einem standardisierten zuvor erarbeiteten Untersuchungsprotokoll dokumentiert (Abbildung III-1). Schmerz und Bewegungseinschränkung wurden anhand eines Scores von 1-10 bewertet. Werte von 1-3 entsprachen leichten Schmerzen und einer geringen Bewegungseinschränkung mit einer erhaltenen Rotationsfähigkeit von 90-180°. Werte von 8-10 wurden bei starken Schmerzen vergeben, die Pronation-Supination-Rotation war auf weniger als 45° reduziert (Tabelle III-1). 6 Patienten erfüllten die Ausschlusskriterien, so dass insgesamt 54 Patienten (56 Handgelenke) der konventionellen Diagnostik und der MRT zugeführt wurden. Nach der Begutachtung der konventionellen Röntgenaufnahmen erfolgte eine Festlegung der Diagnose und im Falle des Verdachtes auf eine Fraktur die genaue Lokalisation. Die zu diesem Zeitpunkt geplante Therapie wurde ebenfalls schriftlich dokumentiert. Die klinische Untersuchung und Therapieplanung wurde in allen Fällen von dem gleichen chirurgischen Oberarzt durchgeführt, ebenso erfolgte die Befundung der Röntgenbilder sowie der MRT-Bilder durch die gleichen radiologischen Oberärzte und Chirurgen unabhängig voneinander. Im Anschluss an die MRT-Untersuchung und Auswertung wurde gemeinsam mit den Chirurgen die endgültige optimale Therapieplanung besprochen und durchgeführt.

Zu Beginn jeder MRT-Untersuchung wurden Probanden sowie Patienten ausführlich über Risiken und Nebenwirkungen des Magnetfeldes aufgeklärt sowie eventuelle

Kontraindikationen ausgeschlossen und die schriftliche Einverständniserklärung ersucht. Die Aufklärung erfolgte außerhalb des Magnetfeldes anhand standardisierter Aufklärungsbögen durch den diensthabenden Radiologen. Gezielte Fragen nach Herzschrittmachern sowie eine detaillierte Anamnese hinsichtlich vorausgegangener Operationen an Herz und/oder Kopf waren ebenso Inhalt des Aufklärungsgespräches wie die Frage nach dem Vorhandensein von Metallinkorporaten, Implantaten oder Gefäßclips im Körper. In Einzelfällen wurde eine Fremdanamnese zur Ergänzung herangezogen. Nach Ausschluss der Kontraindikationen wurden Probanden und Patienten über Untersuchungsablauf und -dauer, Lagerung, Lärmbelastung sowie die Möglichkeit der Kommunikation mit dem Untersucher und die Überwachung des Patienten während der Untersuchung informiert. Vor der Untersuchung wurden Probanden und Patienten aufgefordert, Uhren, Schmuck und sonstige Metallgegenstände abzulegen. Nach der untersuchungsgerechten Lagerung erfolgte die Positionierung der Extremität in der Spule und schließlich die funktionsgerechte Positionierung der Oberflächenspule im Kernspintomographen.

Tabelle III-1

Subjektive Einschätzung der Schmerzen und der Bewegungseinschränkung

Score	Schmerzbelastung	Bewegungseinschränkung
0	Kein Schmerz	Volle Bewegungsfähigkeit. Pronation-Supination-Rotation von $>180^\circ$ möglich.
1	Leichter Schmerz, der auf einer Punkteskala von 1-10 den Werten 1-3 entspricht	Leichte Bewegungseinschränkung, die auf einer Punkteskala von 1-10 den Werten 1-3 entspricht. Die Pronation-Supination-Rotation ist von $90-180^\circ$ erhalten.
2	Mittlere Schmerzstärke (4-7)	Mittlere Bewegungseinschränkung (4-7). Die Pronation-Supination-Rotation ist von $45-90^\circ$ erhalten.
3	Starke Schmerzstärke (8-10)	Starke Bewegungseinschränkung (8-10). Die Pronation-Supination-Rotation ist auf $<45^\circ$ reduziert.

Abbildung III-1

Untersuchungsprotokoll

PATIENTENDATEN Nummer <input type="text"/> Geburtstag <input type="text"/> Name, Vorname <input type="text"/> Geschlecht <input type="radio"/> m <input type="radio"/> w <input type="radio"/> Adresse <input type="text"/> Beruf <input type="radio"/> Hausfrau <input type="radio"/> Schüler <input type="radio"/> Rentner <input type="radio"/> Telefon <input type="text"/>					
UNFALLTAG Unfallhergang Arbeit <input type="radio"/> Sturz <input type="radio"/> Sport <input type="radio"/> Stoß <input type="radio"/> Verkehr <input type="radio"/> sonstiges <input type="radio"/>		ELINKE Schmerz-Score kein (0) <input type="radio"/> leicht (1-3) <input type="radio"/> mittel (4-7) <input type="radio"/> schwer (8-10) <input type="radio"/>		Bewegungseinschränkung_Score (>180°) <input type="radio"/> (90-180°) <input type="radio"/> (45-90°) <input type="radio"/> (<45°) <input type="radio"/>	
Schwellung <input type="radio"/> Druckschmerz <input type="radio"/> Tabak <input type="radio"/> Handrücken <input type="radio"/> Ulna <input type="radio"/> Funktion <input type="radio"/> Dauerschmerz <input type="radio"/>		Dorsalextension <input type="radio"/> Palmarflexion <input type="radio"/>			
KONVENTIONELLE RADIOLOGIE ROENTGENTAG Aufnahmetechnik 2 Ebenen <input type="radio"/> KBS <input type="radio"/> Schrägaufnahme <input type="radio"/>			ERGEBNIS KONV RA Fraktur (#) Handwurzel (HW) <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> # Rad <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> # Ulna <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> # Uo <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>		
WEICHTEILAPPARAT Band <input type="radio"/> TFOC <input type="radio"/>			FRAKTUR keine <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> V.a <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> relativ sicher <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>		
THERAPIE KONV RA Verband <input type="radio"/> Gips UA <input type="radio"/> OA <input type="radio"/> OP <input type="radio"/> Röntgenkontrolle <input type="radio"/>		IMMOBLZEIT (Wo) keine <input type="radio"/> 4-8 <input type="radio"/> 0-2 <input type="radio"/> >8 <input type="radio"/> 2-4 <input type="radio"/>		AUZEIT (Wo) keine <input type="radio"/> 4-8 <input type="radio"/> 0-2 <input type="radio"/> >8 <input type="radio"/> 2-4 <input type="radio"/>	
MRT MRT-TAG Aufnahmetechnik T1 tra <input type="radio"/> T1 cor <input type="radio"/> T2-PD cor <input type="radio"/> T2-stir <input type="radio"/>		ERGEBNIS MRT Fraktur (#) <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Ödem <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Hämatom <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> TFOC <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Bandverletzung <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> knöcherner Ausriss <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> bone bruise <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>		T1 tra cor <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> T2-PD <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> T2_stir <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	
ZEITSPANNE (Tagen) Unfall-Röntgen <input type="radio"/> Röntgen-MRT <input type="radio"/>		#WO? <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> Änderung der #-Lokalisation <input type="radio"/> Seite re <input type="radio"/> li <input type="radio"/>			
DIAGNOSE Änderung? <input type="radio"/> Erweiterung (Weichteilbefund, etc.) <input type="radio"/>					
THERAPIE MRT Änderung? <input type="radio"/>		IMMOBLZEIT (Wo) keine <input type="radio"/> 4-8 <input type="radio"/> 0-2 <input type="radio"/> >8 <input type="radio"/> 2-4 <input type="radio"/>		AUZEIT (Wo) keine <input type="radio"/> 4-8 <input type="radio"/> 0-2 <input type="radio"/> >8 <input type="radio"/> 2-4 <input type="radio"/>	
Verband <input type="radio"/> Gips UA <input type="radio"/> OA <input type="radio"/> OP <input type="radio"/> Verzicht auf Röntgenkontrolle <input type="radio"/>		Inmobl. unmittelbar beendet <input type="radio"/> Inmobl. unverändert <input type="radio"/>		AU keine Konsequenz <input type="radio"/> verkürzt <input type="radio"/> verlängert <input type="radio"/>	

III.2.2 Untersuchungstechnik und Sequenzen

Die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen wurden an einem Kernspintomographen (Symphony Quantum, Siemens, Erlangen) bei einer Feldstärke von 1,5 Tesla durchgeführt. Die Handgelenke aller 54 Patienten wurden mit Oberflächenspulen (spezielle HF-Spulen) untersucht, um selektiv den zur Spule benachbarten Bereich zu erfassen und ein verbessertes Signal-Rausch-Verhältnis sowie eine erhöhte räumliche Auflösungsvermögen zu erhalten. Zu Beginn der Studie wurden die Untersuchungen bei 3 Patienten mit einer flexiblen Spule der Firma Siemens, Erlangen durchgeführt. Alle anderen Patienten (n=51) wurde mit einer speziell entwickelten Handgelenksspule untersucht, mit der das S/R-Verhältnis weiter verbessert und eine höhere räumliche Auflösung erzielt werden konnte. Dies ist zum einen auf die Technik der Spule, zum anderen auf die wesentlich verbesserten Lagerungsmöglichkeiten des Patienten zurückzuführen. Die verbesserte Patientencompliance verminderte die Bewegungsartefakte.

Die Untersuchungstechnik mit der flexiblen Spule erforderte die Lagerung des Patienten in Pronation und die Überstreckung des Armes nach kranial über den Kopf. In dieser Position sollte der Patient im Idealfall 20 min verharren, was sich teilweise als erschwerlich herausstellte. Zur besseren Lagerung des Patienten wurde eine neue Spule entwickelt, die die Untersuchung in bequemer Rückenlage ermöglichte. Seitlich des Patienten wurde das zu untersuchende Handgelenk, dessen Volumen dem Spulenumfang entsprach, in einer festen Spule in einer eigens dafür vorgesehenen Halterung befestigt und mit Schaumstoffplatten die ebene Haltung der Hand und der Finger unterstützt (Abbildung III-2).

Abbildung III-2

a) Die Untersuchungen fanden in einem 1,5 Tesla Kernspintomographen (Symphony Quantum, Siemens, Erlangen) statt (links). Die Lagerung bei der Untersuchung mit der flexiblen Spule (b: links) erfolgte in Pronation mit nach vorne überstrecktem Arm und Stabilisierung mit Sandsäcken (rechts).



b) Zur besseren Lagerung wurde eine Handspule entwickelt, die das Handgelenk handschuhartig umgibt (rechts). Das Volumen des Handgelenkes entspricht dem der Spule. Hieraus ergibt sich eine höhere Sensitivität, da die Empfängerspule so nah wie physiologisch möglich am zu untersuchenden Gewebenvolumen positioniert wird.



c) In einer Halterung wird die Spule seitlich des Patienten fixiert, der sich in bequemer Rückenlage (feet first supine) befindet. Der Kopf bleibt während der Untersuchung außerhalb der Ganzkörperspule, so dass auch Patienten mit Klaustrophobie problemlos untersucht werden können.



Das Untersuchungsprotokoll wurde anhand von Probandenuntersuchungen mehrfach erweitert und setzte sich schließlich aus folgenden Komponenten zusammen: nach der Lageorientierung an einer Übersichtssequenz (Scout, Localizer) mit der Ganzkörperspule (body coil) wurde ein zweiter Localizer in 3 Ebenen mit der Oberflächenspule (surface coil) angefertigt, der die Voraussetzung für die Planung der folgenden Sequenzen zur Abklärung der Diagnose darstellte. Begonnen wurde mit einer transversal orientierten T1-gewichteten SE-Sequenz (TR=520, TE=18, 20 Schichten, flip angle=90°, gap=0,2 mm, distance factor 10%, slice thickness 2 mm, matrix 512x512, 1 aquisition). Es folgte die Durchführung einer auf diesen Schichten geplanten und damit entsprechend der anatomischen Verhältnisse möglichst genau gewinkelten T1-gewichteten, koronar orientierten Sequenz (TR=520, TE=18, 15 Schichten, flip angle=90°, gap=0,2 mm, distance factor 10%, slice thickness 1,7-2 mm, matrix 512x512, 1 oder 2 aquisitions). Schließlich wurden im Routineprotokoll eine T2-gewichtete, fettgesättigte Turbo-Spin-Echo (TSE)-Sequenz (TE=103) und eine protonendichte Sequenz (TE=17), koronar orientiert angefertigt (TR=4040, TE=17-103, 15 Schichten, distance factor 10%, slice thickness 1,7-2 mm, matrix 256x256, FOV 80-120 mm, 2 aquisitions). In Abhängigkeit von der klinischen Fragestellung wurden weitere Sequenzen in verschiedenen Schichtorientierungen angeschlossen (z.B. sagittal). Das Messfeld (=field of view (FOV)) betrug 80-100 mm². In den T1-gewichteten Spin-Echo-Sequenzen (SE-Sequenzen) wurde eine Matrix 512x512 verwendet, woraus sich eine Pixelgröße von 0,16-0,2 mm² ergibt. In den T2-gewichteten SE-Sequenzen errechnet sich aus der verwendeten Matrix 256x256 eine Pixelgröße von 0,31-0,39 mm².

Alle Untersuchungen wurden nativ durchgeführt, da es sich ausschließlich um akute Verletzungen handelte. Die Diagnose einer Fraktur oder Weichteilverletzung wurde anhand der MRT gestellt. Diverse Studien berichten von einer hohen Sensitivität und Spezifität des Verfahrens in der Detektion okkultter Frakturen und Weichteilläsionen [18, 70, 107]. Dies sollte überprüft werden.

III.3 Bildmorphologische Auswertkriterien

III.3.1 Konventionelle Röntgendiagnostik

Bei der Befundung der Nativröntgenbilder wurde auf Frakturen und Band- oder Diskusverletzungen geachtet. Hinweis auf eine *Fraktur* waren die Unterbrechung der

Kontinuität der Kortikalis sowie des Trabekelwerkes der Knochenstruktur, Dislokationen wiesen auf begleitende *Bandverletzungen* hin. Abgesprengte Knochenteile wurden als ligamentärer Ausriss gewertet. Ebenso frakturweisend waren sogenannte Knochenflakes. Resorptionszonen oder Sklerosierungslinien werden im konventionellen Röntgen erst nach 10 Tagen sichtbar. Hieraus resultiert eine Verzögerung der Diagnostik und des Therapiebeginns, was ein Problem des Standardverfahrens (Aufnahme in 2 Ebenen, Kahnbeinserie) zur Untersuchung akuter Handgelenksverletzungen darstellt. Da es sich in dieser Arbeit um die Beurteilung ausschließlich frischer Frakturen handelte, ist dies von besonderer Bedeutung [76].

Als indirekte Zeichen für eine Fraktur wurde auf Fettzeichen geachtet. Das Verschwinden einer physiologischen Fettschicht des M. pronator quadratus aufgrund eines Hämatoms in der palmaren Muskelloge (Pronator-quadratus-Zeichen) kann auf eine okkulte Fraktur am distalen Radius hinweisen.

Die Kriterien der Winkel und Hilfslinien sind im Kapitel Winkel und Gelenke (II.3.1.1.1) beschrieben. Stufenbildung oder eine Unterbrechung der Karpalbögen sowie deren nichtparalleler Verlauf können auf eine karpale Instabilität hinweisen (Abbildung II-5).

Das Vorliegen einer skapholunären Dissoziation (CID) ist durch eine Verbreiterung des skapholunären Gelenkspaltes um >3 mm gekennzeichnet (Terry-Thomas-Sign). Der Befund lässt sich am besten mit der Moneim-Einstellung erfassen, bei der die Ulna durch den gebeugten Klein- und Ringfinger eleviert wird. Des Weiteren projiziert sich der distale Pol des Skaphoids durch dessen Palmarkippung ringförmig (Ringzeichen). Die Dorsalkippung des Os lunatum lässt eine Dreiecksform des Mondbeins erkennen sowie eine Vergrößerung des radioulnaren Winkels (RU) um $>15^\circ$ und des radioskaphoidalen Winkels (SL) um $>60^\circ$ (DISI-Formation). Die lunotriquetrale Dissoziation (CID) wird durch die VISI-Formation mit Palmarflexion von Skaphoid und Os lunatum charakterisiert. Der RU beträgt $<15^\circ$, ebenso wie der lunotriquetrale Winkel, SL $>60^\circ$. Die erwähnten Hilfslinien und -winkel dienen der Diagnostik der CID sowie der übrigen karpalen Gefügestörungen (II.3.1.1.2) [14, 21].

Spongiosklerosen sowie verwaschene Spongiosazeichen deuteten auf ein bereits fortgeschrittenes Stadium der Lunatummalazie hin. Die Diagnose nicht dislozierter Handwurzelknochenfrakturen ist aufgrund der beschriebenen Normalvarianten sowie der Überlagerungserscheinungen nicht immer eindeutig. Im Seitbild ist die Fragmentstellung durch die Vielfachüberlagerung der Handwurzelknochen häufig kaum möglich.

III.3.2 MRT

In der MRT wurden *Frakturen* durch die Änderung der Signalintensität (SI) erkannt. Freies Wasser erniedrigte die SI in T1-gewichteten Aufnahmen und erhöhte sie in T2-gewichteten Sequenzen. Ein Knochenmarksödem (bone bruise) aufgrund spongiöser Mikrofrakturen kam entsprechend der Flüssigkeitsanreicherung signalreich (T2) zur Darstellung. Man bezeichnet diese Form der ossären Veränderung als *Knochenkontusion*. Sie steht den „richtigen“ Frakturen mit Frakturlinien gegenüber (subchondrale und osteochondrale Frakturen). Das Knochenmarksödem kann als Fraktur fehlgedeutet werden, da eine eindeutige Frakturlinie verdeckt oder nicht eindeutig erkennbar ist [75]. Ähnlich wie mit den Knochenkontusionen verhält es sich mit den meisten Pathologien, die fast immer durch eine Zunahme von freiem Wasser charakterisiert sind. Das Kontrastverhalten frischer Frakturen zeigt eine starke bis mittlere Kontrastmittelaufnahme. Da frische Frakturen auch ohne KM gut sichtbar sind, verzichtete man in der vorliegenden Studie darauf.

Weiterhin wurden in der MRT *Bandläsionen* beurteilt. Sie stellten sich im T1-gewichteten Bild hypointens dar. Die Verbindung zwischen den Knochen erschien nicht gespannt, die Kontinuität war teilweise unterbrochen. Häufig werden diese Verletzungen von *ödematösen oder hämorrhagischen Ergüssen* begleitet. Diese erscheinen in der T1-Aufnahme hypointens, wobei ödematöse Ergüsse signalärmer sind als hämorrhagische. Im T2-Bild stellen sie sich signalreich dar. Ähnlich verhielt es sich mit Läsionen des *TFCC*. Hypointense Inhomogenitäten in der T1-gewichteten Aufnahme deuteten auf Zerreißen der Struktur hin, korrespondierende Signalanhebungen in T2-gewichteten Bildern bestätigten die Diagnose.

Hingewiesen sei an dieser Stelle auf die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführte dynamische MRT-Diagnostik mit Kontrastmittel (Gadolinium-DTPA). Eine beginnende *Lunatummalazie* im Ödemstadium stellt sich als homogene Signalauslöschung im T1-gewichteten Bild und korrespondierend als Signalintensitätsanhebung im T2-gewichteten Bild dar. Eine fleckige inhomogene Kontrastmittelanreicherung weist auf ein partiell, fehlende Anreicherung auf ein vollständig nekrotisiertes Os lunatum hin [21]. Die kontrastmittelverstärkte MRT dient auch der Darstellung der Durchblutungsverhältnisse bei nicht durchbauten Skaphoidfrakturen und wird bevorzugt zur Dokumentation der Durchblutung des proximalen Pols des Skaphoids gegeben [25].

III.4 Statistik und Datenanalyse

Die Ergebnisse der konventionell-radiologischen Diagnostik wurden unmittelbar nach der Befundung durch zwei voneinander unabhängige Radiologen mit den Unfallchirurgen diskutiert und das weitere therapeutische Procedere schriftlich festgehalten. Es wurde überprüft, inwieweit die MRT eine Änderung oder Erweiterung der Diagnose und des therapeutischen Vorgehens herbeiführt.

Unter Verwendung einer Kreuztafel (*Beurteilung diagnostischer Tests*) wurden die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt und die Parameter Sensitivität, Spezifität, die Raten "Falsch Positiv" und "Falsch Negativ", prädiktive Werte, die Effizienz und der Youden-Index berechnet (Tabelle III-2). Für alle Parameter werden auf Grundlage der Binomial-Verteilung 95%-Konfidenzintervalle (Vertrauensgrenzen) in Klammern angegeben. Sie kennzeichnen den Bereich eines Merkmals, in dem sich 95% aller möglichen Populationsparameter einer binominal verteilten Population befinden, die den empirisch ermittelten Stichprobenkennwert erzeugt haben können. Durch die Angabe von Vertrauensgrenzen besitzt das Resultat einer Untersuchung eine informative Vertrauenswürdigkeit [2, 53].

Sensitivität und *Spezifität* errechnen sich nach folgenden Beziehungen:

$$\text{Sensitivität} = a / (a + c)$$

$$\text{Spezifität} = d / (d + b)$$

Tabelle III-2

Allgemeine Kreuztafel zur Beurteilung eines diagnostischen Tests

Verfahren	positiv	negativ	total
positiv	a	b	a+b
negativ	c	d	c+d
total	a+c	b+d	Gesamtfallzahl

Zur Evaluierung der Übereinstimmung der beiden Radiologen wurde eine „Interobserver-Analyse“, der *Kappa-Test* durchgeführt. Kappa (κ) wird errechnet, indem man die mögliche und die tatsächlich vorliegende Zahl von übereinstimmenden Diagnosen in einer Kontingenztafel in Relation setzt (Tabelle III-3).

Tabelle III-3

Allgemeine Kontingenztafel für zwei Untersucher

Radiologe 1	Fraktur positiv	Fraktur negativ	total
Fraktur positiv	a	b	a+b
Fraktur negativ	c	d	c+d
total	a+c	b+d	Gesamtfallzahl

Kappa κ errechnet sich dann nach folgender Gleichung:

Gleichung III-2

$$\kappa = P_0 - P_x / 1 - P_x$$

P_0 ist der Quotient aus der Summe der Zahlen in der Diagonalen, welche die maximale Übereinstimmung ausdrücken, und der Gesamtfallzahl; P_x ist die Summe aus den Produkten $(a+c) \times (a+c)$ und $(b+d) \times (c+d)$ geteilt durch die Gesamtfallzahl zum Quadrat:

Gleichung III-3

$$P_0 = (a+d) / \text{Gesamtfallzahl}$$

$$P_x = (a+c)(a+c) + (b+d)(c+d) / \text{Gesamtfallzahl}^2$$

Kappa nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Ein Maximum von 1 indiziert eine perfekte Übereinstimmung, während ein Wert von 0 nicht besser als die zufällige Übereinstimmungswahrscheinlichkeit ist. Zur Interpretation der Werte zwischen 0 und 1 sind in Tabelle III-4 Richtlinien angegeben [29, 47].

Tabelle III-4

Richtlinien zur Bewertung des Kappa-Maßes

Kappa- Wert	Übereinstimmung
<0,20	schlecht
0,21-0,40	mäßig
0,41-0,60	befriedigend
0,61-0,80	gut
0,81-1	sehr gut

Der *Chi²-Test* prüft die Abhängigkeit von mindestens zwei kategorialen Merkmalen. Er dient der Evaluation eines Zusammenhangs zwischen den subjektiv empfundenen Merkmalen des Schmerzes sowie der Bewegungseinschränkung und dem Vorhandensein einer Fraktur. Die übliche Formel zur Berechnung des Chi²-Tests nach Pearson lautet:

Gleichung III-4

$$\chi^2 = \sum (f_0 - f_e) / f_e$$

Die Summe wird dabei über alle Felder der Kreuztabelle gebildet. Von einer ausreichenden statistischen Signifikanz wurde ab einer Wahrscheinlichkeit $p < 0,05$ ausgegangen [22, 31].

IV ERGEBNISSE

IV.1 Probandenuntersuchungen

Die verschiedenen Schnittführungen, Schichtdicken und technischen Parameter der Magnetresonanztomographie wurden in ihrer diagnostischen Wertigkeit überprüft. 15 Probanden (5 Männer und 10 Frauen im Alter von 24-56 (Mittelwert 41,8) Jahren) wurden untersucht, 5 Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt beispielhaft dokumentiert.

Zunächst wurde die Planung der Schnittführung anhand der Übersichtssequenzen evaluiert. Es stellte sich heraus, dass die beste Winkelung und minimal erforderliche Anzahl von Schnitten für eine koronare Sequenz an einer transversalen Übersicht, die Radius und Ulna zeigt, geplant werden konnte. Zur Kontrolle einer ausreichenden Anzahl von Schichten, die alle Strukturen abdecken, waren weitere transversal orientierte Schnitte erforderlich, die Anschnitte der Handwurzelknochen und abschließend der Metakarpalia zeigten. Hierzu genügte meist eine Übersichtssequenz der Handspule mit wenigen transversalen Schnitten (n=3). In wenigen Fällen war zur Planung der koronaren Schichten zunächst eine T1-gewichtete Sequenz in transversaler Schichtorientierung erforderlich. Die Positionierung des Handgelenkes auf der flexiblen Spule wie auch in der Handspule sollte möglichst den Verband benachbarter Strukturen wiedergeben, um die Gelenke sowie Knorpel- und Bandstrukturen beurteilen zu können. Voraussetzung hierfür war die flache Lagerung der Hand, die durch einen Sandsack auf den Handrücken bei der flexiblen Spule oder Schaumstoffpolster als Unterfütterung der Finger in der Handspule ermöglicht wurde. Die Untersuchung mit der flexiblen Spule stellte sich in Einzelfällen als erschwerlich heraus. Insbesondere alten und gebrechlichen Patienten war die Lagerung in Pronation mit überstrecktem Arm für mindestens 20 min nur mit Anstrengung möglich. Die Untersuchung mit der neu entwickelten Handspule zeigte eine deutliche Verbesserung der Patienten-Compliance und folglich der Qualität der erhaltenen MRT-Bilder. Die Untersuchung war auch bei ängstlichen Kindern oder Patienten mit Klaustrophobie möglich, da durch die Lagerung auf dem Rücken mit den Füßen voran der Körper nur bis in Kinnhöhe in die Ganzkörperspule hineingefahren wurde und der Kopf im Freien blieb.

In einer ersten Auswertung wurde die Schichtdicke variiert und bezüglich der Visualisierbarkeit der knöchernen Strukturen und Weichteile subjektiv, nach dem optischen Eindruck bewertet. In allen Fällen zeigte die Sequenz mit einer Schichtdicke von 2,0 mm das

beste Signal-Rausch-Verhältnis. Eine ebenfalls gute räumliche Auflösung konnte bei einer Schichtdicke von 2,5 mm beobachtet werden, allerdings sind die zu beurteilenden Strukturen nur auf entsprechend weniger Schichten sichtbar (durchschnittlich 1 Schicht weniger), in 2/5 Fällen war das Lig. scapholunatum bei dieser Schichtdicke nicht sichtbar. Bei einer Schichtdicke von 1,5 mm konnten knöcherne und ligamentäre Strukturen zwar auf durchschnittlich 2 zusätzlichen Schichten gesehen, auf Grund der stark rauschigen Bilder aber nur verhältnismäßig schlecht beurteilt werden (Tabelle IV-1), (Abbildung IV-1).

In einer zweiten Auswertung sollte überprüft werden, welche Matrix (Pixel-Auflösung) die vorteilhafteste Bildauflösung ermöglicht, die Bewertung basierte ebenfalls auf dem subjektiven optischen Eindruck. Durch ein kleineres FOV und eine höhere Matrix lässt sich die räumliche Auflösung optimieren. Mit der Erhöhung der Matrix steigt die Messzeit und das Signal-Rausch-Verhältnis wird schlechter. Für die Gelenkdiagnostik ist ein möglichst kleines FOV am effizientesten, jedoch muss eine Einfaltung durch benachbarte Strukturen verhindert werden. Für die Probandenuntersuchungen wurde daher ein FOV read von 80-100 mm und ein FOV phase von 100% gewählt. Die Matrix betrug mit der flexiblen Spule 256x256, konnte aber mit der Handgelenksspule auf maximal 512x512 erhöht werden, ohne das Signal-Rausch-Verhältnis zu verschlechtern. Damit erhält man bei einer Matrix mit 512 x512 eine Pixelgröße von 0,16-0,2 mm², bei einer Matrix mit 256 x256 eine Pixelgröße von 0,31-0,39 mm². Auf Grund der wesentlich höheren Auflösung erwies sich sowohl bei der T1-gewichteten als auch bei der protonendichten Sequenz die 512x512 mm Matrix als besser. Bei der T2-gewichteten Sequenz kam hier zu wenig Signal an, so dass die räumliche Auflösung entsprechend schlecht war. Eine 256x256 Matrix war hier von Vorteil (Abbildung IV-2).

Die Phasenorientierung in Kopf-Fuß-Richtung zeigte weniger Störartefakte, als eine rechts-links gerichtete Orientierung. Um der Einfaltung durch benachbarte Strukturen vorzubeugen, ist die Einrichtung eines phase oversampling im Randbereich notwendig.

Tabelle IV-1

Beurteilbarkeit des Signal-Rausch-Verhältnisses sowie der Knochen- und Bandstrukturen bei unterschiedlicher Schichtdicke (5 Probanden)

	1,5	2,0	2,5
1			
Knochen	3	1	2
Bänder	-	+	-
n	8	6	5
2			
Knochen	3	1	2
Bänder	-	-	-
n	8	6	5
3			
Knochen	3	1	2
Bänder	+	+	+
n	9	7	6
4			
Knochen	3	1	2
Bänder	+	+	+
n	7	5	4
5			
Knochen	3	1	2
Bänder	+	+	+
n	8	6	5

n: Anzahl der Schichten, auf denen das Os lunatum abhängig von der jeweiligen Schichtdicke sichtbar ist

+: Band (Lig. scapholunatum) ist sichtbar

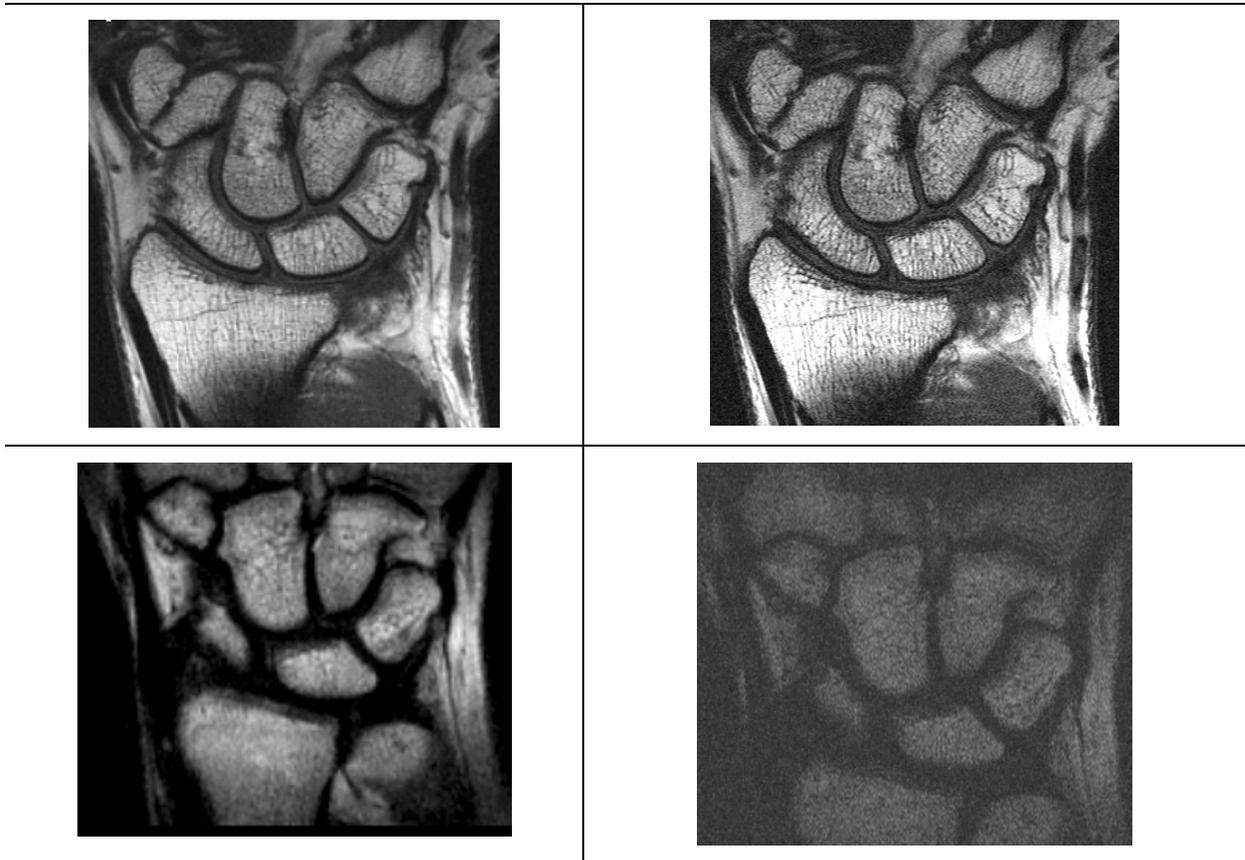
Abbildung IV-1

Das Bild mit einer Schichtdicke (SD) von 1,5 mm zeigt das relativ schlechteste Signal-Rausch-Verhältnis. Bei dieser SD konnte das Os lunatum in 7 Schichten gesehen werden und das skapholunäre Band befriedigend beurteilt werden (linkes Bild). Bei einer SD von 2,0 mm ist das Signal-Rausch-Verhältnis gut, das Os lunatum war in 5 Schichten sichtbar und das skapholunäre Band gut beurteilbar (Bild in der Mitte). Bei einer SD von 2,5 mm ist das Signal-Rausch-Verhältnis ebenfalls gut und das skapholunäre Band gut beurteilbar. Der Nachteil bei dieser SD ist, dass das Os lunatum nur in 4 Schichten gesehen werden kann (rechtes Bild).



Abbildung IV-2

Bei der T1-gewichteten Sequenz werden die Strukturen mit einer Matrix mit 512x512 mm (oben rechts) besser dargestellt, als mit einer niedrigeren Matrix mit 256x256 mm (oben links). Dem gegenüber kommt bei der T2-gewichteten Sequenz mit einer Matrix von 512x512 mm (unten rechts) weniger Signal an als bei der T2-Sequenz mit 256x256 mm (unten links).



Als Ergebnis der Probandenstudien wurde ein Studienprotokoll zur Untersuchung des Handgelenkes erstellt (Tabelle IV-2). Die T2-gewichtete STIR-Sequenz, die aus technischen Gründen erst während der laufenden Studie erarbeitet werden konnte, verbesserte die T2-gewichtete Untersuchung erneut qualitativ und zeitlich. Im Routineprotokoll ersetzt sie die T2-gewichtete fse protonendichtegewichtete-Sequenz, die eine hohe Signal-Rausch-Problematik aufwies und eine schlechtere Spezifität als die STIR-Sequenz hatte.

Tabelle IV-2

Studienprotokoll zur Untersuchung einer akuten Handgelenksverletzung

Sequenz	Orientierung	Phasenkodierung	TR (ms)	TE (ms)	FOV	Matrix	SD (mm)	DF (%)	Schichten (n)	Aquisition (n)	Zeit (min)
T1	trans	re-li	520	18	80x100	358x512	2	10	20	1	2:30
T1	cor	re-li	548	18	80x100	358x512	1,7x2	10	15	1	2:38
T2 fse pd	cor	feet-head	4040	17-103	80x100	256x256	1,7x2	10	15	2	7:06
T2 STIR	cor	feet-head	4660	76	100x100	205x56	1,7x2	10	15	2	4:46

TR=Repetitionszeit

TE=Echozeit

FOV=field of view: read x phase (mm x %)

SD=Schichtdicke

DF=distance factor

n=Anzahl

tran=transversal

cor=koronar

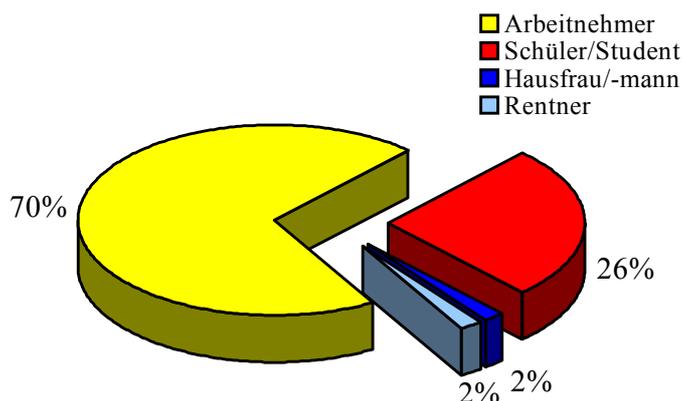
re-li=rechts-links orientiert

IV.2 Patientenuntersuchungen

Insgesamt wurden 62 Handgelenke von 60 Patienten untersucht, 6 Patienten mussten aus der Studie ausgeschlossen werden. Gründe hierfür waren in vier Fällen bekannte Handgelenkstraumata oder chronisch degenerative Veränderungen sowie in zwei Fällen das Nichterscheinen zum Untersuchungstermin. Im Ergebnisteil wurden entsprechend 54 Patienten (56 Handgelenke) ausgewertet, 36 Männer und 18 Frauen im Alter von 12 bis 83 (Mittelwert 35,03) Jahren. 70% aller Patienten gingen zum Zeitpunkt der Untersuchung einem Beruf nach, 26% der Patienten befanden sich in der Ausbildung (Diagramm IV-1).

Diagramm IV-1

Verteilung der beruflichen Tätigkeit im Patientenkollektiv (54 Patienten)



IV.2.1 Klinisches Bild

Bei allen Verletzungen handelte es sich um akute Handgelenksverletzungen mit traumatischer Genese. In 68,5% der Fälle entstand die Verletzung durch einen Sturz auf die dorsalextendierte Hand (n=37), in weiteren Fällen durch Stauchung oder Distorsion (n=8). In 5,6% Fällen blieb der Verletzungsmechanismus unklar. In 38,9% der Fälle handelte es sich um einen Arbeitsunfall, 29,6% der Verletzungen ereigneten sich beim Sport und 14,8% im Straßenverkehr (Diagramm IV-2).

Alle Patienten hatten bei der klinischen Untersuchung in unterschiedlicher Ausprägung Funktions- und/oder Bewegungseinschränkungen sowie Schmerzen bei voller Belastung des

Handgelenkes (Score „0“ wurde in keinem Fall vergeben). Von einem lokal begrenzten Druckschmerz berichteten 42/54 Patienten, die Hälfte aller Patienten klagte über dauerhaft anhaltende Schmerzen (n=27). 31 Patienten hatten eine Schwellung (Tabelle IV-3). Die Auswertung (Chi²-Test) der Korrelation der Stärke der Schmerzempfindung mit der Häufigkeit einer Fraktur ergab keine statistische Signifikanz (p=0,853333) (Tabelle IV-4). Die Korrelation des Ausmaßes der Bewegungseinschränkung mit der Häufigkeit einer Fraktur hingegen war statistisch signifikant (p=0,033576) (Tabelle IV-5).

Diagramm IV-2

Traumaursache (54 Patienten)

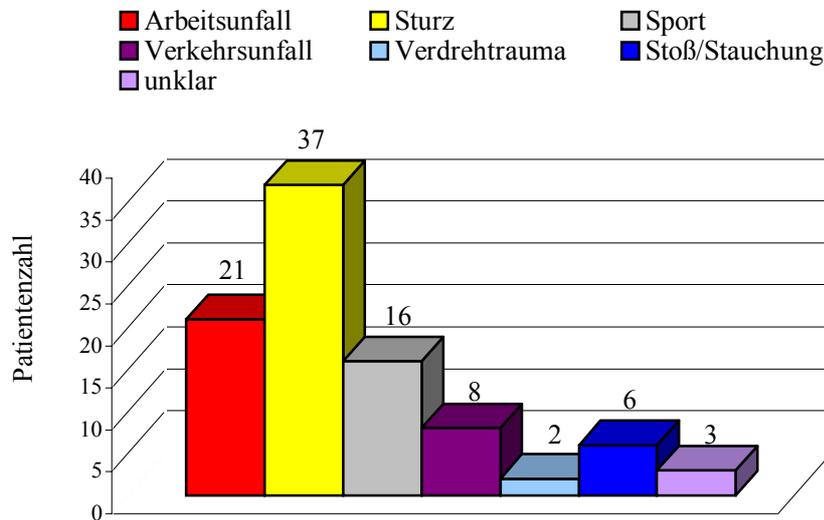


Tabelle IV-3

Verteilung der Symptome des klinischen Bildes (54 Patienten)

Klinische Symptomatik	n (%)
Dauerschmerz	27 (50,0)
Belastungsschmerz	52 (96,3)
Druckschmerz	42 (77,8)
-Anatomische Tabatiere	28
-Handrücken/sonstige Bereiche	14
Schwellung	31 (57,4)
Funktionseinschränkung	52 (96,3)
Bewegungseinschränkung	52 (96,3)
Normale Belastung möglich	3 (5,6)

Tabelle IV-4

Beurteilung des Schmerzes Anhand eines Scores (56 Handgelenke)

Score	Fraktur	Keine Fraktur
1	7	14
2	6	12
3	7	10

Tabelle IV-5Beurteilung des Ausmaßes der Bewegungseinschränkung
Anhand eines Scores (56 Handgelenke)

Score	Fraktur	Keine Fraktur
1	4	20
2	6	5
3	10	11

IV.2.2 Konventionelle Röntgendiagnostik

Von allen 56 Handgelenken wurden konventionelle Röntgenaufnahmen in zwei Ebenen angefertigt, in 24 Fällen lagen zusätzlich Spezialaufnahmen (Kahnbeinserie) vor. Das rechte Handgelenk war 26 Mal Gegenstand der Untersuchungen, das linke 30 mal. Die konventionell-radiologischen Aufnahmen wurden im Mittel 1,6 (0-31) Tage nach dem Trauma durchgeführt.

Tabelle IV-6 gibt einen Überblick über die konventionell-radiologischen Röntgenbefunde. 36 mal wurde der Verdacht auf eine Fraktur protokolliert. Fast die Hälfte der Verdachtsdiagnosen einer Fraktur betrafen das Skaphoid (n=19 (16)), in 10 (9) Fällen war der distale Radius und in weiteren 5 (2) Fällen ein anderer Knochen der Handwurzel betroffen, 2 (1) Frakturen konnten nicht zugeordnet werden (die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Ergebnisse des zweiten Radiologen). Unter dem Punkt „sonstige“ verbarg sich der Verdacht auf 2 (1) Ulna-, 2 (1) Triquetrum- und 1 Trapezoideumfraktur. 20 (28) mal wurde keine Pathologie, weder an Knochen- noch an Weichteilstrukturen, angegeben und das Handgelenk als regelrecht befundet.

Von den 19 (16) aufgrund des klinischen Bildes sowie der nicht eindeutigen Nativröntgenbilder teilweise dringend verdächtigten Skaphoidfrakturen, stellten sich nur 5 (5) Frakturen als Bestätigung der in der MRT diagnostizierten 7 Skaphoidfrakturen heraus. R1 übersah 2 Frakturen während R2 1 Fraktur als Radiusfraktur fehldiagnostizierte und eine weitere übersah. Nur 5 (4) der 10 (9) geäußerten Verdachtsdiagnosen einer Radiusfraktur erwiesen sich in der MRT als richtig. 4 (4) Radiusfrakturen wurden übersehen, bei weiteren 2 (3) fanden sich ursprünglich andere Frakturlokalisationen. So wurden die Frakturen als Skaphoid- und Ulnafraktur (Skaphoid-, Ulna- und Triquetrumfraktur) konventionell-radiologisch fehldiagnostiziert. Im MRT konnte nur eine der Triquetrumfrakturen verifiziert werden. Zwei Ulnafrakturverdachte erwiesen sich als Frakturen des Processus styloideus radii. Alle anderen Verdachtsdiagnosen wurden im MRT nicht bestätigt, beide Radiologen haben eine chondrale Querfraktur des Os capitatum übersehen. Beide Frakturverdachte des ersten Radiologen, die einer exakten Struktur nicht zuzuordnen waren, stellten sich als nicht existent heraus. Die Verdachtsdiagnose einer nicht eindeutig lokalisierbaren Fraktur des zweiten Radiologen erwies sich als Triquetrumfraktur.

Konventionell-radiologisch wurde in 20 (28) Fällen eine Fraktur ausgeschlossen. Dies erwies sich in nur 14 (22)/36 der im MRT bestätigten Fälle als korrekt, 6 (6) Frakturen wurden

übersehen. 22 (14) der aufgrund der Nativaufnahmen gestellten Verdachtsdiagnosen einer Fraktur waren falsch positiv und müssen zu den 14 (22) als initial korrekt nicht-frakturiert erkannten Fälle dazugezählt werden, um die Gesamtzahl der aus der MRT Untersuchung hervorgegangenen 36 Fälle ohne Frakturachweis zu ergeben.

Die „*Interobserver-Analyse*“ ergab eine nur „mäßige“ Übereinstimmung in der Frakturdiagnostik beider Befunder ($\kappa=0,36$) (Tabelle III-4). Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die beschriebenen 23 Übereinstimmungen sich nur auf die Fragestellung der Existenz oder Nicht-Existenz einer Fraktur, nicht jedoch auf die Übereinstimmung hinsichtlich der Frakturlokalisation bezogen. Berücksichtigt man diesen Aspekt, so findet man nur in 16 Fällen eine exakte Übereinstimmung. Retrospektiv wurden die Sensitivität und Spezifität der Nativröntgenaufnahmen in Abhängigkeit des beurteilenden Radiologen untersucht. Die Beurteilung der diagnostischen Tests ergab bei Radiologen 1 eine Sensitivität (richtig positiv) von 38,9% (23,1%-56,5%) und eine Spezifität (richtig negativ) von 70% (45,7%-88,1%) (Die Zahlen in Klammern bedeuten das 95%-Konfidenzintervall für den Parameter). Für den 2. Radiologen ergaben sich eine Sensitivität von 50% (30,7%-69,34%) und eine Spezifität von 78,6% (59,1%-91,7%). Sensitivität und Spezifität der konventionell-radiologischen Aufnahmen sind ungenügend (Tabelle IV-7, Tabelle IV-8, Tabelle IV-9).

Tabelle IV-6

Ergebnisse der konventionellen Röntgendiagnostik
(56 Handgelenke)

	R1 (%)	R2 (%)
Skaphoid Fraktur	19 (33,9)	16 (28,6)
dringender Verdacht	7	7
möglich	12	9
Radius Fraktur	10 (17,9)	9 (16,1)
dringender Verdacht	6	6
möglich	4	3
Sonstige	5 (8,9)	2 (3,6)
dringender Verdacht	3	2
möglich	2	-
Uo#	2 (3,6)	1(1,8)
No#	20 (35,7)	28 (50,0)

Uo#: fracture of unknown origin, keine genaue Zuordnung möglich

No#: keine Fraktur

R1: Radiologe 1

R2: Radiologe 2

Tabelle IV-7

Kontingenztafel zur Evaluierung der Übereinstimmung der Untersucher für die konventionell-radiologische Untersuchung (56 Handgelenke)

	R2 Fraktur	R2 keine Fraktur
R1 Fraktur	23	13
R1 keine Fraktur	5	15

R1: Radiologe 1

R2: Radiologe 2

Tabelle IV-8

Kontingenztafel zur Evaluierung der Übereinstimmung der konventionell-radiologischen Diagnosen des Radiologen 1 mit der MRT (retrospektiv) (56 Handgelenke)

	MRT Fraktur	MRT keine Fraktur
R1 Fraktur	14	22
R1 keine Fraktur	6	14

R1: Radiologe 1

Tabelle IV-9

Kontingenztafel zur Evaluierung der Übereinstimmung der konventionell-radiologischen Diagnosen des Radiologen 2 mit der MRT (retrospektiv) (56 Handgelenke)

	MRT Fraktur	MRT keine Fraktur
R2 Fraktur	14	14
R2 keine Fraktur	6	22

R2: Radiologe 2

IV.2.3 MRT

Von allen 56 Handgelenken wurden MRT-Aufnahmen angefertigt. Die MRT-Untersuchung folgte im Mittel 6,6 (0-28) Tage nach der konventionellen Untersuchung.

Einen Überblick über die knöchernen Verletzungen und Zusatzbefunde im MRT geben Tabelle IV-10 und Tabelle IV-11. Insgesamt konnten im MRT 35 ossäre Verletzungen dargestellt werden, davon 20 Frakturen und 15 spongiöse Mikrotraumen (Bone bruise). 11/20 Frakturen befanden sich am distalen Radius, 7/20 am Skaphoid und weitere 2 an anderen Handwurzelknochen (Os triquetrum und Os capitatum). In 36 Fällen war keine Fraktur zu diagnostizieren, allerdings wurde insgesamt (mit Weichteilapparat) nur in 13 Fällen ein völlig regelrechtes Handgelenk beobachtet, alle anderen Handgelenke waren an Band- oder Diskusstrukturen pathologisch. 4/15 Bone bruise waren zwar frakturbegleitend, traten jedoch an einer anderen als der frakturierten Knochenstruktur auf. In 11 Fällen traten Spongiosaödeme unabhängig von einer Fraktur auf und wurden aufgrund des Fehlens einer Frakturlinie definitionsgemäß nicht als Fraktur gewertet. In diesen Fällen wurde nach dem klinischen Bild über eine vorübergehende Ruhigstellung entschieden.

In 31 (25)/56 Fällen trat aufgrund der MRT-Untersuchung eine *Diagnoseänderung* ein. Mehr als zwei Drittel dieser Änderungen waren auf falsch positive Verdachtsdiagnosen zurückzuführen: in 3/25 (5/19) Fällen der falsch positiven Diagnosen betraf die Fraktur eine andere Knochenstruktur als ursprünglich vermutet, 22/25 (14/19) Verdachtsdiagnosen konnten in der MRT nicht bestätigt werden. Die Anzahl der übersehenen Frakturen beschränkte sich auf jeweils 6 (falsch negativ in weniger als einem Drittel). Es wurden 2 (1) Skaphoidfrakturen, 4 (4) Radiusfrakturen und eine weitere Fraktur am Os triquetrum übersehen. Zusammenfassend konnten von 36 (R1) bzw. 28 (R2) der im konventionellen Röntgen diagnostizierten Frakturen letztlich nur 11 (9) im MRT verifiziert werden, 3 (5) befanden sich an einem anderen Ort und 6 wurden übersehen. Diagramm IV-3 zeigt noch einmal die Verteilung der Frakturen vor und nach der MRT-Untersuchung. Man erkennt, dass eine Neigung zur Überdiagnostizierung der Frakturen der Handwurzelknochen besteht, aus Angst des Übersehens dieser Frakturen und darausfolgender möglicher Komplikationen. Bei insgesamt 12/25 (12/31) *Diagnoseübereinstimmungen* kam es trotz der initial korrekten Beurteilung zu einer Diagnoseerweiterung, den Weichteilapparat oder in 4 Fällen spongiöser Mikrofrakturen auch weitere knöcherne Strukturen betreffend. In 16/31 Fällen der

Diagnoseänderung konnte neben der Aussage über die Existenz oder Nicht-Existenz einer Fraktur auch das Ausmaß des Traumas bildgebend erfasst werden (Tabelle IV-12).

In 10/54 Fällen wurde die MRT-Untersuchung 0, 1 oder 2 Tage nach dem Trauma durchgeführt. In 3/10 Fällen wurden Nativaufnahmen und MRT direkt am Tag des Traumas durchgeführt, hierbei wurde eine Skaphoidfraktur mit begleitendem bone bruise entdeckt. In 4/10 Fällen untersuchte man am ersten posttraumatischen Tag und fand 2 Frakturen, 2 weitere konnten ausgeschlossen werden. Am dritten Tag nach Einwirkung des Traumas wurden weitere 3/10 Patienten untersucht. Eine Fraktur wurde bestätigt, zwei Handgelenke waren in der MRT unauffällig.

Bei der Beurteilung des Weichteilbereichs bestand konventionell-radiologisch in einem Fall der Verdacht auf eine Diskusruptur, die in der MRT nicht bestätigt werden konnte. Der Verdacht eines knöchernen Bandausrisses stellte sich in der MRT als Skaphoidfraktur dar. Das Vorkommen von 7 Läsionen des triangulären fibrocartilaginären Komplexes sowie 8 knöchernen Bandausrisse und 5 Bandverletzungen konnten im Nativröntgenbild nicht diagnostiziert werden. Die 3 im MRT diagnostizierten Zysten sind Zufallsbefunde ohne pathologische Bedeutung (Tabelle IV-11).

Tabelle IV-10

Ergebnisse der MRT-Diagnostik (56 Handgelenke)

	n (%)
Skaphoid Fraktur	7
Radius Fraktur	11
Sonstige	2
Keine Fraktur	36 (64,3)
- davon alte Frakturen	1

n: Anzahl der Handgelenke

Tabelle IV-11

Zusatzbefunde im MRT (56 Handgelenke)

	n
Bone bruise	15
Diskusläsionen	7
Lig. Verletzungen	5
Ligamentärer Ausriss	8
Gelenkerguss	13
Zysten	3

n: Anzahl der Handgelenke

Tabelle IV-12

Diagnoseänderungen nach MRT (56 Handgelenke)

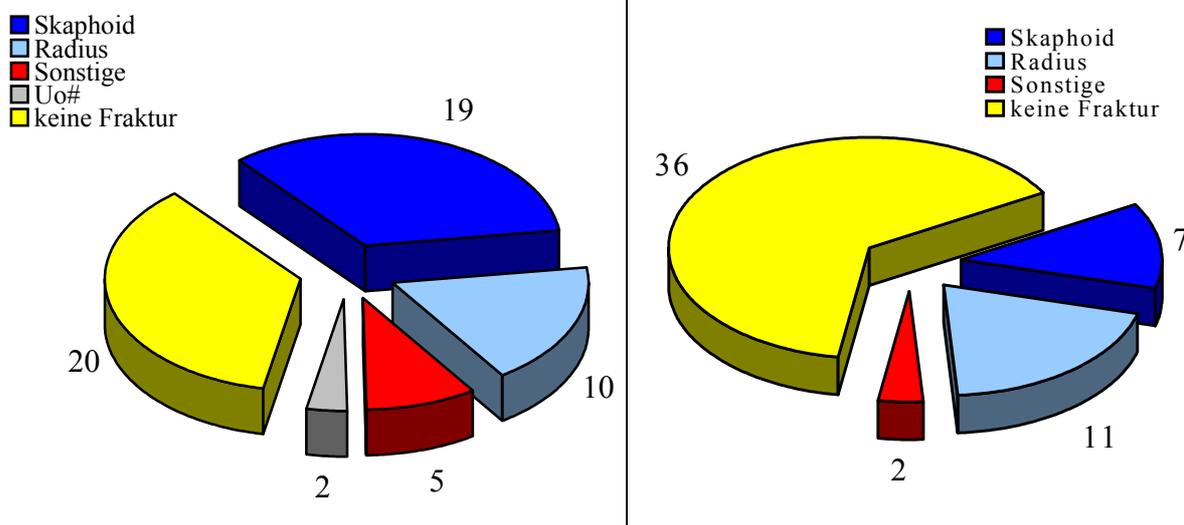
	R1 (%)	R2 (%)
Diagnoseänderung	31 (55,4)	25 (44,6)
<u>falsch positiv</u>	25 (44,6)	19 (33,9)
Andere Frakturlokalisierung	3	5
Definitiv keine Fraktur	22	14
<u>falsch negativ</u>	6 (10,7)	6 (10,7)
Skaphoid Fraktur	2	1
Radius Fraktur	4	4
Sonstige Frakturen	-	1
Diagnoseübereinstimmung	25 (44,6)	31 (55,4)
Diagnoseerweiterung im Falle einer Diagnoseänderung	16 (28,6)	15 (26,8)
Diagnoseerweiterung im Falle einer Diagnoseübereinstimmung	12 (21,4)	12 (21,4)

R1: Radiologe 1

R2: Radiologe 2

Diagramm IV-3

Verteilung der Frakturen im Patientenkollektiv: Beurteilung im konventionellen Röntgen (links), Beurteilung im MRT (rechts). Nur 11 der 36 konventionell-radiologischen Verdachtsdiagnosen einer Fraktur konnten im MRT verifiziert werden. 3 Frakturen stellten sich in der MRT an einem anderen Ort dar, 6 Frakturen wurden initial übersehen (Ergebnisse des ersten Radiologen). (56 Handgelenke)



Uo# = fracture of unknown origin, keine genaue Zuordnung möglich

In zwei Drittel aller Fälle (66,1%) hatte die MRT-Untersuchung eine *therapeutische Konsequenz*. In 22/37 Fällen konnte die Immobilisationszeit des betroffenen Handgelenkes bis zu 12 Wochen verkürzt werden. In 18 dieser 22 Fälle konnte die Ruhigstellung unmittelbar beendet werden. Dreimal diente das MRT der Indikationsbestätigung eines operativen Eingriffes, wodurch eine frühere Remobilisierung des Gelenkes ermöglicht wurde. Eine therapiebedingte Verlängerung der Immobilisationsphase musste in 12/37 Fällen vorgenommen werden.

35/54 Patienten mussten sich in Folge der MRT-Untersuchung keinem diagnostischen follow-up mehr unterziehen. Die anfängliche Therapieplanung sieht für diese Patienten in der Regel eine maximal 10-tägige Ruhigstellung mit anschließender erneuter Nativröntgendiagnostik vor. Die MRT-Untersuchung verhinderte in 35 Fällen diese Phase der Therapieverzögerung und ermöglichte entweder das sofortige oder frühzeitige entfernen einer Gipsschiene bzw. eines Oberarmgipses und die traumagerechte Behandlung (Tabelle IV-13).

Tabelle IV-13

Therapieänderung nach MRT (56 Handgelenke)

	n (%)
Therapeutische Konsequenz	37 (66,1)
Operation	3
Immobilisation verkürzt 0-2 Wochen	15
Immobilisation verkürzt 0-2 Wochen	1
Immobilisation verkürzt 0-2 Wochen	6
Immobilisation verkürzt 0-2 Wochen	-
Immobilisation verkürzt 0-2 Wochen	6
Immobilisation verkürzt 0-2 Wochen	6
In n Fällen der verkürzten Immobilisation (22 Handgelenke) konnte die Immobilisation unmittelbar beendet werden	18 (32,1)
Radiologisches follow-up war bei x Patienten nicht mehr nötig	35 (62,5)
Keine therapeutische Konsequenz	19 (33,9)

n: Anzahl der Handgelenke

x: Anzahl der Patienten

Diagnostisch entscheidend für die Untersuchung frischer Handgelenksverletzungen war die T2-gewichtete Sequenz (STIR) in koronarer Schnitfführung, die wegen ihrer hohen Sensitivität vor allem der Frakturdetektion und –lokalisierung diene. Sie stellte auch traumatisch veränderte Band- und Diskusläsionen sowie Gelenkergüsse frühzeitig dar. Zur genauen Lokalisation von Frakturen und Bandrupturen diene eine T1-gewichtete Sequenz in koronarer Schnitfführung. Sie zeichnete sich durch eine hohe Spezifität aus. Es stellte sich heraus, dass die T1-gewichtete Sequenz in transversaler Schnitfführung die MRT-Diagnose nicht beeinflusste und entsprechend keine therapeutische Konsequenz hatte. Nach Abschluss dieser Studie wurde daher in der Routine auf die T1-gewichtete Sequenz in transversaler Schnitfführung verzichtet, sofern eine ausreichende Planung der koronar orientierten Sequenzen anhand der Übersichtssequenzen der Handspule möglich war. Entsprechend konnte das ursprüngliche Sequenzprotokoll (Übersichtssequenz Körper- und Handspule, Aufnahmen in T1- und T2 (PD)-gewichteten Sequenzen, cor und tran T1) von 12 min 14 sec Dauer reduziert werden auf 7 min 24 sec (Übersichtssequenz Körper- und Handspule, Aufnahmen in T1- und T2-gewichteten STIR-Sequenzen, cor).

IV.3 Einfluss der MRT auf die Dauer der Arbeitsunfähigkeit

In 23/54 Patienten hatte die Therapieänderung einen Einfluss auf die Dauer der Krankschreibung. 19/23 betroffene Patienten waren erwerbstätig. In 15/23 Fällen konnte die Krankschreibung um insgesamt 59 Wochen verkürzt werden. Die Zahlen setzen sich aus 57 eingesparten Wochen bei 13 Erwerbstätigen und 2 Wochen bei 2 nicht Erwerbstätigen zusammen. In 8/23 Fällen fand eine Verlängerung der Krankschreibung statt. Auf 6 Erwerbstätige entfielen 29 Wochen, auf 2 nicht Erwerbstätige 8 Wochen. Setzt man gesparte Wochen der Krankschreibung mit verlängerten Krankschreibungszeiten ins Verhältnis, so ergibt sich insgesamt eine Einsparung von 22 Wochen bei 23 Patienten bzw. eine Einsparung von 28 Wochen bei 19 Erwerbstätigen. In 57,4% hatte die MRT keinen Einfluss auf die Dauer der Arbeitsunfähigkeit (Tabelle IV-14).

Einen Überblick über die Verteilung der Zeiträume der Arbeitsunfähigkeit vor und nach der MRT-Untersuchung gibt Diagramm IV-4. Vergleicht man die voraussichtliche Dauer der Arbeitsunfähigkeit nach konventionellem Röntgen mit der Dauer nach MRT, zeigt sich eine Verlagerung hin zum Kurzzeitraum von 0-2 Wochen. Statt ursprünglich 16 Patienten können nach der MRT-Untersuchung 27/54 Patienten unmittelbar an den Arbeitsplatz zurückkehren.

Tendentiell finden sich mehr Patienten, die 2-4 oder 4-8 Wochen krankgeschrieben sind, was auf die falsch negativen Röntgendiagnosen zurückzuführen ist. Dies waren in 4 (4)/6 Fällen Radiusfrakturen, deren Ruhigstellung und damit verbundene Arbeitsunfähigkeit sich auf den genannten Zeitraum belaufen kann.

Im Bereich der mehr als achtwöchigen Krankschreibungszeit, die im Falle einer Skaphoidfraktur für einen Zeitraum von 10-12 Wochen bescheinigt werden kann, reduzierte sich die Zahl der Patienten von 8 auf 6. Diese verhältnismäßig geringe Anzahl von Patienten sowie die leichte Abnahme trotz der hohen Anzahl falsch positiver Verdachtsdiagnosen einer Fraktur des Kahnbeins, ist auf den meist vorsichtig formulierten Verdacht einer Fraktur zurückzuführen. Das herkömmliche Verfahren sieht hierfür zunächst eine vorläufige Ruhigstellung mit einer Röntgenkontrolle im Abstand von 10 Tagen vor, so dass selten geplant wird, die volle Krankschreibungszeit von Beginn an in Anspruch zu nehmen. Weitere Aufnahmen sollen eine adäquate Therapieplanung ermöglichen. In zwei Fällen wurde allerdings der Therapieplan mit einem 6-wöchigen Oberarmgips und nachfolgend mindestens 4-wöchigen Unterarmgips bereits begonnen. In beiden Fällen konnte die Ruhigstellung nach der MRT-Untersuchung, die ein unauffälliges Kahnbein zeigte, unmittelbar beendet und die

vorgesehene 10-wöchige Krankschreibungsdauer aufgehoben werden. Die Patienten konnten ihrer beruflichen Tätigkeit sofort wieder nachgehen.

Tabelle IV-14

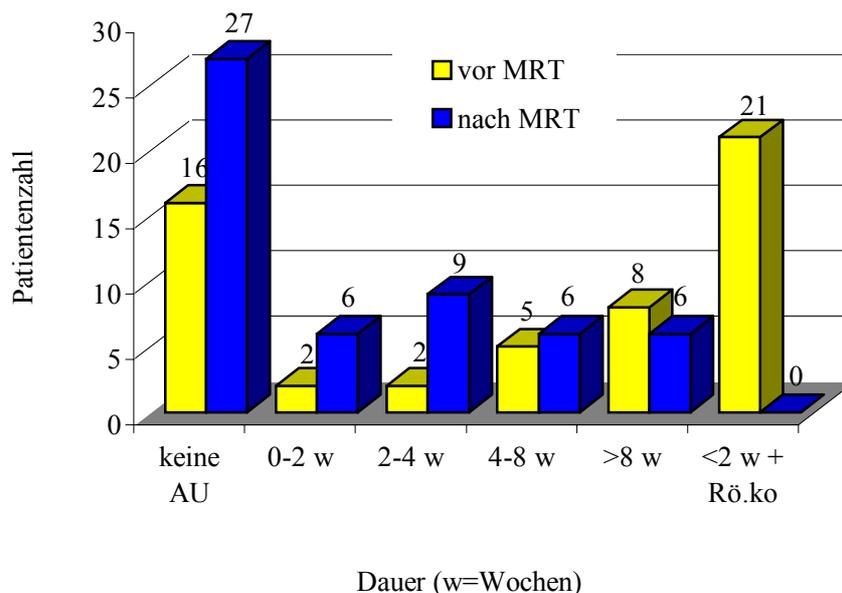
Einfluss der MRT auf die Dauer der Arbeitsunfähigkeit (54 Patienten)

		x (%)
Einfluss auf die Dauer der Arbeitsunfähigkeit		23 (42,6)
verkürzt	<2 Wochen	8
	>2 Wochen	7
verlängert	<2 Wochen	1
	>2 Wochen	7
Kein Einfluss auf die Dauer der Arbeitsunfähigkeit		31(57,4)

x: Anzahl der Patienten

Diagramm IV-4

Verteilung der Arbeitsunfähigkeit vor und nach MRT (54 Patienten)



w=Wochen
 AU=Arbeitsunfähigkeit
 Rö.ko=Röntgenkontrolle

**Abbildung IV-3**

Querfraktur des Os scaphoideum (pa-Aufnahme)

44-jähriger Berufstätiger nach Sturz auf die dorsalextendierte linke Hand

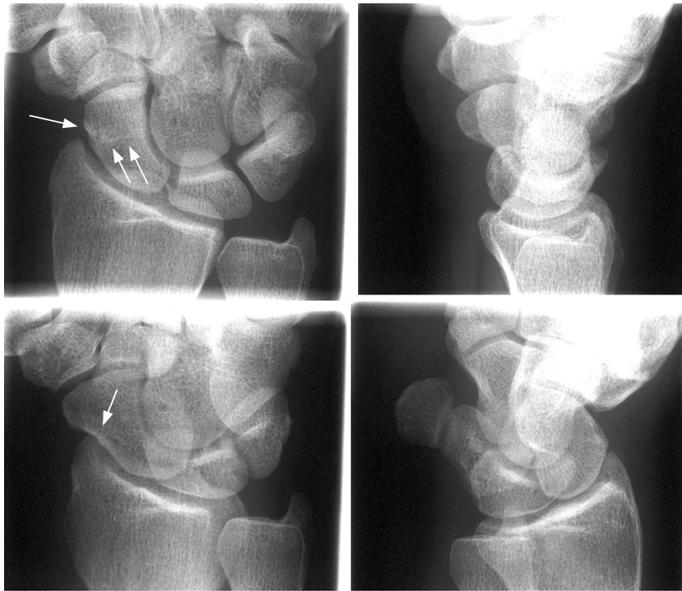
a) Die Sklerosierungslinie sowie eine Kontur-unregelmäßigkeit radial deuten auf eine Fraktur hin.



b) Nachweis einer kleinen Sklerosierungsinsel am Os scaphoideum (Pfeile).



c) Die T1-gewichtete Aufnahme in koronarer Schichtorientierung verifiziert die Fraktur des Kahnbeins (Pfeile). Es sei auf den hämorrhagischen Gelenkguss hingewiesen (Pfeilkopf).

**Abbildung IV-4**

Verdachtsdiagnose Skaphoidfraktur

55-jähriger selbständiger Architekt nach Sturz vom Fahrrad auf die linke Hand

a) Nativröntgenaufnahme eines Handgelenkes (Kahnbeinserie): eine Inhomogenität in der Knochenstruktur scheint auf eine Fraktur hinzudeuten. Der Befund ist dem in Abbildung IV-3 ähnlich.

Die klinischen Zeichen waren ein radialeitiger Druckschmerz in Höhe der Tabatiere und eine leichte Bewegungseinschränkung. Die Gipsruhigstellung mit einem Oberarmgips für zunächst 6 Wochen wurde begonnen. Eine Ruhigstellung für weitere 4-6 Wochen mit einem Unterarmgips wäre gefolgt.



b) Die T1-gewichtete Aufnahme in koronarer Schichtorientierung zeigt ein homogenes Os scaphoideum (S) ohne die Dokumentation einer Fraktur.

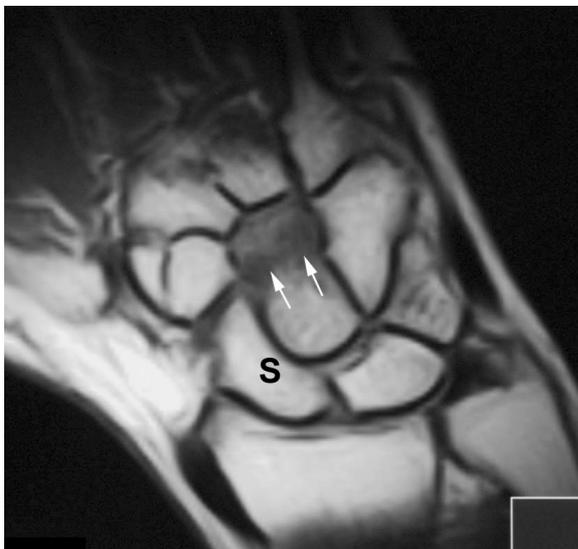
Die unmittelbare Beendigung der Immobilisation sowie Rückkehr in den Arbeitsalltag war die therapeutische Konsequenz.

**Abbildung IV-5**

Verdacht auf Kahnbeinfraktur, okkulte Fraktur des Os capitatum

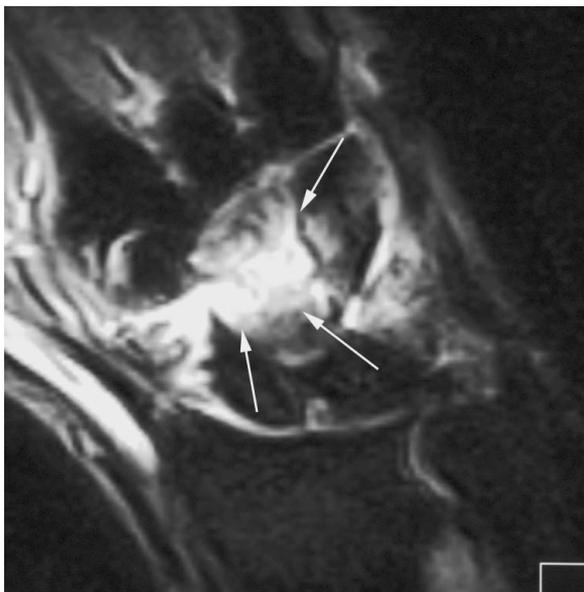
29-jährige Frau nach Sturz auf die rechte Hand, mittelstarke Schmerzen und Einschränkung der Dorsalxtension

a) Nativröntgenaufnahme eines Handgelenkes (Kahnbeinserie): der radiale Knochenvorsprung ließ initial eine Skaphoidfraktur vermuten.



b) In der koronar orientierten T1-gewichteten Aufnahme ohne Kontrastmittel kommt eine Querfraktur des Os capitatum zur Darstellung. Das hypointense Signal weist im Zentrum eine deutliche Frakturlinie auf (Pfeile), peripher sieht man extensiven Bone bruise im distalen Bereich des Os capitatum.

Das Kahnbein (S) stellt sich leicht hyperintens dar, allerdings ohne einen Hinweis auf eine Fraktur.



c) Die koronar orientierte T2-gewichtete fettgesättigte Aufnahme ohne Kontrastmittel stellt den erheblichen Gelenkerguss sowie das Ausmaß des Bone bruise basierend auf einer Fraktur des Os capitatum dar (Pfeile).

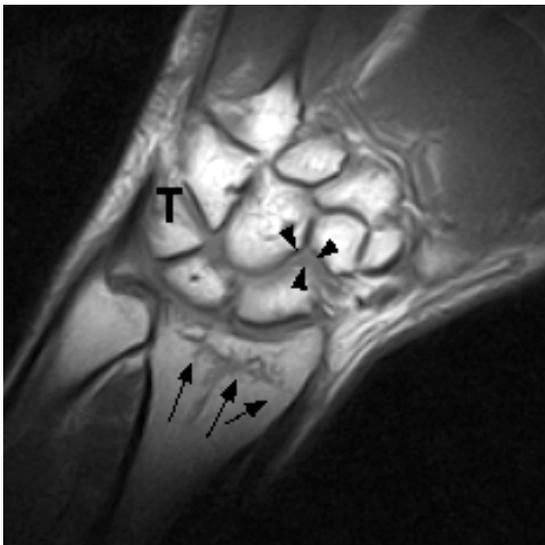
**Abbildung IV-6**

Verdachtsdiagnose Triquetrumfraktur, okkulte distale Radiusfraktur

34-jähriger Arbeitnehmer nach Sturz beim Sport

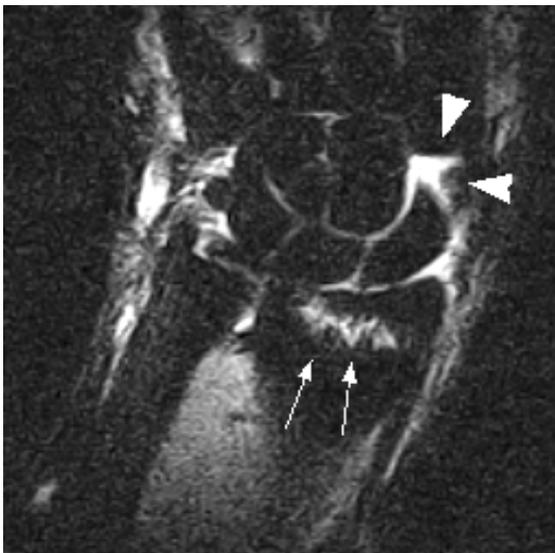
a) Aufgrund der seitlichen Nativaufnahme wurde der Verdacht einer Triquetrumfraktur geäußert (Pfeile).

Die sonstigen Strukturen erscheinen unauffällig.



b) Die T1-gewichtete kernspintomographische Aufnahme zeigt eine Radiusfraktur (Pfeile). Zwischen Kahnbein und Os trapezoideum ist ein deutlicher Erguss zu sehen (Pfeilköpfe).

Das Os triquetrum (T) zeigt hypointense Inhomogenitäten, die aber nicht auf eine durchgehende Fraktur hindeuten.



c) Die Signalanhebung im distalen Radius im T2-gewichteten Bild stellt die Fraktur dar (Pfeile).

Deutlich auch hier der Gelenkerguss (Pfeilköpfe).

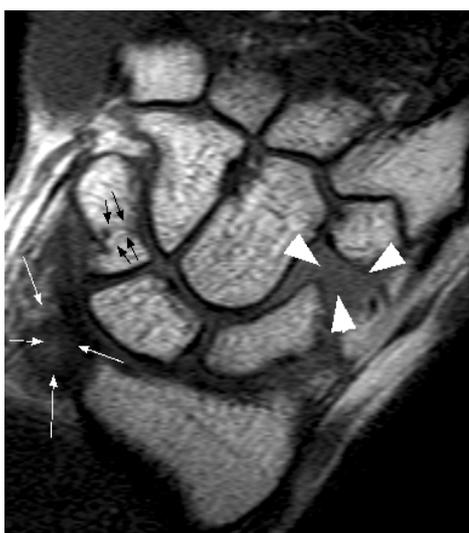
**Abbildung IV-7**

Verdachtsdiagnose distale Radiusfraktur

41-jähriger selbständiger Unternehmer, der beim Eislaufen an den Weihnachtsfeiertagen gestürzt ist

a) Ein sogenannter Flake kann ein Hinweis auf eine distale Radiusfraktur sein (weiße Pfeile).

In diesem Fall war die MRT unauffällig, so dass dem jungen Mann eine Ruhigstellung von 4-6 Wochen erspart blieb.

**Abbildung IV-8**

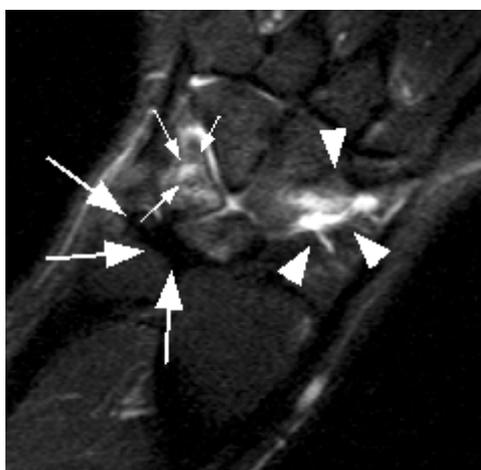
Okkulte Fraktur des Os triquetrum, Zerreißung des Discus triangularis und hämorrhagischer Gelenkerguss

26-jähriger Student nach Verletzung beim Fußballspielen

a) Die hypointense Frakturlinie kennzeichnet den Querverlauf durch das Dreiecksbein (schwarze Pfeile).

Distal der Ulna fällt ein Bereich hypointensen Signals auf, der einen Riss im TFCC darstellt (weiße Pfeile).

Ein leicht hypointenser Bereich im skaphotrapezoiden Gelenk ist durch einen hämorrhagischen Erguss entstanden (Pfeilköpfe).



b) Korrespondierende hyperintense Signale in den traumatisierten Bereichen bestätigen die oben genannten Verletzungen.

Die klinische Symptomatik bestand aus starken Schmerzen mit stark eingeschrnkttem Bewegungsumfang.

**Abbildung IV-9**

Unauffälliger Befund

31-jähriger Mann nach Sturz während der Arbeit

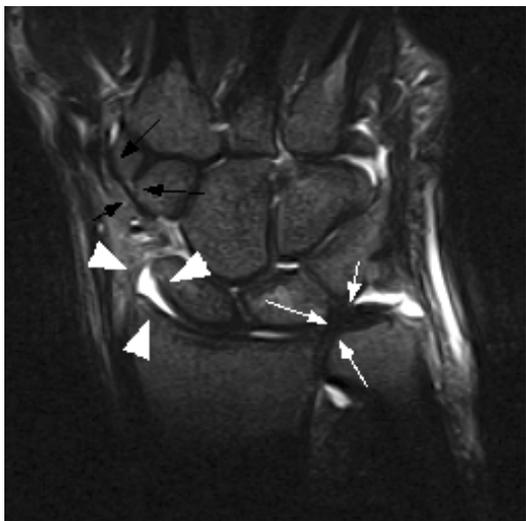
a) Die Nativaufnahmen (Kahnbeinserie) weisen auf keine pathologische Veränderung hin. Trotzdem äußerten der zweite Radiologe und der Chirurg den Verdacht auf eine Fraktur des Kahnbeins oder des distalen Radius aufgrund der ausgeprägten Klinik des Verletzten.



b) Im T1-gewichteten Bild erkennt man Zerreibungen des ulnaren Bandapparates. Die nicht gestrafften hypointensen Strukturen sind schlaffe Bänder des ulnaren Kollateralbandes (schwarze Pfeile).

Die trapezio-trapezoidale Bandverbindung ist intakt (schwarze Pfeilköpfe), ebenso das radio-kaphoidale Ligament. Dieses wölbt sich jedoch aufgrund eines hämorrhagischen Ergusses nach latero-distal vor (weiße Pfeilköpfe).

Der TFCC erscheint als homogen hypointense Struktur intakt (weiße Pfeile).



c) Auch in der T2-Aufnahme erscheinen die ligamentären Strukturen signalarm. Die kontrastreichen Sequenzen ermöglichen detaillierte Verlaufskontrollen der Bänder und ermöglichen die sichere Aussage über fragliche Pathologien der Weichteilstrukturen (schwarze und weiße Pfeile).

Die hohe Sensitivität der T2-gewichteten Sequenzen stellt Gelenkergüsse und Knochenödeme beeindruckend dar. Bereiche des Ergusses erscheinen hier stark hyperintens (Pfeilköpfe).

Klinische Symptomatik und MRT-Diagnostik führten zur Ruhigstellung des Handgelenkes mit einem Unterarmgips für etwa 2 Wochen. Die MRT-Untersuchung hatte in diesem Fall keine therapeutische Konsequenz, trotzdem trug sie zur sofortigen und detaillierten Darstellung des Handgelenktraumas bei.

**Abbildung IV-10**

Darstellung des Bandapparates, knöcherner Ausriss

12-jähriger Schüler nach Sturz auf die rechte Hand beim Sport

a) Das native T2-gewichtete Bild zeigt einen knöchernen Ausriss des Bandes zwischen Os scaphoideum und Os trapezium sowie des kollateralen radiokarpalen Bandkomplexes (schwarze Pfeile). Die ligamentäre Struktur zwischen Kahnbein und Processus styloideus radii ist intakt. Ein Erguss wölbt die Struktur hervor (schwarzer Pfeilkopf). Die knöchernen Strukturen stellen sich unauffällig dar.

Die Bandstrukturen zwischen Os trapezium und trapezoideum (große weiße Pfeile) sowie zwischen Os scaphoideum und Os lunatum (kleine weiße Pfeile) sind intakt.

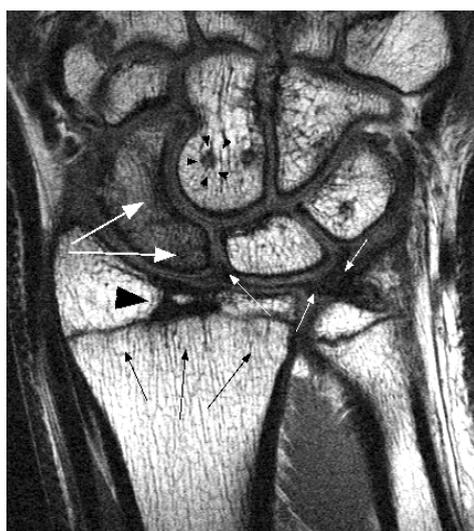
Das TFCC zeigt ein normales Signalmuster (weißer Pfeilkopf). Das Ausmaß der Weichteilverletzungen war im Nativröntgenbild nicht ersichtlich. Klinische Symptomatik und MRT-Diagnostik führten zur Ruhigstellung des Handgelenkes mit einem Unterarmgips für etwa 4 Wochen, um Spätkomplikationen vorzubeugen.

**Abbildung IV-11**

Sklerosierung im distalen Radius

16-jähriger Schüler, dem ein Ball gegen die Hand geschossen wurde

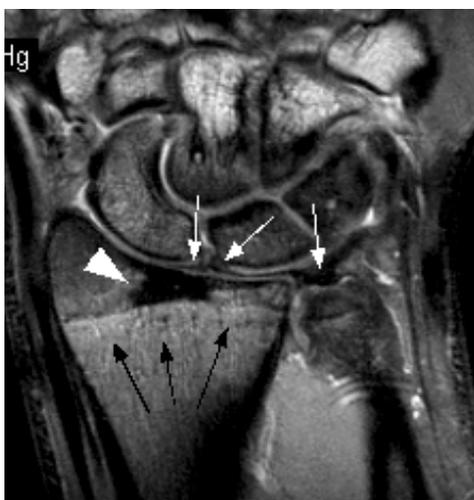
a) Distal der Epiphysenfuge verdichtet sich die Knochenstruktur (schwarze Pfeile).



b) Die T1-gewichtete Aufnahme zeigt, dass es sich bei der vermuteten Scholle um eine alte Sklerosierungslinie handelt, die keiner frischen Radiusfraktur entspricht (großer schwarzer Pfeilkopf). Entlang der Epiphysenfuge erkennt man leichte hypointense Inhomogenitäten im Rahmen einer Epiphysenstauchung (Salter und Harris V, Aitken „IV“) (schwarze Pfeile).

Band- und TFCC-Strukturen sind intakt (kleine weiße Pfeile). Im Os capitatum und Os triquetrum sieht man Knochenzysten (kleine schwarze Pfeilköpfe).

Die homogene Signalerminderung im Skaphoid kann Folge einer alten Fraktur mit nachfolgender Nekrose sein (große weiße Pfeile). Mit ähnlicher Signalintensität würde sich eine Lunatummalazie des Mondbeines präsentieren.



c) Die Epiphysenstauchung entspricht in der Klassifizierung einer Salter und Harris Grad V Verletzung (schwarze Pfeile).

Auch in der T2-gewichteten Aufnahme erscheint die alte Sklerosierungslinie signalarm, während sich eine frische Fraktur signalreich darstellen würde.

Es sei auch hier auf die gute Möglichkeit der Beurteilung des Bandapparates hingewiesen.

V DISKUSSION

V.1 Patientenuntersuchungen

Das konventionelle Röntgen in zwei Ebenen sowie Kahnbeinserien bilden die *Basisdiagnostik* in der Detektion von Frakturen des Handgelenkes und sollten, da sie in den meisten Fällen ausreichend sind, zunächst durchgeführt werden [17, 139]. Die Schwierigkeit der Frakturdiagnostik im Bereich des Handgelenkes resultiert aus der Überlagerung von Knochenanteilen im Nativröntgenbild [1, 7, 86]. Die Sensitivität der initialen Röntgenaufnahmen wird abhängig von der Zuverlässigkeit der Referenzmethode mit 86% (Nativröntgenbilder) bzw. 64% (Knochenscans) beschrieben, in der vorliegenden Arbeit betrug sie maximal 50% [122].

In einer achtjährigen Langzeitstudie mit über 442 Skaphoidfrakturen wurden 70% aller Frakturen initial im Nativröntgen erkannt. Davon wurden 10% der Frakturen auf lateralen Aufnahmen, 77% auf Aufnahmen in Neutralstellung, 73% in Ulnadeviation sowie 71% auf Bildern mit einer um 30° gedrehten Röntgenröhre gesehen [20].

Herzberg et al. berichten, dass in einer Serie von 166 perilunären Dislokationen und Fraktur-Dislokationen retrospektiv 41 Fälle (25%) initial übersehen wurden [63].

Vor allem nicht dislozierte Frakturen fallen häufig erst durch periostalen Abstützkallus oder Demarkationszonen der Bruchlinie auf, die zeitversetzt zum Unfallzeitpunkt entstehen und einen adäquaten Therapiebeginn hinauszögern. Dies führt dazu, dass vor allem isolierte Frakturen der seltener betroffenen Knochen wie des Os capitatum, das nur in etwa 0,3% aller Handwurzelverletzungen alleine betroffen ist, übersehen werden. Das gleiche gilt für kombiniert auftretende Frakturen innerhalb eines oder mehrerer Knochen und Ausrissfrakturen, die etwa 2% aller Handgelenkesverletzungen in der Erstversorgung ausmachen [24, 28, 30, 50].

Die Klassifikation der Fraktur und der Dislokation, die exakte Lokalisation der maximalen Pathologie anhand der Nativröntgenbilder und die Aussage über eine Heilungsprognose gelten als besonders schwierig, sind aber für den Erfolg der Therapie entscheidend [35, 63, 75, 91, 137]. Van Gelderen et al. und Hobby et al. stellen mit ihrer Studie die diagnostische Sicherheit der konventionellen Röntgenaufnahmen in Frage. Sie berichten, dass sich in 8/16

bzw. 45/98 Patienten das diagnostische Management signifikant änderte. Die vorliegende Arbeit bestätigt dies. In 35/56 Fällen änderte sich hier das Therapieschema [65, 129].

Mit dem zunehmenden Einsatz der MRT in der Traumatologie wurde anfänglich neben der Weichteildiagnostik vor allem auf das Übersehen ossärer Verletzungen hingewiesen. So berichten Leslie und Dickson von falsch negativen Diagnosen in Höhe von 2%, Munk et al. berichten von 6% und Waeckerle et al. von 20% [10, 81, 92, 131]. Es wurde jedoch mit der Zeit deutlich, dass – im Gegenteil – eine Neigung zur „Überdiagnostizierung“ vieler Handwurzelknochenfrakturen besteht, um der „Unterdiagnostizierung“ weniger Frakturen vorzubeugen. Der Ausschluss von Frakturen kam bei Hobby et al. in 121/267 Fällen vor, während die Diagnosebestätigung nur in 64 Fällen festgestellt werden konnte. Ähnliche Ergebnisse zeigt die vorliegende Arbeit (vide supra) [1, 7, 18, 43, 52, 65, 76, 81].

Wenn eine Fraktur nicht offensichtlich ist, weiterhin aber der klinische Verdacht auf eine Fraktur besteht, ist die Immobilisation entweder mit einem Unterarm- oder mit einem Oberarmgips sowie die erneute Röntgenkontrolle in 10-14 Tagen *Methode der Wahl* [1, 7, 40, 114, 116, 121]. Tiel-van Buul et al. berichten jedoch in ihrer Studie, dass die Sensitivität wiederholter Röntgenaufnahmen bei nur 30% liege und der Kappa Übereinstimmungsquotient initial zwar 0,76 betrage, nach 2 und 6 Wochen jedoch auf 0,5 abfalle [122]. Während man sich über den unersetzbaren Stellenwert der initialen Röntgenaufnahmen im Klaren ist, wird häufig berichtet, dass wiederholte Nativröntgenbilder das therapeutische Management nicht oder selten beeinflussen. Frakturen werden erst nach mehreren, bis zu 6 Wochen sichtbar und der Therapiebeginn entsprechend verzögert [1, 37, 77, 81, 127, 132].

Die *Erfahrenheit* macht in der Sicherheit der Diagnosestellung kaum einen Unterschied, die Beurteilung der Nativröntgenbilder ist stark beobachterabhängig [35, 76, 107]. Im Zweifel über die Existenz einer Fraktur soll die klinische Symptomatik entscheiden [13, 40]; jedoch berichten einige Studien von der Unzuverlässigkeit des klinischen Erscheinungsbildes auf Grund der individuellen Empfindung von Schmerz und Bewegungseinschränkung. Die im Chi²-Test ausgewertete geringe Korrelationen der Schmerzen mit einer Fraktur bestätigt dies, allerdings war die Korrelation des Ausmaßes der Bewegungseinschränkung mit der Häufigkeit einer Fraktur statistisch signifikant ($p=0,033576$) (vide supra) [18, 46]. Dias et al. untersuchten 127 Patienten mit klinischem Verdacht auf eine Skaphoidfraktur bezüglich diagnoseweisender Weichteilschwellung. Vor dem Auftreten eines Weichteilödems besteht die Gefahr falsch negativer Resultate, dies wurde in einem von vier Patienten berichtet. Etwa ein Drittel der Patienten hatte trotz der Weichteilschwellung keine knöcherne Verletzung,

sodass es zu falsch positiven Diagnosen kam. Die Studie verdeutlicht die eingeschränkte Zuverlässigkeit des klinischen Erscheinungsbildes als ultima ratio [38].

Beschwerdepersistenz, verlängerte Morbidität und vermeidbare längere Ruhigstellung der betroffenen Extremität sowie zum Teil schwierige therapeutische Maßnahmen zum Zeitpunkt der Diagnosestellung, wie zum Beispiel die Behandlung der Skaphoidpseudarthrose, können Folge einer übersehenen Fraktur oder eines Bänderschadens des Handgelenkes sein. *Distale Radiusfrakturen* werden in 50% der Fälle von ausgeprägten Läsionen des Weichteilapparates begleitet und gehen bei Kindern nicht selten mit weiteren Frakturen im Handgelenkesbereich einher. Die Kernspintomographie ermöglicht das Erkennen des Ausmaßes der Verletzung und damit eine bessere Einschätzung der Situation [30, 100, 115]. Unter 197 Frakturen des distalen Radius fanden Tang et al. 65 Frakturen, die mit einer karpalen Instabilität einhergingen. Dies entspricht einer Inzidenz von 32,9% [119]. Goldberg et al. berichten, dass 66% der Fälle einer Fraktur des distalen Vorderarms mit begleitenden Bandverletzungen einhergehen [57]. Das Erkennen einer Radiusfraktur-begleitenden Skaphoidfraktur erfordert spezielle Ruhigstellungsmaßnahmen, um einem Abkippen des Kahnbeins vorzubeugen [27].

In 85-90% heilen nicht dislozierte *Skaphoidfrakturen* nach konservativer Behandlung aus [35]. Die Nicht-Durchbauung des Skaphoids sowie der anderen Karpalknochen wird von der verspäteten Diagnosestellung, dem Ausmaß der Dislokation und den Begleitverletzungen beeinflusst. 40% dieser Frakturen gelten als nicht diagnostiziert zum Zeitpunkt des initialen Traumas [129]. Die Inzidenz der Nichtdurchbauungsraten des Os scaphoideum variiert von 5% [81] über 12,3% [37] bis hin zu 50% [61]. Langhoff und Andersen zeigten in ihrer Studie, dass die Inzidenz der verzögerten Durchbauung des Kahnbeins von 9% bei Patienten mit sofortigem Therapiebeginn innerhalb von zwei Tagen auf 36% bei Patienten mit verzögerten Therapiebeginn von mehr als 4 Wochen ansteigt. Die Rate der Nicht-Durchbauung wächst von 5% auf 45% [78].

Neben der insuffizienten Durchbauung frakturierter Kahnbeinknochen verweisen Amadio et al. auf die Bedeutung der karpalen Winkel: bei einer intraskaphoidalen Abkipfung $>45^\circ$ beträgt die zufriedenstellende Heilungsrate 27%, die Inzidenz einer posttraumatischen Arthritis 54%. Dem Gegenüber erhält man in 83% der Fälle ein zufriedenstellendes Ergebnis und in nur 22% der Fälle posttraumatische Arthritis, wenn die Winkel regelrecht stehen [6]. Moritomo et al. gehen davon aus, dass der abnormale Kontakt zwischen zwei Knochen die Entwicklung degenerativer Prozesse fördern kann [91]. Diagnostische Unsicherheit und inkonsequente Therapie führen zur Entstehung einer Skaphoidpseudarthrose [118].

Die teilweise schlechte *Gefäßversorgung* der Karpalknochen wird als einer der Hauptgründe für die Entstehung einer avaskulären Nekrose herangezogen, wobei dies von Barton et al. als nicht generalisierbar entkräftet wird, da in der Tat therapeutisch nicht vaskularisierte Knochenblocks verwendet werden, um Pseudarthrosen zu behandeln [7]. Im Rahmen einer akuten Ischämie des Kahnbeins nach einfachem Handgelenkstrauma bei einem Kind konnte, obwohl konventionell radiologisch keine Fraktur nachweisbar war, mittels MRT und Knochenszintigraphie die komplette Avaskularisation zum Zeitpunkt der Verletzung dargestellt und einer bleibenden Minderperfusion unmittelbar vorgebeugt werden. Im Verlauf stellte sich der Knochen mit normalen Durchblutungsverhältnissen dar [54].

Der großflächige Überzug der Karpalknochen mit *Gelenkknorpel* aufgrund der vielen Artikulationen untereinander bedingt zusätzlich Komplikationen bei Handgelenkstraumata. Die operative Behandlung war lange Zeit offenen oder stark dislozierten Frakturen vorbehalten, da Operationstechniken wie die Kirschner-Draht-Fixierung, herkömmliche Schrauben oder Miniplättchen eine Metallentfernung erforderten, um Knorpelschäden zu vermeiden. Eine Frühmobilisation war damit praktisch ausgeschlossen. Dank des Prinzips der intraossären, teilweise kanülierten Verschraubung und des minimal invasiven Zugangs zur Schonung des ligamentären Apparates konnte hier ein Fortschritt erzielt werden, der heute auch die operative Fixierung nur leicht dislozierter Frakturen rechtfertigt. Allerdings bedarf die operative Frakturversorgung noch immer einer klaren Definition und Indikation, verbunden mit optimaler präoperativer Diagnostik [33, 75].

Nicht ausgeheilte Frakturen der Karpalknochen (Pseudarthrose) resultieren ebenso wie Verletzungen des skapholunären Bandes (skapholunäre Dissoziation) längerfristig infolge der instabilen Situation in einem karpalen Kollaps mit ausgeprägten arthrotischen Veränderungen des Handgelenkes, Schmerzen an Bändern und Gelenkspalt und Bewegungseinschränkung mit schmerzhaftem „Klicken“ (II.3.3.3) [128]. Je nach Stadium des karpalen Kollaps können kurative Verfahren angewendet werden (I) oder aber – im fortgeschrittenen Stadium (II und III) – sogenannte Rettungsoperationen. Diese basieren auf dem Prinzip, die von Arthrose betroffenen Gelenkabschnitte auszuschalten und damit eine Funktionsverbesserung mit Schmerzlinderung zu bewirken. Dies erfolgt meist auf Kosten der Beweglichkeit. Im schlimmsten Fall kann eine komplette Handgelenksarthrodese die letzte therapeutische Möglichkeit sein, der Preis ist der Verlust der Beweglichkeit. Jedoch ist selbst bei diesem Verfahren die vollständige Schmerzfreiheit nicht garantiert [74, 105].

Mayfield et al. berichten, dass die skapholunäre Dissoziation (SLD) aufgrund einer Kraftverschiebung im Handwurzelbereich über das Tuberculum scaphoideum nachträglich zu einer Fraktur des Kahnbeins führen kann [88].

Neben der Beurteilung der knöchernen Strukturen ermöglicht die MRT die Befundung von Verletzungen im Weichteilbereich. Hierfür sind eine hohe Sensitivität und hohe Auflösung eine Voraussetzung [136]. Neueste klinische Studien befassen sich mit dem Ansatz der einzelnen Bänder des Handgelenkes, mit deren Faserorientierung und den Stellungen maximaler Spannung und Belastung. Das Verständnis der Kinematik und Funktion weist immer mehr auf ein komplexes Zusammenspiel zwischen knöchernen und ligamentären Strukturen hin und erfordert Maßnahmen, die den Weichteilapparat exakt beurteilen lassen. Individuelle Unterschiede in der Signalintensität von Sehnen und Bändern können kernspintomographisch eine Verletzung simulieren und müssen ausgeschlossen werden [11, 12, 16, 32, 87, 112, 113, 126]. Die mögliche Fehlinterpretation eines Knochenmarksödems (bone bruise) als Fraktur wurde bereits an anderer Stelle erwähnt (III.3.2). Die Diagnose einer Fraktur sollte nur im Falle einer eindeutig nachweisbaren Frakturlinie und entsprechender Korrelation in T1- und T2-gewichteten Bildern erfolgen.

Es zeigte sich, dass die Magnetresonanztomographie ein weites Spektrum an Abnormalitäten darstellen kann, einen ausgezeichneten Gewebekontrast und eine hohe Sensitivität für reaktive Veränderungen mit der Fähigkeit lokale Hyperämie, Ödem und frühe Stressreaktionen des Knochens unmittelbar posttraumatisch zu erfassen besitzt [96]. Bereits in der Akutphase nach dem Trauma ermöglicht die MRT somit eine sichere Diagnose der Knochen- und Weichteilveränderungen. In einer Kontrastmitteldarstellung kann unmittelbar die Vitalität kleinster Knochenfragmente überprüft und die Gefahr einer Pseudarthrose eingeschätzt werden [14]. In 10/54 Fällen der vorliegenden Arbeit, in denen die MRT-Untersuchung 0-2 Tage posttraumatisch stattgefunden hat, konnten zuverlässige Diagnosen gestellt werden. In einem der Fälle konnte bereits am Tag der Verletzung eine im Nativröntgenbild okkulte Fraktur mittels Kernspintomographie verifiziert werden. Bereits 3 Stunden nach Verletzungshergang dokumentierten Feldmann et al. in der MRT eine akute Fraktur [46], Imadea et al. berichten von der Detektion abnormer Knochenstrukturen ab dem zweiten Tag post Trauma [69]. Gaebler et al. führten eine prospektive Blindstudie an 32 Patienten mit Handgelenkstraumata und klinischem Verdacht auf eine Kahnbeinfraktur durch. Die initialen Röntgenübersichtsaufnahmen sowie die vier Aufnahmen der Kahnbeinserie waren negativ. Die MRT-Untersuchung fand durchschnittlich am 2,8 Tage nach dem Unfall statt. Die

Sensitivität und Spezifität betragen 100%, Begleitverletzungen im Bereich der Bänder und des TFCC konnten mit der gleichen Treffsicherheit diagnostiziert werden [51].

Gegenüber Follow-up Aufnahmen hat die Kernspintomographie den Vorteil, dass dem Patienten wiederholte Krankenhausbesuche erspart bleiben und die Strahlenbelastung durch wiederholtes Röntgen ebenfalls wegfällt. Für das MR-Verfahren sind keine ionisierenden Strahlen notwendig, eine Schädigung des menschlichen Körpers durch die Anwendung von Hochfrequenzwellen oder hohen magnetischen Feldstärken ist nicht bekannt [80]. Die Aufnahme konventioneller Röntgenbilder hingegen exponiert den Patienten ionisierender Strahlung. Eine wenn auch nur vorübergehende Gipstragezeit muss mehrfach kontrolliert werden. Für den entsprechenden Zeitraum sowie eventuell die gesamte Länge der scheinbar erforderlichen Ruhigstellung müssen Arbeitgeber und Krankenkassen für den Arbeitsausfall und die entstehenden Entgeltfortzahlungskosten im Falle eines Krankenstandes aufkommen. Studien, die die Wertigkeit der MRT zur Verlaufskontrolle von Frakturen überprüft haben, verweisen auf die Möglichkeit früherer Gipsentfernung und Mobilisation durch den Einsatz der MRT [89]. Die Sicherheit der Diagnose ermöglicht eine effiziente, unverzögerte Therapie. Im Falle einer okkulten Fraktur können hierdurch die Immobilisationszeit auf den erforderlichen Zeitraum beschränkt und Komplikationen auf ein Minimum reduziert werden. Das Erkennen einer falsch positiven Fraktur erlaubt dem Krankgeschriebenen unter Umständen eine unmittelbare Wiederaufnahme der beruflichen Tätigkeit.

Die Verkürzung des Zeitraums zwischen der Manifestation klinischer Symptome und der definitiven Diagnose verhindert auch ein mögliches Dislozieren einer okkulten Fraktur bei andauernder Mobilität im Falle diagnostischer Unsicherheit. Einem komplexen und finanziell aufwendigen Management wird so vorgebeugt [18].

Die „*Interobserver-Analyse*“ ergab in der vorliegenden Studie eine nur „mäßige“ Übereinstimmung in der konventionell-radiologischen Frakturdiagnostik beider Befunder ($\kappa = 0,36$). Sensitivitäten zwischen 40-50% und Spezifitäten zwischen 70-80% sind ungenügend. Dem gegenüber stehen die Daten der Sensitivität und Spezifität der MRT in der Detektion okkulten Frakturen des Handgelenkes: Sensitivitäten werden mit 95-100%, Spezifitäten mit 92-100% angegeben [18, 107]. Im Rahmen von Diskusläsionen stellvertretend für Weichteilstrukturen werden Sensitivitäten von 83-100% und Spezifitäten von 53-67% beschrieben [70]. Schadel-Hopfner et al. geben eine Sensitivität von 71% und eine Spezifität von 86% bei der Detektion von skapholunären Bandtränen im MRT an [106].

Die Niedrigfeld MR-Bildgebung mit 0.2 T und Mittelfeld MR-Bildgebung mit 1.0 T sind in der Diagnostik radiologisch okkultur Handgelenksfrakturen äquivalent. Bei der Darstellung detaillierter Frakturverhältnisse zur effizienten Therapieplanung und Prognose ist die Mittel- und Hochfeld-MRT der Niedrigfeld-MRT jedoch überlegen [19].

Die Kernspintomographie ersetzt die Diagnostik durch ein invasives und kostenaufwendiges Verfahren wie die Arthrographie oder die Operation. Initiale Kosten einer MRT-Untersuchung belaufen sich auf rund 150 Euro. Dem stehen die Kosten einer Nativröntgenaufnahme des Handgelenkes in zwei Ebenen in Höhe von etwa 20 Euro gegenüber. Berücksichtigt man jedoch, dass außer einer herkömmlichen Aufnahme zusätzliche Spezialaufnahmen wie die Kahnbeinserie notwendig sein können (weitere 10 Euro) und man auf die Wiederholung der Nativröntgenbilder bei okkulen Frakturen angewiesen ist (bis zu 3 mal 20 Euro=60 Euro), addieren sich die Summen schnell. Hinzu kommt, dass die, wenn auch nur temporäre Ruhigstellung im Falle eines Verdachts auf eine Skaphoidfraktur mit einem Oberarmgips behandelt werden sollte (50 Euro), mehrfache Kontrolltermine (Personalkosten und Verbandmaterial) müssen ebenfalls beachtet werden (eigene nicht veröffentlichte Daten aus dem Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie der Goethe-Universität Frankfurt am Main). Die lange Gipsimmobilisation von mindestens 12 Wochen im Falle einer Skaphoidfraktur schließt das Restrisiko des Entstehens einer Pseudarthrose, das zwischen 1,5% und 37% angegeben wird, jedoch noch immer nicht aus [8]. Nach einer verspäteten definitiven Frakturdiagnostik von >6 Wochen schlagen Krimmer et al. grundsätzlich ein operatives Procedere vor, um der Entstehung einer Pseudarthrose vorzubeugen [75]. Dieses würde in keiner Relation zu dem initialen Kostenaufwand einer MRT-Untersuchung stehen, die detaillierte Erkenntnisse über die Verletzung gegeben hätte.

Deutsch et al. berichten in ihrer Studie, die sich mit der MRT-Diagnostik okkultur Frakturen des proximalen Femurs befasst, dass eine MRT-Untersuchung bei kritischer Indikationsstellung die diagnostischen Kosten ihrer Institution um 25% senken konnte. Dies wird durch den Verzicht auf andere diagnostische Mittel und im Falle der Femurfraktur durch eine Verkürzung der Hospitalisationszeiten ermöglicht [36].

Sowohl der Kostenfaktor als auch die Dauer der MRT-Untersuchung sprachen in der Vergangenheit trotz hoher Sensitivitäts- und Spezifitätswerte und der offensichtlichen therapeutischen Relevanz gegen den Einsatz der Kernspintomographie als primäres diagnostisches Mittel bei Handgelenkesverletzungen. Dem widersprechen Studien, bei denen

MRT-Untersuchungen des Handgelenkes in der Routine „zwischen geschoben“ werden konnten [129]. Die Voraussetzung hierfür ist eine optimale Protokollplanung, die mit einer Mindestanzahl von Sequenzen eine maximale Diagnostik zulässt. Schick et al. empfehlen zum Nachweis okkulten Frakturen an distalem Unterarm und Handwurzel die Kombination von Turbo-STIR und T1-Spinecho (SE)-Sequenzen in koronarer Schichtführung [107]. Hingegen berichten Stähler et al., dass im Rahmen ihrer Untersuchungen die alleinige Anwendung einer protonendichtegewichteten fettgesättigten Turbospinecho-Sequenz (PD fatsat TSE-Sequenz) mit verlängerter Echozeit zur Darstellung aller klinisch relevanten Strukturen ausreichte [117]. In der vorliegenden Studie erwies sich die Anwendung einer T1-gewichteten SE-Sequenz in koronarer Schichtführung (TR=432, TE=18, 15 Schichten, flip angle=90°, gap=0,2 mm, slice thickness 1,7-2 mm, matrix 512x512, 1 oder 2 Aquisitionen) mit einer Dauer von 3 Minuten für die kontrastreiche Darstellung des Weichteilapparates und ossärer Verletzungen als hoch spezifisch. Diese wurde mit einer T2-gewichteten, fettgesättigten Turbo-Spin-Echo (TSE)-Sequenz, koronar orientiert kombiniert (TR=4040, TE=17, 15 Schichten, slice thickness 2 mm, matrix 256x256, FOV 80-120 mm, 2 Aquisitionen). Die hohe Sensitivität der T2-gewichteten Aufnahme stellte ossäre Verletzungen sowie Ergüsse ausgezeichnet dar. Diese Sequenz enthielt eine protonendichte Messung, die sich vor allem in der Weichteildiagnostik durch eine hohe Spezifität (hervorragendes Kontrastverhalten) auszeichnete. Die Dauer der gesamten Sequenz betrug aufgrund der notwendigen 2 Aquisitionen etwas mehr als 6 Minuten. Die vollständige Untersuchung erfolgte in knapp 10 Minuten, in denen eine stichhaltige und aussagekräftige Diagnostik ermöglicht wurde. Zeitweise wies diese Sequenz jedoch eine hohe Signal-Rausch-Problematik auf und eine mäßige Spezifität. Dies führte zur Entwicklung einer STIR-Sequenz, die aufgrund der hohen Sensitivität in die Routine übernommen wurde und den zeitlichen Aufwand der Untersuchung auf 7 min 24 sec reduzieren konnte. Um falsch positiven MRT-Befunden zum Beispiel im Falle eines Bone bruise, das als Fraktur fehlinterpretiert werden kann, vorzubeugen, empfehlen wir die Verwendung einer T1 und einer T2-gewichteten Sequenz zum Überprüfen der Korrelation pathologischer Befunde. Unabhängig davon wäre in Zukunft die Anwendung einer sensitiven, kurzen (Sekundenbereich) gradientengewichteten T2-Sequenz als Screening-Methode zur Detektion okkulten Frakturen zu evaluieren.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit war die Evaluierung des Einflusses der MRT auf das therapeutische Management. Die tatsächliche Auswirkung auf die Gesundheit der Patienten

konnte im Rahmen einer wöchentlich stattfindenden chirurgischen Handsprechstunde im Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität teilweise verfolgt werden. Die dortige Betreuung der Patienten ergab, dass sich in keinem der Fälle das angewendete Therapiekonzept als unzureichend oder inadäquat erwies, die Zufriedenheit der Patienten war groß. Zur Überprüfung der Effektivität und der Komplikationsrate der jeweiligen Behandlung, zum Beispiel das Entstehen einer Skaphoidpseudarthrose, müsste eine Langzeitkontrolle der Patienten von 5-10 Jahren angesetzt werden. Dies war im Rahmen dieser Studie nicht möglich und wurde als Ziel nicht verfolgt.

V.2 *Qualitätsmanagement*

1998 haben sich in Deutschland insgesamt 8,97 Mio. Menschen eine Unfallverletzung zugezogen. Im Heim- und Freizeitbereich gab es 5,25 Mio. Unfälle, wobei hiervon 2,33 Mio. erwerbstätige Personen betroffen waren. Demgegenüber wurden für den Arbeitsplatzbereich nur 1,84 Mio. meldepflichtige Arbeits- und Wegeunfälle registriert. Die Heim- und Freizeitunfälle der Erwerbstätigen ergaben in der Summe 32,6 Mio. Arbeitsunfähigkeitstage und produzierten Kosten in Höhe von 2,8 Milliarden Euro.

40% aller Berufsverletzungen betreffen die Hand [109]. Auch wenn bereits seit Jahren eine rückläufige Tendenz bei den Arbeitsunfällen besteht (- 2,8% im Jahr 2000 für meldepflichtige Unfälle), ist jeder Pflichtversicherte im Bundesdurchschnitt 16,4 Kalendertage krank (Bundesverband der Betriebskrankenkassen 1999). Dabei dauert 1999 ein Arbeitsunfähigkeitsfall im Mittel 13,6 Tage; auf jeden Pflichtversicherten entfallen 1,2 Fälle pro Jahr. Gegenüber 1998 bedeutet das einen Anstieg der durchschnittlichen Fehlzeiten um 0,3 Tage.

Im Falle einer Krankschreibung sind vom Unternehmen gesetzlich vorgeschriebene Pflichtleistungen zu erbringen. Entstehende Personalzusatzkosten setzen sich zusammen aus:

- Sozialversicherungsbeiträgen einschließlich Unfallversicherungsbeiträge
- Bezahlte Feiertage
- Urlaubsvergütung
- Entgeltfortzahlung im Krankheitsfall

Hinzu kommen Kosten der betrieblichen Altersversorgung und Pflichtleistungen im Rahmen von Mutterschutz. Die Sozialversicherungsbeiträge der Arbeitgeber haben den größten Anteil an den gesetzlichen Lohnzusatzkosten. Trotzdem stellen die Entgeltfortzahlungskosten und

anteilige Krankengeldkosten pro Jahr für die Betriebe nach wie vor einen entscheidenden wirtschaftlichen Faktor dar. Für 2001 ergab sich ein Betrag von über 32 Milliarden Euro.

Krankengeld, das die Krankenkassen ab der 7. Woche der Arbeitsunfähigkeit gewähren, kommt als zusätzliche Belastung hinzu. Für 2001 liegen Ausgaben in Höhe von rund 7,7 Milliarden Euro. Aufgrund der paritätischen Finanzierung der gesetzlichen Krankenversicherung durch Versicherte und Arbeitgeber gehen hiervon 50% (3,85 Milliarden Euro) zu Lasten der Betriebe. Insgesamt entstehen für die Arbeitgeber 2001 rund 37 Milliarden Euro Lohnersatzleistungskosten für erkrankte bzw. krankgemeldete Mitarbeiter. Seit dem 01. Januar 1999 wurde die Entgeltfortzahlung von 80% auf 100% des vorherigen Arbeitsentgelts erhöht (Zahlen und Information der Bundesvereinigung der Deutschen Arbeitgeberverbände [66]).

Neben den finanziellen Aufwendungen sind Fehlzeiten für die Unternehmen mit einer Vielzahl weiterer Probleme verbunden. Neben vermehrtem Planungs- und Organisationsaufwand müssen Überstunden und Zusatzschichten der übrigen Mitarbeiter geleistet werden bzw. befristet neue Mitarbeiter eingestellt werden, was weitere Kosten mit sich bringt. Die Arbeitsmotivation und das Betriebsklima können dadurch beeinträchtigt werden.

Dem Einfluss der Kernspintomographie auf krankheitsbedingte Fehlzeiten, die erhebliche Kosten und Belastungen für die Unternehmen und deren Mitarbeiter mit sich bringen, galt in der Auswertung der vorliegenden Arbeit besondere Aufmerksamkeit. Es konnte gezeigt werden, dass in 29,6% aller Patienten deren Arbeitsunfähigkeitsdauer verkürzt werden konnte. 9/54 Patienten konnten ihre berufliche Tätigkeit unmittelbar nach der MRT-Untersuchung wieder aufnehmen. 38,9% der Unfälle ereigneten sich in dieser Studie im Rahmen eines Arbeitsunfalls, so dass die *Berufsgenossenschaften und Krankenkassen* in Erwägung ziehen sollten, zumindest im Falle eines Arbeitsunfalls die MRT-Untersuchung als generelles diagnostisches Verfahren bei klinisch frakturverdächtigen aber radiologisch unauffälligen Akutverletzungen des Handgelenkes anzuwenden.

Das bisherige Behandlungsschema sieht bei klinisch verdächtigen, radiologisch okkulten Frakturen bisher eine überbrückende Gipstragezeit von 10-14 Tagen vor, um dann eine erneute Nativröntgenkontrolle anzuschließen. Zu deren Wertigkeit wurde oben Stellung genommen. Die erforderliche Immobilisationszeit kann im Falle einer Kahnbeinfraktur bis zu 12 Wochen betragen. Den initial höheren Kosten für eine MRT-Untersuchung stehen im Falle

des Ausschlusses eines pathologischen Befundes Einsparungen durch den Fortfall der Krankschreibung und Entgeltfortzahlung gegenüber. Die Daten der vorliegenden Studie machen die Häufigkeit falsch positiver Diagnosen deutlich. Mit Hilfe der MRT konnten in der vorliegenden Studie 28 Arbeitswochen (140 Arbeitstage) bei 19 Erwerbstätigen eingespart werden. Pro Arbeitnehmer konnte die Dauer der Krankschreibung somit um durchschnittlich 1,5 Arbeitswochen reduziert werden. Bei einem durchschnittlichen Bruttoeinkommen eines Arbeitnehmers in Deutschland von Euro 24900.-/Jahr (1. Halbjahr 2000, statistisches Bundesamt) konnten hierdurch insgesamt 13407,69 Euro Lohnentgeltfortzahlungskosten eingespart werden. Hinzu kommt bei Krankschreibungszeiten von mehr als 7 Wochen der vom Arbeitgeber zu leistende Anteil am Krankengeld. Bestätigt das MRT einen pathologischen Befund, kann durch den unverzögerten Therapiebeginn die erforderliche Dauer der Ruhigstellung auf ein Minimum reduziert werden. Die Kernspintomographie stellt das Ausmaß einer Verletzung detailliert dar und kann die Notwendigkeit einer Operation indizieren, was die Immobilisationszeit ebenfalls verkürzen würde. Schließlich wird möglichen Folgekosten durch Komplikationen vorgebeugt. Dorsay et al. berichten von einer allmählichen Akzeptanz der MRT in der Akutdiagnostik von Handgelenkesverletzungen in ihrem Haus aufgrund vergleichbarer finanzieller Belastung aber deutlicher Überlegenheit der MRT gegenüber der konventionellen Radiologie bei unauffälligen oder unklaren Röntgenbildern [42].

V.3 Dokumentation anderer Untersuchungsverfahren

V.3.1 Arthrographie

Die Arthrographie des Handgelenkes ist eine Methode zur invasiv-diagnostischen Abklärung traumatischer, degenerativer und entzündlicher Veränderungen. Sie ermöglicht die Diagnostik von Bandverletzungen [99]. Als Zugang stehen mehrere Punktionsorte zur Verfügung, zur Vermeidung einer Läsion benachbarter Weichteilstrukturen bevorzugt man den dorsalen sowie dorsolateralen oder dorsomedialen Punktionsweg. Klinisch relevant ist die Darstellung aller drei Gelenkkompartimente [82-85]:

1. Intercarpalgelenk
2. Antebrachiokarpalgelenk
3. Distales Radioulnargelenk

Nicht-ionische, isomere Kontrastmittel zeigen bereits während der Injektion pathologische Übertritte in zerstörte Kapselanteile an. Die Aufnahme erfolgt in relativ weicher Technik (wenig kV). Die Arthrographie ermöglicht die unmittelbare Instillation von Medikamenten sowie eine therapeutische Intervention [15]. Sie sollte gezielt nach Ausschöpfung der nicht-invasiv diagnostischen Methoden eingesetzt werden [60].

V.3.2 Sonographie

Intrafasziale Hämatome im Rahmen von Sehnenrupturen (Achillessehnenruptur, Fingermuskelsehnen), durch Bandläsionen bedingte Gelenkergüsse im Karpalbereich sowie Abrissfrakturen lassen sich sonographisch darstellen. Vorteile der Methode sind die hohe Verfügbarkeit, geringe Untersuchungskosten, vernachlässigbare Patientenbelastung und fehlende Strahlenexposition. Nachteile liegen in der hohen Untersucherabhängigkeit und der nur partiellen Beurteilbarkeit knöcherner Strukturen [14, 62].

V.3.3 Skelettszintigraphie

Zur Skelettszintigraphie werden ^{99m}Tc -markierte Phosphatkomplexe eingesetzt. Von Bedeutung ist die Skelettszintigraphie beim Nachweis radiologisch okkulten Frakturen, wobei sie in Konkurrenz zur konventionellen Radiographie und zur MRT gesehen wird [48, 90, 95, 120, 130].

Die Hyperakkumulation eines radioaktiv markierten Isotops in der frakturierten Region eines Knochens indiziert die Neubildung frischen Knochenmaterials und einen gesteigerten Stoffwechsel. Der Beginn eines inflammatorischen Prozesses und Heilungsvorgangs innerhalb einer knöchernen Struktur ist Voraussetzung für die Anreicherung der Radionuklide in der Knochenszintigraphie. Dies bedingt einen verzögerten Einsatz des Verfahrens in der Diagnostik okkulten Frakturen von 48 Stunden [133] bis hin zu 72 Stunden [122]. Meurer et al. führen bei älteren Menschen die verminderte Nierenfunktion sowie die fehlende Spezifität der Szintigraphie als Grund für die hohe Zahl falsch negativer Befunde im Rahmen ihrer Studie an [90].

Die Übereinstimmung zwischen unterschiedlichen Untersuchern ist hoch (Kappa 0,88 [124]). Dem gegenüber stehen Kappa-Werte von 0,76 bei initialen und nur noch 0,5 bei wiederholten Nativröntgenaufnahmen. Die Sensitivität der Knochenszintigraphie wird meist mit nahezu 100% angegeben, dem gegenüber die Sensitivität konventionell-radiologischer Aufnahmen

mit 64-86% [95, 122, 133]. Der Nachteil der Knochenszintigraphie ist deren geringe Ortsauflösung, welche die Zuordnung einer Fraktur erschwert und die Weichteildiagnostik kaum möglich macht. Die fehlende Spezifität erlaubt keine Differenzierung zwischen Fraktur, Synovitis und Hyperämie [90].

Nielsen et al. führten die Evaluierung des Verfahrens anhand von 100 Patienten durch. 25/54 im Szintigramm gewertete Frakturen stellten sich als wahr heraus, davon 11 Skaphoidfrakturen, die alle erkannt wurden. Unter den falsch positiven Frakturen waren sowohl chronisch degenerative als auch akut entzündliche Prozesse falsch interpretiert worden. 36/54 Frakturen konnten im Nativröntgenbild nicht verifiziert werden. Die Skelettszintigraphie wird aufgrund der geringen Spezifität und des verzögerten Einsatzes der Methode als Zusatzdiagnostikum im Falle radiologisch okkulten Frakturen empfohlen, welche die Zahl der klinischen Untersuchung, Nativröntgenbilder und überflüssiger Immobilisation im Falle negativer Szintigraphiebefunde verkürzen kann. Insgesamt werden die Möglichkeiten des Verfahrens zum Erkennen okkulten Frakturen jedoch als begrenzt beschrieben, eine sichere Diagnostik ist nicht immer möglich [9, 95]. Die Kernspintomographie wird in der Detektion okkulten Frakturen als effektiver angesehen, nicht zuletzt auch wegen der ausbleibenden Strahlung, die im Falle der Skelettszintigraphie von den Phosphatisotopen ausgeht [48].

V.3.4 Computertomographie

Eine überlagerungsfreie räumliche Schnittbilddarstellung des Karpus gelingt mit der Computertomographie. Der Vorteil der CT als nicht-invasive Untersuchungsmethode liegt in der kurzen Untersuchungszeit. Die Messzeit zur Erstellung einer Einzelschicht liegt bei modernen Geräten im Subsekundenbereich. Der Gebrauch der CT-Untersuchung wird durch die mäßige Sensitivität bei akuten Verletzungen und vor allem die verhältnismäßig geringe Spezifität begrenzt [90], genüge aber laut Bohndorf et al. den Bedürfnissen der Skeletttraumatologie völlig [14]. Peritraumatisch jedoch kann die CT wie alle anderen auf Röntgenstrahlen beruhenden Methoden eine okkulte Fraktur weder mit Sicherheit zeigen noch ausschließen. Erst nach Ausbildung einer Resorptionszone im Frakturbereich, meist nach etwa 2 Wochen, kann die CT mit relativ hoher Sensitivität positive Befunde darstellen [18]. In einer Studie konnten mit Hilfe der CT 6 Wochen posttraumatisch allerdings nur 18/21, nativradiologisch zu diesem Zeitpunkt bereits sichtbare Frakturen, erkannt werden [123].

Die CT dient vorwiegend der Detektion okkultur Frakturen, weniger der Beurteilung des Weichteilapparates, und kann somit aufgrund der zur MRT verhältnismäßig geringen Ortsauflösung das Ausmaß eines Handgelenktraumas nur begrenzt darstellen. Ossäre Verletzungen und deren Heilungsverlauf lassen sich ohne eine untersuchungsbedingte Entfernung eines Gipses gut verfolgen und stellen eine zuverlässige Alternative zum konventionellen Röntgenbild dar [49, 101, 102], dessen Aussage zu Durchbauung, Sklerosierung und Heilung des frakturierten Knochens nicht immer zufriedenstellend ist [39].

V.3.5 Sonstiges

Bei der *Vergrößerungsradiographie* (Feinfokusvergrößerungsröntgen FFVR) werden mit einer Mikrofokusröhre Aufnahmen in vierfacher Vergrößerung in vier Projektionen angefertigt. Spongiöse und kortikale Konturunterbrechungen sollen aufgrund der deutlicheren Trabekelwerkdarstellung besser sichtbar werden.

In einer prospektiven Studie mit 23 Patienten wurde die Aussagekraft der FFVR mit der der MRT bei okkultur Frakturen verglichen. In der FFVR waren nur 5/10 Frakturen erkennbar. In der MRT zeigten sich 11 Frakturen, eine Fraktur stellte sich als falsch positiv heraus. Die Sensitivität der FFVR in der Detektion okkultur Frakturen des Handgelenkes betrug 50%, die Spezifität 100%. Die MRT zeigte eine Sensitivität von 100% und eine Spezifität von 92%. Die MRT wurde der FFVR als bilddiagnostische Methode bei Akutverletzungen der Hand vorgezogen [52, 107].

In einer prospektiven Studie mit 62 Patienten wurde das Verfahren der *Intraschallwellen* (intrasound Vibration) untersucht. Das Verfahren in Anlehnung an Finkeburg et al. (1993) zeigte im Gegensatz zu früheren Ergebnissen eine niedrige Sensitivität (73%) und Spezifität (51%) und wird daher nicht als Standardverfahren empfohlen [71].

V.4 Ausblick

Weitere prospektive Studien werden notwendig sein, die Wertigkeit der MRT in der Akutdiagnostik von Handgelenksverletzungen und die klinische Relevanz im Langzeitverlauf der in der MRT erhobenen Befunde zu überprüfen. Eine andere Fragestellung könnte sich mit dem Versuch der Etablierung von Gradientenechosequenzen befassen, die ein Screening von Frakturen innerhalb von Sekunden ermöglichen. Die hohe Sensitivität könnte dem Screening auf okkulte Frakturen und ödematös veränderte Bandverletzungen dienen und den Patienten

im Falle eines positiven Befundes in den Gradientenechosequenzen einem, wie in der vorliegenden Studie erarbeiteten, hochauflösenden Sequenzprotokoll, zuführen. Ein solches Untersuchungsprotokoll könnte innerhalb von Sekunden die Notwendigkeit einer weiterführenden Untersuchung anzeigen oder ausschließen und somit die Effektivität weiter erhöhen.

VI ZUSAMMENFASSUNG

Die konventionelle Röntgendiagnostik stellte lange Zeit das dominierende diagnostische Instrument zur Beurteilung von akuten Verletzungen des Handgelenkes und der umliegenden Strukturen dar. Da der klinische Verlauf nach Verletzungen des Handgelenkes häufig unbefriedigend und langwierig ist und nicht adäquat therapierte Verletzungen dieser Region mit einer hohen Rate an Sekundärkomplikationen einhergehen, galt es, die Diagnostik des Handgelenkes zu optimieren, da mit der konventionellen Röntgendiagnostik zum einen Frakturen übersehen, umgekehrt aber auch überdiagnostiziert werden können und zum anderen naturgemäß Bandverletzungen nicht ausreichend beurteilbar sind. Da Verletzungen des Handgelenkes meist bei berufstätigen jüngeren Menschen beobachtet werden, stellt dies ein großes ökonomisches Problem dar.

Ziel dieser Arbeit war es zu untersuchen, ob durch den gezielten Einsatz der Magnetresonanztomographie in der Frühphase nach einem akuten Handgelenkstrauma, die Diagnostik verbessert werden kann, und inwieweit dies Einfluss auf die nachfolgende Therapieplanung und Therapie hat. Es gelang durch den Einsatz der MRT beim akuten Handgelenkstrauma in Fällen mit einer Diskrepanz zwischen dem unauffälligen oder unklaren konventionellen Röntgenbild und der deutlichen klinischen Symptomatik nicht nur in 10,7% der Fälle (n=6) der Nachweis einer okkulten Fraktur, sondern auch in 64,3% der Fälle (n=36) der Nachweis von Begleitverletzungen im Bereich der ligamentären Strukturen und des TFCC. In 39,3% (n=22) konnte durch die MRT der Verdacht auf eine Fraktur ausgeräumt, in weiteren 5,4% (n=3) eine Änderung bezüglich der Frakturlokalisierung vorgenommen werden. Nur 11 der ursprünglich 36 konventionell radiologisch befundeten Verdachtsdiagnosen einer Fraktur konnten im MRT bestätigt werden. In 55,4% wurde die Diagnose und in 66,1% die Therapie geändert (bezugnehmend auf die Daten des ersten Radiologen, Tabelle IV-12).

Den verbesserten chirurgischen Therapiemöglichkeiten insbesondere der ligamentären Verletzungen musste durch die Optimierung der MRT Rechnung getragen werden. Es gelang im Rahmen dieser Promotionsarbeit ein zeitsparendes Untersuchungsprotokoll zu erstellen, das es ermöglicht, eine optimale Diagnostik der knöchernen Strukturen des Handgelenkes sowie des Weichteilapparates in weniger als 10 Minuten Untersuchungszeit durchzuführen. T1- und T2-gewichtete STIR-Sequenzen in koronarer Schichtorientierung erwiesen sich als diagnostisch relevant.

Aufgrund der verbesserten Diagnostik war es möglich, die Patienten rasch der jeweils optimalen Therapie zuzuführen. So konnten zum einen initial okkulte Frakturen und ausgeprägte Band- und Diskusverletzungen adäquat behandelt und zum anderen durch den sicheren Ausschluss von ossären Verletzungen frühzeitig lange Immobilisationszeiten vermieden werden. Dies stellte einen wesentlichen Benefit für die Patienten dar, da wiederholte Krankenhausbesuche und Röntgenaufnahmen, unnötige Immobilisationszeiten von bis zu 12 Wochen sowie inadäquate – gegebenenfalls invasive – Diagnostik (Arthrographie, Operation) vermieden werden konnten. Durch den frühzeitigen Ausschluss von Frakturen und relevanten ligamentären Läsionen mittels MRT konnte so eine Verkürzung der Arbeitsunfähigkeit in 15 Fällen erreicht werden, in 8 Fällen musste die Dauer der Arbeitsunfähigkeit aus therapeutischen Gründen verlängert werden. Dies spielt sowohl für den Arbeitnehmer als auch für den Arbeitgeber und – bei längeren Krankschreibungszeiten – für die Krankenkassen eine große Rolle. Betriebsausgaben durch Entgeltfortzahlung im Krankheitsfall können so reduziert werden. Aufgrund der wirtschaftlichen Folgen sollte nach unseren Erfahrungen in Fällen mit einem klinischen Verdacht auf eine Fraktur oder schwere Weichteilverletzungen im Bereich des Handgelenkes bei unauffälligem oder unklarem Nativröntgenbild der Einsatz der MRT unmittelbar, möglichst am Tag der Verletzung, erfolgen.

Trotz der initial hohen Kosten der kernspintomographischen Untersuchung erscheint uns das Verfahren in der Akutdiagnostik von Handgelenkesverletzungen bei Diskrepanz zwischen dem unauffälligen Röntgenbild und der klinischen Symptomatik indiziert und kosteneffektiv, da durch die adäquate Therapie chronische Handgelenksinstabilitäten und Pseudarthrosen vermieden werden können und auf diese Weise eine Reduktion der Folgekosten möglich ist.

Für die Zukunft werden weitere Studien notwendig sein, die die klinische Relevanz des Langzeitverlaufes der in der MRT erhobenen Befunde überprüfen.

SUMMARY

Conventional radiography has been the standard diagnostic feature in acute wrist fractures and surrounding structures for a long time. Because either the clinical progress after wrist trauma and inappropriate therapy are resulting in a high rate of complications in many cases, it was necessary to optimize the diagnosis of the acute wrist injury, as conventional radiographs often lead to false negative or false positive diagnoses and naturally show no detailed soft tissue abnormalities. Injuries of the wrist are common in young working people and therefore have a high economic impact.

In cases of chronic wrist pain MR imaging is well accepted [7, 68, 72]. Its diagnostic importance in the acute wrist trauma is still discussed [42, 120]. The purpose of this study was the prospective evaluation of the clinical impact of Magnetic Resonance Imaging (MRI) in the early diagnosis of acute wrist fractures and its influence on the diagnosis and therapeutic management. In cases of plain or indistinct radiographs and clinical suspicion of acute wrist trauma there were false negative results in 10,7% (n=6). In 64,3% (n=36) there were additional injuries of ligament structures and TFCC. In 39,3% of the cases (n=22) the presumption diagnosis of a fracture was disproved, in 5,4% (n=3) the fracture was located somewhere else. Only 11 of the initial 36 presumption diagnoses of wrist fractures in conventional radiographs were confirmed in the MRI. In 55,4% there was a diagnostic and in 66,1% a therapeutic change due to MRI examination (data of the first radiologist, table IV-12).

The complex anatomy of the wrist requires a specific and detailed documentation of the ligaments and other soft tissue structures. In an experimental part of this dissertation it was necessary to evaluate those sequences, which offer the best contrast ability to gain detailed diagnosis in soft tissue. We found out that T1- and T2-weighted STIR-sequences in coronal slice orientation provide optimal information in acute wrist injuries. Modern operative techniques of trauma surgeons require an optimized imaging. An early and adequate treatment turned out to be most important to prevent the wrist of avascular necrosis and pseudarthrosis. The basic condition for MRI to be used in acute wrist traumas routinely is an optimized imaging protocol. In this study it was possible to design a time- and cost-saving examination protocol, which offers the most reliable diagnosis of the carpal bones, distal forearm, and soft tissue with a limited number of sequences in less than 10 minutes examination time.

Based on the MRI results it was possible on the one hand to start adequate therapy immediately in cases of occult fractures and soft tissue lesions and on the other hand to avoid unnecessary treatment in false positive cases. The patient did not undergo repeated cast-controls and conventional radiographs, unnecessary immobilization times up to 12 weeks and inadequate invasive diagnosis (arthrography, surgery). In 15 cases there was a reduction of the period of being unable to work due to immediate MRI diagnosis, in 8 cases the period of being unable to work had to be prolonged. In cases of industrial accidents this is important either for the employer and for the employee and in cases of more than 6 weeks inability to work for the health insurance companies. Accurate diagnosis by MRI examination on the day of trauma may reduce economic costs due to shortened immobilization time in cases with a suspected fracture but plain radiographs.

Although initial costs of the MRI examination are higher, we recommend early MRI of the wrist, if possible on the day of trauma, if there is clinical suspicion of a wrist fracture or soft tissue injury and normal plain radiographs.

In the future, studies concerning long term follow-up will be necessary to check the clinical impact of MRI diagnosis.

VII LITERATUR

1. Abdel-Salam A, Eyres KS, Cleary J. Detecting fractures of the scaphoid: the value of comparative X-rays of the uninjured wrist. *J Hand Surg [Br]* 17 (1): 28-32, 1992.
2. Abel U. Die Bewertung diagnostischer Tests: Hippokrates Stuttgart, 1993.
3. Adolfsson L, Lindau T, Arner M. Acutrak screw fixation versus cast immobilisation for undisplaced scaphoid waist fractures. *J Hand Surg [Br]* 26 (3): 192-5, 2001.
4. Alho A, Kankaanpaa. Management of fractured scaphoid bone. A prospective study of 100 fractures. *Acta Orthop Scand* 46 (5): 737-43, 1975.
5. Allan CH, Joshi A, Lichtman DM. Kienbock's disease: diagnosis and treatment. *J Am Acad Orthop Surg* 9 (2): 128-36, 2001.
6. Amadio PC, Berquist TH, Smith DK, Ilstrup DM, Cooney WP, Linscheid RL. Scaphoid malunion. *J Hand Surg [Am]* 14 (4): 679-87, 1989.
7. Barton NJ. Twenty questions about scaphoid fractures. *J Hand Surg [Br]* 17 (3): 289-310, 1992.
8. Baumeister HH, Greinemann H. Zur konservativen Behandlung des Kahnbeinbruches der Handwurzel. *Unfallchirurg* 92 (4): 175-9, 1989.
9. Bayer LR, Widding A, Diemer H. Fifteen minutes bone scintigraphy in patients with clinically suspected scaphoid fracture and normal x-rays. *Injury* 31 (4): 243-8, 2000.
10. Berger PE, Ofstein RA, Jackson DW, Morrison DS, Silvino N, Amador R. MRI demonstration of radiographically occult fractures: what have we been missing? *Radiographics* 9 (3): 407-36, 1989.
11. Bettinger PC, Berger RA. Functional ligamentous anatomy of the trapezium and trapeziometacarpal joint (gross and arthroscopic). *Hand Clin* 17 (2): 151-68, vii, 2001.
12. Bettinger PC, Linscheid RL, Berger RA, Cooney WPr, An KN. An anatomic study of the stabilizing ligaments of the trapezium and trapeziometacarpal joint. *J Hand Surg [Am]* 24 (4): 786-98, 1999.
13. Bickert B, Sauerbier M, Germann G. Die klinische Untersuchung des verletzten Handgelenkes. *Zentralbl Chir* 122 (11): 1010-5, 1997.

14. Bohndorf K, Imhof H. Radiologische Diagnostik der Knochen und Gelenke: Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York, 1998.
15. Bohringer G, Schadel-Hopfner M, Junge A, Gotzen L. Die arthroskopische Therapie frischer Discus articularis-Verletzungen bei distalen Radiusfrakturen1 - Operative Technik und vorläufige Ergebnisse - . Handchir Mikrochir Plast Chir 33 (4): 245-51, 2001.
16. Braithwaite IJ, Jones WA. Scapho-lunate dissociation occurring with scaphoid fracture. J Hand Surg [Br] 17 (3): 286-8, 1992.
17. Breitenseher MJ, Gaebler C. Trauma of the wrist. Eur J Radiol 25 (2): 129-39, 1997.
18. Breitenseher MJ, Metz VM, Gilula LA, Gaebler C, Kukla C, Fleischmann D, Imhof H, Trattinig S. Radiographically occult scaphoid fractures: value of MR imaging in detection. Radiology 203 (1): 245-50, 1997.
19. Breitenseher MJ, Trattinig S, Gabler C, Happel B, Bankier A, Kukla C, Rand T, Imhof H. MRT bei radiologisch okkulten Kahnbeinfrakturen. Erste Erfahrungen von 1.0 Tesla (Ganzkörper-Mittelfeldgerät) versus 0.2 Tesla (dediziertes Niederfeldgerät). Radiologe 37 (10): 812-8, 1997.
20. Brondum V, Larsen CF, Skov O. Fracture of the carpal scaphoid: frequency and distribution in a well-defined population. Eur J Radiol 15 (2): 118-22, 1992.
21. Brossmann JC, C. Freyschmidt, J. Grenzen des Normalen und Anfänge des Pathologischen in der Radiologie des kindlichen und erwachsenen Skeletts. New York: Georg Thieme Verlag Stuttgart, 2001.
22. Bühl A, Zöfel P. SPSS für Windows Version 6, pp. 183; 189: Addison-Wesley, 1994.
23. Burge P. Closed cast treatment of scaphoid fractures. Hand Clin 17 (4): 541-52, 2001.
24. Calandruccio JH, Duncan SF. Isolated nondisplaced capitate waist fracture diagnosed by magnetic resonance imaging. J Hand Surg [Am] 24 (4): 856-9, 1999.
25. Cerezal L, Abascal F, Canga A, Garcia-Valtuille R, Bustamante M, del Pinal F. Usefulness of gadolinium-enhanced MR imaging in the evaluation of the vascularity of scaphoid nonunions. AJR Am J Roentgenol 174 (1): 141-9, 2000.

26. Cetti R, Christensen SE. The diagnostic value of displacement of the fat stripe in fracture of the scaphoid bone. *Hand* 14 (1): 75-9, 1982.
27. Chang CH, Tsai YS, Sun JS, Hou SM. Ipsilateral distal radius and scaphoid fractures. *J Formos Med Assoc* 99 (9): 733-7, 2000.
28. Cockshott WP. Distal avulsion fractures of the scaphoid. *Br J Radiol* 53 (635): 1037-40, 1980.
29. Cohen WG. Errors of measurements in statistics. *Technometrics* 10, pp. 637-66 , 1960.
30. Compson JP. Trans-carpal injuries associated with distal radial fractures in children: a series of three cases. *J Hand Surg [Br]* 17 (3): 311-4, 1992.
31. Craddock JM, Flood CR. The distribution of chi-squared statistic in small contingency tables. *Applied Statistics*, 19, pp.173-81 , 1970.
32. Dagum AB, Hurst LC, Finzel KC. Scapholunate dissociation: an experimental kinematic study of two types of indirect soft tissue repairs. *J Hand Surg [Am]* 22 (4): 714-9, 1997.
33. del Pinal F. Treatment of nonunion of the scaphoid by a limited combined approach. *J Bone Joint Surg Br* 83 (1): 78-82, 2001.
34. del Pinal FA. Primary vascularized distal radius bone graft for nonunion of the scaphoid. *J Hand Surg [Br]* 26 (3): 273-4, 2001.
35. Desai VV, Davis TR, Barton NJ. The prognostic value and reproducibility of the radiological features of the fractured scaphoid. *J Hand Surg [Br]* 24 (5): 586-90, 1999.
36. Deutsch AL, Mink JH, Waxman AD. Occult fractures of the proximal femur: MR imaging. *Radiology* 170 (1 Pt 1): 113-6, 1989.
37. Dias JJ, Brenkel IJ, Finlay DB. Patterns of union in fractures of the waist of the scaphoid. *J Bone Joint Surg Br* 71 (2): 307-10, 1989.
38. Dias JJ, Finlay DB, Brenkel IJ, Gregg PJ. Radiographic assessment of soft tissue signs in clinically suspected scaphoid fractures: the incidence of false negative and false positive results. *J Orthop Trauma* 1 (3): 205-8, 1987.

39. Dias JJ, Taylor M, Thompson J, Brenkel IJ, Gregg PJ. Radiographic signs of union of scaphoid fractures. An analysis of inter-observer agreement and reproducibility. *J Bone Joint Surg Br* 70 (2): 299-301, 1988.
40. Dias JJ, Thompson J, Barton NJ, Gregg PJ. Suspected scaphoid fractures. The value of radiographs. *J Bone Joint Surg Br* 72 (1): 98-101, 1990.
41. Doi K, Oda T, Soo-Heong T, Nanda V. Free vascularized bone graft for nonunion of the scaphoid. *J Hand Surg [Am]* 25 (3): 507-19, 2000.
42. Dorsay TA, Major NM, Helms CA. Cost-effectiveness of immediate MR imaging versus traditional follow-up for revealing radiographically occult scaphoid fractures. *AJR Am J Roentgenol* 177 (6): 1257-63, 2001.
43. Duncan DS, Thurston AJ. Clinical fracture of the carpal scaphoid--an illusionary diagnosis. *J Hand Surg [Br]* 10 (3): 375-6, 1985.
44. Eddeland A, Eiken O, Hellgren E, Ohlsson NM. Fractures of the scaphoid. *Scand J Plast Reconstr Surg* 9 (3): 234-9, 1975.
45. Eustace SJ. *Magnetic Resonance Imaging of Orthopedic Trauma*. Boston University School of Medicine, Boston Medical Center, Boston, Massachusetts: Lippincott Williams & Wilkins, 1999.
46. Feldmann F, Staron R, Zwass A, Rubin S, Haramati N. MR imaging: its role in detecting occult fractures. *Skeletal Radiol*, 1994.
47. Fleiss JL. *Stat. Methods for Rates and Proportions*. Wiley NY, pp. 143-47, 1973.
48. Fowler C, Sullivan B, Williams LA, McCarthy G, Savage R, Palmer A. A comparison of bone scintigraphy and MRI in the early diagnosis of the occult scaphoid waist fracture. *Skeletal Radiol* 27 (12): 683-7, 1998.
49. Friedman L, Yong-Hing K, Johnston GH. Forty degree angled coronal CT scanning of scaphoid fractures through plaster and fiberglass casts. *J Comput Assist Tomogr* 13 (6): 1101-4, 1989.
50. Fritsche EA, Hort C, Noever G. Simultaneous fractures of the waist and tuberosity of the scaphoid. *J Hand Surg [Br]* 22 (6): 814-6, 1997.
51. Gaebler C, Kukla C, Breitenseher M, Trattinig S, Mittlboeck M, Vecsei V. Magnetic resonance imaging of occult scaphoid fractures. *J Trauma* 41 (1): 73-6, 1996.

52. Gaebler C, Kukla C, Breitensteher MJ, Mrkonjic L, Kainberger F, Vecsei V. Limited diagnostic value of macroradiography in suspected scaphoid fractures. *Acta Orthop Scand* 69 (4): 401-3, 1998.
53. Galen RS, Gambino SR. Norm und Normabweichung klinischer Daten, 1979.
54. Gallie P, Chamberlain S, Stabler D. Temporary ischaemia of the scaphoid in a child. *J Hand Surg [Br]* 26 (4): 384-8, 2001.
55. Geissler WB, Hammit MD. Arthroscopic aided fixation of scaphoid fractures. *Hand Clin* 17 (4): 575-88, viii, 2001.
56. Genda E, Horii E. Theoretical stress analysis in wrist joint--neutral position and functional position. *J Hand Surg [Br]* 25 (3): 292-5, 2000.
57. Goldberg HD, Young JW, Reiner BI, Resnik CS, Gillespie TE. Double injuries of the forearm: a common occurrence. *Radiology* 185 (1): 223-7, 1992.
58. Goldman S, Lipscomb PR, Taylor WF. Immobilization for acute carpal scaphoid fractures. *Surg Gynecol Obstet* 129 (2): 281-4, 1969.
59. Greenspan A. Skelettradiologie. Sacramento, Kalifornien: Chapman&Hall GmbH Weinheim, Basel, Cambridge, New York, 1993.
60. Gupta R, Bozentka DJ, Osterman AL. Wrist arthroscopy: principles and clinical applications. *J Am Acad Orthop Surg* 9 (3): 200-9, 2001.
61. Herbert TJ, Fisher WE. Management of the fractured scaphoid using a new bone screw. *J Bone Joint Surg Br* 66 (1): 114-23, 1984.
62. Herneth AM, Siegmeth A, Bader TR, Ba-Ssalamah A, Lechner G, Metz VM, Grabenwoeger F. Scaphoid fractures: evaluation with high-spatial-resolution US initial results. *Radiology* 220 (1): 231-5, 2001.
63. Herzberg G, Comtet JJ, Linscheid RL, Amadio PC, Cooney WP, Stalder J. Perilunate dislocations and fracture-dislocations: a multicenter study. *J Hand Surg [Am]* 18 (5): 768-79, 1993.
64. Hinshaw WS, Bottomley PA, Holland GN. Radiographic thin-section image of the human wrist by nuclear magnetic resonance. *Nature* 270 (5639): 722-3, 1977.

65. Hobby JL, Dixon AK, Bearcroft PW, Tom BD, Lomas DJ, Rushton N, Matthewson MH. Mr imaging of the wrist: effect on clinical diagnosis and patient care. *Radiology* 220 (3): 589-93, 2001.
66. <http://www.bda-online.de/www/bdaonline.nsf/MainFrameSet>. .
67. Hurlbut PT, Van Heest AE, Lee KH. A cadaveric anatomic study of radial artery pedicle grafts to the scaphoid and lunate. *J Hand Surg [Am]* 22 (3): 408-12, 1997.
68. Imaeda T, Nakamura R, Miura T, Makino N. Magnetic resonance imaging in Kienbock's disease. *J Hand Surg [Br]* 17 (1): 12-9, 1992.
69. Imaeda T, Nakamura R, Miura T, Makino N. Magnetic resonance imaging in scaphoid fractures. *J Hand Surg [Br]* 17 (1): 20-7, 1992.
70. Kato H, Nakamura R, Shionoya K, Makino N, Imaeda T. Does high-resolution MR imaging have better accuracy than standard MR imaging for evaluation of the triangular fibrocartilage complex? *J Hand Surg [Br]* 25 (5): 487-91, 2000.
71. Knight P, Alastair G, Rothwell G. Intrasound Vibration in the Early Diagnosis of Scaphoid Fracture. *Journal of Hand Surgery* , 1997.
72. Koenig H, Lucas D, Meissner R. The wrist: a preliminary report on high-resolution MR imaging. *Radiology* 160 (2): 463-7, 1986.
73. Komurcu M, Basbozkurt M, Gur E. Surgical treatment results in scaphoid nonunion. *J South Orthop Assoc* 10 (4): 215-20, 2001.
74. Krimmer H, Lanz U. Der posttraumatische karpale Kollaps--Verlauf und Therapiekonzept. *Unfallchirurg* 103 (4): 260-6, 2000.
75. Krimmer H, Schmitt R, Herbert T. Kahnbeinfrakturen--Diagnostik, Klassifikation und Therapie. *Unfallchirurg* 103 (10): 812-9, 2000.
76. Kukla C, Gaebler C, Breitensteher MJ, Trattinig S, Vecsei V. Occult fractures of the scaphoid. The diagnostic usefulness and indirect economic repercussions of radiography versus magnetic resonance scanning. *J Hand Surg [Br]* 22 (6): 810-3, 1997.
77. Kukla C, Gaebler C, Breitensteher MJ, Trattinig S, Vecsei V. Prospektiver Vergleich MRT vs. direkte Vergrößerungsradiographie bei okkulen Frakturen des Os scaphoideum. *Unfallchirurg* 101 (1): 32-6, 1998.

78. Langhoff O, Andersen JL. Consequences of late immobilization of scaphoid fractures. *J Hand Surg [Br]* 13 (1): 77-9, 1988.
79. Larsen CF, Brondum V, Skov O. Epidemiology of scaphoid fractures in Odense, Denmark. *Acta Orthop Scand* 63 (2): 216-8, 1992.
80. Laubenberger T. Technik der medizinischen Radiologie - Diagnostik, Strahlentherapie und Strahlenschutz. Köln: Deutscher Ärzteverlag Köln, 1990.
81. Leslie IJ, Dickson RA. The fractured carpal scaphoid. Natural history and factors influencing outcome. *J Bone Joint Surg Br* 63-B (2): 225-30, 1981.
82. Levinsohn EM. Imaging of the wrist. *Radiol Clin North Am* 28 (5): 905-21, 1990.
83. Levinsohn EM, Palmer AK. Arthrography of the traumatized wrist. Correlation with radiography and the carpal instability series. *Radiology* 146 (3): 647-51, 1983.
84. Levinsohn EM, Rosen D. Wrist arthrography. *Radiology* 178 (2): 580, 1991.
85. Levinsohn EM, Rosen ID, Palmer AK. Wrist arthrography: value of the three-compartment injection method. *Radiology* 179 (1): 231-9, 1991.
86. Lindgren E. Some radiological aspects on carpal scaphoid and its fractures. *Acta Chir Scand* , 1949.
87. Linkous MD, Pierce SD, Gilula LA. Scapholunate ligamentous communicating defects in symptomatic and asymptomatic wrists: characteristics. *Radiology* 216 (3): 846-50, 2000.
88. Mayfield JK, Johnson RP, Kilcoyne RK. Carpal dislocations: Pathomechanics and progressive perilunar instability. *Journal of Hand Surgery* , 1980.
89. McNally EG, Goodman R, Burge P. The role of MRI in the assessment of scaphoid fracture healing: a pilot study. *Eur Radiol* 10 (12): 1926-8, 2000.
90. Meurer A, Kreitner KF, Tsironis K, Prokop A, Rehm KE. Zum Stellenwert der MRT in der Diagnostik okkulturer Frakturen. *Unfallchirurg* 102 (1): 43-9, 1999.
91. Moritomo H, Viegas SF, Elder KW, Nakamura K, Dasilva M, F, Boyd NL, Patterson RM. Scaphoid nonunions: a 3-dimensional analysis of patterns of deformity. *J Hand Surg [Am]* 25 (3): 520-8, 2000.

92. Munk B, Frokjaer J, Larsen CF, Johannsen HG, Rasmussen LL, Edal A, Rasmussen LD. Diagnosis of scaphoid fractures. A prospective multicenter study of 1,052 patients with 160 fractures. *Acta Orthop Scand* 66 (4): 359-60, 1995.
93. Nakamura T, Makita A. The proximal ligamentous component of the triangular fibrocartilage complex. *J Hand Surg [Br]* 25 (5): 479-86, 2000.
94. NessAiver M. All about MRI Physics. Baltimor: Simply Physics, 1997.
95. Nielsen PT, Hedeboe J, Thommesen P. Bone scintigraphy in the evaluation of fracture of the carpal scaphoid bone. *Acta Orthop Scand* 54 (2): 303-6, 1983.
96. Oneson SR, Scales LM, Erickson SJ, Timins ME. MR imaging of the painful wrist. *Radiographics* 16 (5): 997-1008, 1996.
97. Palmer AK. Triangular fibrocartilage complex lesions: a classification. *J Hand Surg [Am]* 14 (4): 594-606, 1989.
98. Palmer AK. Triangular fibrocartilage disorders: injury patterns and treatment. *Arthroscopy* 6 (2): 125-32, 1990.
99. Palmer AK, Levinsohn EM, Kuzma GR. Arthrography of the wrist. *J Hand Surg [Am]* 8 (1): 15-23, 1983.
100. Pechlaner S, Kathrein A, Gabl M, Lutz M, Angermann P, Zimmermann R, Peer R, Peer S, Rieger M, Freund M, Rudisch A. Distale Radiusfrakturen und Begleitverletzungen - Experimentelle Untersuchungen zum Pathomechanismus -. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 34 (3): 150-7, 2002.
101. Pennes DR, Jonsson K, Buckwalter KA. Direct coronal CT of the scaphoid bone. *Radiology* 171 (3): 870-1, 1989.
102. Quinn SF, Belsole RJ, Greene TL, Rayhack JM. CT of the wrist for the evaluation of traumatic injuries. *Crit Rev Diagn Imaging* 29 (4): 357-80, 1989.
103. Riederer SJ, Wood ML. *Categorical Course in Physics: The Basic Physics of MR Imaging*: Radiological Society of North America RSNA- Publications, 1997.
104. Rudigier J. *Kurzgefaßte Handchirurgie*. Stuttgart: Hippokrates Verlag Stuttgart, 1985.

105. Sauerbier M, Bickert B, Trankle M, Kluge S, Pelzer M, Germann G. Operative Behandlungsmöglichkeiten bei fortgeschrittenem karpalen Kollaps (SNAC/SLAC wrist). *Unfallchirurg* 103 (7): 564-71, 2000.
106. Schadel-Hopfner M, Iwinska-Zelder J, Bohringer G, Braus T, Klose KJ, Gotzen L. Magnetresonanztomographie oder Arthroskopie in der Diagnostik skapholunärer Bandschäden bei distalen Radiusfrakturen? *Handchir Mikrochir Plast Chir* 33 (4): 234-8, 2001.
107. Schick S, Trattinig S, Gabler C, Kukla C, Gahleitner A, Kainberger F, Ba-Ssalamah A, Breitensteiner M. Okkulte Handgelenksfrakturen: Feinfokusvergrößerungsrontgen versus MRT. *Rofo Fortschr Geb Rontgenstr Neuen Bildgeb Verfahr* 170 (1): 16-21, 1999.
108. Schiebler THS, W. Zilles, K. Anatomie: Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
109. Sennwald G. Das Handgelenk: Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1987.
110. Shampo MA, Kyle RA. Felix Bloch--developer of magnetic resonance imaging. *Mayo Clin Proc* 70 (9): 889, 1995.
111. Shampo MA, Kyle RA. Edward M. Purcell--Nobel Prize for magnetic resonance imaging. *Mayo Clin Proc* 72 (6): 585, 1997.
112. Smith DK. Dorsal carpal ligaments of the wrist: normal appearance on multiplanar reconstructions of three-dimensional Fourier transform MR imaging. *AJR Am J Roentgenol* 161 (1): 119-25, 1993.
113. Smith DK. Scapholunate interosseous ligament of the wrist: MR appearances in asymptomatic volunteers and arthrographically normal wrists. *Radiology* 192 (1): 217-21, 1994.
114. Soto-Hall. , 1945.
115. Spence LD, Savenor A, Nwachuku I, Tilsley J, Eustace S. MRI of fractures of the distal radius: comparison with conventional radiographs. *Skeletal Radiol* 27 (5): 244-9, 1998.
116. Sprague B, Justis EJJ. Nonunion of the carpal navicular. Modes of treatment. *Arch Surg* 108 (5): 692-7, 1974.

117. Stabler A, Spieker A, Bonel H, Schrank C, Glaser C, Petsch R, Putz R, Reiser M. Magnetresonanztomographie des Handgelenkes--Vergleich hochauflösender Pulssequenzen und unterschiedlicher Fettsignalunterdrückungen an Leichenpräparaten. *Rofo Fortschr Geb Rontgenstr Neuen Bildgeb Verfahr* 172 (2): 168-74, 2000.
118. Strassmair M, Wilhelm K. Entstehung einer Skaphoidpseudarthrose. *Deutsches Aerzteblatt*, 2001.
119. Tang JB. [Carpal instability associated with fracture in distal radius]. *Zhonghua Wai Ke Za Zhi* 32 (2): 82-6, 1994.
120. Tiel-van Buul MM, Roolker W, Verbeeten BW, Broekhuizen AH. Magnetic resonance imaging versus bone scintigraphy in suspected scaphoid fracture. *Eur J Nucl Med* 23 (8): 971-5, 1996.
121. Tiel-van Buul MM, van Beek EJ. Value of MR imaging in the detection of occult scaphoid fractures. *Radiology* 206 (1): 291-2, 1998.
122. Tiel-van Buul MM, van Beek EJ, Borm JJ, Gubler FM, Broekhuizen AH, van Royen EA. The value of radiographs and bone scintigraphy in suspected scaphoid fracture. A statistical analysis. *J Hand Surg [Br]* 18 (3): 403-6, 1993.
123. Tiel-van Buul MM, van Beek EJ, Dijkstra PF, Bakker AJ, Broekhuizen TH, van Royen EA. Significance of a hot spot on the bone scan after carpal injury--evaluation by computed tomography. *Eur J Nucl Med* 20 (2): 159-64, 1993.
124. Tiel-van Buul MM, van Beek EJ, van Dongen A, van Royen EA. The reliability of the 3-phase bone scan in suspected scaphoid fractures. An inter- and intraobserver variability analysis. *European Journal of Nuclear Medicine*, 1992.
125. Timins ME, Jahnke JP, Krah SF, Erickson SJ, Carrera GF. MR imaging of the major carpal stabilizing ligaments: normal anatomy and clinical examples. *Radiographics* 15 (3): 575-87, 1995.
126. Timins ME, O'Connell SE, Erickson SJ, Oneson SR. MR imaging of the wrist: normal findings that may simulate disease. *Radiographics* 16 (5): 987-95, 1996.
127. Trojan E. Der Kahnbeinbruch der Hand. Dissertation in support of application for a university teaching appointment. Eigenverlag, 1961.

128. Truong NP, Mann FA, Gilula LA, Kang SW. Wrist instability series: increased yield with clinical-radiologic screening criteria. *Radiology* 192 (2): 481-4, 1994.
129. Van Gelderen W, Gale RS, Steward AH. Short tau inversion recovery magnetic resonance imaging in occult scaphoid injuries: effect on management. *Australas Radiol* 42 (1): 20-4, 1998.
130. Vichard P, Garbuio P, Lepage D, Tropet Y. Les fractures occultes du scaphoide carpien Detection par la radioscintigraphie quantitative. Incidences sociales et medico-legales. *Bull Acad Natl Med* 185 (8): 1399-413; discussion 1414-6, 2001.
131. Waeckerle JF. A prospective study identifying the sensitivity of radiographic findings and the efficacy of clinical findings in carpal navicular fractures. *Ann Emerg Med* 16 (7): 733-7, 1987.
132. Waizenegger M, Barton NJ, Davis TR, Wastie ML. Clinical signs in scaphoid fractures. *J Hand Surg [Br]* 19 (6): 743-7, 1994.
133. Waizenegger M, Wastie ML, Barton NJ, Davis TR. Scintigraphy in the evaluation of the "clinical" scaphoid fracture. *J Hand Surg [Br]* 19 (6): 750-3, 1994.
134. Watson HK, Ryu J. Degenerative disorders of the carpus. *Orthop Clin North Am* 15 (2): 337-53, 1984.
135. Watson HK, Ryu J. Evolution of arthritis of the wrist. *Clin Orthop* (202): 57-67, 1986.
136. Wong EC, Jesmanowicz A, Hyde JS. High-resolution, short echo time MR imaging of the fingers and wrist with a local gradient coil. *Radiology* 181 (2): 393-7, 1991.
137. Wright TW, Dobyns JH, Linscheid RL, Macksoud W, Siegert J. Carpal instability non-dissociative. *J Hand Surg [Br]* 19 (6): 763-73, 1994.
138. Yang Z, Mann FA, Gilula LA, Haerr C, Larsen CF. Scaphopisocapitate alignment: criterion to establish a neutral lateral view of the wrist. *Radiology* 205 (3): 865-9, 1997.
139. Zeitoun F, Dubert T, Frot B, Laredo JD. Imagerie du poignet et de la main: quel examen choisir? *J Radiol* 82 (3 Pt 2): 335-52; quiz 353-4, 2001.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen

Abb. II-1	Protonen im Magnstfeld	Seite 7
Abb. II-2	Energielevel der Protonen	Seite 7
Abb. II-3	Eigenspin der Kerne um ihre Achse	Seite 9
Abb. II-4	DISI- und VISI-Deformität	Seite 18
Abb. II-5	Karpalbögen nach Gilula und Yin	Seite 19
Abb. II-6	Überblick über die wichtigsten Frakturtypen	Seite 21
Abb. II-7	Einteilung der Frakturen nach Salter/Harris und Aitken	Seite 23
Abb. II-8	pa- und seitliche Aufnahme	Seite 25
Abb. II-9	scaphopisocapitate Aligement (SPC)	Seite 25
Abb. II-10	Ulnadeviation	Seite 26
Abb. II-11	Kahnbeinserie	Seite 26
Abb. II-12	Übersichtssequenz-Körperspule	Seite 27
Abb. II-13	Übersichtssequenz-Handspule	Seite 27
Abb. II-14	T1-gewichtete Aufnahme, transversale Schichtorientierung	Seite 28
Abb. II-15	T1-gewichtete Aufnahme, koronare Schichtorientierung	Seite 29
Abb. II-16	T2-gewichtete Aufnahme, koronare Schichtorientierung	Seite 29
Abb. II-17	Protonendichte Sequenz, koronare Schichtorientierung	Seite 29
Abb. II-18	Klassifikation nach Frykman (I-VIII)	Seite 32
Abb. II-19	Klassifikation nach Colles und Barton	Seite 33
Abb. II-20	„Vulnerable“ Zone des Karpus	Seite 36
Abb. II-21	Häufigkeitsverteilung der Skaphoidfrakturen	Seite 37
Abb. III-1	klinisches Untersuchungsprotokoll	Seite 46
Abb. III-2	Lagerung im MRT	Seite 48
Abb. IV-1	Probandenuntersuchungen zur Schichtdicke	Seite 57
Abb. IV-2	Probandenuntersuchungen zur Matrix	Seite 58
Abb. IV-3	Querfraktur des Kahnbeines	Seite 74

Abb. IV-4	Verdachtsdiagnose Kahnbeinfraktur	Seite 75
Abb. IV-5	okkulte Fraktur des Os capitatum	Seite 76
Abb. IV-6	okkulte Fraktur des distalen Radius	Seite 77
Abb. IV-7	Verdachtsdiagnose distale Radiusfraktur	Seite 78
Abb. IV-8	okkulte Fraktur des Os triquetrum	Seite 78
Abb. IV-9	Zerreißungen des Bandapparates	Seite 79
Abb. IV-10	knöcherner Bandausriss	Seite 80
Abb. IV-11	Sklerosierung im distalen Radius	Seite 81

Diagramme

Diag. III-1	Geschlechterverteilung im Gesamtkollektiv	Seite 42
Diag. IV-1	Verteilung der beruflichen Tätigkeit im Patientenkollektiv	Seite 60
Diag. IV-2	Traumaursache	Seite 61
Diag. IV-3	Frakturverteilung vor und nach MRT	Seite 70
Diag. IV-4	Verteilung der Arbeitsunfähigkeit vor und nach MRT	Seite 73

Tabellen

Tab. II-1	Wassergehalt des menschlichen Gewebes	Seite 11
Tab. II-2	Signalintensität in verschiedenen Geweben	Seite 11
Tab. II-3	Karpale Winkel	Seite 16
Tab. II-4	Angaben zur durchschnittlichen Dauer einer Frakturheilung	Seite 24
Tab. II-5	Radiologische Zeichen der Instabilität distaler Unterarmfrakturen	Seite 30
Tab. II-6	A0-Klassifikation nach Müller et al.	Seite 31
Tab. II-7	Frakturzeichen	Seite 34
Tab. II-8	Stadien der Lunatummalazie nach Decoulx (1977)	Seite 35
Tab. II-9	Arthroseausmaß nach Watson und Ryu	Seite 40
Tab. III-1	Score des Schmerzes und der Bewegungseinschränkung	Seite 45
Tab. III-2	Allgemeine Kreuztafel zur Beurteilung eines diagnostischen Tests	Seite 52
Tab. III-3	Allgemeine Kontingenztafel für zwei Untersucher	Seite 53

Tab. III-4	Richtlinien zur Bewertung des Kappa-Maßes	Seite 54
Tab. IV-1	Probandenuntersuchungen zum Signal-Rausch-Verhältnisses	Seite 57
Tab. IV-2	radiologisches Studienprotokoll	Seite 59
Tab. IV-3	Ergebnisse: klinisches Bild	Seite 62
Tab. IV-4	Ergebnisse: Schmerz	Seite 62
Tab. IV-5	Ergebnisse: Bewegungseinschränkung	Seite 62
Tab. IV-6	Ergebnisse der konventionellen Röntgendiagnostik	Seite 65
Tab. IV-7	Untersucherübereinstimmung	Seite 66
Tab. IV-8	Übereinstimmung R1-MRT	Seite 66
Tab. IV-9	Übereinstimmung R2-MRT	Seite 66
Tab. IV-10	Ergebnisse der MRT-Diagnostik	Seite 68
Tab. IV-11	Zusatzbefunde im MRT	Seite 69
Tab. IV-12	Diagnoseänderungen nach MRT	Seite 69
Tab. IV-13	Therapieänderung nach MRT	Seite 71
Tab. IV-14	Einfluss der MRT auf die Dauer der Arbeitsunfähigkeit	Seite 73

Verzeichnis der Abkürzungen

A	Fläche
A.	Arterie
α	Wellenlänge
Abb.	Abbildung
AO	Arbeitsgemeinschaft Osteosynthese
AU	Arbeitsunfähigkeit
AVN	avaskuläre Nekrose
B	magnetische Feldstärke
c	Ausbreitungsgeschwindigkeit
CID	dissoziative Gefügestörung (carpal instability dissociative)
cm	Zentimeter
Cor	koronar
CT	Computertomographie, -tomogramm
DF	Distanzfaktor
Diag.	Diagramm

DISI	Dorsal Intercalated Segment Instability, Dorsalkippung mit einer Vergrößerung des skapholunären Winkels auf $>60^\circ$
E	Energie
e	Konstante (2,7183)
v	Frequenz
f_p	Larmorfrequenz
FFVR	Feinfokusvergrößerungsrontgen
FOV	Field of View, Untersuchungsfeld
γ	Gyromagnetisches Verhältnis (Konstante)
HF	elektromagnetische Hochfrequenzenergie
IR	Inversion Recovery
k	Boltzmann-Konstante ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
KM	Kontrastmittel
kV	Kilovolt
lig.	Ligament
μ	magnetisches Dipolmoment
M	Magnetisierung
min	Minute
mm	Millimeter
MR	Magnetresonanz
MRT	Magnetresonanztomographie, -tomogramm
ms	Millisekunden
n	Anzahl
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
NSA	Number of Signal Averages, Mittelung der Signale
π	Konstante (3,1415927)
pa	posterior-anterior (Strahlengang)
PD	protonendichte (Sequenz)
R1, R2	Radiologen eins und zwei, Befunder
Σ	Summe
sag	sagittal
sec	Sekunde
SD	Schichtdicke
SE	Spin-Echo (Sequenz)
SI	Signalintensität

SLAC	Scapholunate advanced Collapse, bänderbedingte Instabilität
SLD	skapholunäre Dissoziation
SNAC	Scaphoid-Nonunion advanced Collapse, knöcherne Instabilität
SR	Saturation Recovery
STIR	Short Tau Inversion Recovery (Sequenz)
t	absolute Temperatur
T1	longitudinale Relaxationszeit (Spin-Gitter-Relaxationszeit)
T2	transversale Relaxationszeit (Spin-Spin-Relaxationszeit)
Tab.	Tabelle
TE	Time to Echo, Echozeit
TFCC	trianguläre fibroartilaginäre Komplex
TR	Time to Repeat, Wiederholungszeit
tran	transversal
VISI	(oder PISI) Volar oder Palmar Intercalated Segment Instability, Palmarkippung mit Verkleinerung des skapholunären Winkels auf $<30^\circ$
X	substanzspezifische Suszeptibilität

LEBENS LAUF

Persönliche Daten

Sabine Keim

Geboren am 02. August 1977 in Frankfurt am Main als Tochter des Bankfilialdirektors Eckhard Keim und seiner Ehefrau Stephanie, geb. Christmann

Schulbildung

1984-1988

Grundschule Friedrich-List in Frankfurt am Main

1988-1994

Leibniz-Gymnasium in Frankfurt am Main

1994-1997

Friedrich-Dessauer-Oberstufengymnasium in Frankfurt am Main, Abitur mit dem Abschluss 1,0

Studium

Oktober 1997

Beginn des Studiums der Humanmedizin an der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main

September 1999

Ärztliche Vorprüfung

September 2000

Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

September 2002

Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

November 2003

Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung und Abschluss des Studiums der Humanmedizin mit 1,66

Famulaturen

28.02.-28.03.2000

Gemeinschaftspraxis auf dem Gebiet der Anästhesiologie, Dres. H. J. Ferlemann, J. Freier und A. G. Scholl in Hofheim am Taunus

01.09.-01.10.2000

Zentrum der Gynäkologie und Geburtshilfe am Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main (Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Manfred Kaufmann)

19.02.-23.03.2001

Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie am Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main (Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Thomas J. Vogl)

30.07.-31.08.2001

Institut für Neurologie und (Neuro-) Ophthalmologie sowie auf dem Gebiet der Kopf- und Augenplastischen Chirurgie des Froedtert Memorial Lutheran Hospital des Medical College of Wisconsin/Milwaukee, USA (Bernd Remler, MD und Gerald J. Harris, Professor of Ophthalmology and Head, Orbital and Oculoplastic Surgery)

Praktisches Jahr

28.10.-22.12.02	University of Southern California/L.A., USA (Traumachirurgie und Herz-Thoraxchirurgie)
23.12.02-16.02.03	Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main (Allgemeinchirurgie)
17.02.-08.06.03	Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main (Gynäkologie und Geburtshilfe)
09.06.-28-09.03	Klinikum der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main (Innere Medizin)

Promotion

01.2000-06.2001	Untersuchung der Probanden und Patienten, prospektive Erfassung der Daten, Erstellen eines Untersuchungsprotokolls basierend auf experimentell ermittelten Daten
09-12.2001	Verfassen des schriftlichen Teils der Dissertation
09.12.2003	Disputation und Erlangung des Doktorgrades der Medizin

Zusatzqualifikationen

09.1999-07.2002	Nachwachen und Pflegediensttätigkeit in den Städtischen Kliniken Frankfurt am Main Höchst
10.1999-02.2000	Studentische Hilfskraft im Kursus der makroskopischen Anatomie (Präparierkurs) an der Dr. Senckenbergischen Anatomie unter der Anleitung von Univ.-Prof. Dr. Frank Nürnberger
10.1999-02.2000	Verbandskurs (einschließlich Gipstechnik) an der Orthopädischen Universitätsklinik Friedrichsheim Frankfurt am Main
10.2000-02.2001	Studentische Hilfskraft im Kursus der makroskopischen Anatomie (Präparierkurs)
10.2000-02.2002	Ultraschallkurs im Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Volkmer Jakobi
11.2001	Kursus der Klinischen Immunologie unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Hinfried Radeke, Pharmazentrum Frankfurt
10.2001-02.2002	Kursus der Tropenmedizin unter der Leitung von PD Dr. med. Gudrun Just-Nübling, Zentrum der Inneren Medizin III der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt am Main

Sulzbach im Taunus, im Oktober 2002

DANKSAGUNG

Herrn Prof. Dr. Vogl danke ich für die Überlassung des Dissertationsthemas sowie die wissenschaftliche Unterstützung. Weiterhin möchte ich Herrn PD Dr. Mack für die wissenschaftliche Betreuung und persönliche Förderung meinen aufrichtigen Dank aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Windolf, der an der Erarbeitung der Thematik dieser Studie und an ihrer Durchführung aus handchirurgischer Sicht beteiligt war und wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit und zum klinischen Bezug beigetragen hat.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr. Jacobi und Dr. Balzer für Ihre Unterstützung bei der Auswertung der Bilder sowie der Durchsicht der Arbeit danken.

Ich möchte nicht schließen, ohne auch den ärztlichen und medizinisch technischen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Diagnostische und Interventionelle Radiologie sowie der Klinik für Chirurgie und Unfallchirurgie für die gute Zusammenarbeit und fortwährende Unterstützung zu danken.

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die im Fachbereich Medizin zur Promotion eingereichte Arbeit mit dem Titel

Effektivität und Effizienz der hochauflösenden MRT
in der Diagnostik akuter Handgelenksverletzungen

im Institut für Diagnostische und Interventionelle Radiologie unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. med. Thomas J. Vogl mit Unterstützung durch Herrn PD Dr. med. Martin G. Mack ohne sonstige Hilfe selbst durchgeführt und bei der Abfassung der Arbeit keine anderen als die in der Dissertation angeführten Hilfsmittel benutzt habe.

Ich habe bisher an keiner in- oder ausländischen Medizinischen Fakultät ein Gesuch um Zulassung zur Promotion eingereicht. Die vorliegende Dissertation wurde bisher nicht als Dissertation eingereicht.

Teile der vorliegenden Arbeit wurden (werden) in folgenden Publikationsorganen veröffentlicht: siehe folgende Seite.

Sulzbach im Taunus, im Oktober 2002

Teile der vorliegenden Arbeit wurden in folgenden Publikationsorganen veröffentlicht:

1) Der Unfallchirurg, Springer-Verlag

„Klinische Relevanz der MRT bei akuten Handgelenksverletzungen“

S. Keim, M. Mack, Th. Vogl, J. Windolf

2) European Radiology, Springer-Verlag

“Clinical Impact of MRI in Acute Wrist Fractures – Indication and Therapeutic Consequences”

Martin G. Mack MD, Sabine Keim, Jörn Balzer MD, Wolfram Schwarz MD,

Kathrin Hochmuth MD, Joachim Windolf MD, MD, Thomas J. Vogl MD

Sulzbach im Taunus, im Oktober 2002