

Aus dem Institut für Klinische Radiologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor Prof. Dr. med. Dr. h.c. Maximilian Reiser

**Korrelierende anatomische und MR-tomographische
Untersuchungen des Handgelenkes: Vergleich von
zwei neuen Phased-array-Spulen und einer
zirkularpolarisierten Volumenspule.**

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

vorgelegt von
Florian Sebastian Mackel
aus
München
2006

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. A. Stäbler

Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. A. Mayerhofer
PD Dr. A. Frick
Prof. Dr. K. Hahn

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. C. Glaser

Dekan: Prof. Dr. med. D. Reinhardt

Tag der mündlichen Prüfung: 29.06.2006

für meine Familie

1	EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG	10
1.1	Einleitung	10
1.2	Fragestellung	10
2	GRUNDLAGEN	12
2.1	Anatomie des Handgelenkes	12
2.1.1	Gelenke und Skelettelemente	12
2.1.1.1	Distales Radioulnargelenk	12
2.1.1.2	Proximales Handgelenk	12
2.1.1.3	Distales Handgelenk	13
2.1.1.4	Nebengelenke	13
2.1.2	Muskelsystematik	13
2.1.3	Karpale Bandsysteme	15
2.1.3.1	Oberflächliche Schicht	16
2.1.3.2	Palmare Bänder der mittleren Schicht	16
2.1.3.3	Dorsale Bänder der mittleren Schicht	17
2.1.3.4	Binnenbänder der tiefen Schicht/ Intrinsiche Bänder	19
2.1.4	Gefäß-Nervenstraßen	19
2.1.4.1	Arteria radialis	19
2.1.4.2	Arteria ulnaris	20
2.1.4.3	Nervus medianus	20
2.1.4.4	Nervus ulnaris	21
2.1.5	Loge de Guyon	21
2.1.6	Ulnarer Faserknorpelkomplex (TFCC)	22
2.2	Pathologien des Handgelenkes und ihre Darstellung im MRT-Bild	23
2.2.1	Frakturen	23
2.2.2	Ulnokarpales Impaktionssyndrom	24
2.2.3	Skaphoidpseudarthrose und Osteonekrose	26
2.2.4	Lunatumnekrose (Morbus Kienböck)	27
2.2.5	Tumore	29
2.2.5.1	Knochenständige Tumore	29
2.2.5.2	Weichteiltumore	30
2.2.6	Nervenkompressionssyndrome	32
2.2.6.1	Karpaltunnel	32
2.2.6.2	Loge de Guyon	33
2.2.7	Erkrankungen der Bänder	34

2.2.7.1	Interossäre Bänder	34
2.2.7.2	Ulnarer Faserknorpelkomplex (TFCC)	35
2.3	Magnetresonanztomographie des Handgelenkes	36
2.3.1	Technische Anforderungen	36
2.3.2	Patienten, Probanden und Präparate.....	37
2.3.3	Lagerung	38
2.3.4	Untersuchungssequenzen	39
2.3.5	Untersuchungsspulen.....	41
3	MATERIAL UND METHODEN.....	44
3.1	Untersuchung.....	44
3.1.1	Handgelenkspräparate und Probanden.....	44
3.1.2	Untersuchungsgeräte und MR-Spulen	45
3.1.3	Sequenzwahl	47
3.1.4	Lagerung	48
3.1.5	Durchführung.....	49
3.2	Auswertung.....	49
3.2.1	Quantitative Auswertung	49
3.2.2	Qualitative Auswertung.....	51
4	ERGEBNISSE	52
4.1	Quantitative Ergebnisse- Spulenevaluation.....	52
4.1.1	Rauschen.....	52
4.1.2	Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR)	53
4.1.3	Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR)	55
4.1.4	Bildvergleich	57
4.2	Qualitative Ergebnisse- Anatomisch-MR-tomographische Bildkorr.	59
4.2.1	Transversale Schnitfführung.....	59
4.2.1.1	Schichtung in Höhe des proximalen Handgelenkes	59
4.2.1.2	Schichtung in Höhe der proximalen Karpalreihe	60
4.2.1.3	Schichtung in Höhe des proximalen Karpalkanals	61
4.2.1.4	Schichtung in Höhe des distalen Karpalkanals.....	62
4.2.2	Koronare Schnitfführung	71
4.2.2.1	Schichtung in Höhe des Karpalkanals	71
4.2.2.2	Schichtung in Höhe des oberflächlichen Karpus.....	71

4.2.2.3	Schichtung in Höhe des zentralen Karpus	72
4.2.3	Sagittale Schichtführung	78
4.2.3.1	Schichtung in Höhe des radialen Kompartiments der Art. radiocarpalis.....	78
4.2.3.2	Schichtung in Höhe des zentralen Karpus	79
4.2.3.3	Schichtung in Höhe des ulnaren Kompartiments der Art. radiocarpalis	79
4.2.4	Ulnarer Faserkomplex (TFCC)	83
4.2.5	Loge de Guyon.....	85
5	DISKUSSION	88
5.1	Methodikdiskussion	88
5.2	Quantitative Ergebnisse- Evaluierung der Spulen	93
5.2.1	Rauschen.....	93
5.2.2	Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR)	94
5.2.3	Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR).....	95
5.2.4	Bildqualität	95
5.3	Qualitative Ergebnisse- Anatomisch-MR-tomographische Bildkorr.	96
5.3.1	Transversale Schichtführung	96
5.3.2	Koronare Schichtführung	97
5.3.3	Sagittale Schichtführung	99
5.3.4	Ulnarer Faserkomplex (TFCC)	100
5.3.5	Loge de Guyon.....	103
6	ZUSAMMENFASSUNG	106
7	LITERATUR	109
8	ANHANG.....	128
9	DANKSAGUNG.....	131
10	LEBENS LAUF.....	132

Abbildungsverzeichnis:

Abb.1: Karpale Bandsysteme einer rechten Hand (Ansicht von palmar)	17
Abb.2: Karpale Bandsysteme einer rechten Hand (Ansicht von dorsal)	18
Abb.3: Pforten und Wände der Loge de Guyon	22
Abb.4: Ulnokarpaler Komplex (TFCC)	23
Abb.5: SNR unterschiedlicher Spulentypen	42
Abb.6: zirkulär polarisierte Volumen-Kniegelenksspule	46
Abb.7: 2-Kanal-phased-array-Spulenprototyp	46
Abb.8: 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule	46
Abb.9: Mittelwerte der Standardabweichung des Hintergrundrauschens	52
Abb.10: Mittelwerte der Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR) versch. Strukturen	54
Abb.11: Mittelwerte der Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR) versch. Strukturen	56

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Überblick über die Muskeln des Unterarms und des Handgelenkes	14
Tab. 2: Stadieneinteilung der Lunatummalazie	28
Tab. 3: Einteilung der TFCC-Läsionen nach Palmer	35
Tab. 4: Probanden der Messprotokollerstellung	44
Tab. 5: Präparate d. qual. und quant. Untersuchung und Probanden d. stat. Vergleichs	44
Tab. 6: Messreihen d. Probanden zur Erstellung des definitiven Messprotokolls	47
Tab. 7: Sequenz- und Messprotokoll Präparate (qualitativ)	48
Tab. 8: Sequenz- und Messprotokoll Präparate (quantitativ)	48
Tab. 9: Platzierung der "Region of interest"	50
Tab.10: Mittelwerte der Standardabweichung des Hintergrundrauschens	52
Tab. 11: Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR)	53
Tab. 12: Signifikanzniveau der verschiedenen MRT-Spulen (SNR)	54
Tab. 13: Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR)	55
Tab. 14: Signifikanzniveau der verschiedenen MRT-Spulen (CNR)	57
Tab. 15: Protokollübersicht anderer Autoren	92

Abkürzungsverzeichnis:

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
abd.	abductor
AC	Akquisitionen
Art.	Articulatio
ax	axial/ transversal
brev.	brevis
CNR	contrast to noise ratio
comm.	communicantes
cor	koronar
CTS	Karpaltunnelsyndrom
DESS-WE-Sequenz	Dual-Echo-Steady-State-Sequenz mit Wasseranregung
dig.	digitorum
dors.	dorsale
EMG	Elektromyographie
ext.	extensor
FA	Auslenkungswinkel
flex.	flexor
FLASH-WE-Sequenz	Fast-Low-Angle-Shot-Sequenz mit Wasseranregung
FOV	field of view
FS	Fettsättigung
GRE-Sequenz	Gradienten-Echo-Sequenz
HG	Handgelenk
HG-Sp. (2)	2-Kanal-phased-array-Handgelenksspule
HG-Sp. (4)	4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule
KG	Kniegelenk
KM	Kontrastmittel
KN-Sp.	Kniegelenks-Spule
Kortik.	Kortikalis
long.	longus
Lig.	Ligamentum
LT-Band	Lig. lunotriquetrale
M.	Musculus
Mm.	Musculi
MOD	Magneto-optische Diskette
MR	Magnetresonanz-

MRT	Magnetresonanztomographie
MW	Mittelwert
N.	Nervus
palm.	palmare
PD-FS-Sequenz	Protonendichte-gewichtete Sequenz mit Fettsättigung
poll.	pollicis
Präp.	Präparat
Prob.	Proband
Proc.	Processus
prof.	profundus
rad.	radialis
Rö.	Röntgen
ROI	region of interest
S.	Sequenz
sag	sagittal
SAR	Spezifische Absorptions-Rate
SE	Spin-echo-Sequenz (T1)
SE T1-Sequenz	T1-gewichtete Spin-Echo-Sequenz
SL-Band	Lig. scapholunatum
SLAC	scapholunate advanced wrist collapse
SNR	signal to noise ratio
Spong.	Spongiosa
STABW	Standardabweichung
STIR-Sequenz	Short-Tau-Inversion-Recovery-Sequenz
Superf.	superficialis
T	Tesla
TA	Messzeit
Tab.	Tabelle
TE	Echozeit
TFCC	triangular fibrocartilage complex
TR	Repetitionszeit
WE	Wasseranregung
V	Volumen
V.	Vena
Vve	Vena

1 Einleitung und Fragestellung

1.1 Einleitung

Die Magnetresonanztomographie des Handgelenkes erlangt neben der Projektionsradiographie zur Diagnostik des Handgelenkschmerzes zunehmende Bedeutung und wird häufig als Routineuntersuchung durchgeführt. Durch die gute Darstellbarkeit der Anatomie, mit Möglichkeit der Bewertung von Weichteilen und Abbildung von Flüssigkeiten bei Entzündungen, Tumoren oder Traumen, können mit der MRT im Vergleich zu Röntgenaufnahmen oder CT-Bildern zusätzliche Aussagen über mögliche Weichteilpathologien gemacht werden.

Trotz technischem Fortschritt mit neuen MR-Tomographen und höherer Feldstärke können nicht alle pathologischen Veränderungen der komplexen Handgelenksanatomie mit ihren kleinen weichteiligen Strukturen zufriedenstellend dargestellt werden. Um eine adäquate Begutachtung zu ermöglichen benötigt man optimierte Sequenzprotokolle mit kurzer Untersuchungszeit und guter Signalausbeute, die einen hohen Kontrast zwischen Flüssigkeitsansammlungen, Knochen, Muskeln und dem hyalinen Knorpel in einer hochauflösenden Dünnschichtabbildung erzielen.

Bei den bisher verwendeten linear polarisierten Volumen-Spulen ergab sich das Problem, dass für eine bessere räumliche Auflösung ein höheres Bildsignal benötigt wird. Dies konnte in der Vergangenheit nur durch eine längere Akquisitionszeit erreicht werden. Durch die Entwicklung der seit kurzer Zeit zur Verfügung stehenden Phased-array-Spulen-Technik, können durch Überlagerung mehrerer Einzelspulen, Bilder mit höherer Signalausbeute, kleinerem Hintergrundrauschen bei nahezu gleichbleibender Untersuchungszeit erzeugt werden.

1.2 Fragestellung

Mit der vorliegenden Arbeit soll der Signal- und Kontrastunterschied dreier MRT-Spulen (linear polarisierte Volumen-Kniespule, 2-Kanal-phased-array-Prototyp und 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule), an 6 Handgelenken evaluiert und die Vorteile der Mehrkanaltechnik dargestellt werden.

Die anschließend durchzuführende Korrelation zwischen den angefertigten MR-Bildern der phased-array-Spulen-Technik und den anatomischen Sägeschnitten, soll die MR-tomographische Abbildbarkeit der verschiedenen Gewebearten im Vergleich zu den Präparaten belegen, sowie speziell den Discus articularis, dessen

Bandgefüge und die Loge de Guyon mit den darin enthaltenen Strukturen in hoher Auflösung darstellen. Das dafür verwendete Sequenzprotokoll wird an 12 Probanden erstellt, auf die speziellen Anforderungen der MR-tomographischen Handgelenksuntersuchung abgestimmt und dessen Praktikabilität getestet.

2 Grundlagen

2.1 Anatomie des Handgelenkes

2.1.1 Gelenke und Skelettelemente

Funktionell lassen sich im Bereich der Handwurzel mehrere Gelenkgruppen unterscheiden: Das distale Radioulnargelenk (*Articulatio radioulnaris distalis*), das proximale Handgelenk (*Articulatio radiocarpalis*), das distale Handgelenk (*Articulatio mediocarpalis*) und die verschiedenen Nebengelenke (*Articulationes intercarpales*). Eine Sonderstellung nimmt das Erbsenbeingelenk (*Articulatio ossis pisiformis*) ein, das eine gelenkige Verbindung des *Os pisiforme*, als in die Sehne des *M. flexor carpi ulnaris* eingelassenes Sesambein, mit dem *Os triquetrum* bildet.

2.1.1.1 Distales Radioulnargelenk

Im distalen Radioulnargelenk gleitet die knorpelige *Incisura ulnaris* des Radius um die gegenüberliegende *Circumferentia articularis* der Ulna. Dabei dreht sich das distale Radiusende um die in ihrer Position verharrende Ulna und ergibt so die Pro- und Supination (Umwendbewegung) des Unterarms bzw. der Hand.

2.1.1.2 Proximales Handgelenk

Das proximale Handgelenk verbindet die distalen Anteile von Ulna und Radius mit der überknorpelten und durch Zwischenbänder verbundenen proximalen Reihe des Karpus (*Os scaphoideum*, *Os lunatum*, *Os triquetrum*). Das Eigelenk mit der konvexen Gelenkfläche auf der proximalen Seite wird in ein radiokarpales und in ein ulnokarpales Kompartiment unterschieden. Im radiokarpalen Kompartiment artikulieren die zwei grubenartigen Gelenkflächen (*Fossa scaphoidea*, *Fossa lunata*) des Radius, die eine ulnare Neigung von 25-30° und eine palmare Neigung von 5-10° besitzen, mit dem *Os scaphoideum* und dem radialen Anteil des *Os lunatum*. Der ulnare Flächenanteil des *Os lunatum* und das *Os triquetrum* zeigen eine Verbindung mit dem auf der Ulna aufliegendem Faserknorpelkomplex („*triangular fibrocartilage complex*“, „*TFCC*“; Palmer 1981) und bilden das ulnokarpale Kompartiment. Diese Konstellation ermöglicht eine Palmarflexion oder Dorsalextension und Radial- oder Ulnarabduktion der Hand, die durch eine Pro- und Supination im distalen Radioulnargelenk vervollständigt wird (Schmidt 1992).

2.1.1.3 Distales Handgelenk

Das distale Handgelenk oder auch Mediokarpalgelenk befindet sich zwischen der proximalen und distalen Reihe der Karpalia (Os trapezium, Os trapezoideum, Os capitatum, Os hamatum). Der S- bzw. wellenförmig verlaufende Gelenkspalt garantiert eine gute Verzahnung der beiden Skelettreihen. Durch Kombination der Bewegungsausschläge mit dem proximalen Handgelenk, lässt sich das volle Ausmaß der Palmarflexion von 85-90° bzw. Dorsalextension von 80-90° und Radialduktion von 15-25° bzw. Ulnarduktion von 40-50° erreichen (Schmidt 1992). Aktive Rotationsbewegungen sind durch den komplexen Gelenkspalt und kräftige Sehnenstränge, die darüber hinweglaufen, eingeschränkt. Bei passiven Bewegungen verhält sich das Gelenk jedoch ähnlich einem Kugelgelenk (Drenckhan 1994).

2.1.1.4 Nebengelenke

Die gelenkigen Verbindungen innerhalb der Karpalia zweigen von dem Hauptgelenkspalt des distalen Handgelenks ab und werden als Articulationes intercarpales zusammengefasst. In der proximalen Reihe werden die Skelettelemente durch straffe Bandverbindungen, im Gegensatz zur distalen Reihe, verschieblich miteinander verbunden (Ligg. intercarpalia interossea). Im klinischen Sprachgebrauch werden die proximalen Bandstrukturen als SL-Band (zwischen Os scaphoideum und Os lunatum) und als LT-Band (zwischen Os lunatum und Os triquetrum) bezeichnet.

2.1.2 Muskelsystematik

Die Muskulatur des Unterarms wird nach Ihrer genetischen Entwicklung in eine ventrale Flexorengruppe und eine dorsale Extensorengruppe unterteilt. Eine Sonderstellung nimmt die sogenannte radiale Muskelgruppe ein, die sich von der dorsalen Gruppe um den Radius herum, auf die Palmarseite des Unterarms verlagert hat.

Eine zusätzliche Gliederung kann durch eine Einteilung in eine oberflächliche und tiefe Schicht, bzw. durch die unterschiedliche Insertion der Muskeln erreicht werden (Drenckhan 1994).

Dorsale Muskelgruppe	Ursprung	Ansatz
Oberflächliche Schicht		
M. extensor carpi rad. long.	lateralen Humerus/ Sept. interm. brachi I.	Metakarpale II
M. extensor carpi rad. brev.	Epicondylus lateralis	Metakarpale III
M. extensor digitorum	Epicondylus lateralis/ Lig. coll. radiale	Dorsalaponeurose Digiti II-V
M. extensor digiti minimi	Epicondylus lateralis	Dorsalaponeurose Digiti V
M. extensor carpi ulnaris	Epicondylus lateralis/ Fascia antebrachii	Metakarpale V
Tiefe Schicht		
M. abductor pollicis longus	Ulna/ Membrana interossea/ Radius	Os metacarpale I
M. extensor pollicis brevis	Ulna/ Membrana interossea/ Radius	Grundphalanx Daumen
M. extensor pollicis longus	Ulna/ Membrana interossea	Endphalanx Daumen
M. extensor indicis	Ulna	Dorsalaponeurose Digitus II
Ventrale Muskelgruppe		
Oberflächliche Schicht		
M. flexor carpi radialis	Epicondylus medialis	Metakarpale II
M. palmaris longus	Epicondylus medialis	Palmaraponeurose
M. flexor carpi ulnaris	Epicondylus medialis/ Olecranon	Ham. o. hamati / Metakarp V
M. flexor digitorum superf.	Epicond. med./Proc. coronoideus/Radius	Mittelfalangen II-V
Tiefe Schicht		
M. flexor digitorum prof.	Ulna/ Memb. interossea/ Fascia antebr.	Endphalangen Digiti II-V
M. flexor pollicis longus	Radius/ Memb. interossea	Endphalanx Daumen
M. pronator quadratus	Ulna	Radius
Kurze Handmuskeln		
Hypothenar		
M. palmaris brevis	Palmaraponeurose	Haut Hypothenar
M. flexor digiti minimi brev.	Hamulus o. hamati/ Retinaculum flex.	Grundphalanx
M. abductor digiti minimi	Os pisiforme/ Lig. pisohamatum	Grundphalanx
M. opponens digiti minimi	Hamulus o. hamati/ Retinaculum flex.	Os metacarpale V
Thenar		
M. abductor pollicis brevis	Retinaculum flex./ Os scaphoideum	rad. Sesambein/ Grundphalanx
M. flexor pollicis brevis	Ret. flex./ Ossa trapezium u. capitatum	rad. Sesambein/ Grundphalanx
M. opponens pollicis	Ret. flex./ Os trapezium	Os metacarpale I
M. adductor pollicis	Os capitatum/ os metacarpale II	uln. Sesambein/ Grundphalanx

Tabelle 1: Überblick über die Muskeln des Unterarms und des Handgelenks.

Die Ansatzorte sind hierbei: Radius, Karpus bzw. Metakarpus, Finger und Daumen. Die Hand besitzt zudem noch eigene kurze Muskeln, die auf die Bereiche des Handtellers, des Kleinfingerballen (Hypothenar) und des Daumenballens (Thenar) verteilt sind. Einige Autoren konnten in Ihren MR-tomographischen bzw. makroskopischen Untersuchungen die Existenz von Muskelvariationen im Bereich der Hand und des Handgelenks beschreiben (Dodds 1990/ Zeiss 1992 u. 1995/ Polesuk 1998/ Timins 1999). Zahlreiche Varianten bestehen für den M. abductor digiti minimi brevis und longus im Hypothenargebiet, der oft akzessorische Muskelbäuche an unterschiedlichen Ursprüngen (M. flexor digitorum/ Retinaculum

flexorum/ Membrana interossea/ Ulna/ M. flexor carpi radialis) besitzt, die aber immer in den ursprünglichen Muskelanteil einstrahlen und an der Grundphalanx des Kleinfingers enden (Schmidt 1992/ Timins 1999).

Häufige unterschiedliche Ausprägungen zeigt auch der M. palmaris longus. In ca. 13-20% der Fälle fehlt der Muskel komplett. Normalerweise geht er in der distalen Hälfte des Unterarms in seine Endsehne über, die über das Retinaculum flexorum zieht, um dann in der Palmaraponeurose zu inserieren. In der Literatur sind jedoch Ausnahmen beschrieben, die als akzessorische Muskeläste in die Muskelgruppe des Hypothenar einstrahlen, eine zweiköpfige oder -bäuchige Aufteilung besitzen, oder eine im Gegensatz zur Normalversion umgekehrte muskelige Fiederung im distalen Bereich zeigen („Palmaris longus inversus variant“, Timmins 1999).

Die anatomischen Varianten des M. palmaris longus können, ebenso wie die Variationen im Kleinfingerballenbereich, besonders bei Hypertrophie zu Kompressionssyndromen des N. medianus im Karpaltunnel bzw. des N. ulnaris in der Loge de Guyon beitragen (Polesuk 1998).

2.1.3 Karpale Bandsysteme

Die Regio carpalis besteht aus einem unter Spannung stehenden dynamischen Ringsystem der Handwurzelknochen, die durch ein lückenloses, kompliziert aufgebautes Bandsystem zusammengehalten wird (Lichtman 1981/ Fisk 1984). Der distale Halbring ist durch interkarpale und karpometakarpale Bandstrukturen fixiert. Dagegen ist der Bereich des proximalen Handgelenks deutlich beweglicher und erlaubt in Kombination mit dem distalen Handgelenk den beschriebenen Bewegungsumfang.

In der Literatur werden die karpalen Bänder nach verschiedenen Prinzipien gegliedert. Taleisnik (1976) gliederte die Ligamente in extrinsische und intrinsische Bänder. Die extrinsischen Ligamente haben ihren Ursprung am Vorderarmknochen und setzen an den Karpalia an, während die intrinsischen Bänder am Karpus entspringen und dort auch inserieren. Eine weitere Einteilung erfolgte durch Modifikation mehrerer Systeme von Schmidt (1992) in Bänder der oberflächlichen, mittleren und tiefen Schicht.

2.1.3.1 Oberflächliche Schicht

In der oberflächlichen Schicht werden die sogenannten Handwurzelbänder (Retinaculum flexorum und extensorum) zusammengefasst.

Der superfizielle Anteil, der wie das Retinaculum flexorum aus der Fascia antebrachii hervorgeht, wird als Lig. carpi palmare bezeichnet.

Das 2-3 cm breite, in der „Tiefe“ liegende, Retinaculum flexorum überbrückt die von den Handwurzelknochen gebildete Rinne (zwischen der Eminentia carpi radialis und ulnaris) und ergänzt sie zu dem osteofibrösen Karpalkanal, durch den die Sehnen der langen Fingerbeuger und der N. medianus laufen. Der körpernahe Rand projiziert sich etwa über die proximale Reihe der Handwurzelknochen, während die distale Grenze über den Basen der Ossa metacarpalia liegt.

Die am Unterarm die Muskulatur umschließende Unterarmfaszie, die für die oberflächlichen Beuger und Strecker Ursprungsort ist, wird im Bereich des dorsalen Karpus durch quere Faserzüge des Retinaculum extensorum verstärkt. Zwischen den beiden Schichten liegen die Durchtrittsstellen für die Extensorensehnen (sechs Sehnenfächer), in denen die Sehnen von Sehnenscheiden umgeben sind.

Aufgabe der beiden Bandstrukturen ist es, die über die Handgelenke laufenden Sehnen zu zügeln und sie in ihrer richtigen Position auszurichten. Zusätzlich wirken sie einer Subluxation und Rotationsinstabilität des Karpus entgegen.

2.1.3.2 Palmare Bänder der mittleren Schicht

Die palmaren Anteile der Bandstrukturen lassen sich in die Ligg. radioscapnocapitatum und radiolunotriquetrum, die Elemente des TFCC, das kurze radiolunäre Band und das Lig. radioscapnocapitatum (Testutsches Band) unterteilen.

Das Lig. radioscapnocapitatum hat seinen Ausgangspunkt am weitesten radial im Bereich des Proc. styloideus radii und zieht über das Os scaphoideum schräg zum Os capitatum. Die Anheftung am Kahnbein ist hierbei jedoch nur schwach ausgeprägt.

Weiter ulnar entspringt das Lig. radiolunotriquetrum und zieht über die palmare Seite des Mondbeines zur palmaren Fläche des Os triquetrum.

Das kurze radiolunäre Band, das zur Gelenkkapsel zählt, verläuft in einer fast queren Verlaufsrichtung vom distalen und ulnaren Radius zur Vorderseite des Os lunatum. Dieses Band wurde erstmalig von Berger 1984 beschrieben und kontrovers

diskutiert. Manche Autoren stellen seine Existenz in Frage, andere betonen die Bedeutung für die Fixierung des Os lunatum (Rominger 1993).

Die Aufgabe der Bänder besteht in einer flexiblen Verbindung des Radius mit den Handwurzelknochen. Die palmaren Bänder sind im Gegensatz zur dorsalen Seite dicker und fester, was auf die frühere evolutionsgeschichtliche Beanspruchung mit vermehrter Greif- und Hängfunktion, sowie auf die palmigrade Position der vorderen Extremität von Primaten, die u.a. auf der Hand gehen, zurückzuführen ist (Schmidt 1992).

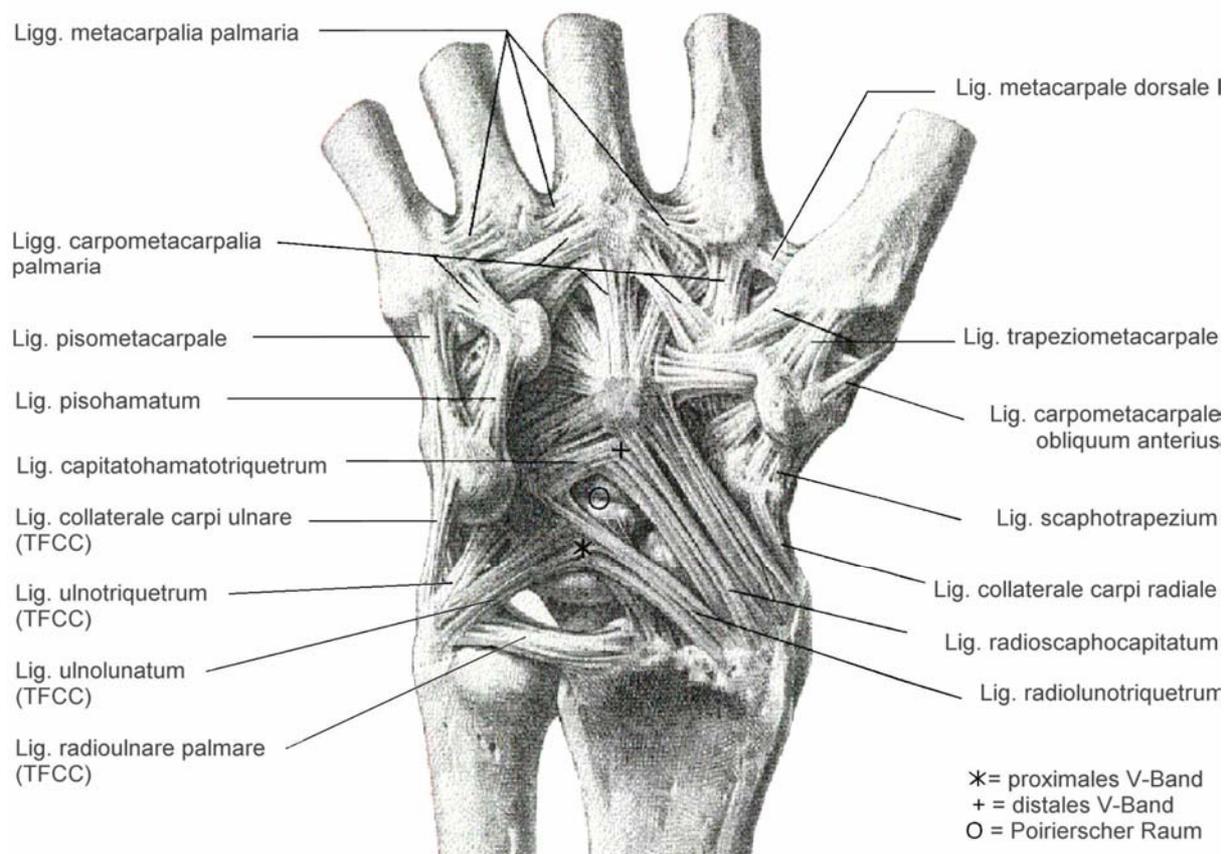


Abb. 1: Karpale Bandsysteme einer rechten Hand (Ansicht von palmar). Die Binnenbänder sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt (Abb. aus Schmidt, H.M., Lanz U: Chirurgische Anatomie der Hand. Hippokrates, Stuttgart 2002).

2.1.3.3 Dorsale Bänder der mittleren Schicht

Die dorsalen Bänder des Karpus sind in die Kollateralbänder (Lig. collaterale carpi radiale und ulnare), die dorsalen Anteile des TFCC, die Lig. radioscaphoideum und radiolunatum und die zwei Hauptbänder, Lig. radiotriquetrum und Lig. intercarpale dorsale unterteilt.

Das kurze, kräftige Lig. collaterale carpi radiale (vom Proc. styloideus radii zum Os scaphoideum) spannt sich bei der Ulnarabduktion, das schwache Lig. collaterale carpi ulnare (vom Proc. styloideus ulnae zu Os triquetrum und Os pisiforme) bei der Radialabduktion an (Frick 1992).

Die Ligg. radioscaphoideum, radiolunatum und radiotriquetrum nehmen alle am dorsalen distalen Radius ihren Ursprung und ziehen schräg über den Gelenkspalt der Articulatio radiocarpalis zu den jeweiligen Handwurzelknochen.

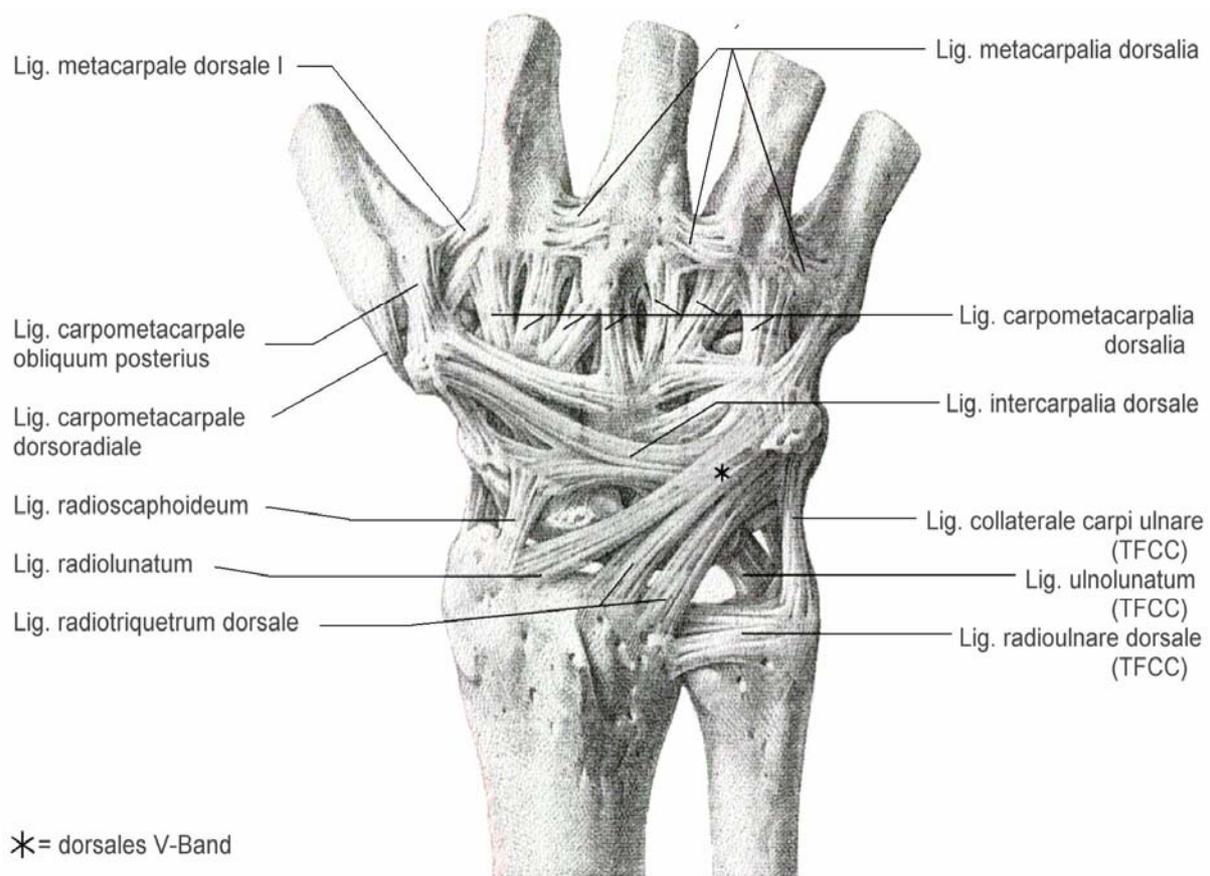


Abb. 2: Karpale Bandsysteme einer rechten Hand (Ansicht von dorsal). Die Binnenbänder sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt (Abb. aus Schmidt, H.M., Lanz U: Chirurgische Anatomie der Hand. Hippokrates, Stuttgart 2002).

Das Lig. radiotriquetrum, das den distalen Radius mit den dorsalen Flächen des Os scaphoideum, Os lunatum und triquetrum verbindet, bildet, mit dem zwischen Skaphoid und Triquetrum aufgespannten Lig. intercarpale, das V-Band des dorsalen Karpus (Schmidt 1992).

2.1.3.4 Binnenbänder der tiefen Schicht/ Intrinsicche Bänder

Die kurzfasrigen Ligg. intercarpalia palmaria und dorsalia und die Ligg. intercarpalia interossea überbrücken jeweils den Gelenkspalt zwischen zwei benachbarten Handwurzelknochen einer Reihe, auf der Palmarseite auch zwischen proximaler und distaler Knochenreihe. Die Bandstrukturen bauen die Ossa carpi in ein festes Gefüge ein, das lediglich Verschiebungen der Handwurzelknochen (und zwar vornehmlich der proximalen Reihe) längs der Seitenflächen gestattet (Frick 1992).

In der MR-tomographischen Auswertung und der klinischen Diagnostik ist das Lig. scapholunatum (SL-Band) und das Lig. lunotriquetrum (LT-Band) von besonderem Interesse.

Das SL-Band verläuft vom proximalen Pol des Os scaphoideum von seiner ulnaren Seite aus schräg zur radialen Seitenfläche des Mondbeines. Dieses Band ist sehr straff und kräftig gebaut und hat eine wichtige Funktion in der Stabilitätserhaltung des Karpus (siehe auch Kap. 2.2.4 und Kap 2.2.7.1 / Brown 1998). Die Innervation und Blutversorgung des Kahn- und Mondbeines wird unter anderem durch den neurovaskulären Strang (Lig. radioscapulolunatum/ Testutsches Band) gewährleistet. Das LT-Band verbindet die proximalen Anteile des Lunatum mit dem Triquetrum. Beide Bänder sind die am häufigsten verletzten Strukturen im karpalen Binnenraum und spielen somit in der Klinik und in der radiologischen Diagnostik eine große Rolle. Weitere intrinsicche Bänder des Karpus sind die Ligg. scaphotrapeziotrapezoideum, triquetrosaphoideum und das Lig. carpi radiatum („deltoid ligament“, distales V-Band). Das V-Band besteht aus drei Faserzügen, die das Os capitatum mit dem Os triquetrum, Os lunatum und Os scaphoideum verbinden. Häufig fehlen die zentralen Anteile zum Os lunatum, so dass ein V-förmiges, mit der Spitze nach distal, zeigendes Gebilde entsteht.

2.1.4 Gefäß-Nervenstraßen

2.1.4.1 Arteria radialis

Die Arteria radialis zieht von der radialen und palmaren Seite des Radius mit ihren Begleitvenen um das Os trapezium zum Handrücken. Hier verläuft sie von Muskeln begleitet durch die Tabatière, um dann wieder im Spatium interosseum metacarpi I auf die Volarseite der Hand zu gelangen und in den tiefen Hohlhandbogen (Arcus palmaris profundus) überzugehen. Vorher gibt die A. radialis palmar noch zwei

weitere, oftmals variabel gestaltete, Gefäßbögen zur A. ulnaris ab (Arcus radiocarpalis palmaris und Arcus intercarpalis palmaris) (Gelbermann 1983).

Auf der dorsalen Seite des Karpus bildet die A. radialis mit den Zuflüssen aus der A. interossea anterior und der A. ulnaris ebenfalls drei Gefäßarkaden (Arcus radiocarpalis dorsalis, Arcus intercarpalis dorsalis und Arcus metacarpalis proximalis et dorsalis).

Die arterielle Versorgung der Handwurzelknochen erfolgt somit aus der A. radialis und den drei zugehörigen Gefäßbögen auf palmarer und dorsaler Seite. Eine Ausnahme bildet das Os pisiforme, das ausschließlich von der A. ulnaris arterielles Blut erhält.

2.1.4.2 Arteria ulnaris

Die Arteria ulnaris begleitet den M. flexor carpi ulnaris am Unterarm bis zur Handwurzel, zieht mit dem N. ulnaris durch die palmar gelegene Loge de Guyon und geht distal im Bereich des proximalen V. Metakarpalknochen in den oberflächlichen Hohlhandbogen (Arcus palmaris superficialis) über.

In Höhe der distalen Ulna bzw. der proximalen Handwurzelknochen gibt die A. ulnaris Seitenäste zu den proximalen palmaren Gefäßbögen der A. radialis ab (s.o.). Etwas mehr distal, im Bereich der Loge de Guyon zwischen Os pisiforme und Hamulus ossis hamati, zweigt ein weiterer Nebenast zum Arcus palmaris profundus ab.

2.1.4.3 Nervus medianus

Der N. medianus verläuft in der Unterarmmittelstraße zwischen oberflächlichen und tiefen Beugern distalwärts. Nahe dem Handgelenk liegt der Nerv oberflächennah, dicht unter der verstärkten Fascia antebrachii. Im weiteren Verlauf zieht er mit den Sehnen der Mm. flexor carpi radialis und palmaris longus zum Canalis carpi. Hier verläuft der Nerv in enger Nachbarschaft und meistens ohne Krümmung gerade unter dem Retinaculum flexorum zur Palma manus. Im Regelfall zweigt sich der N. medianus am Ausgang des Karpaltunnels in seine Endäste auf. Zahlreiche Variationen liegen jedoch im Bereich des Hohlhandkanals vor (Lanz 1977). So sind verschiedene Modifikationen bzgl. des Abgangs des Ramus muscularis (thenaris), des Ramus accesorius oder hohe Teilungen beschrieben.

2.1.4.4 Nervus ulnaris

Der N. ulnaris, der in der Ellenstraße vom Ellenbogen zum Handgelenk zieht, teilt sich radial vom Erbsenbein in der Loge de Guyon auf dem Retinaculum flexorum in den Ramus profundus und den Ramus superficialis.

Der Ramus superficialis nervi ulnaris zweigt sich nach der Gabelung in Hautäste für den vierten und fünften Finger auf.

Der tiefe, motorische Anteil des Nervs und seine Begleitgefäße (A. und V. ulnaris) nutzen den Spaltraum zwischen Lig. carpi palmare, das seinen Befestigungsort am Kamm des Os pisiforme hat, und dem Retinaculum flexorum um zum Hypothenar und dessen Muskeln zu gelangen.

2.1.5 Loge de Guyon

Die Loge de Guyon befindet sich an der ulnaren Seite der Hand im Bereich des Hypothenars. N. ulnaris, A. ulnaris und entsprechende Begleitvenen ziehen durch den, mit Fettgewebe, ausgekleideten ulnaren Tunnel, um zur Hypothenarmuskulatur bzw. zur Hohlhand zu gelangen. Dieser ungefähr 3-4cm lange Kanal erstreckt sich in proximodistaler Richtung vom Os pisiforme bis zu den Ursprüngen der hypothenaren Muskulatur auf Höhe des Hamulus ossis hamati.

Der Boden des Tunnels wird durch die distalen Ausläufer der Fascia antebrachii (Lig. carpi palmare) und Faserzüge des Musculus palmaris brevis gebildet. Ferner verstärken die Sehne des M. flex. carpi ulnaris und subkutanes Baufett die Deckschicht (Denman 1978 u. 1979).

Das Retinaculum flexorum und das Lig. pisohamatum formen gemeinsam das Dach des „carpal ulnar neurovascular space“ Cobb 1996. Zusätzlich lassen sich akzessorische Bindegewebstreifen und Ursprungsfasern der Hypothenarmuskulatur identifizieren.

Die radiale Grenze wird aus der Verbindung des Bodens und dem Retinaculum flexorum bzw. den Ursprüngen der Thenarmuskeln gebildet.

Ulnar zieht der Fasziensboden proximal über das Os pisiforme und distal über die Eminentia hypothenaris und schafft so die ulnare Begrenzung der Loge de Guyon.

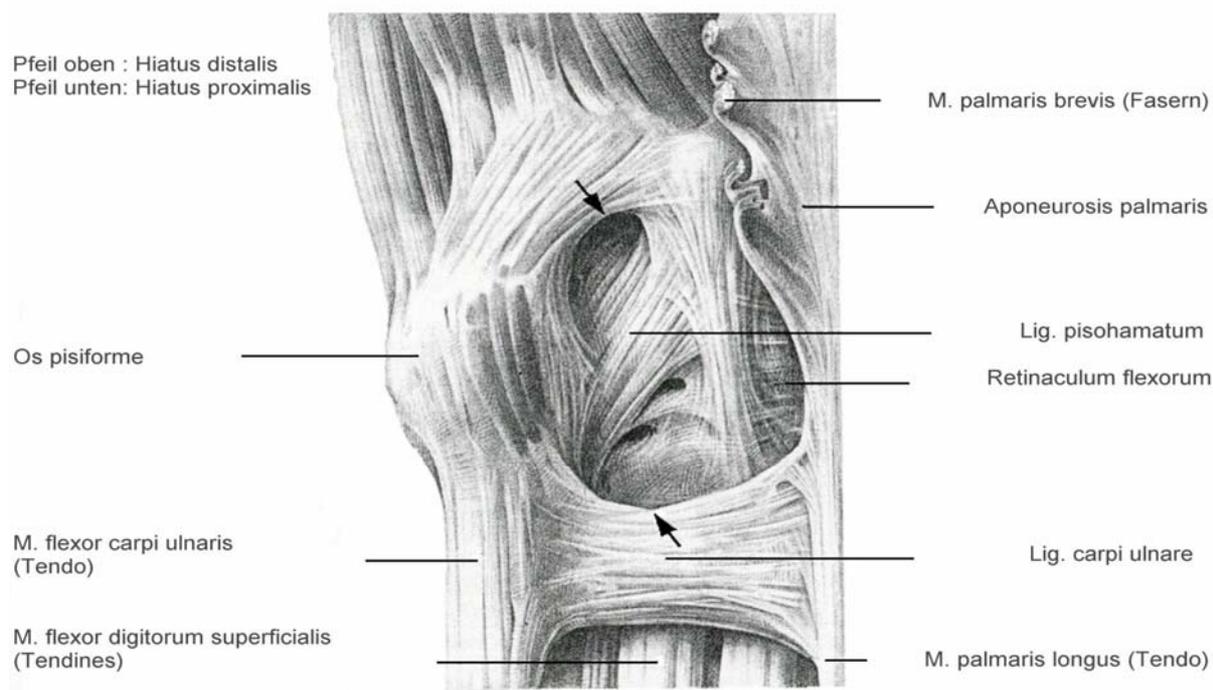


Abb. 3: Pforten und Wände der Loge de Guyon. (Abb. aus Schmidt, H.M., Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand. Hippokrates, Stuttgart 2002*).

2.1.6 Ulnarer Faserknorpelkomplex (TFCC)

Der ulnokarpale Komplex („TFCC“, Palmer 1981) ist ein kompliziert aufgebautes Gebilde, das sich vom distalen ulnaren Ende des Radius bis zur Basis des V. Metakarpalknochen ausdehnt. Es enthält folgende Bauteile: den Discus articularis, die Ligg. radioulnare dorsale und palmare, die Ligg. ulnolunatum und ulnotriquetrum, den Meniscus ulnocarpalis („ulnocarpal meniscus homologue“, Palmer 1981) und ein sternförmiges Band auf der Dorsalseite, das aus der Sehnenscheide des M. extensor carpi ulnaris und dem Lig. coll. carpi ulnare besteht. Somit lässt sich eine Unterteilung in den dreieckigen, faserknorpeligen Discus articularis und die zugehörigen Bandstrukturen, welche die Fixierung garantieren, vornehmen. Eine makroskopische, wie auch MR-tomographische Identifizierung bzw. Abgrenzung ist wie bei den karpalen Bändern nur schwer möglich, da die Elemente Durchflechtungen zeigen und ohne klar definierbare Grenzen ineinander übergehen. In histologischen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die ulnolunären bzw. ulnotriquetralen Bänder nicht an der Ulna, sondern an der palmaren Seite des TFCC entspringen (Nakamura 2001/ Connell 2001). Der TFCC übernimmt die Funktion eines Absorbers, um übermäßige Belastungen zwischen den Karpalia und der Ulna

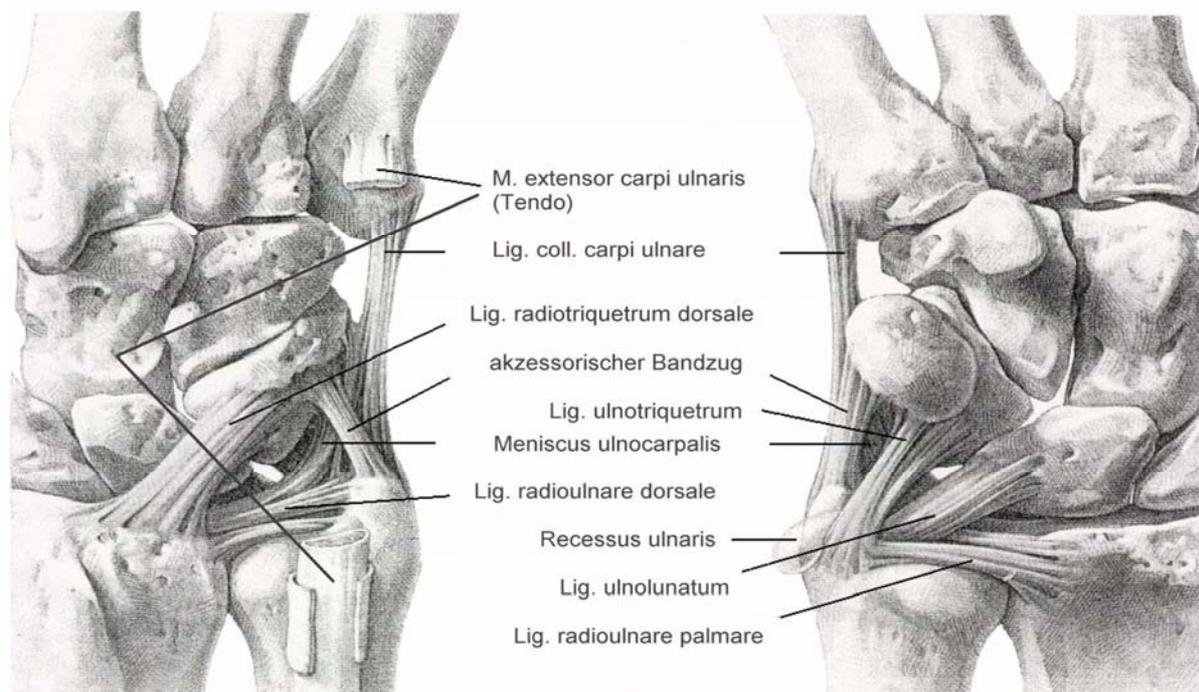


Abb. 4: Ulnokarpaler Komplex (TFCC) von dorsal (links) und palmar (rechts). (Abb. aus Schmidt, H.M., Lanz U: *Chirurgische Anatomie der Hand. Hippokrates, Stuttgart 2002*).

zu minimieren. Ferner gewährleistet er Drehbewegungen und stabilisiert maßgeblich das proximale Handgelenk (Palmer 1981/ Nakamura 1996 u. 1999).

2.2 Pathologien des Handgelenkes und ihre Darstellung im MRT-Bild

2.2.1 Frakturen

Normalerweise werden Frakturen des Handgelenks nicht primär anhand einer MRT-Untersuchung diagnostiziert. Hier sind weiterhin Projektionsradiographien, ggf. gefolgt von hochauflösenden CT-Bildern die Untersuchungsmethoden der ersten Wahl. In Fällen, in denen Patienten nach unauffälligen Röntgenaufnahmen weiterhin über Schmerzen im Handgelenksbereich klagen, ist eine MRT-Untersuchung zur Diagnosesicherung hilfreich.

Frakturen des Handgelenks betreffen in erster Linie den distalen Radius und das Os scaphoideum. Im Falle der Kahnbeinfraktur wurden die bisherigen Nachweismethoden – Knochenszintigraphie nach 48 h oder Gipsversorgung und Röntgenkontrolle – zunehmend zugunsten der MRT aufgegeben. Sogenannte okkulte Frakturen des Os scaphoideum, sind Frakturen, die initial röntgenologisch nicht erkennbar sind. Nach 2-5 Tagen einsetzende Resorptionsvorgänge am Frakturspalt bewirken eine Aufweitung der Bruchlinien und können jetzt radiologisch

nachgewiesen werden (Stäbler 2002). Im MRT-Bild ist diese Frakturart sofort nach dem Trauma sichtbar (Breitenseher 1997/ Hunter 1997/ Kukla 1997/ Van Gelderen 1998/ Gabler 2001). Sie imponiert als lineares Knochenmarködem mit Signalreduktion im T1- und Signalanhebung im T2-Kontrast. Ebenso ist die STIR-Sequenz in der Lage, die Frakturlinie und das Ödem gut darzustellen (Van Gelderen 1998). Die Sensitivität und Spezifität beträgt bei den genannten Sequenzen nahezu 100% (Breitenseher 1997). Ein Nachweis der Skaphoidfraktur ist insofern wichtig, da Pseudarthrosen und avaskuläre Knochennekrosen insbesondere des proximalen Fragments mit deutlich schlechterer Prognose auftreten können. Schindler (1996) ist der Meinung, die Indikation zur Durchführung einer MRT-Untersuchung bezüglich Diagnostik der Skaphoidfraktur großzügig zu stellen. Die Untersuchung von Dorsay (2001) ergab zwischen primärer MRT-Untersuchung und konventionellen Verlaufsrontgenbildern nach Immobilisation des Handgelenks einen ähnlichen Kosten-Nutzen-Effekt.

Die MRT zeigt im Nachweis von seltenen Überlastungsfrakturen an der diaphysären Ulna bzw. am Kahnbein ein weiteres Einsatzgebiet (Lee 1988/ Breitenseher 1997/ Koksinen 1997).

2.2.2 Ulnokarpales Impaktionssyndrom

Das ulnokarpale Impaktionssyndrom tritt bei einer Ulna-Plus-Variante oder bei einer relativ zu langen Elle nach Radiusfraktur auf. Um einen Ulna-Vorschub zu diagnostizieren, wird der radioulnare Index bestimmt, der die Gelenkflächen der distalen Ulna und des distalen Radius in einer posterioranterioren Nativ-Röntgenaufnahme bei 90° abduzierter Schulter, rechtwinkligem Ellenbogen und Normal-Null-Stellung des Handgelenkes in Korrelation setzt. Diese Standardposition muss eingehalten werden, da bei Pronation des Handgelenkes der Ulna-Vorschub zunimmt.

Aufgrund der täglich auftretenden Kräfte, die von der Hand über das Handgelenk auf den Unterarm übertragen werden, kommt es bei einer Ulna-Plus-Variante zu einer vermehrten Belastung des TFCC, des ulnaren Karpus und der distalen Ulna. In Folge der Druckbelastung nimmt der TFCC in seiner Höhe ab und kann durch die fortschreitende Degeneration auch Perforationen aufweisen. An der ulnaren Seite des Os lunatum, dem distalen Ulnaende, sowie am radialseitigen Triquetrum treten Chondromalazie, subchondrale Sklerosierung, Zystenbildung bzw. fortschreitende

Gelenkknorpeldestruktionen auf und zeigen im Endstadium so das Vollbild einer Arthrose (Escobedo 1995). In seltenen Fällen, kann das ulnokarpale Impaktionssyndrom auch bei Ulna-Negativ- oder Ulna-Neutral-Varianten beobachtet werden (Friedmann 1991/ Tomaino 1998). Bei ulnarem Handgelenksschmerz, negativem radioulnarem Index und unauffälligen konventionellen Röntgenbildern kann unter Berücksichtigung der Differentialdiagnosen, wie interossären Ganglien, echten Zysten und M. Kienböck trotzdem ein ulnokarpales Impaktionssyndrom vermutet werden, da durch die Pronation im Handgelenk mit gleichzeitigem Faustschluss ein vermehrter Ulna-Vorschub mit erhöhter Kraftwirkung auf den TFCC auftritt (Cerezal 2002). Die MRT kann diese Diagnose bei unauffälligen konventionellen Röntgenbildern klar bestätigen (Stäbler 1997).

Durch das Anprallen der Ulna entstehen in der Folge ein Knochenmarködem sowie subchondrale Zysten. Im Gegensatz zur Lunatumnekrose sind die Veränderungen am proximalen und ulnaren Anteil des Os lunatum lokalisiert und helfen so das ulnokarpale Impaktionssyndrom gegen die Lunatumnekrose abzugrenzen.

Projektionsradiographische Aufnahmen sind bei ulnarem Handgelenksschmerz die primäre Standarduntersuchungsmethode. Um eine genaue Beurteilung aller involvierten Strukturen zu erhalten, sind weitere Untersuchungen nötig. Die Arthrographie oder Szintigraphie zeigen ähnliche Sensitivitäten wie die MRT, die Spezifität ist jedoch geringer. Im MRT-Bild lassen sich auch kleinere anatomische Strukturen und ihre pathologischen Veränderungen gut beurteilen. In der subchondralen Region der beteiligten Knochen sind in den T1-gewichteten Bildern schwache Signalitätsänderungen zu finden. In T2-gewichteten Bildern weist eine Signalintensitätsabnahme auf eine Sklerose oder Fibrose des Knochenmarkes hin, eine Zunahme ist dagegen mit Knochenmarködem oder subchondralen Zysten vereinbar (Escobedo 1995/ Imaeda 1996). Irritationen oder beginnende Destruktionen des hyalinen Gelenkknorpels sind mit der Standard-MRT nur schwer zu diagnostizieren (Dalinka 1991/ Kang 1991). Escobedo (1995) betont, dass Gelenkknorpelveränderungen für die Diagnose nicht unbedingt nötig sind. In seiner Studie berichtet er über einen Fall von ulnokarpalem Impaktionssyndrom, bei dem sowohl radiologisch als auch szintigraphisch bzw. magnetresonanztomographisch keine Veränderungen am Gelenkknorpel nachzuweisen waren. Normalerweise kann die MRT aber die stetig auftretenden Knochenveränderungen aufdecken und somit die Diagnose eines ulnokarpalen Impaktionssyndroms sichern.

2.2.3 Skaphoidpseudarthrose und Osteonekrose

Skaphoidfrakturen mit verzögerter Knochenbruchheilung über 6 Monate hinaus, werden als Pseudarthrosen bezeichnet. Die Gründe für das relativ häufige Auftreten dieser Erkrankung, sind unzureichende Ruhigstellung, Dislokation und Sperrung der Fragmente, zusätzliche, begleitende karpale Instabilität, ein zu spätes Erkennen der Fraktur und die anatomischen Besonderheiten der Durchblutung des Kahnbeins (Pechlaner 1987/ Schmitt 1997).

Die Entwicklung der Pseudarthrose verläuft in verschiedenen, abgrenzbaren Stadien: Zu Beginn findet sich eine Demineralisierungs- und Resorptionszone im Bereich des Frakturspalt. In der Folge treten Resorptionszysten an beiden Fragmentenden auf und zeigen die fehlende Konsolidierung der beiden Knochenanteile. Eine irreversible Frakturspaltaufweitung mit Sklerose und osteophytären Randanbauten charakterisiert schließlich das Vollbild der Kahnbeinpseudarthrose. Gleichzeitig ist eine Ischämie des proximalen Fragments durch die nun unterbrochene Blutversorgung möglich. Die Reparationsprozesse werden durch Neovaskularisation und fibröse Überbauung des Fragmentspaltes eingeleitet. Eine fehlgeschlagene Erneuerung des Knochengewebes und der arteriellen Blutversorgung endet in der manifesten Osteonekrose des proximalen Kahnbeinanteiles.

Die MRT erlaubt eine Evaluierung der Vitalität der Fragmente und die Charakterisierung des fibrovaskulären Gewebes im Pseudarthrosenspalt. Der proximale Knochenanteil, der Fragmentspalt und die angrenzenden Frakturbezirke des distalen Fragments zeigen eine Signalintensitätsminderung im T1-gewichteten Bild und eine Signalerhöhung in der T2-gewichteten und fettunterdrückten Abbildung (Desser 1990/ Schmitt 1996). Eine noch erhaltene arterielle Perfusion des proximalen Anteils erhöht dabei das Signal im T1-gewichteten Bild nach Kontrastmittelgabe und lässt somit bei unterschiedlichen Signalintensitätsabstufungen eine gewisse prognostische Aussage bzgl. der Ausheilung der Pseudarthrose zu (Schmitt 1997). Eine direkte Abbildung des fibrösen Kallus ist röntgenologisch nur bedingt möglich. Im MRT-Bild zeigt sich aber in allen Sequenzen ein signalarmes Band, mit fokalen oder linearen Signalverstärkungen (Schmitt 1997/ Stäbler 2002). Vorhandene Zysten stellen sich im T2-gewichteten Bild, im Gegensatz zu Sklerosierungen, signalstark dar. Zusätzlich lässt sich im distalen Fragment, im Bereich der Taille, aufgrund der

Hypervaskularisation ein Signal beobachten, das als Ausdruck eines Knochenmarködems gewertet wird.

2.2.4 Lunatumnekrose (Morbus Kienböck)

Aseptische Knochennekrosen betreffen meistens das Os lunatum (M. Kienböck) oder seltener das Os scaphoideum (Morbus Preiser). Seltene Varianten können auch an den übrigen Karpalia (Os trapezoideum-Morbus Agati/ Os triquetrum-Morbus Witt/ Os capitatum/ Os hamatum), an den Metakarpalbasen (M. Mauclair), an den Phalangealbasen (M. Thiemann) oder im gesamten Bereich der Handwurzelknochen (M. Caffey) auftreten.

Die MRT ist hierbei ein sensitives Verfahren, um Osteonekrosen an der Hand frühzeitig, bei noch negativem Röntgenbefund, aufzudecken (Sowa 1989/ Desser 1990/ Trumble 1990/ Steinbach 2000). Zudem sind in gewissen Grenzen Aussagen über die Blutversorgung und die Vitalität des Knochens möglich (Schmitt 1997/ Stäbler 2002).

Die Lunatumnekrose tritt meistens bei Männern im Alter zwischen 20 und 40 Jahren auf. Als Ursache kommt ein Bagatelltrauma oder eine mechanische Überbelastung mit Zerstörung der versorgenden Arterien in Frage (Lichtmann 1994). Ein weiterer prädisponierender Auslöser ist durch eine Ulnarvarianterkrankung und damit entstehende Inkongruenz des Radiokarpalgelenkes gegeben. Bei dieser Konstellation treten verstärkt Scherkräfte am Mondbein auf, die zu Mikrofrakturen und Nekrosen führen (Hulten 1928/ Linscheid 1987). Verschiedene Autoren teilten die Lunatumnekrose in Stadien ein und bezogen sich dabei entweder auf das morphologische Erscheinungsbild in konventionellen Röntgenaufnahmen (Decoux 1957/ Lichtmann 1982), oder unterteilten die Osteonekrose nach ihrem MR-tomographischen Bild (Schmitt 1996/ Lichtmann 1994). Stäbler und Vahlensiek (2002) veröffentlichten im Kapitel „Handgelenk“ des Buches „MRT des Bewegungsapparat“ eine Einteilung, die sowohl die MRT-Morphologie in den verschiedenen Stadien, als auch das konventionelle Röntgenbild berücksichtigt (siehe auch Tab.2):

Im Anfangsstadium (Ia) führt eine länger andauernde Druckbelastung zu einer Stressreaktion mit Knochenmarködem bei noch intakter Durchblutung. Die konventionellen Röntgenbilder sind noch unauffällig oder zeigen eine vermehrte Sklerosierung (Ib). In der MRT-Aufnahme findet sich eine geringgradige Signalreduktion im T1-Bild, bei zunehmender Signalintensität im T2-Bild. Die

MRT- Stadium	T1- Gewichtung	MR- Morphologie	Gd- Aufnahme	T2- Gewichtung	Konventionelles Röntgen
Ia	Signal -	homogene, diffuse Signalveränderung	ja	Signal +	unauffällig
Ib	Signal -	homogene, diffuse Signalveränderung	ja	Signal +	Sklerose
II	Signal -	inhomogene, geographische Signalveränderung	fokal/ fleckig	Signal – od. +	Sklerose Zysten
III	Signal -	Höhenabnahme, Fragmentierung	nein	Signal -	Zysten Höhenabnahme Fragmentation
IV	Signal -	Sekundärarthrose	Os lunatum: nein synoviale Proliferationen: ja	Signal -	zusätzlich degenerative Veränderungen

Tabelle 2: MRT- und konventionell radiologische Stadieneinteilung der Lunatumnekrose nach Stäbler u. Vahlensiek/ Signal - = niedrige Signalintensität; Signal + = hohe Signalintensität. In Stadium I bleibt die Form und Struktur des Mondbeines erhalten, in Stadium II zeigt sich im Röntgenbild eine beginnende Sklerose, die im Stadium III in eine Fragmentation übergeht. Das Stadium III kann weiter in Stadium IIIa ohne sekundärer Radiokarpalarthrose und Stadium IIIb mit Arthrose unterteilt werden. Stadium IV zeichnet sich durch sekundär bedingte Veränderungen besonders auch am Processus styloideus radii aus. Diese sind durch synoviale Proliferation und an Kontrastmittelspeicherndem Granulationsgewebe erkennbar.

Kontrastmittelaufnahme kann insbesondere durch fettunterdrückte Sequenzen nachgewiesen werden. Im weiteren Verlauf (II) führt das chronisch bestehende Knochmarködem zu einer Markraumfibrose und Sklerosierung der Trabekel mit eingeschränkter Blutversorgung dieser Bezirke. Es bildet sich eine Nekrose mit umschriebener Zystenbildung und verstärktem Signalverlust im T1-Bild. In den nekrotischen Anteilen wird kein Kontrastmittel mehr aufgenommen und die Signalintensität im T2-Bild stagniert. Im Spätstadium (III) erfährt das Os lunatum einen zunehmenden strukturellen Umbau mit sich ausbreitenden Nekroseanteilen, Höhenminderung und Fragmentation. Hiermit kann es zu einer funktionellen Insuffizienz des SL-Bandes durch Ruptur, Gelenkspaltverminderung mit Styloidarthrose und zu einer Subluxationsstellung des Os scaphoideum oder zu einem Karpaltunnelsyndrom kommen (siehe auch Kap. 2.2.7.1). Eine homogene Kontrastanreicherung findet in diesem Stadium nicht mehr statt. Eine KM-Aufnahme ist allenfalls in den Randbezirken oder punktförmig in reparativem Granulationsgewebe nachweisbar. Das Stadium IV entspricht einer chronischen

Lunatumnekrose mit weiter fortschreitenden degenerativen Veränderungen, Radiokarpalarthrose, subchondraler Zystenbildung und karpaler Instabilität (Sowa 1989/ Desser 1990/ Trumble 1990/ Schmitt 1997/ Martini 1998/ Steinbach 2000/ Stäbler 2002).

Oft zeigen auch andere Erkrankungen ein ähnliches Bild in der MRT und führen häufig zur Fehldiagnose einer Lunatumnekrose. Differentialdiagnostisch müssen im frühen Stadium ein ulnokarpales Impaktionssyndrom, intraossäre Ganglien oder Osteoid-Osteome ausgeschlossen werden.

2.2.5 Tumore

Tumoröse Raumforderungen des Handgelenks sind selten. Neben den primär knochenständigen Tumoren, wie Enchondrom, Osteoidosteom und Osteochondrom, finden sich hauptsächlich benigne Weichteiltumore im Bereich der Hand bzw. des Handgelenks (Butler 1960). In hohem Prozentsatz sind dies Ganglien, Riesenzelltumoren der Sehnenscheiden, Hämangiome, Lipome oder arteriovenöse Fisteln (Miller 1994/ Peh 1995/ Capelastegui 1999/ Garcia 2001). Eine Vielzahl radiologischer Untersuchungstechniken, wie Projektionsradiographie, Ultraschall und Computertomographie können diese pathologischen Erscheinungen zufriedenstellend darstellen. Die MRT hat bei den palpablen Tumoren nach einer Studie von Capelastegui (1999) eine Sensitivität von 94%. Eine sichere Unterscheidung zwischen gut- und bösartigen Tumoren mit der MRT ist nur bedingt möglich. Da aber im Handgelenksbereich oft nur benigne Raumforderungen mit charakteristischen radiologischen Zeichen auftreten, wird die Einordnung erleichtert (Peh 1995/ Binkovitz 1990). Eine Biopsie, wie in den meisten Diagnose-Algorithmen gefordert, gibt endgültig Aufschluss über die Dignität des Tumors.

2.2.5.1 Knochenständige Tumore

Die Häufigkeit der primären Knochentumore im Handgelenksbereich ist sehr gering. In der Literatur schwanken die Angaben zwischen 16% und 2% (Dahlin 1995/ Murray 1999). Dabei nehmen die benignen Raumforderungen, wie Enchondrom und Osteoidosteom mit 84% den größten Anteil ein. Die MRT bietet neben der Computertomographie als Untersuchungstechnik der ersten Wahl, die Möglichkeit, die Knochenstruktur und die periphere Ausbreitung in die Weichteile zu beurteilen und lässt so die Einordnung und das Staging des Tumors zu.

Der häufigste benigne knorpelige Tumor der Hand ist das Enchondrom. 40% aller *Enchondrome* des Körpers treten an den Phalangen der Hand und 10% an den Mittelhandknochen auf. Ein Befall der Karpalia ist dagegen ungewöhnlich. Im Röntgenbild stellt sich der Tumor als diaphysäre intramedulläre Läsion mit ausgedünnten Trabekeln und punktförmigen Verkalkungen der Knorpelmatrix dar. Die MRT zeigt in der Gradientenechosequenz eine hyperintense Läsion mit diffus verteilten Signalauslöschungen als Hinweis auf Knorpelverkalkungen. Bei Verdacht einer malignen Transformation und einer peripheren Bindegewebeinfiltration kann die MRT wichtige Zusatzinformationen erbringen (Garcia 2001).

Das *Osteoidosteom* ist ein gutartiger, meist bei jüngeren Männern auftretender, osteoblastischer Tumor an den Phalangen und Metakarpalknochen. Röntgenologisch zeigt sich eine kortikale Auftreibung mit Sklerose, in deren Zentrum sich häufig erst computertomographisch ein rundlicher Aufhellungsherd (Nidus) darstellen lässt. Die CT ist momentan bei der Evaluierung des Osteoidosteoms die Untersuchungsmethode der Wahl. Das begleitende Ödem der Weichteile und des Knochenmarks kann aber im MRT-Bild mit einer Signalintensitätserhöhung in der T2-gewichteten- und in der STIR-Sequenz gut dargestellt werden. Als Differentialdiagnose kommt eine lokale Weichteilinfektion bzw. eine Stressreaktion in Betracht (Biebuyck 1993).

Der häufigste, mit 3%iger Prävalenz an der Hand vorkommende maligne Knochentumor, ist das *Chondrosarkom* (Wilner 1982/ Dahlin 1995/ Berquist 1996). In den konventionellen Röntgenbildern zeigen sich lytische Läsionen mit geringer Beteiligung des Knochenmarks. Die MRT und CT haben hierbei ihre Indikation in der Darstellung der kortikalen Erosionen und der peripheren Weichteilinfiltration (Garcia 2001).

2.2.5.2 Weichteiltumore

Die Projektionsradiographie stößt bei der Erkennung von Weichteiltumoren an ihre Grenzen. Die Magnetresonanztomographie und die sonographische Untersuchung können dagegen die verschiedenen Raumforderungen effektiv abbilden (Miller 1994/ Capelastegui 1999).

Ganglien des Handgelenks sind mit 59 % der Weichteiltumore sehr häufig. Man findet sie oft an der Dorsalseite des Handgelenks im Bereich der Gelenkkapsel. Sie sind mit muköser Flüssigkeit gefüllt und von einem fibrösen Wall umgeben. Im

Handwurzelbereich ist der Ursprungsort oftmals das SL-Band. Zusätzlich können sie im Knochen, z.B. als intraossäre Ganglien des Os lunatum, auftreten (Tanaka 1995). Die Gelenke an der Handwurzel kommunizieren gelegentlich mit den Ganglien und erlauben einen Flüssigkeitsübertritt in die Zyste. Die so entstehende Druckerhöhung und damit verbundene Expansion verursacht dem Patienten Beschwerden.

Der muköse Inhalt zeigt ähnliche magnetresonanztomographische Eigenschaften wie Wasser. Er stellt sich in der T1-gewichteten Sequenz mit gleichem Signal wie die Muskulatur dar und zeigt eine Signalintensitätszunahme in der T2-gewichteten Aufnahme (Steinbach 2000/ Garcia 2001). Intraossäre Ganglien sind in der Projektionsradiographie zu einem großen Prozentsatz als fokale Aufhellungen mit einem umschriebenen Sklerosesaum identifizierbar. Die MRT ist das sensitivste Untersuchungsverfahren und kann die intraossären Strukturen in der T2-gewichteten Aufnahme oder in der STIR-Sequenz durch eine umschriebene Signalintensitätszunahme darstellen (Tanaka 1995/ Steiner 1996). Die MRT ist für Differenzierung und somit für die präoperative Planung hilfreich (Steinbach 2000/ Garcia 2001).

Der *Riesenzelltumor* der Sehnenscheiden stellt mit 12% den zweitgrößten Anteil der Weichteiltumoren. Der Tumor findet sich oft strecksehnenseitig und ist meistens indolent. Die Raumforderung beinhaltet ein lockeres Bindegewebe mit eingestreuten multinukleären Riesenzellen und intrazytoplasmatischen Fettgewebe (Karasick 1992). Die enthaltenen Hämosiderinablagerungen bewirken im T1- und T2-Kontrast eine Signalintensitätsminderung (De Beuckeleer 1997). Besonders der Signalverlust im T2-gewichteten Bild, der normalerweise bei anderen Weichteiltumoren nicht zu finden ist, hilft differentialdiagnostisch zwischen Fibromen und Sehnenscheiden zu unterscheiden.

Weitere häufige Tumore sind neben den superfiziellen *Hämangiomen* der Haut und des Unterhautfettgewebes, auch die intramuskulären Hämangiome. Im projektionsradiographischen Bild können eventuell kleine runde Kalzifikationen (Phlebolithen in den langsam fließenden Gefäßen) entdeckt werden (Garcia 2001). Neben der Angiographie, der Computertomographie und dem Ultraschall, kann die MRT, wenn auch nur eingeschränkt, intramuskuläre Hämangiome darstellen. In der Studie von Capelastegui (1999) wurden nur 4 von 9 dieser vaskulären Tumoren korrekt erkannt. Im T1-gewichteten Bild stellen sie sich mit einem schwachen, in der T2-gewichteten Aufnahme mit einem starken Signal dar (Nelson 1990).

Lipome kommen an der Handwurzel mit einer Häufigkeit von 1%, meistens im Bereich des Thenars oder des Hypothenars, vor (Miller 1994). Sie sind durch ihr auffallendes Fettsignal, ihre eindeutige Abgrenzbarkeit und ihre lobuläre Architektur (Muskelsepten) einfach zu diagnostizieren (Peh 1995).

2.2.6 Nervenkompressionssyndrome

2.2.6.1 Karpaltunnel

Das Karpaltunnelsyndrom (CTS) ist das häufigste Kompressionssyndrom peripherer Nerven mit schmerzhafter Neuropathie, Parästhesien in den radialen 2½ Fingern und Atrophie des Thenar. Die Ursachen für die Kompression des Nervus medianus innerhalb des Karpalkanals werden in zwei Kategorien eingeteilt.

1. Pathologische Veränderungen, die den Karpalkanal von außen einengen, wie z.B. Raumforderungen jeglicher Genese, posttraumatische Knochenfehlstellungen und aseptische Knochennekrosen mit daraus entstehender karpaler Instabilität.
2. Raumforderungen innerhalb des Karpalkanals, wie z.B. Tumore, Entzündungen, Muskelhypertrophie, rheumatoide Arthritis mit Pannusbildung bzw. Tenosynovitis, und exzessive Fettansammlungen

Neben den klinischen Zeichen bzw. Tests, werden elektrophysiologische Messungen (Nervenleitgeschwindigkeit, Elektromyogramm,) mit eingeschränkten Sensitivitäten und Spezifitäten zur Diagnostik des CTS eingesetzt (Katz 1991/ Jablecki 1993). Die konventionelle Röntgenuntersuchung und die CT sind im allgemeinen nicht zur Diagnostik geeignet, da sie lediglich eine knöcherne Einengung des Karpalkanals bzw. Verkalkungen in den Weichteilen sichtbar werden lassen. Eine Alternative zur radiologischen Abklärung ist die Sonographie, die zwar einen geringeren Gewebekontrast und Schwächen in der Darstellung der knöchernen Deformitäten oder Ganglien zeigt (Buchberger 1992 u. 1997), aber von Keberle (2000), wegen der einfacheren, problemloseren Durchführung und der geringeren Kostenbelastung der MRT gleichgestellt wird.

Seit Ende der 80iger Jahre hält auch die MRT Einzug in die Diagnosestellung des CTS (Middleton 1987/ Mesgarzadeh 1989). Das Handgelenk wird in Neutralstellung mit T1-, T2- und PD-gewichteten Aufnahmen in axialer Schichtung untersucht. Der N. medianus kann hierbei als flach-ovuläre Struktur mit mittlerer Signalintensität identifiziert werden (Steinbach 2000). Beim CTS führen MR-tomographisch

verschiedene Abbildungskriterien zur Diagnose: In der Untersuchung von Brahme (1997) konnten Sensitivitäten von 91-100% und Spezifitäten bis zu 87% gezeigt werden. Die Studie von Jarvik (2002) zeigte in der Abbildung der Signalintensitätserhöhung des N. medianus zusammen mit der Beurteilung der Morphologie (Abflachung des Nervs), verglichen mit der Messung der Nervenleitgeschwindigkeit und einem Handgelenksschmerzdiagramm, nur eine Sensitivität von 88% bei einer schwachen Spezifität von 39%. Er fordert eine systematische Einordnung mehrerer MR-Kriterien in ein Modell und eine weiterführende wissenschaftliche Auseinandersetzung. Steinbach (2000) ist aufgrund der geringen Sensitivität der Meinung, die MRT sollte nur bei folgenden Indikationen eingesetzt werden:

- (1) Bei vorhandenem klinischen Verdacht und negativen EMG-Ergebnissen,
- (2) Zur Aufklärung der Ätiologie,
- (3) Für die präoperative Positionsbestimmung des N. medianus bei endoskopischen Verfahren,
- (4) Zur postoperativen Kontrolle bei erneut auftretenden Symptomen.

2.2.6.2 Loge de Guyon

Bei einer Einengung des N. ulnaris, kann es ähnlich wie beim CTS des N. medianus zu einem Kompressionssyndrom kommen. Shea u. Mc Clain (1969) unterscheiden drei verschiedene Läsionstypen des N. ulnaris im Bereich der Loge de Guyon. Typ 1 umfasst Schädigungen im Gebiet des Os pisiforme bis zur Bifurkation des Nervs, die motorische und sensible Ausfälle nach sich ziehen. Kompressionen des Ramus profundus nervi ulnaris im Hiatus distalis ergeben mögliche Funktionseinschränkungen der Kleinfingerballenmuskulatur und werden als Typ 2 bezeichnet. Typ 3 umfasst Schädigungen im Verlauf des oberflächlichen Nervenastes, die zu einer Lähmung des M. palmaris brevis und zu sensiblen Ausfällen führen. Gross u. Gelbermann (1985), die eine genaue anatomische Untersuchung zur Anatomie der Loge de Guyon und zum Verlauf und Aufteilung des Nervus ulnaris durchführten, teilten den ulnaren Tunnel in 3 Zonen ein, die dem möglichen Läsionsmuster von Shea und Mc Clain entsprechen.

Zahlreiche Erkrankungen bzw. Auslöser können diese Neuropathie bewirken. Hierzu gehören: Frakturen (Os pisiforme/ Hamulus ossis hamati/ Basen der Metakarpalia/ Radius) (Gross 1985), Knochenanomalien (zweigeteilter Hamulus ossis hamati/

Pisiform-Hamatum Koalition) (Greene 1981/ Berkowitz 1992), Tumoren im Bereich des Hypothenars (Lipome/ Ganglien/ Riesenzelltumoren) (White 1962/ Shea 1969/ Gross 1985/ Millberg 1980/ Kobayashi 2001/ Bui-Mansfield 2002), vaskuläre Ursachen (Thrombose oder Aneurysma der A. ulnaris) (Kalisman 1982), Muskelvariationen (M. abductor digiti minimi/ M. palmaris longus) (O'Hara 1988/ Dodds 1990/ Zeiss 1995/ Ruocco 1998/ Timins 1999), Radfahrerlähmung durch Druck von außen (Eckman 1975), chronische Polyarthritits (Taylor 1974), Pisotriquetralarthrose, Hypertrophie von Sehnen bzw. Bandstrukturen (Lig. carpi palmare/ Sehne des M. flexor carpi ulnaris) oder der Morbus Dupuytren (Salzberg 1987).

2.2.7 Erkrankungen der Bänder

2.2.7.1 Interossäre Bänder

Das Lig. scapholunatum (SL-Band) und das Lig. lunotriquetrum (LT-Band) sind wichtige intrinsische Bandstrukturen, die das proximale gegen das distale Handgelenk separieren und durch die Verbindung der proximalen Karpalreihe den Karpus stabilisieren. Diese Binnenbänder sind die am häufigsten verletzten Bandstrukturen an der Hand und können in der Folge degenerieren oder rupturieren (Brown 1998).

Nach einem Trauma des Handgelenks, mit Sturz auf die ausgestreckte Hand, kann das SL-Band rupturieren. Diese Insuffizienz ermöglicht eine Rotation des dann mobilen proximalen Anteils des Os scaphoideums nach dorsal mit Knorpelschädigung im Bereich des Proc. styloideus radii. Die daraus resultierende karpale Instabilität wird als Rotationssubluxation des Skaphoids (RSS) bezeichnet. Die damit verbundene Druckentlastung im Radiokarpalgelenk erhöht die Krafteinwirkung des Os capitatum auf das Lunatum mit konsekutiver Knorpelschädigung. In der Folge kann sich eine Luxation bzw. Proximalwanderung des Os capitatum bei fehlendem Widerlager in die, durch das rupturierte SL-Band entstandene, Lücke zwischen Lunatum und Skaphoid mit Annäherung in Richtung Radius ergeben. In diesem späten Stadium („scapholunate advanced wrist collapse“/SLAC) treten degenerative Veränderungen wie Styloidarthrose oder Arthrose im Bereich des ulnaren Mediokarpalgelenkes auf (Stäbler 1997). Der karpale Kollaps kann neben einer traumatischen Genese mit solitärer SL-Band-

Ruptur auch durch die degenerative Veränderung mit konsekutiver Insuffizienz des Lig. scapholunatum im Rahmen des M. Kienböcks auftreten (siehe dort).

Bei der Lunatumluxation sind neben dem SL-Band sämtliche Lunatumligamente und auch der ulnokarpale Komplex verletzt. Das Os lunatum verliert seine Artikulation sowohl mit dem Os capitatum als auch mit dem Radius und disloziert mit einer 90 Grad Kippung nach palmar. Bei einer gleichzeitigen Verletzung des LT-Bandes und der ligamentären Verbindungen der Unterarmknochen mit dem Triquetrum spricht man von einer mittkarpalen Luxation. Neben der Dislokation des Os capitatum findet sich zusätzlich eine moderate Lunatumluxation mit Achsenkippung nach palmar (Schmitt 1997/ Breitenseher 1997/ Connell 2001/ Stäbler 2002).

2.2.7.2 Ulnarer Faserknorpelkomplex (TFCC)

Der TFCC ist ein wichtiger Komplex, der das ulnokarpale Kompartiment puffert und im proximalen Handgelenk als stabilisierende Größe wirkt. Palmer führte 1989 eine Läsionseinteilung des ulnokarpalen Komplexes ein, die bis heute ihre Gültigkeit hat:

Klasse I: Traumatisch	Klasse II: Degenerativ
A: Perforation oder vertikaler Riss radiusnah B: Abriss am Proc. styloideus mit / ohne Fraktur C: Abriss am Lunatum, Triquetrum / Instabilität D: Abriss am Radius mit / ohne Fraktur	A: Höhenminderung des TFCC B: IIA + Chondromalazie des Lunatum / Ulna C: zentrale Perforation des Discus triangularis D: IIC + Riss des Lig. lunotriquetrum E: IID + ulnokarpale Arthrose

Tabelle 3: Einteilung der TFCC-Läsionen nach Palmer. Die Erkrankungen des ulnaren Faserkomplex werden nach Palmer in Klasse I: traumatisch und Klasse II: degenerativ unterteilt. Bei Klasse IA-Verletzung wird bei einem radialseitige Riss offen oder arthroskopisch débridiert. Hier zeigt sich im Gegensatz zu einem ulnarseitigem Riss (IB) mit guter Vaskularisation, der konservativ ruhiggestellt wird, eine schlechtere Spontanheilung. Klasse IC-Verletzungen verlangen neben einer Rekonstruktion des Discus triangularis oft eine Naht der benachbarten Bändern. Radialseitige gelegene Abrisse (ID) werden durch transossäre Nähte offen oder arthroskopisch versorgt. Bei den degenerativen Erkrankungen des TFCC (IIA-C) ohne begleitende Arthrose wird meist eine Ulnaverkürzungsosteotomie durchgeführt. Diese bietet gegenüber anderen druckentlastenden Verfahren den entscheidenden Vorteil, dass es sich um ein extraartikuläres Verfahren handelt. Bei zusätzlicher Arthrose und/oder Instabilität werden entsprechende Arthrodeseverfahren mit Débridement durchgeführt (Beyermann 1999).

Die Ursache der Diskusruptur ist bei jungen Patienten meist ein Handgelenkstrauma, bei älteren Menschen treten eher degenerative Veränderungen, mit den daraus resultierenden Rissen, in den Vordergrund.

Diese degenerativen Veränderungen, die meistens asymptomatisch bleiben, finden sich im Bereich des ulnokarpalen Komplexes relativ häufig. Mikič (1978) zeigte in

einer anatomischen Studie an 180 Leichenpräparaten, dass 53% der über 60jährigen Patienten TFCC-Perforationen aufweisen. Die degenerativen Rupturen treten gewöhnlich im zentralen dünnen Anteil auf und sind oft mit einem positiven relativen Ulna-Vorschub und einer Höhenminderung des TFCC vergesellschaftet. Palmer (1989) stellte ein umgekehrt proportionales Verhältnis der Ulnalänge zur Dicke des TFCC fest. Diese Konstellation führt zu einem extremen Druckanstieg auf die ulnaren Karpalia mit ulnaren bzw. lunären Erosionen und Gelenkknorpeldegenerationen und endet im fortgeschrittenen Alter in der Form eines ulnokarpalen Impaktationssyndroms (Palmer 1989/ Escobedo 1995/ Stäbler 1997/ Cerezal 2002). Bei traumatischer Genese ist der Unfallmechanismus typischerweise ein Rotationstrauma. Begleitverletzungen in der Vorgeschichte können Hinweise auf eine zusätzliche TFCC-Läsion geben (Beyermann 1999). Fischer (1996) untersuchte 54 Patienten mit frischer Radiusfraktur arthroskopisch und entdeckte in 41% der Fälle eine partielle oder komplette Ruptur des ulnokarpalen Komplexes. Traumatische Läsionen oder Risse des TFCC sind meistens 1-2 mm neben der radialen Insertion am Radius, manchmal aber auch im ulnaren Abschnitt, lokalisiert und gehen eher mit einer Ulna-Minus Variante und dickerem TFCC einher (Palmer 1989/ Zlatkin 1989/ 1992).

2.3 Magnetresonanztomographie des Handgelenkes

2.3.1 Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen an die Magnetresonanztomographie des Handgelenkes sind in Folge der komplexen Anatomie und der oftmals kleinen Strukturen sehr hoch. Eine erfolgreiche Untersuchung erfordert hohe Signalintensitäten und einen guten Kontrast zwischen den zu untersuchenden Strukturen. Das Hintergrundrauschen und eventuell auftretende Artefakte müssen minimiert werden. Dabei ist zu beachten, dass im Körper implementierte nichtferromagnetische Gelenkendoprothesen oder Osteosynthesematerialien in der unmittelbaren Umgebung der Metallteile lokale Artefakte produzieren können. Eine hohe Bildauflösung kann durch kleine „field of views“ (FOV) mit maximal 8-10cm und dünne Schichten (1-3mm) in den jeweiligen Ebenen erreicht werden, um alle relevanten Strukturen und Pathologien erfassen und beurteilen zu können. Die Aufnahmen müssen eine hohe diagnostische Aussagekraft bei kurzer Gesamtmeszeit (20-30 Minuten) haben.

Generell ermöglichen Hochfeld-Magnetresonanztomographen mit 1,5 Tesla Feldstärke eine höhere Signalintensität im Gewebe bzw. ein größeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis („signal-to-noise-ratio“/ SNR) und damit eine bessere Detailerkennbarkeit als Niederfeld-Tomographen. Sie erlauben eine dünnere Schichtung, kleinere FOV und kürzere Messzeiten und haben sich so in der Untersuchung des Handgelenks durchgesetzt (Kneeland 1996). In absehbarer Zukunft werden auch Geräte mit 3 Tesla in der Routinediagnostik zur Verfügung stehen.

Die Flächenauflösung ergibt sich aus dem gewählten FOV geteilt durch die Anzahl der Pixel, die durch die Bildmatrix vorgegeben wird. So erreichten wir in unserer Untersuchung bei einem FOV von 8cm und einer Matrix von 256x256 eine niedrige Pixelgröße von 0,3mm x 0,3mm („in-plane-resolution“). Die räumliche Auflösung wird zusätzlich noch durch die Schichtdicke bestimmt. Aus den so entstehenden Voxeln wird das Signal für die Bilddarstellung akquiriert. Dabei ist zu berücksichtigen, je dünner die Schichtdicke und je höher die Auflösung ist, umso weniger Volumen und damit weniger Signal steht für die zweidimensionale Abbildung zur Verfügung. Für eine optimale Bilddarstellung muss also die niedrigst mögliche räumliche Auflösung (größtmöglichstes Voxelvolumen) für eine noch zufriedenstellende Beurteilung der anatomischen Region gewählt werden. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass ein Kompromiss zwischen dem SNR und der räumlichen Auflösung gefunden werden muss (Parker 1990). Da in der Beurteilung von Knorpelläsionen, Bandrupturen oder Nervenpathologien dünne Schichten bei hoher Auflösung erforderlich sind, kann der SNR-Verlust durch hocheffiziente Handgelenksspulen, spezielle Sequenzen und Magnetresonanztomographen mit starkem Magnetfeld ausgeglichen werden.

Neben den Qualitätskriterien SNR und CNR korreliert der Bildqualitätsindex nach Owen (1990), bei unterschiedlichen Auflösungen und Schichtdicken, am besten mit den subjektiven Qualitätseindrücken des Untersuchers. Hierbei wird der Quotient aus berechnetem SNR und räumlicher Auflösung (Voxelvolumen) gebildet.

2.3.2 Patienten, Probanden und Präparate

Vor einer MRT-Untersuchung wird dem Patienten bzw. Probanden ein Einwilligungsbogen mit Fragen nach früheren Operationen, Schwangerschaft oder Herzschrittmachern zur Beantwortung übergeben. Sollten bei einem Patienten ferromagnetische Metallteile (Gelenkprothesen, Gefäßclips, Granatsplitter o.ä.) im

Körper vorhanden sein, kann die MRT-Untersuchung wegen der bestehenden Gefahr einer magnetisch bedingten Dislokation der Metallobjekte unter gewissen Umständen nicht durchgeführt werden. Bei zusätzlich erforderlicher Kontrastmittelgabe ist nach bekannten Unverträglichkeitsreaktionen zu fragen und in der Anwendung zu berücksichtigen. Während der Untersuchung ist die Kommunikation mit dem durchführenden medizinisch-technischen Personal über eine Sprechanlage möglich. Zusätzlich kann der Patient über ein Notsignal auf sich aufmerksam machen und die Messung so unterbrechen bzw. stoppen. Wegen der engen Untersuchungsröhre kann bei extrem adipösen oder zur Klaustrophobie neigenden Patienten die MRT-Untersuchung nicht durchgeführt werden.

Für wissenschaftliche Studien sind häufig sehr lange Messzeiten notwendig. Einem Patienten bzw. Probanden ist jedoch eine Gesamtuntersuchungszeit deutlich über 30 Minuten, in der die exakt gleiche Position eingehalten werden muss, nicht zumutbar. Aus diesem Grund werden für wissenschaftliche Untersuchungen mit geplanter langer Messzeit fixierte Leichenpräparate verwendet, die nach der Untersuchung mikroskopisch oder histologisch aufgearbeitet werden können und eine Bildkorrelation ermöglichen. Die Studie von Baker (1987) zeigte, dass sich die Ergebnisse von MR-tomographischen Untersuchungen von Probanden und Formalin-Ethanol fixierten Leichenpräparaten nicht unterscheiden.

2.3.3 Lagerung

Eine möglichst bequeme und entspannte Lagerung des Patienten ist für die Qualität der MRT-Bilder unablässig. Normalerweise wird die Handgelenksspule im homogenen Magnetfeldbereich in der Mitte der Röhre zentriert. Der Patient liegt in Bauchlage mit über Kopf ausgestrecktem Arm und platziert seine Hand in der Spule („Supermann-Position“). Diese Art der Lagerung wird von älteren Patienten oder Patienten mit Schulterbeschwerden nur schlecht toleriert. Eine kurze Untersuchungszeit und eine angenehme Lagerung durch Polsterung bzw. Abstützung der Schulter und des Oberarms können dabei helfen, die entstehenden Bewegungsartefakte zu minimieren. Um eine korrekte Beurteilung der karpalen Achsenverhältnisse zu ermöglichen, ist darauf zu achten, dass das Handgelenk in neutraler Stellung in der Spule positioniert wird. Extreme Ulnarabduktionen bzw. Dorsalextensionen müssen korrigiert werden. Neuere Handgelenksspulen erlauben eine bequemere Lagerung dadurch, dass der Patient den Arm im Ellenbogen

abwinkeln und die Spule zur Längsachse der Magnetfeldröhre leicht gedreht werden kann. Die bei älteren Untersuchungsspulen nicht zu umgehende Lagerung des Handgelenks in Ulnarabduktion kann somit weitgehend vermieden werden. Eine zusätzliche Polsterung und Fixierung des Handgelenks in der Spule minimiert die Bewegungen des Patienten und trägt zu einem guten Untersuchungsergebnis bei. Eine weitere Möglichkeit stellt die Untersuchung mit flexiblen Spulen dar, bei denen die Hand neben der Hüfte liegend in Normal-Null-Stellung positioniert wird. Diese „Off-center-Messung“ kann nur bei schlanken Patienten und einer starken Fixierung des Handgelenks in der Spule durchgeführt werden.

2.3.4 Untersuchungssequenzen

Die MRT stellt eine gute, aber im Detail durchaus noch zu verbessernde Untersuchungsmethode des Handgelenks dar. Die Wahl der verwendeten Pulssequenzen hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die Bildqualität. Für eine optimale Beurteilung des Handgelenks müssen die Spongiosa, der Diskus, die interossären Bänder, der hyaline Gelenkknorpel und freies Wasser gut darstellbar sein. Da in der Regel die meisten Erkrankungen des Handgelenks mit einer Vermehrung des freien Wassers einhergehen, ist die Sensitivität einer MR-tomographischen Untersuchung vor allem von der Nachweisfähigkeit von freiem Wasser abhängig. Zusätzlich muss bei der Wahl und Kombination der Untersuchungssequenzen eine diagnostisch adäquate räumliche Auflösung mit hohem Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR/ Kriterium der Bildqualität/ Mittelwert der Signalintensität einer anatomischen Struktur dividiert durch den Mittelwert der Standardabweichung des Hintergrundrauschens) und ausreichender Kontrast mit hohem Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis gewährleistet sein („contrast-to-noise-ratio“/ CNR/ kombinierte Messgröße als Qualitätsmaßstab/ Differenz der Mittelwerte der Signalintensitäten zweier benachbarter anatomischer Strukturen, dividiert durch den Mittelwert der Standardabweichung des Hintergrundrauschens).

Das Hintergrundrauschen ist dabei eine statistische Schwankung der Signalintensität, die nicht zur Bildinformation beiträgt. Im MR-Bild erscheint das Rauschen als körniges, regelloses Muster und überlagert das Gewebesignal.

Stäbler (2000) evaluierte verschiedene moderne Pulssequenzen anhand menschlicher Handgelenkspräparate. Abschließend gab er Empfehlungen zur Erstellung eines optimierten MRT-Protokolls bei der Untersuchung des Handgelenks.

Die Spin-Echo-Sequenz ist die häufigste angewandte Sequenz in der MRT. Neben der kurzen Repetitionszeit bei kurzer Echozeit, zeichnet sie sich durch geringe Artefaktanfälligkeit, gute Signalhomogenität und hohes SNR aus und wird in der Routinediagnostik für die Darstellung anatomischer Strukturen verwendet. Dabei bilden sich Fett, Knochenmark und eiweißreiche Flüssigkeiten signalintensiv ab. Andere Flüssigkeiten, Muskeln, Entzündungen, Tumoren oder solide Verkalkungen kommen dagegen signalarm zur Darstellung.

Für die verbesserte Darstellung von freiem Wasser, wurde die Technik der Fettsignalunterdrückung entwickelt. Die Sequenzen arbeiten hierbei mit zwei unterschiedlichen Methoden. Die frequenzselektive Fettgewebssignalunterdrückung bietet die Möglichkeit den Kontrast zwischen fetthaltigem Gewebe und Wasser zu erhöhen. Es wird ein Sättigungspuls der eigentlichen Pulssequenz vorgeschaltet, der die Fettprotonen absättigt und deren Anteil im MRT-Bild unterdrückt.

Die selektive Anregung des Wassersignals ist schneller als die Fettunterdrückung, da der Vorpuls entfällt. Es kommt ebenfalls zu einer Auslöschung des Fettmarkes, bei gleichzeitiger Hervorhebung von freiem Wasser.

Beide Methoden sind anfällig gegenüber Magnetfeldinhomogenitäten. Der Einfluss des Patienten auf die Magnetisierbarkeit ist dabei nicht zu vermeiden. Daher ist es notwendig einen Shim des Hauptmagnetfeldes durchzuführen. Dabei werden an vorher festgelegten Punkten Abweichungen des Magnetfeldes bestimmt und durch zusätzliche Spulen berücksichtigt.

Die STIR-Sequenz („short-tau-inversion-recovery“) bietet in der muskuloskelettalen MRT ebenfalls die Möglichkeit der Fettsignalunterdrückung. Sie ermöglicht einen guten Fettgewebe-Wasser-Kontrast und ist somit für die Abgrenzung eines Tumors oder eines Knochenmarködems hilfreich. Ein Nachteil der STIR-Sequenz ist das relativ schlechte SNR, sowie die Anfälligkeit für Bewegungsartefakte.

Mit GRE-Sequenzen (Gradienten-Echo-Sequenz) kann eine deutliche Messzeitverkürzung durch eine kurze Wiederholzeit erzielt werden. Weitere Vorteile sind das bessere SNR pro Zeiteinheit, die 3D-Bildgebung und geringere SAR-Werte (Hochfrequenzabsorptionswerte). Die Nachteile der GRE-Sequenzen bestehen in der Anfälligkeit auf Grund der Suszeptibilitätsartefakte und der Empfindlichkeit bei Feldinhomogenitäten. Im hämatopoetischen Knochenmark löschen sich die Wasserkomponente und die Fettkomponente bei opposed-phase Bedingungen weitgehend aus, sodass sie signalarm oder signalfrei erscheinen. Der hyaline

Gelenkknorpel und die interossären Bänder bzw. der Diskus werden bei bestimmten Sequenzen dagegen signalstark bzw. mit mittlerer Signalintensivität abgebildet.

Für die Beurteilung der komplexen Handgelenksstrukturen bieten sich zwei unterschiedliche 3D-Gradienten-Echo-Sequenzen mit Wasseranregung an. Die FLASH-WE-Sequenz („fast-low-angle-shot/ water-excitation“) weist gegenüber anderen Gradienten-Echo-Sequenzen die beste Knorpeldarstellung bei kurzer Aufnahmezeit auf, ist aber allgemein anfällig für Magnetfeldinhomogenitäten.

Die DESS-WE-Sequenz („dual-echo-steady-state/ water-excitation“) erzielt bessere SNR, durch eine gleichzeitige Aufnahme zweier Rohdatenmatrizen. Zusätzlich bietet sie einen stärkeren T2-Kontrast. Die DESS-Sequenz findet hauptsächlich in der orthopädischen Bildgebung ihre Verwendung. Sie kann gut zwischen Gelenkflüssigkeit und Knorpelstrukturen differenzieren.

Zusätzlich lassen sich die anatomischen Strukturen gut mit der PD-FS-Sequenz („proton-density/ fat-sat“) abbilden. Die Signalintensität des Fettgewebes wird unterdrückt und protonendichtes Gewebe kommt mit höchster Signalintensität zur Darstellung. Diese Sequenz weist gegenüber der STIR-Sequenz eine deutlich kürzere Messzeit und bessere SNR auf.

2.3.5 Untersuchungsspulen

Eine verbesserte Bildqualität kann neben speziellen Sequenzen, einer hohen Magnetfeldstärke durch optimierte Handgelenksspulen mit kleinem Durchmesser und an das Handgelenk angepasster Geometrie erreicht werden. In der Routinediagnostik des Handgelenks fanden bisher hauptsächlich Oberflächenspulen und Volumenspulen Verwendung, die aber nicht speziell auf die Größe und anatomische Komplexität des Handgelenks zugeschnitten waren. Die Größe der Empfangsspule sollte dem abzubildenden Körperabschnitt angepasst sein, da durch einen kleineren Spulendurchmesser bzw. Volumen ein höherer Füllfaktor und damit ein besseres SNR erzielt werden kann.

Roemer (1990) stellte eine experimentelle Spulenkonfiguration mit vier Empfänger-Spulen und vier Empfangskanälen vor und nannte sie „NMR phased-array“. Hierbei werden mehrere, kleine Spulenelemente in einer Kunststoffhülle zusammengefasst. Jedes Spulenelement besitzt ein eigenes Datenakquisitionssystem mit Vorverstärker, Empfangskanal, Analog-Digital-Wandler und Speicher. Alle Elemente produzieren gleichzeitig individuelle Bilder (Basis-Bilder) verschiedener Regionen, die

anschließend in einem Bild mit großem Messfeld zusammengefasst werden (Array-Bild). Die Rekonstruktionszeit ist etwa 4-5-mal länger als bei einer vergleichbaren Einkanal-Spule. Denn für jedes Basisbild ist eine eigene Fourier-Transformation und eine anschließende Überlagerung auf die Basisbilder der anderen Kanäle notwendig. Das Rauschen wird jeweils nur innerhalb des Bildfeldes eines Array-Elementes wirksam.

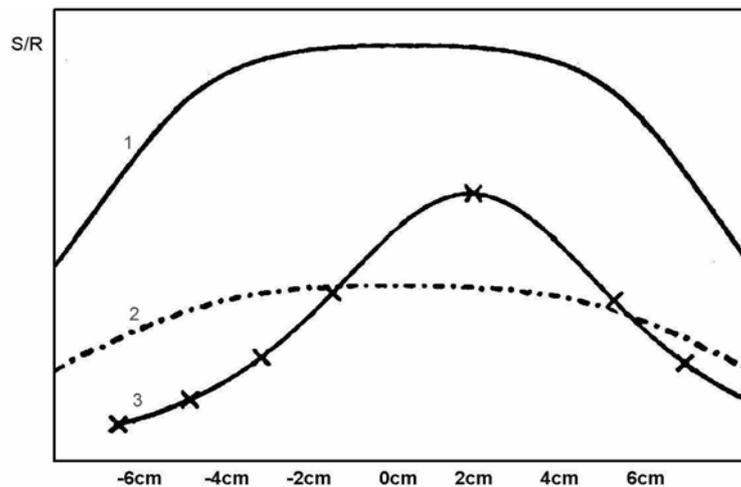


Abb. 5: SNR unterschiedlicher Spulentypen in Abhängigkeit zur Spulenzentrum: 1: 4-Kanal-phased-array-Spule; 2: Oberflächenspule; 3: Einzelelement einer 4-Kanal-phased-array-Spule. Durch die Überlagerung der Einzelelemente in der phased-array-Technik können sowohl in xy-Richtung als auch in z-Richtung der Spule höhere SNR erreicht werden, da der zugehörige Bilddatenlogarithmus nur das Hintergrundrauschen im Einzelelement wertet. Im Vergleich der Kurven 1 und 2 zeigt sich jedoch ein überproportionaler Abfall des SNR in der Peripherie der Mehrkanalspule im Vergleich zur Oberflächenspule (in Anlehnung an Wright SM, Wald LL. Theory and application of array coils in MR spectroscopy: NMR Biomed 1997 Dec;10(8);394-410).

Der Bilddatenalgorithmus wichtet dabei das Rauschen entsprechend der Empfindlichkeit der einzelnen Elemente. Dies ergibt hohe SNR-Werte, die mit der Anzahl der verwendeten Spulenelemente linear ansteigen.

Da die Signalintensität des einzelnen Spulenelementes durch die geringere Größe zur Peripherie in xy- Richtung wie in z-Richtung stärker als bei einer großen Oberflächenspule abfällt, müssen die Elemente überlappend angeordnet werden. Somit kann ein höheres, annähernd lineares SNR im Bereich des Spulenzentrums erreicht werden. Die Bildqualität ist damit fast im gesamten FoV deutlich besser, verliert aber in der Peripherie im Vergleich zu einer großen Oberflächenspule überproportional an Signalintensität (Roemer 1990/ Hayes 1991/ Wright 1997).

Seit Ende der 90iger Jahre stehen neben den Ring- und Wickelspulen neuartige „phased-array-Spulen“ für die MR-tomographische Untersuchung des Handgelenks“ zur Verfügung. Das größere SNR erlaubt dabei letztlich kleinere field-of-views und dünnere Schichten.

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchung

3.1.1 Handgelenkspräparate und Probanden

Bevor wir die statistische bzw. anatomische Untersuchung der Handgelenke der Präparate und Probanden durchführten, testeten wir anhand 12 Probanden die verschiedenen MRT-Sequenzen, modifizierten die Untersuchungsparameter und stellten anschließend das endgültige Messprotokoll zusammen.

Proband	Seite	Alter	Geschlecht	Proband	Seite	Alter	Geschlecht
S.L.	rechts	23	weiblich	L.S.	rechts	25	männlich
A.M.	rechts	26	männlich	A.M.	rechts	56	männlich
C.P.	rechts	24	männlich	F.W.	rechts	26	männlich
S.M.	rechts	26	weiblich	P.L.	rechts	25	männlich
C.K.	rechts	24	männlich	W.K.	rechts	26	männlich
A.M.	rechts	18	männlich	C.H.	rechts	23	weiblich

Tabelle 4: Probanden der Messprotokollerstellung

Für die anatomische und statistische Auswertung wurden insgesamt 3 mit Formalin-Ethanol fixierte Handgelenke menschlicher Leichen, die proximal des Radiokarpalgelenks abgesetzt wurden, untersucht. Vor der MRT-Untersuchung wurden die Präparate zum Ausschluss größerer pathologischer Veränderungen in 2 Ebenen geröntgt. In den Aufnahmen konnten, bis auf eine erhebliche Arteriosklerose in einem Präparat, keine weiteren krankhaften Befunde gefunden werden. Erst bei der MR-tomographischen Untersuchung stellte sich bei zwei Präparaten degenerative Veränderungen dar, die vorher in den Röntgenaufnahmen nicht diagnostiziert werden konnten. Die Präparate wurden sowohl für den quantitativen Spulenvergleich, als auch für die anatomische Bildkorrelation benutzt.

Für die statistische Auswertung wurden zusätzlich 3 neue Probanden miteinbezogen (siehe Tabelle 4).

Nr.	Art	Seite	Alter	Geschlecht	Schichtung/ Besonderheiten/Pathologien
1	Präparat links	72	M		axiale Schichtung
2	Präparat rechts	86	W		koronare Schichtung/ multiple Zysten, insbes. Os lunatum
3	Präparat rechts	78	W		sagittale Schichtung/ Degeneration TFCC/ Zyste Os scaphoideum
1	Proband rechts	30	M		Fragmentation Discus articularis
2	Proband rechts	27	W		keine
3	Proband rechts	18	W		keine

Tabelle 5: Präparate der qualitativen und quantitativen Untersuchung und Probanden des statistischen Spulenvergleichs.

3.1.2 Untersuchungsgeräte und MR-Spulen

Unsere MR-tomographischen Untersuchungen des Handgelenks wurden an zwei 1,5 Tesla Geräten der Baureihen Magnetom Vision und Magnetom Symphony (Siemens AG Medizintechnik, Erlangen) durchgeführt. Die hohe Magnetfeldstärke erlaubt durch hohe SNR und CNR eine hochaufgelöste Darstellung und genaue Beurteilung der anatomischen Strukturen.

Für den statistischen Vergleich der SNR und CNR verwendeten wir drei Spulen unterschiedlicher Bauart. Die neuentwickelten phased-array-Spulen (2-Kanal-phased-array-Handgelenksspule/ Prototyp/ Siemens AG Medizintechnik, Erlangen/ Baujahr '99/ Spulenvolumen $V= 970 \text{ cm}^3$) und (4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule/ HRW U1108/ MRI Devices Corporation, USA/ Baujahr '01/ Spulenvolumen $V= 1180 \text{ cm}^3$) produzieren durch ihre parallel geschalteten Einzelelemente deutlich höhere SNR und erreichen durch ihr zusätzlich kleineres Volumen, höchste Bildauflösung. Zum Vergleich wurde die zirkular polarisierte Volumenspule (CP Extremitätenspule/ Siemens Medizintechnik AG, Erlangen/ Spulenvolumen $V= 8500 \text{ cm}^3$) verwendet, die lange Zeit zur Standarduntersuchung des Knie- Fuss- und Handgelenkes verwendet wurde.

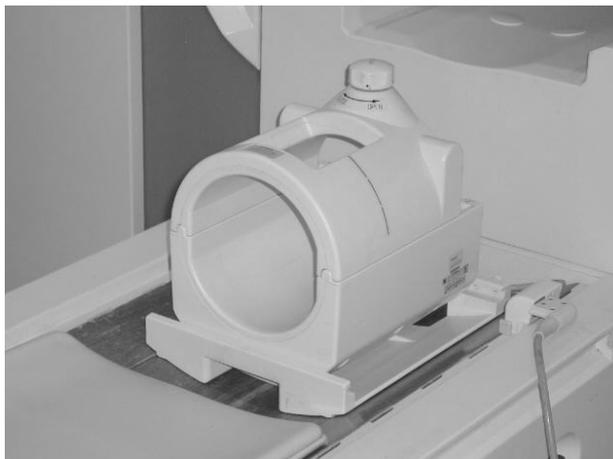


Abb. 6: zirkular polarisierte Volumen-Kniegelenksspule (CP Extremity)/ Baujahr 1997/ Spulenvolumen 8500 cm³/ Siemens AG, Medizintechnik, Erlangen.



Abb. 7: 2-Kanal-phased-array-Spulenprototyp/ Baujahr 1999/ Spulenvolumen 970 cm³/ Siemens AG, Medizintechnik, Erlangen.



Abb. 8: 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule/ Baujahr 2001/ Spulenvolumen 1180 cm³/ MRI Devices Inc., USA

3.1.3 Sequenzwahl

Die Handgelenke wurden mit 4 unterschiedlichen MR-tomographischen Sequenzen untersucht. Bei der Auswahl der Sequenzen bzw. bei der Erstellung des Messprotokolls wurden die Ergebnisse der Sequenzvergleichsstudie von Stähler (2000) miteinbezogen und die Akquisitionszeit pro Sequenz auf maximal 6 Minuten begrenzt.

Proband	A.M.	S.L.	C.P.	S.M.	C.K.	A.M.	L.S.	A.M.	F.W.	P.L.	W.K.	C.H.
SE T1-cor	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
SE T1-ax		x			x	x		x				
SE T1-sag		x			x				x	x	x	x
FLASH FS-cor		x			x	x	x	x		x		x
FLASH FS-ax			x									
FLASH FS-sag												
FLASH WE-cor	x	x							x		x	
FLASH WE-ax												
FLASH WE-sag			x						x			
DESS FS-cor	x											
DESS FS-ax	x		x		x	x		x		x	x	x
DESS FS-sag												
PD FS-cor		x		x					x			
PD FS-ax					x							
PD FS-sag												
STIR-cor	x			x				x				x

Tabelle 6: Messreihen der Probanden zur Erstellung des definitiven Messprotokolls.

Zur anatomischen Orientierung wurde die weit verbreitete Spin-Echo-Sequenz mit T1-Wichtung (TR 400ms/ TE 20ms) verwendet. Aus der Reihe der Gradienten-Echo-Sequenztechnik wurden die FLASH- und die DESS-Sequenz jeweils mit selektiver Wasseranregung ausgewählt. Die DESS-Sequenz ermöglicht eine gute Beurteilung des Knorpels und die Unterscheidung zwischen Knorpel und Gelenkflüssigkeit. Die FLASH-Sequenz zeigt gegenüber der DESS-Sequenz eine noch verbesserte Knorpeldarstellung bei kürzerer Untersuchungszeit.

Obwohl Stähler (2000) etwas bessere Signal-zu-Rausch-Verhältnisse für die Sequenzen mit frequenzselektiver Fettsignalunterdrückung gefunden hat, benutzten wir aufgrund der deutlich kürzeren Aufnahmezeit die Technik der selektiven Wasseranregung.

Um den Kontrast zwischen Wasser und umliegendem Gewebe, das SL- und LT-Band und den TFCC gut darzustellen, verwendeten wir die Proton-Density-Sequenz (TR 3000/ TE 34) mit frequenzselektiver Fettsignalelimination. Die Signalintensität des Fettgewebes wird unterdrückt und protonendichtes Gewebe kommt mit höchster

Signalintensität zur Darstellung. Aufgrund der längeren Akquisitionsdauer wurde die STIR-Sequenz nicht in unser Protokoll aufgenommen.

Sequenz	TA (min)	Ebene	TR (ms)	TE (ms)	FA (Grad)	FoV (mm)	Voxelgröße (mm)	AC	FS	Bandbreite (Hertz)
SE T1	3,04	cor	400	20	90	80 x 80	0,4 x 0,3 x 3	2	----	65
SE T1	3,04	ax	400	20	90	80 x 80	0,4 x 0,3 x 3	2	----	65
SE T1	3,04	sag	400	20	90	80 x 80	0,4 x 0,3 x 3	2	----	65
FLASH 3D	4,28	cor	19	10	25	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	2	WE	130
FLASH 3D	4,28	ax	19	10	25	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	2	WE	130
FLASH 3D	4,28	sag	19	10	25	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	2	WE	130
DESS 3D	5,43	cor	22	7	18	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	1	WE	130
DESS 3D	5,43	ax	22	7	18	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	1	WE	130
DESS 3D	5,43	sag	22	7	18	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	1	WE	130
PD	5,38	cor	3000	34	180	80 x 80	0,3 x 0,3 x 3	3	FS	110
PD	5,38	ax	3000	34	180	80 x 80	0,3 x 0,3 x 3	3	FS	110
PD	5,38	sag	3000	34	180	80 x 80	0,3 x 0,3 x 3	3	FS	110

Tabelle 7: Sequenz- und Messprotokoll Präparate (qualitativ)

Für die Untersuchung der Probanden wurde ein auf unter 30 Minuten eingeschränktes Messprotokoll angewandt, da eine längere Untersuchungszeit nicht zumutbar war. Hierbei wurden die Spin-Echo-Sequenz in allen drei Ebenen, die FLASH-WE-Sequenz in koronarer und axialer Schichtung, die DESS-WE-Sequenz in axialer Ebene und die Proton-Density-FS-Sequenz in koronarer Führung verwendet.

Sequenz	TA (min)	Ebene	TR (ms)	TE (ms)	FA (Grad)	FoV (mm)	Voxelgröße (mm)	AC	FS	Bandbreite (Hertz)
SE T1	3,04	cor	400	20	90	80 x 80	0,4 x 0,3 x 3	2	----	65
SE T1	3,04	ax	400	20	90	80 x 80	0,4 x 0,3 x 3	2	----	65
SE T1	3,04	sag	400	20	90	80 x 80	0,4 x 0,3 x 3	2	----	65
FLASH 3D	4,28	cor	19	10	25	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	2	WE	130
FLASH 3D	4,28	sag	19	10	25	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	2	WE	130
DESS 3D	5,43	ax	22	7	18	80 x 80	0,3 x 0,3 x 1,5	1	WE	130
PD	5,38	cor	3000	34	180	80 x 80	0,3 x 0,3 x 3	3	FS	110

Tabelle 8: Sequenz- und Messprotokoll Probanden (quantitativ)

3.1.4 Lagerung

Die Handgelenke der Probanden und Präparate wurden zentral in den jeweiligen Untersuchungsspulen mit flach aufliegendem Handteller gelagert. Im Gegensatz zu den Präparaten musste bei den Patienten und Probanden in der CP-Extremitäten-Spule und der 2-Kanal-phased-array-Spule aufgrund der starren Positionierung der Spulen innerhalb der MR-Röhre eine geringgradige Ulnarabduktion der Handgelenke toleriert werden. Die 4-Kanal-phased-array-spule erlaubte dagegen, durch eine individuelle Drehung der Spule in der Längsachse des Magnetoms, dem Patienten

bzw. Probanden eine bequeme Abwinkelung des Ellenbogens und eine Positionierung des Handgelenks nahe der Neutral-Null-Stellung. Die Handgelenke wurden innerhalb der Spule zentral gelagert, die Mitte des Spulenmagnetfeldes verlief durch das Radiokarpalgelenk. Die tastbaren Knochenvorsprünge der Unterarmknochen (Processus styloidei radialis und ulnaris) wurden hierbei als Markierung des Gelenks herangezogen.

3.1.5 Durchführung

Nach Registrierung des Probanden in der Computerkonsole und korrekter Lagerung der zu untersuchenden Handgelenke in der Spule, wurde die Positionierung mit Hilfe eines Scout überprüft. Durch das Übersichtsbild erfolgte die exakte Platzierung des FOV. Das Zentrum des Bildes wurde im Bereich des Übergangs der proximalen zur distalen Karpalreihe eingerichtet. Der Bildausschnitt reichte somit in der koronaren Schichtführung von den distalen Unterarmknochen bis zum Metacarpus mit den seitlichen Muskelmassen des Thenars und Hypothenars. Die Untersuchungszeit der Probanden und Patienten wurde von insgesamt 54 Minuten und 12 Sequenzen für die Präparate auf 29 Minuten und 7 Sequenzen eingeschränkt. Anschließend wurden die Bilder ausgedruckt und auf MOD bzw. CD-ROM für die statistische und anatomische Auswertung archiviert.

3.2 Auswertung

3.2.1 Quantitative Auswertung

Für den statistischen Vergleich der drei unterschiedlichen Spulen, bestimmten wir in der Spin-Echo-Sequenz bei insgesamt 6 Handgelenken (3 Präparate menschlicher Leichen und 3 Gelenken von Probanden) die Mittelwerte der Signalintensitäten 4 verschiedener Strukturen bzw. Gewebearten (Spongiosa, Kortikalis, Knorpel, Diskus) und die Standardabweichung des Rauschens im Hintergrund.

Wir wählten dafür die Spin-Echo-Sequenz wegen der geringen Artefaktanfälligkeit, der überdurchschnittlichen Signalhomogenität innerhalb des Bildes und der kurzen Aufnahmezeit. Für die Festsetzung des Signalwertes bestimmten wir in der koronaren Schichtführung 8 Messungen pro Struktur in den zentralen Einzelschichtbildern mit Hilfe der „Region of interest“ (ROI's). Um die Strukturen exakt zu definieren, müssen bei der ROI-Platzierung von Diskus, Knorpel und Kortikalis deutlich vergrößerte Bildausschnitte verwendet werden. Die identische

Positionierung der ROI's behielten wir bei den 3 Bildserien der unterschiedlichen Spulen und bei allen Probanden und Präparaten bei.

Spongiosa	Kortikalis	Knorpel	Diskus
2x Radius Ulna Os capitatum	4x ulnarer u. distaler Radius	4x Radiokarpal- gelenk	4x radiale Anheftung 4x zentrale Portion
in 2 Schichten	in 2 Schichten	in 2 Schichten	in 1 Schicht

Tabelle 6: Platzierung der „Regions of interest“.

Sämtliche Signalwerte und die Standardabweichung des Hintergrundrauschens können aus den Tabellen im Anhang entnommen werden.

Als Kriterium der Spuleneffizienz verwendeten wir das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), das dem Mittelwert der Signalintensität einer anatomischen Struktur dividiert durch den Mittelwert der Standardabweichung des Hintergrundrauschens entspricht.

$$SNR = \frac{\text{Mittelwert der Signalintensität}}{\text{Standardabweichung des Hintergrundrauschens}}$$

Für eine gute Bildqualität und eine gute Unterscheidung zwischen benachbarten Strukturen, ist neben einem hohen SNR auch ein ausreichender Kontrast nötig. Hieraus ergibt sich eine kombinierte Messgröße als Qualitätsmaßstab, das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis („contrast-to-noise-ratio“/ CNR). Dieses Verhältnis errechnet sich aus der Differenz der Mittelwerte der Signalintensitäten zweier benachbarter anatomischer Strukturen, dividiert durch den Mittelwert der Standardabweichung des Hintergrundrauschens.

$$CNR = \frac{\text{Signalintensität 1} - \text{Signalintensität 2}}{\text{Standardabweichung des Hintergrundrauschens}}$$

Die gewonnenen Signalwerte dividierten wir durch die Standardabweichung des Hintergrundes und fassten sie mit dem Mittelwert zu einer deskriptiven Statistik zusammen. Die CNR berechneten wir nach obiger Formel und stellten sie mit dem Mittelwert und der Standardabweichung in einer Tabelle zusammen. Anschließend führten wir einen statistischen Vergleich für die quantitativen Messwerte mittels dem nicht-parametrischen Wilcoxon-Test für paarige Stichproben durch (Programm:

SPSS für Windows; Version 11.0 deutsch; SPSS Inc. 2002). Wir prüften auf ein statistisches Signifikanzniveau von $p < 0,05$.

3.2.2 Qualitative Auswertung

Die anatomische Korrelation erfolgte an drei Formalin-Ethanol-fixierten Handgelenkspräparaten. Wir untersuchten jedes Präparat mit 4 Sequenzen in allen drei Ebenen. Nach Erhalt und Archivierung der MRT-Bilder legten wir die Schnittebenen für jedes Handgelenk fest. Dabei wurde auf Artefakte und Bildinhomogenitäten geachtet. Nach projektionsradiographischer Untersuchung froren wir die Präparate bei -80° Grad tief und zersägten diese anschließend entlang der MRT-Schnittführung in 3mm Schichten. Die Präparateschnitte wurden digital abfotografiert (Digital Still Camera DSC-S70/ Cyber-Shot/ 3,3 Mega Pixels/ Sony Corp., Japan), zusammen mit den MRT-Bildern auf CD-ROM gebrannt und mit 2 verschiedenen Bildbearbeitungs-Programmen nachbearbeitet (MGI Photo Suite/ DEU 806/ MGI Software Corp., USA und Micrografx Picture Publisher 8.01 für Windows/ Micrografx Corp., USA). Bei der Gegenüberstellung der makroskopischen Schnitte mit den MRT-Bildern, typisierten wir die verschiedenen Gewebearten und achteten auf deren Zuordnung und Abbildbarkeit im MRT-Bild. Anschließend wurde eine exakte Identifizierung der Strukturen in den zentralen Präparateschnitten und in den MRT-Bildern für jede Ebene vorgenommen.

4 Ergebnisse

4.1 Quantitative Ergebnisse- Spulenevaluation

4.1.1 Rauschen

STABW des Hintergrundes (Rauschen)	4-Kanal-phased-array Handgelenksspule Spin-Echo-Seq.	2-Kanal-phased-array Handgelenksspule Spin-echo-Seq.	Volumen-Kniespule Spin-echo-Seq.
Proband 1	15,2	26,2	58,2
Proband 2	14,8	36,6	63,3
Proband 3	15,3	23,4	58,7
Präparat 1	14,6	19,0	49,6
Präparat 2	15,6	20,8	42,1
Präparat 3	15,1	21,1	48,6
MW	15,1	24,5	53,4
STABW	0,4	6,4	7,9

Tabelle 10: Mittelwerte der Standardabweichung des Hintergrundrauschens. Erwartungsgemäß produziert die Mehrkanal-Spule der Fa. MRI Devices trotz größerem Volumen ein deutlich kleineres Hintergrundrauschen als der Prototyp der Fa. Siemens. Die Volumen-Kniespule schnitt auf Grund ihrer Größe und der fehlenden phased-array-Technik am schlechtesten ab.

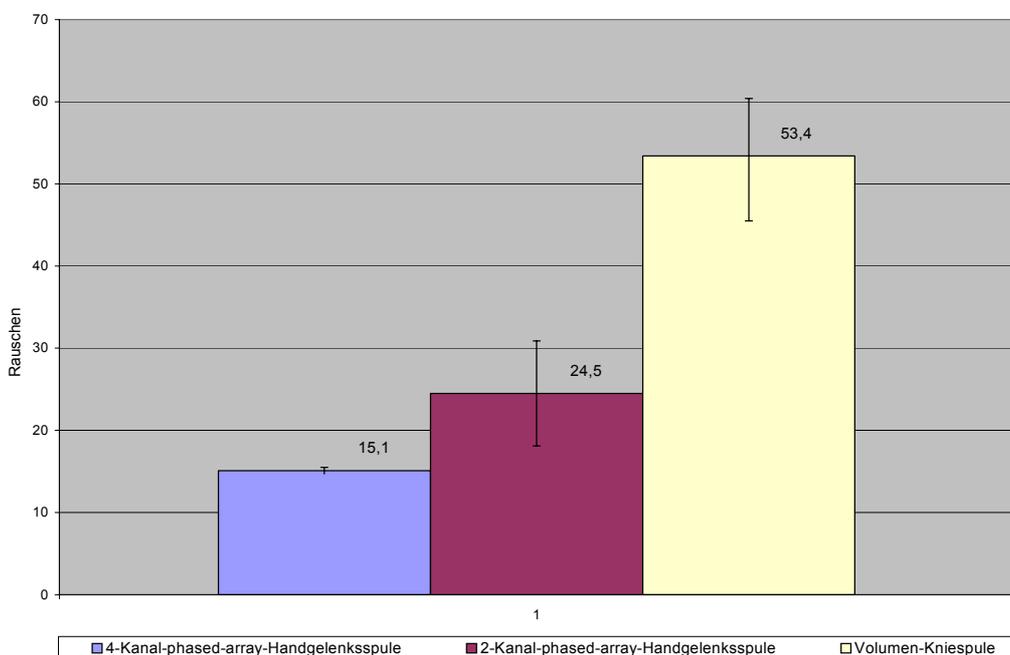


Abb. 9: Mittelwerte der Standardabweichung des Hintergrundrauschens. In der graphischen Darstellung wird der Unterschied der Hintergrundrauschwerte der untersuchten Spulen deutlich. Die Mehrkanalspule schnitt hierbei am besten ab ($15,1 \pm 0,4$). Sie lag damit 38,3% unterhalb des Rauschwertes des 2-Kanal-Prototypen ($24,5 \pm 6,4$) und 71,7% unterhalb der Kniespule ($53,4 \pm 7,9$).

In der vorliegenden Untersuchung war das Rauschen der 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule ($15,1 \pm 0,4$) am geringsten. Die 2-Kanal-phased-array-Handgelenksspule folgte mit deutlichem Abstand ($24,5 \pm 6,4$). Das stärkste Hintergrundrauschen produzierte die großen Extremitätenspule (Volumen-Kniespule) mit $53,4 \pm 7,9$ (Abb.4). Der statistische Unterschied im Wilcoxon-Test aller drei Spulen gegeneinander war mit einem p-Wert $< 0,001$ höchst signifikant.

4.1.2 Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR)

SNR	HG-Spule (4)	HG-Spule (2)	Knie-Spule	SNR	HG-Spule (4)	HG-Spule (2)	Knie-Spule
Spong.	SE	SE	SE	Kortikalis	SE	SE	SE
Prob. 1	80,0	69,3	36,1	Prob. 1	16,1	12,6	9,9
Prob. 2	84,2	71,5	37,8	Prob. 2	13,7	12,4	9,3
Prob. 3	80,4	77,8	38,2	Prob. 3	22,6	18,6	7,3
Präp. 1	89,6	88,1	33,6	Präp. 1	21,8	27,4	8,4
Präp. 2	81,4	66,9	48,2	Präp. 2	21,4	15,8	15,4
Präp. 3	80,8	65,6	40,3	Präp. 3	21,4	14,2	10,1
MW SNR	82,7	73,2	39,0	MW SNR	19,5	16,8	10,1
STABW	3,7	8,5	5,0	STABW	3,7	5,7	2,8

SNR	HG-Spule (4)	HG-Spule (2)	Knie-Spule	SNR	HG-Spule (4)	HG-Spule (2)	Knie-Spule
Knorpel	SE	SE	SE	Diskus	SE	SE	SE
Prob. 1	21,8	22,8	10,2	Prob. 1	7,3	6,4	3,0
Prob. 2	24,1	19,6	9,6	Prob. 2	7,4	8,1	3,6
Prob. 3	24,2	20,5	9,2	Prob. 3	6,5	6,3	3,1
Präp. 1	42,2	36,5	14,4	Präp. 1	24,6	15,8	6,3
Präp. 2	38,0	31,6	15,8	Präp. 2	26,1	17,1	7,0
Präp. 3	35,6	27,2	13,9	Präp. 3	28,0	14,0	6,8
MW SNR	31,0	26,4	12,2	MW SNR	16,7	11,3	5,0
STABW	8,6	6,7	2,9	STABW	10,6	4,9	1,9

Tabelle 11: Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR) verschiedener Strukturen bzw. Gewebearten.

In der untersuchten Spinecho-Sequenz zeigte die Spongiosa gefolgt vom Knorpel die höchsten SNR-Werte. Im direkten Vergleich produziert die 4-Kanal-Technik durch die mehrfache Bildakquisition deutlich höhere SNR-Werte als die verbleibenden Spulen.

Die Tabelle 11 sowie die Abbildung 10 zeigen die SNR-Werte verschiedener Gewebearten in den drei zu untersuchenden Spulen. Das SNR der Spongiosa ist in der 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule ($82,7 \pm 3,7$) deutlich höher als in der 2-Kanal-Spule ($73,2 \pm 8,5$) und in der Volumen-Kniegelenk-Spule ($39,0 \pm 5,0$). Neben dem SNR der Kortikalis in der 4-Kanal-Spule ($19,5 \pm 3,7$) zeigen die SNR-Werte des Knorpels ($31,0 \pm 8,6$) und des Diskus ($16,7 \pm 10,6$) deutlich größere Werte mit höchst signifikantem Unterschied ($p < 0,001$) als die SNR der zwei verbleibenden Spulen.

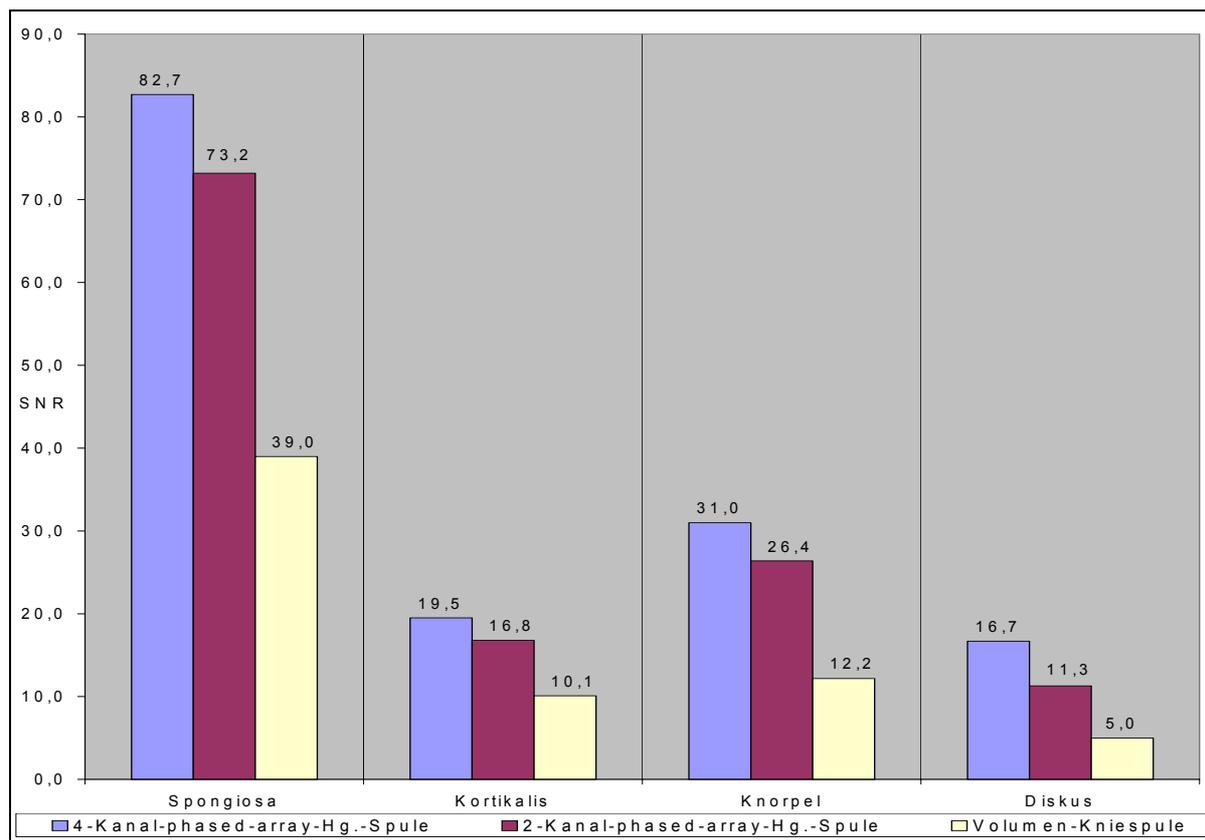


Abb. 10: Mittelwerte der Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR) verschiedener Strukturen. Die Signal-zu-Rausch-Verhältnisse der Gewebearten zeigten in den 3 Spulen signifikante Unterschiede. Die 4-Kanal-Spule der Fa. MRI Devices Inc. produzierte auf Grund ihrer 4 überlagerten Einzelemente erheblich größere SNR als die verbleibenden Spulen. Werden die SNR der Gewebe zusammengefasst, erreichen die 2-Kanal-Spule 85% und die Volumenspule nur 44% des SNR-Niveaus der 4-Kanal-Handgelenksspule. Somit ist neben einem kleinen Volumen und dem daraus resultierenden geringeren Rauschen, auch zu einem großen Anteil die parallele Signalakquisition der phased-array-Technik für die hohen SNR-Werte verantwortlich.

p-Werte SNR	SNR	SNR	SNR	SNR
	Spongiosa	Kortikalis	Knorpel	Diskus
HG-Spule (4), HG-Spule (2)	<0,001	0,002	<0,001	<0,001
HG-Spule (2), KG-Spule	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
HG-Spule (4), KG-Spule	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Tabelle 12: Signifikanzniveau der verschiedenen MRT-Spulen (SNR). Es zeigen sich für alle Gewebearten höchst signifikante ($p < 0,001$) Unterschiede.

4.1.3 Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR)

CNR Knorpel/ Spongiosa	HG-Spule (4) SE	HG-Spule (2) SE	Knie-Spule SE
Proband 1	58,2	46,5	26,7
Proband 2	60,1	51,9	30,7
Proband 3	56,2	57,3	29,0
Präparat 1	47,4	51,6	19,2
Präparat 2	43,4	35,3	32,4
Präparat 3	45,2	38,4	26,4
MW CNR	51,8	46,8	27,4
STABW	7,2	8,5	4,6

CNR Kortikalis/ Spongiosa	HG-Spule (4) SE	HG-Spule (2) SE	Knie-Spule SE
Proband 1	63,9	56,7	26,2
Proband 2	70,5	59,1	28,5
Proband 3	57,8	59,2	30,9
Präparat 1	67,8	60,7	25,2
Präparat 2	60,0	51,1	32,8
Präparat 3	59,4	51,4	30,2
MW CNR	63,2	56,4	29,0
STABW	5,1	4,2	2,9

CNR Diskus/ Spongiosa	HG-Spule (4) SE	HG-Spule (2) SE	Knie-Spule SE
Proband 1	72,7	62,9	33,1
Proband 2	76,8	63,4	34,2
Proband 3	73,9	71,5	35,1
Präparat 1	65,0	72,3	27,3
Präparat 2	55,3	49,8	41,2
Präparat 3	52,8	51,6	33,5
MW CNR	66,1	61,9	34,1
STABW	10,1	9,6	4,5

CNR Diskus/ Knorpel	HG-Spule (4) SE	HG-Spule (2) SE	Knie-Spule SE
Proband 1	14,5	16,4	6,3
Proband 2	16,7	11,5	3,5
Proband 3	17,7	14,2	6,1
Präparat 1	17,6	20,7	8,1
Präparat 2	11,9	14,5	8,8
Präparat 3	7,6	13,2	7,1
MW CNR	14,3	15,1	6,7
STABW	4,0	3,2	1,9

CNR Kortikalis/ Knorpel	HG-Spule (4) SE	HG-Spule (2) SE	Knie-Spule SE
Proband 1	5,7	10,2	0,3
Proband 2	10,4	7,2	0,3
Proband 3	10,5	1,9	1,9
Präparat 1	20,4	9,1	6,0
Präparat 2	16,6	15,8	0,4
Präparat 3	14,2	13,0	2,9
MW CNR	13,0	9,5	2,0
STABW	5,2	4,8	2,2

CNR Kortikalis/ Diskus	HG-Spule (4) SE	HG-Spule (2) SE	Knie-Spule SE
Proband 1	0,6	0,2	0,1
Proband 2	0,4	0,1	0,1
Proband 3	1,0	0,5	0,1
Präparat 1	0,0	0,6	0,0
Präparat 2	0,0	0,0	0,2
Präparat 3	0,0	0,0	0,1
MW CNR	0,3	0,2	0,1
STABW	0,4	0,3	0,1

Tabelle 13: Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR) verschiedener Strukturen bzw. Gewebearten. Die CNR, die den Kontrast zwischen Knorpel und Spongiosa, zwischen Kortikalis und Spongiosa sowie für den Kontrast zwischen Diskus und Spongios und zwischen Kortikalis und Diskus berücksichtigen, zeigten für die 4-Kanal-Spule deutlich größere Werte als die Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse in der 2-Kanal-phased-array-spule oder Volumen-Kniespule. Der Kontrast zwischen Diskus und Knorpel für den 2-Kanal-Prototyp und für die 4-Kanal-phased-array-spule unterschied sich nicht signifikant voneinander.

In der Tabelle 13 fassten wir entsprechend den SNR die Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse zwischen den verschiedenen Gewebearten zusammen. Die bildliche Darstellung erfolgte in der Abbildung 11, die p-Werte der drei Spulen bezogen auf die CNR können der Tabelle 14 entnommen werden. Die CNR, die den Kontrast zwischen Knorpel und Spongiosa und zwischen Kortikalis und Spongiosa berücksichtigen, zeigten alle deutlich größere Werte in der 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule mit hohem signifikantem Unterschied ($p < 0,01$) als die Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse in der 2-Kanal-phased-array-spule. Die CNR, die zwischen Diskus und Spongiosa berechnet wurden und die 4-Kanal-Spule und die 2-Kanal-Spule beinhalteten, unterschieden sich mit einem p -Wert=0,031 signifikant voneinander ($CNR_{4\text{-Kanal-Spule}} = 66,1 \pm 10,1 / CNR_{2\text{-Kanal-Spule}} = 61,9 \pm 9,6$).

Der Kontrast zwischen Diskus und Knorpel war für die 2-Kanal-Spule $CNR_{\text{Diskus/Knorpel}} = 15,1 \pm 3,2$ und für die 4-Kanal-phased-array-spule $CNR_{\text{Diskus/Knorpel}} = 14,3 \pm 4,0$ vergleichbar ($p_{\text{Diskus/Knorpel}} = 0,312$).

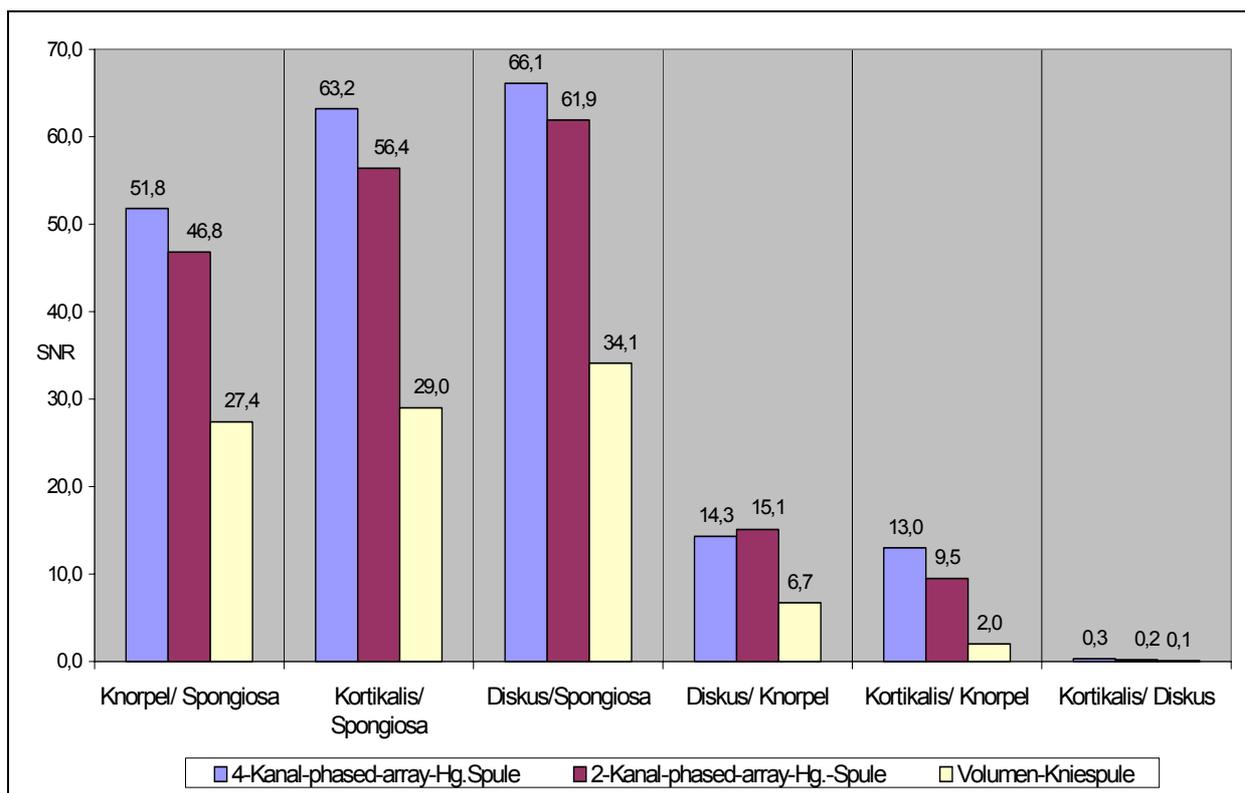


Abb. 11: Mittelwerte der Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR) verschiedener Strukturen und Gewebearten. In der graphischen Darstellung des CNR-Vergleichs der drei untersuchten Spulen, zeigt sich bis auf das Verhältnis Diskus/Knorpel ein höheres CNR für die 4-Kanal-Spule im Gegensatz zu den verbleibenden Spulen. Die 4-Kanal-Handgelenksspule übertrifft den phased-array-Prototypen bei Zusammenfassung aller CNR Werte um 8 %. Die zirkular polarisierte Volumen-Kniespule erreichte nur 41% des CNR-Niveaus der 4-Kanal-Spule und 44% des CNR-Niveaus des 2-Kanal-Prototyps.

p-Werte CNR	CNR	CNR	CNR	CNR	CNR	CNR
	Knorpel/ Spongiosa	Kortikalis/ Spongiosa	Diskus/ Spongiosa	Diskus/ Knorpel	Kortikalis/ Knorpel	Kortikalis/ Diskus
HG-Spule (4), HG-Spule (2)	0,007	0,001	0,031	0,312	0,011	0,062
HG-Spule (2), KG-Spule	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
HG-Spule (4), KG-Spule	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Tabelle 14: Signifikanzniveau der verschiedenen MRT-Spulen (CNR). Es zeigte sich, dass bis auf das CNR zwischen Diskus und Knorpel sich alle weiteren CNR-Werte (Knorpel u. Spongiosa/ Kortikalis u. Spongiosa/ Diskus u. Spongiosa/ Diskus u. Knorpel/ Knorpel u. Kortikalis/ Kortikalis u. Diskus) signifikant voneinander unterschieden. Der fehlende signifikante Unterschied bei dem CNR-Wert, der Diskus und Knorpel in Beziehung setzt, lässt sich durch eine ungenaue Signalwert-Bestimmung oder durch spulenspezifische Eigenschaften erklären.

4.1.4 Bildvergleich

Die unten folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch das Handgelenk einer 18-jährigen Probandin in der zentralen koronaren Schichtführung in der Spin-Echo-Sequenz (TR 400/ TE 20). Durch den Spulenwechsel konnte die identische Positionierung des FOV nicht beibehalten werden, so dass sich die drei MRT-Bilder in der Schnitthöhe leicht unterscheiden. Die Aufnahme in der 4-Kanal-phased-array-spule zeigt die optimale Schichtführung mit Erfassung des Vorderarms, des Karpus und dem Anschnitt des Metakarpus. Der Processus styloideus ulnae ist voll ausgeprägt, der TFCC spannt sich distal des Caput ulnae auf.

Der Unterschied des Hintergrundrauschens ist nur schwer auszumachen, es fällt jedoch eine feinere Zeichnung der Spongiosabälkchen in den Aufnahmen mit Phased-array-technik auf. Der TFCC ist unter anderem auch wegen der Schichtführung am besten in der letzten Abbildung zu identifizieren. Das MRT-Bild der Kniespule zeigt die beste Homogenität. Der Phased-array-prototyp weist im oberen Bildausschnitt auf der radialen Seite einen Signalexzess der Haut und des subkutanen Fettgewebes, sowie auf der ulnaren Seite des Metacarpus auf. Die Abbildung der 4-Kanal-Spule zeigt einen Signalverlust im Knochen von proximal nach distal.

Prinzipiell sind alle wichtigen Strukturen, wie Knochen mit Spongiosabälkchen, TFCC, Knorpel, interössäre Bänder auf den drei Aufnahmen zu identifizieren. Die moderne 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule zeigt dabei die beste Detailerfassung bei eher geringerer Signalhomogenität über den Spulenquerschnitt.



MRT-Bild der Volumen Kniegelenksspule.



MRT-Bild des 2-Kanal-phased-array-Spulenprototyps.



MRT-Bild der 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule.

4.2 Qualitative Ergebnisse- Anatomisch-MR-tomographische Bildkorrelation

4.2.1 Transversale Schnittführung

Die Abbildungen 12-50 zeigen die Anatomie des Handgelenkes in der transversalen Schnittführung von proximal nach distal in insgesamt 12 Schnitthöhen. Die ersten zwei Korrelationen (Abb. 12-22) präsentieren das proximale Handgelenk mit dem Übergang der Vorderarmknochen zur proximalen Karpalreihe. Abbildung 23-33 bilden die Karpalia der proximalen Reihe ab. Die zwei nächsten anatomisch-MR-tomographischen Vergleiche (Abb. 34-42) sind in Höhe des proximalen Karpaltunnels gefertigt und zeigen den Eingang der Loge de Guyon. Der distale Karpaltunnel mit der Loge de Guyon in Höhe des Hamulus ossis hamati wird durch die Abbildungen 43- 50 repräsentiert.

4.2.1.1 Schichtung in Höhe des proximalen Handgelenkes

Die Abbildungen 12-16 zeigen das distale Radioulnargelenk. Besonders in Abbildung 14 und 15 ist der knorpelige Überzug des Gelenkes zu erkennen. Auf der palmaren Seite des Radius spannt sich der kurze M. pronator quadratus auf. Unterhalb zeigt sich Fett- bzw. Bindegewebe, das sich im T1-gewichteten Bild (Abb. 12) signalstark darstellt und die Sehnen der Flexoren separiert. In diesem sogenannten „Paronaraum“ können sich Entzündungen nach proximal ausbreiten.

In den 3D-GRE-Sequenzen (Abb.14 u. 15) sind der N. medianus und der N. ulnaris signalstark zu identifizieren. Der runde N. medianus liegt in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Beugeschnehen auf radialer Seite und ist im Vergleich zum N. ulnaris, der sich in der Nähe der Arteria ulnaris befindet, im Querschnitt etwas größer.

Direkt unterhalb des N. medianus ist die Fascia antebrachii auf radialer Seite zu identifizieren (Abb. 14 u. 16), die durch ihr Krümmungsverhalten bei Karpaltunnelsyndrom zur Diagnosesicherung herangezogen wird.

Die Arteria ulnaris und radialis bilden sich im makroskopischen Präparateschnitt (Abb. 16) mit einem Lumen ab. Die A. radialis liegt dabei radial und dorsal des M. flexor carpi radialis, und wie der variable verlaufende M. palmaris longus, außerhalb des Retinaculum flexorum. Die A. ulnaris zeichnet sich palmar und medial zum N. ulnaris, zwischen dem M. flex. carpi ulnaris und den tiefen Handgelenksbeugern, ab.

Auf der Dorsalseite sind die Fingerextensoren durch ihre definierte Lage zu Ulna und Radius einfach zu bestimmen. Radial des Tuberculum listeri bis zum lateralen Ansatz des M. pronator quadratus bilden sich die Sehnen der Mm. carpi radialis longus und brevis, M. ext. pollicis brevis und M. abductor poll. longus mit ihren signalstarken Sehnenscheiden z.B. in der Protonen-gewichteten Sequenz eindrücklich ab (Abb.13).

Auf der ulnaren Seite bis zum Listerischen Vorsprung sind die Sehnen des M. extensor carpi ulnaris, des M. extensor digiti minimi, des M. extensor digitorum, sowie des M. ext. pollicis longus zu identifizieren. Unterhalb der Fingerstrecker liegt, in direkter Nähe zum Radius, die Sehne des M. ext. indicis.

In den Abbildungen 17-22 ist der Übergang zur Karpalreihe mit dem Anschnitt des proximal gelegenen Os lunatum zu sehen. Das Mondbein bildet sich mit seinem knorpeligen Gelenküberzug ab und ist an seiner radialen Seite vom distalen Radius eingebettet. Neben dem angeschnittenen Proc. styloideus ulnae sind weiter dorsal und medial die oberflächlichen Venen mit ihrem Lumen abgrenzbar (Abb. 18 u. 19).

4.2.1.2 Schichtung in Höhe der proximalen Karpalreihe

In den Abbildungen 23-26 werden die Knochen der proximalen Karpalreihe sichtbar. Aufgrund der bogenförmigen Anordnung kommen die Karpalia nur nach und nach zur vollen Darstellung. Die knorpelige Art. intercarpalis zwischen dem Os lunatum und dem Os scaphoideum ist sehr gut in den Abbildungen 23, 24 und 28 zu begutachten.

Dorsal und palmar des Gelenkes liegt die klinisch als SL-Band bezeichnete kräftige Bandstruktur, die sich in mittlerer Signalintensität in der Protonen-gewichteten Sequenz (Abb. 26) darstellt.

Auf Höhe des distalen Radius und dem Os lunatum spannt sich vom angeschnittenen Proc. styloideus ulnae der semizirkuläre, ligamentäre TFCC mit mittlerer Signalintensität zur lateralen Seite des Mondbeines auf. Der größte Anteil dieses Komplexes liegt dabei auf der ulnaren Seite des Os lunatum (Abb. 23).

In der Abbildung 25 erkennt man die dünne Handrückenfaszie, die die Extensoren vom subkutanen Fettgewebe trennt.

In dieser Höhe, bildet sich der ursprüngliche rundliche N. medianus in direkter Nachbarschaft zu den Flexoren der Finger unterhalb des Retinaculum flexorum in

ovaler bzw. länglicher Form ab. Er hebt sich durch seinen höheren Lipid- und Wassergehalt im Gegensatz zu den oberflächlichen und tiefen Beugesehnen gut ab. Das LT-Band, das sich wie das SL-Band zwischen den anliegenden Karpalia auf der Dorsal- und Palmarseite aufspannt, ist sehr gut in den Abbildungen 26 und 30 abzugrenzen. Es stellt sich als kräftiger Bandzug zwischen dem Os lunatum und Os triquetrum mit mittlerer Signalintensität dar.

Die palmare Grenze der Tabatiere bilden die Mm. abductor pollicis longus und extensor pollicis brevis. Hier liegt oberflächlich und lateral des Kahnbeins die V. cephalica (Abb.30). Der M. ext. pollicis longus, der die dorsale Begrenzung bildet, ist auf den MR-tomographischen Schnitten nicht abzugrenzen.

Die A. radialis die ursprünglich auf der Palmarseite unterhalb des Radius nach proximal zieht, wechselt im Verlauf ihre Lage und zieht unter den Daumensehnen auf die radiale Seite des Os scaphoideum in die Tabatiere (Abb. 33).

Das Os capitatum, das zur distalen Reihe der Karpalia zu rechnen ist, ist auf den Abbildungen 30-33 angeschnitten. Es ist leicht nach lateral versetzt, so dass eine Artikulation mit dem Gelenkspalt von Os lunatum und Kahnbein möglich ist.

4.2.1.3 Schichtung in Höhe des proximalen Karpalkanals

Die lateralen Wände des Karpalkanals werden ulnar durch das Erbsenbein und radial durch das Kahnbein, bzw. durch das Os trapezium gebildet. Das Retinaculum flexorum, das die palmare, gekrümmte Begrenzung bildet, hat zum einen seine Ansatzpunkte ulnar am Os pisiforme bzw. am Hamulus ossis hamati, zum anderen radial am Tuberculum ossis trapezii bzw. am Kahnbein.

In direkter Nachbarschaft, nur durch das kräftige Retinaculum flexorum getrennt, liegt der proximale Eingang der Loge de Guyon mit N. und A. ulnaris und Begleitvenen (Abb. 36 u. 38). Der Nerv befindet sich in dieser Höhe dorsal der Arterie bzw. den Venen und hebt sich mit mittlerer Signalintensität aus dem Fett gefüllten Raum gut hervor.

In den Abbildungen 34-36 und 38 ist das palmare Lig. scaphotriquetrum, das die tiefe Begrenzung des Karpalkanals bildet, zu identifizieren. Auf der dorsalen Seite bildet sich v.a. in der PD-FS-Sequenz das Lig. scaphohamatum dorsale ab, welches die Karpalia unterhalb der Extensorensehnen überspannt und sie mit weiteren Bändern im Gefüge hält. Palmar des Os pisiforme ist die Sehne des M. flexor carpi ulnaris zu sehen, die am Erbsenbein inseriert und es einbindet (Abb. 35).

Auf der Gegenseite befindet sich innerhalb des Karpalkanals auf radialer Seite in unmittelbarer Nähe der Volarfläche des Kahnbeins die Sehne des M. flex. pollicis longus. Weiter lateral, ebenfalls palmar des Os scaphoideum liegt die Sehne des M. flex. carpi radialis (Abb. 35/36), die noch vom Retinaculum bedeckt, aber von einer bindegewebigen Scheidewand vom eigentlichen Karpalkanal getrennt ist.

Die Abbildungen 39-42 zeigen Anschnitte des Os triquetrum (Abb. 39) und Os trapezoideum (Abb. 40).

Die A. radialis hat mittlerweile ihre Position neben dem Kahnbein verlassen und zieht lateral um das Os trapezium auf die Dorsalseite des Handgelenks (Abb. 40).

Der N. medianus wird durch die Flexoren bedrängt, zeigt aber keine Kompressionszeichen und bildet sich nun als längliche, abgeplattete Struktur ab.

4.2.1.4 Schichtung in Höhe des distalen Karpalkanals

Die Abbildungen 43-50 zeigen die Karpalia der distalen Reihe in Höhe des Hamulus ossis hamati und dem Tuberculum ossis trapezii. Das nur leicht konvex gebogene Retinaculum flexorum verbindet diese beiden Strukturen und formt die palmare Begrenzung des Karpalkanals. Die oberflächlichen und tiefen Beuger separieren sich durch ihre nebeneinander liegende rundliche Anordnung innerhalb des Karpaltunnels. Die Sehne des M. flex. carpi radialis verläuft innerhalb des Kanals an der Palmarseite des Trapeziums, durch das Tuberculum eingebettet, nach distal (Abb.44). Unterhalb des Os trapezium kommt der aus den Mm. opponens pollicis, abductor pollicis longus und brevis gebildete Thenar zum Vorschein.

In den Abbildungen 48-50 ist die spitze, dreieckige Insertion dieser Daumenballenmuskulatur in das Retinaculum flexorum zu sehen. Ulnar des Hamulus ossis hamati bildet sich der Hypothenar bestehend aus dem M. abductor digiti minimi, dem M. flex. digiti minimi brevis und dem M. opponens digiti minimi ab (Abb. 43/47/50). Palmar davon ist das subkutane Fettgewebe des Kleinfingerballens in hoher Signalintensität mit bindegewebigen Septen dargestellt (Abb.43).

Die Loge de Guyon, die unterhalb des Hamulus in länglicher Ausdehnung zu identifizieren ist, enthält die Nervenbifurkation des N. ulnaris mit dem Ramus superficialis und profundus (Abb. 48). Der M. palm. brevis, der im Verlauf zur Darstellung kommt (Abb. 47/49/50), bildet den Boden der Loge de Guyon.

In Abbildung 50 ist die Basis des Os metacarpale pollicis, in den Abbildungen 48 und 49 die Basis des Os metacarpale III angeschnitten.

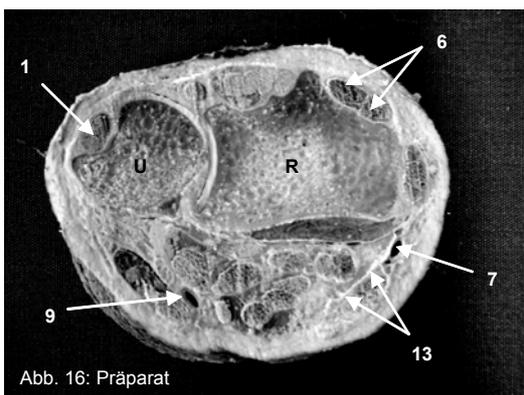
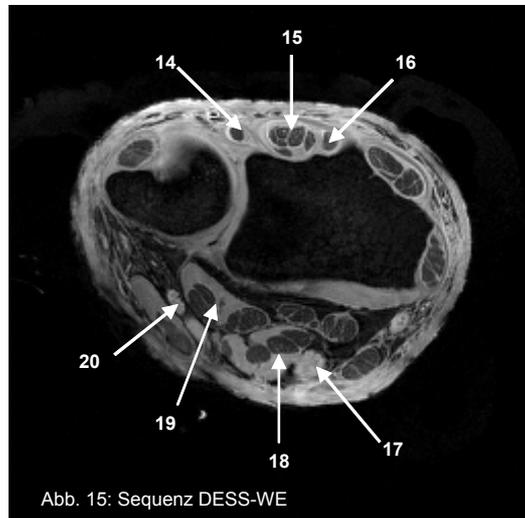
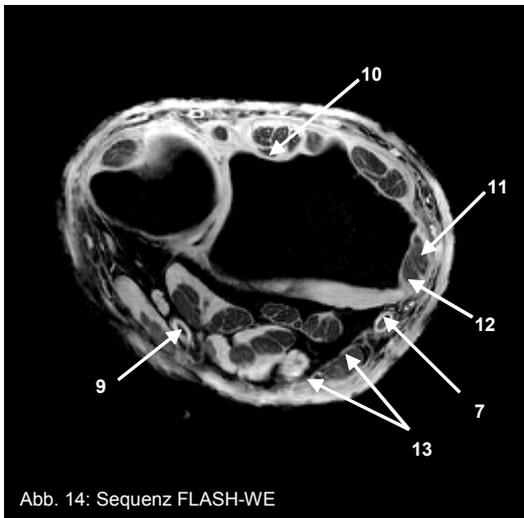
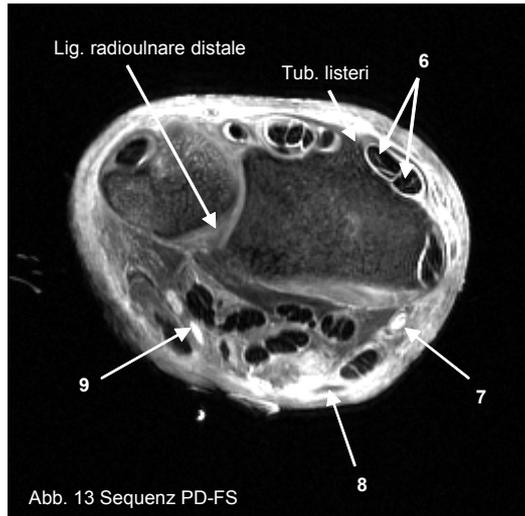
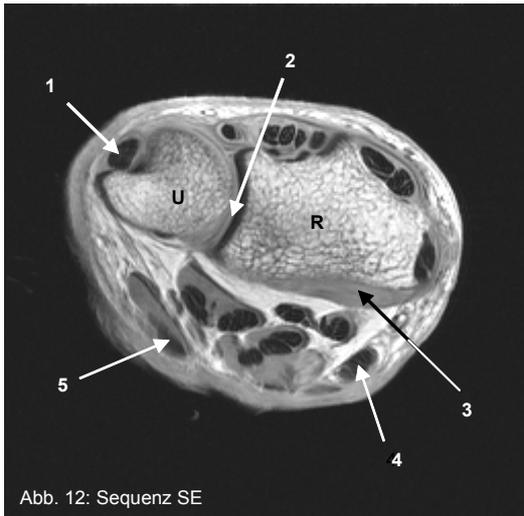
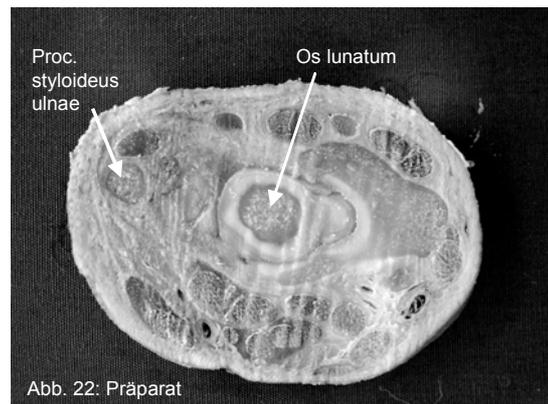
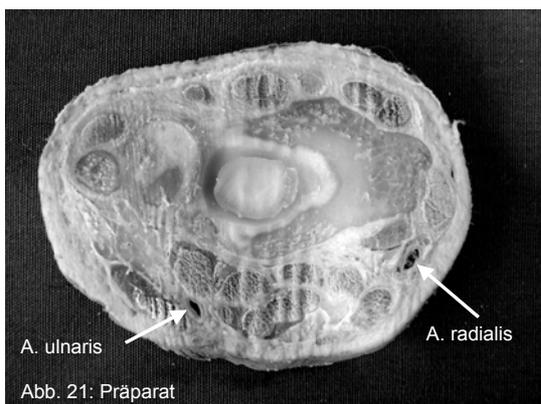
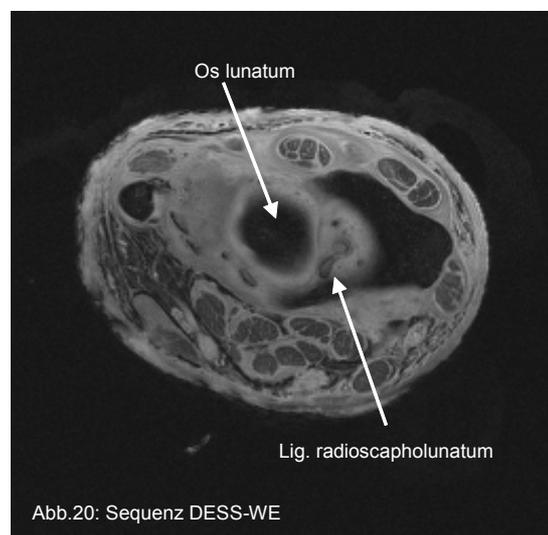
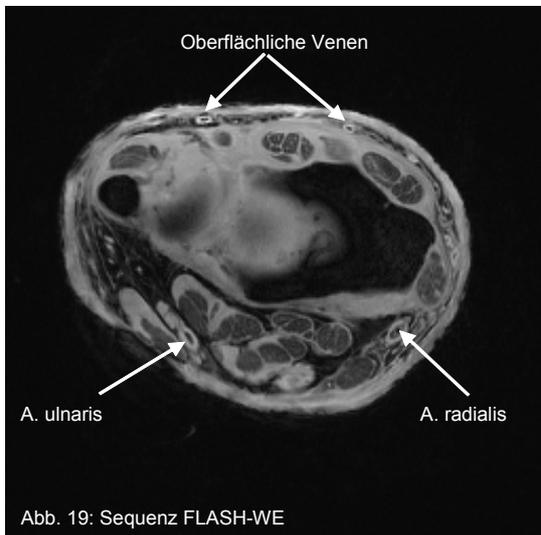
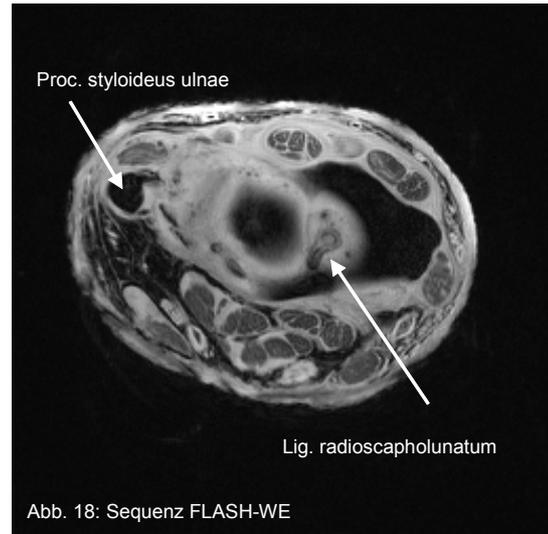
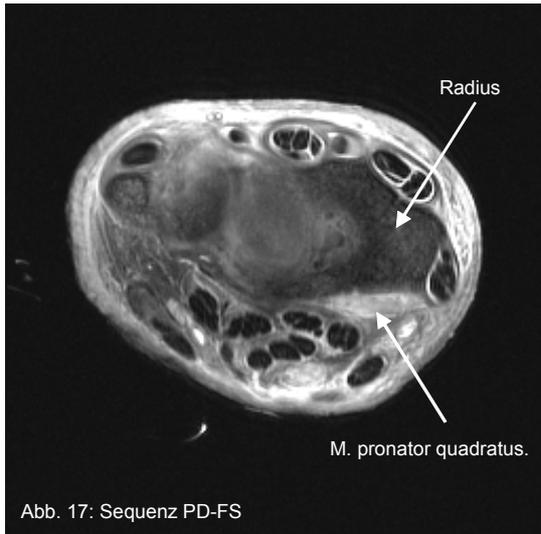
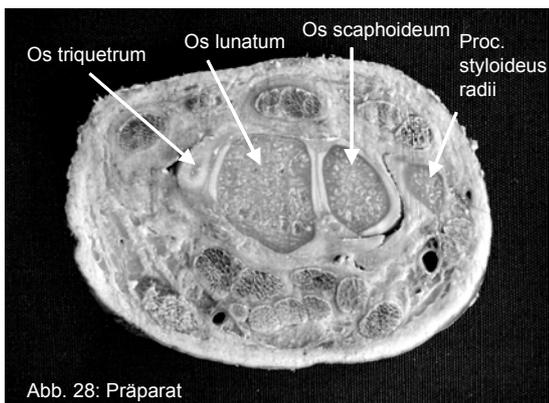
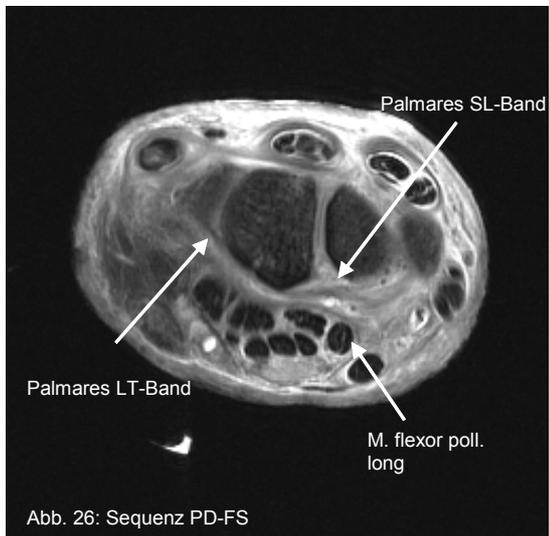
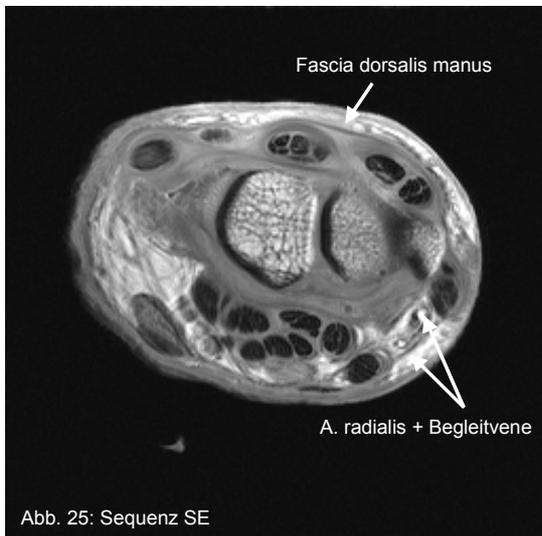
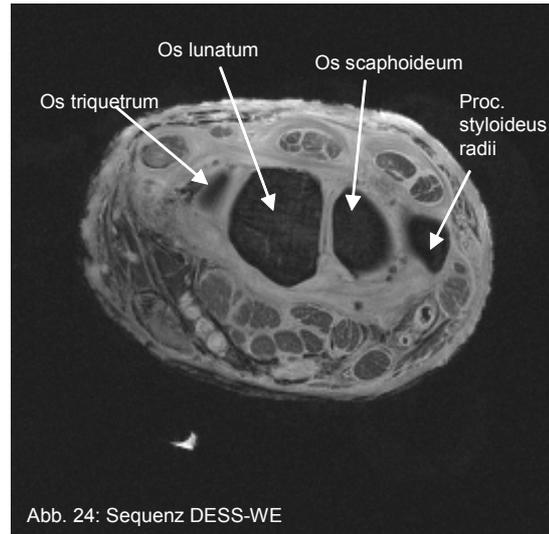
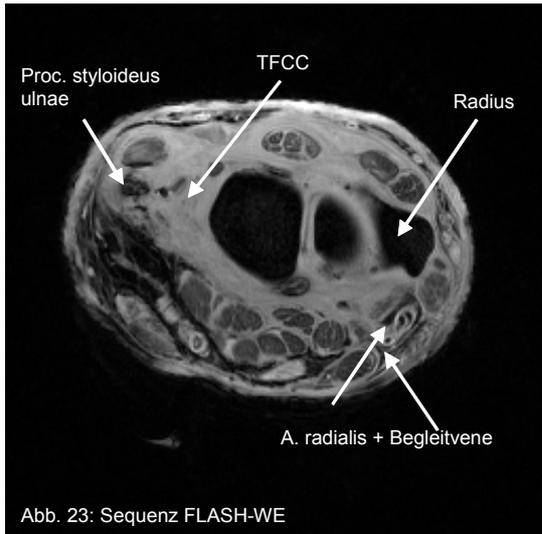


Abb. 12-16: Schnitt in Höhe d. distalen Radioulnargelenkes

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 1: M. ext. carpi ulnaris | 12: M. abductor poll. long. |
| 2: Art. radioulnaris dist. | 13: Fascia antebrachii |
| 3: M. pronator quadratus | 14: M. ext. digiti minimi |
| 4: M. flexor carpi radialis | 15: M. ext. digitorum |
| 5: M. flexor carpi ulnaris | 16: M. ext. poll. long. |
| 6: M. ext. carpi rad. long./brevis | 17: N. medianus |
| 7: A. radialis | 18: M. flex. digitorum superf. |
| 8: M. palmaris longus | 19: M. flex. digitorum prof. |
| 9: A. ulnaris | 20: N. ulnaris |
| 10: M. ext. indicis | R: Radius |
| 11: M. ext. pollicis brevis | U: Ulna |





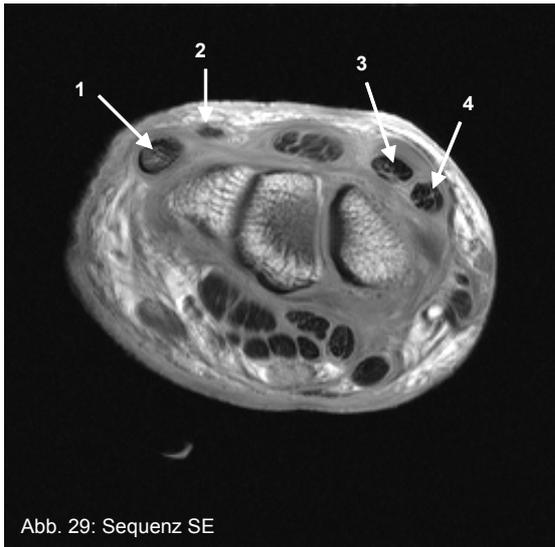


Abb. 29: Sequenz SE

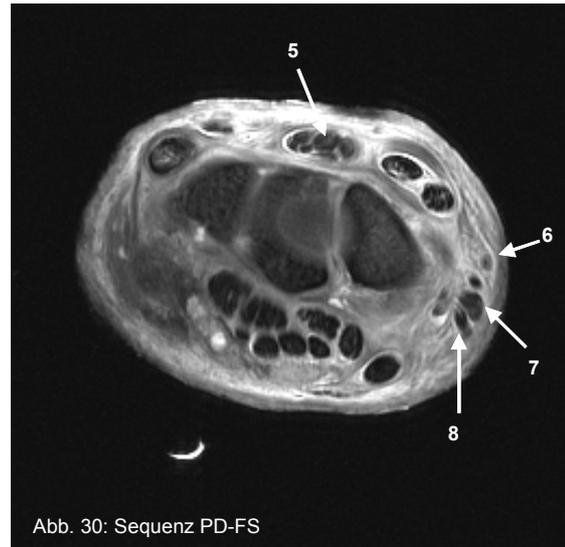


Abb. 30: Sequenz PD-FS

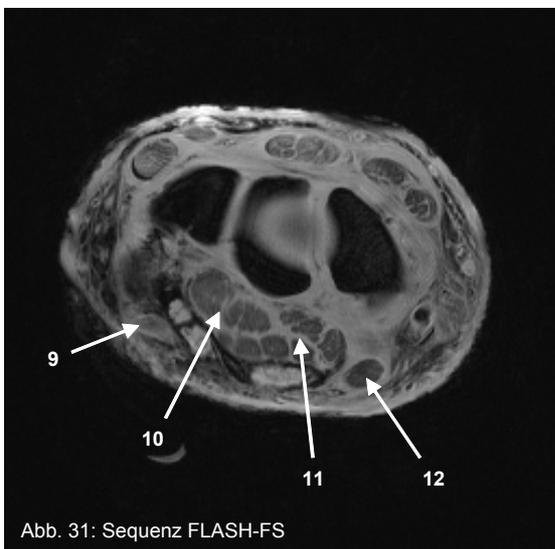


Abb. 31: Sequenz FLASH-FS

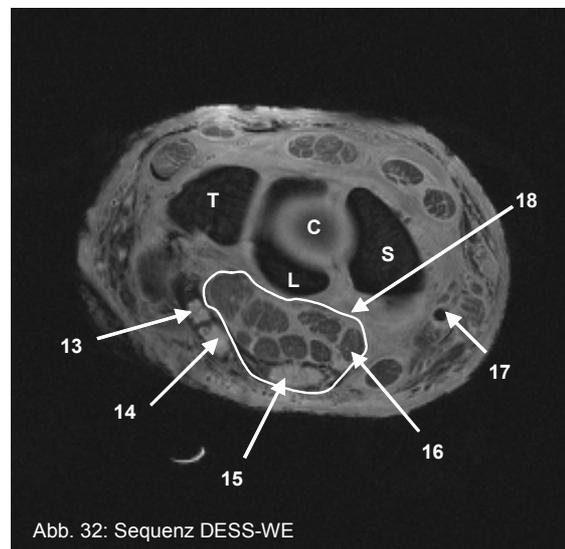


Abb. 32: Sequenz DESS-WE

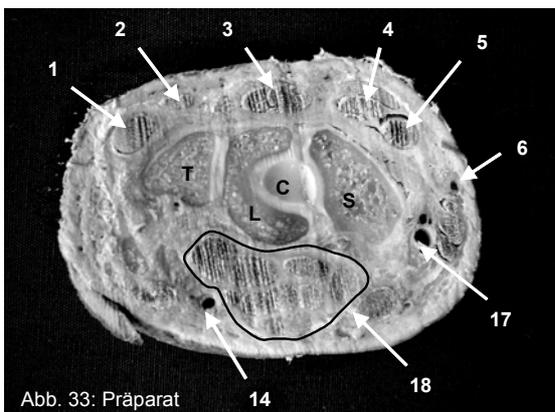


Abb. 33: Präparat

Abb. 29- 33: Schnitt in Höhe der proximalen Karpalreihe

- | | |
|---------------------------------|------------------------------|
| 1: M. ext. carpi ulnaris | 12: M. flexor carpi radialis |
| 2: M. ext. digiti minimi | 13: N. ulnaris |
| 3: M. ext. carpi radialis brev. | 14: A. ulnaris |
| 4: M. ext. carpi radialis long. | 15: N. medianus |
| 5: M. ext. digitorum et indicis | 16: M. flex. poll. longus |
| 6: V. cephalica | 17: A. radialis + Vve. comm. |
| 7: M. ext. poll. brevis | 18: Canalis carpi |
| 8: M. abd. poll. longus | C: Os capitatum |
| 9: M. flexor carpi ulnaris | L: Os lunatum |
| 10: M. flex. digitorum prof. | S: Os scaphoideum |
| 11: M. flex. digitorum superf. | T: Os triquetrum |

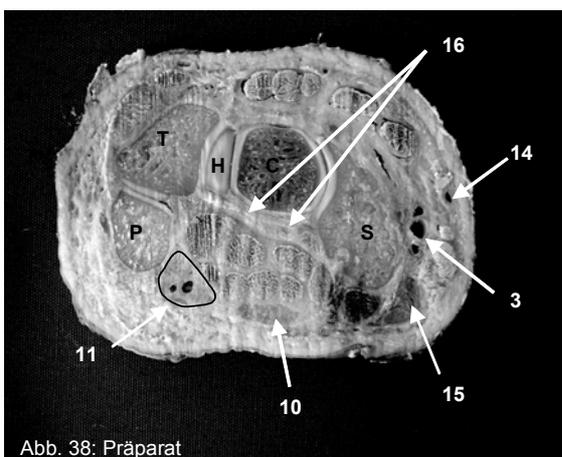
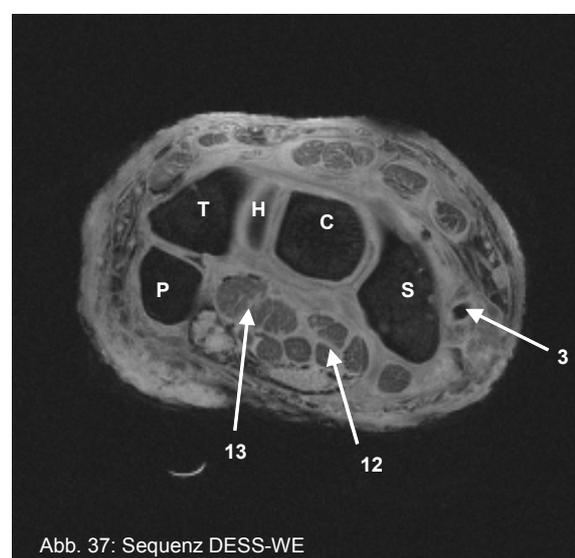
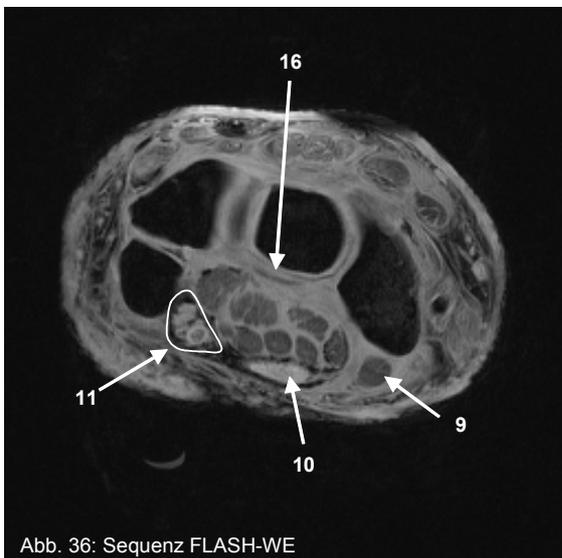
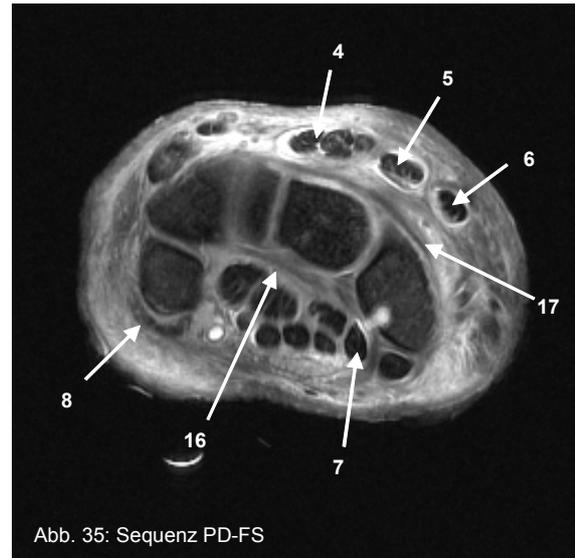
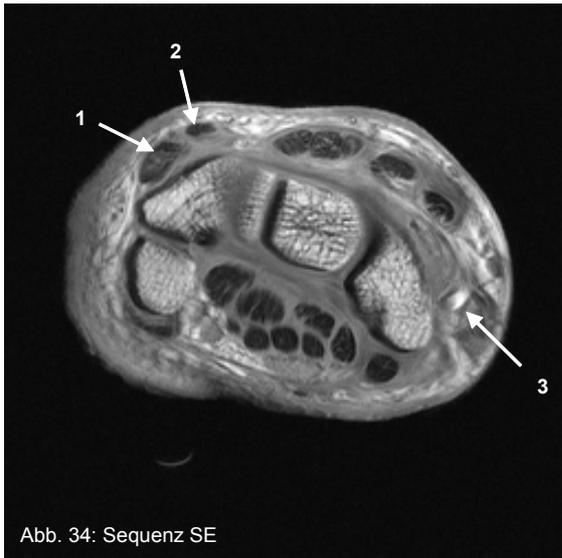


Abb. 34-38: Schnitt in Höhe d. Pisotriquetralgelenkes/ proximaler Eingang der Loge de Guyon/ Karpalkanal

- | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 1: M. ext. carpi ulnaris | 13: M. flex. digitorum prof. |
| 2: M. ext. digiti minimi | 14: V. cephalica |
| 3: A. radialis + Vve. comm. | 15: Thenar |
| 4: M. ext. digitorum et indicis | 16: Lig. scaphotriquetrum palm. |
| 5: M. ext. carpi rad. brevis | 17: Lig. scaphohamatum dors. |
| 6: M. ext. carpi rad. longus | |
| 7: M. flexor pollicis longus | |
| 8: Insertion d. M. flex. carpi uln. | |
| 9: M. flex. carpi radialis | |
| 10: N. medianus | |
| 11: proximale Loge de Guyon | |
| 12: M. flexor digitorum superf. | |

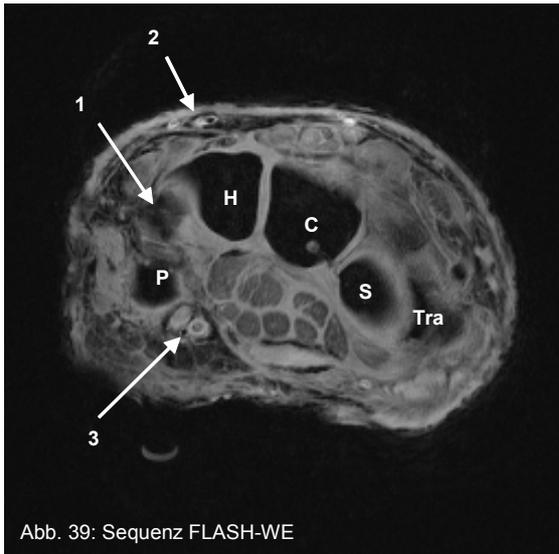


Abb. 39: Sequenz FLASH-WE

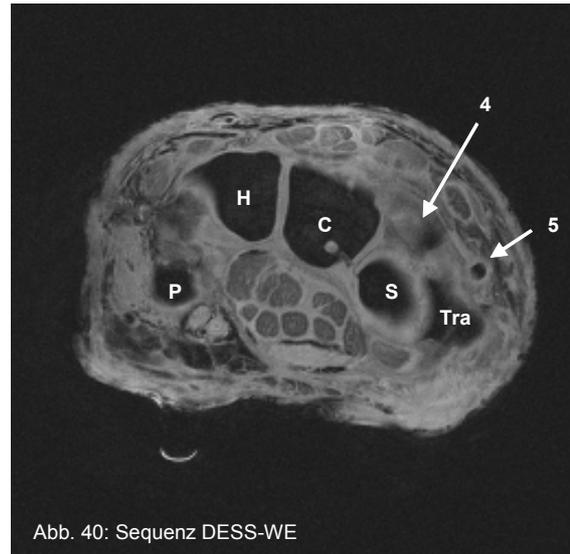


Abb. 40: Sequenz DESS-WE

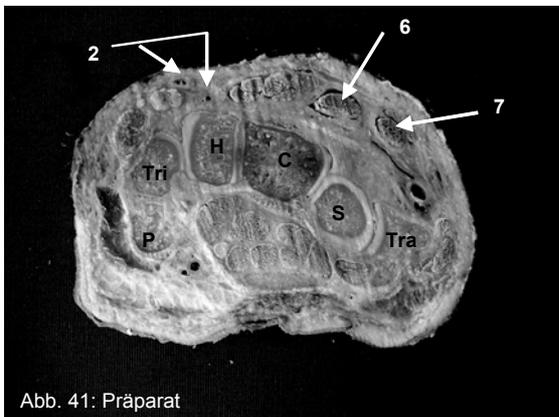


Abb. 41: Präparat

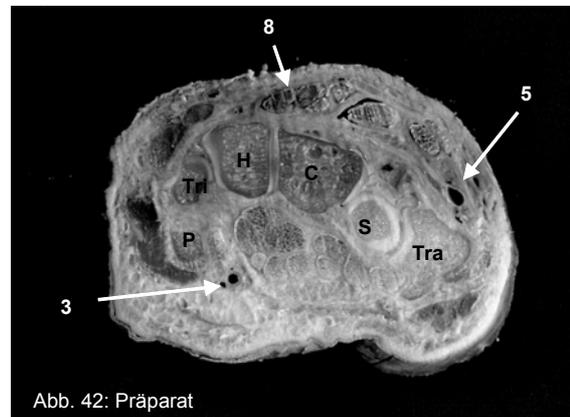


Abb. 42: Präparat

Abb. 39- 42: Schnitt in Höhe des mittleren Karpaltunnels/ Beginn distale Karpalreihe

- 1: Anschnitt Os triquetrum
- 2: oberflächliche Venen
- 3: Loge de Guyon mit A. und N. ulnaris
- 4: Anschnitt Os trapezoideum
- 5: A. radialis
- 6: M. ext. carpi radialis brevis
- 7: M. ext. carpi radialis longus

- 8: M. ext. digitorum et indicis
- C: Os capitatum
- H: Os hamatum
- P: Os pisiforme
- S: Os scaphoideum
- Tra: Os trapezium
- Tri: Os triquetrum

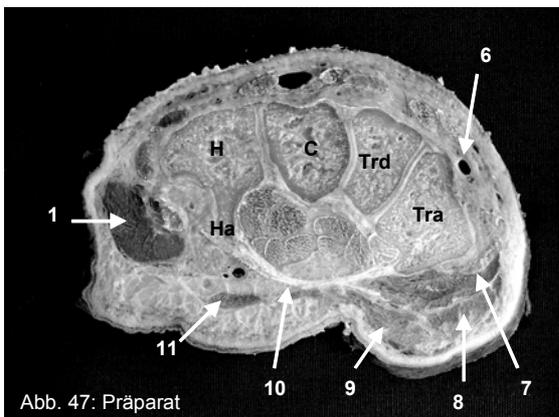
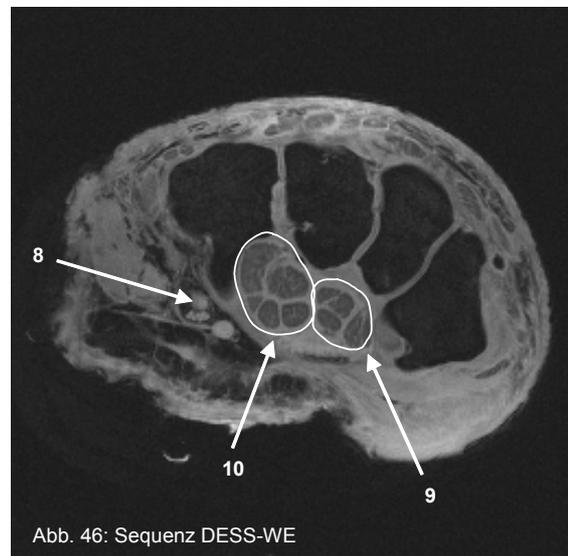
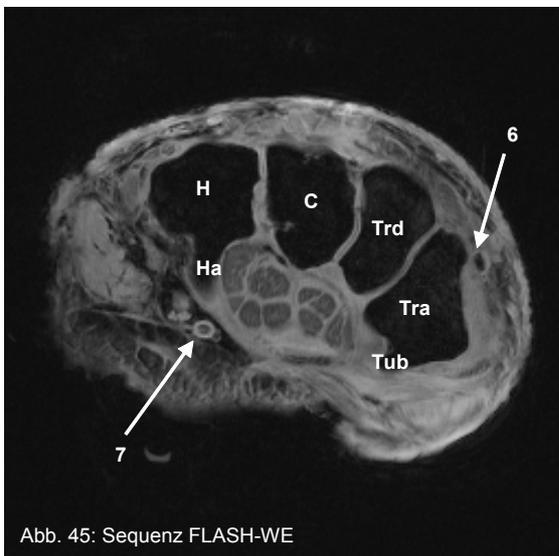
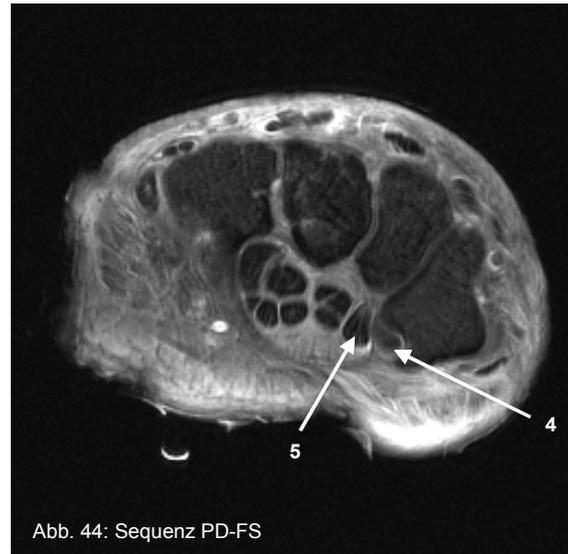
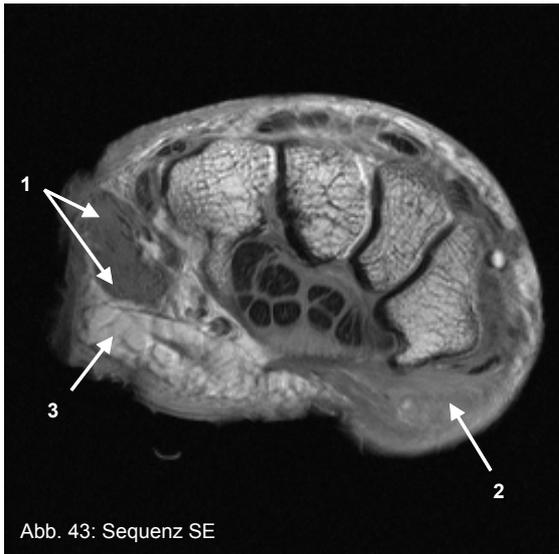


Abb. 43- 47: Schnitt in Höhe der mittleren Loge de Guyon / Hamulus ossis hamati

- | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1: Hypothenar | C: Os capitatum |
| 2: Thenar | Ha: Hamulus ossis hamati |
| 3: subkutanes Fettgewebe | H: Os hamatum |
| 4: M. flexor carpi radialis | Tra: Os trapezium |
| 5: M. flexor polli. longus | Trd: Os trapezoideum |
| 6: A. radialis | Tub: Tuberculum o. trapezii |
| 7: A. ulnaris | |
| 8: N. ulnaris | |
| 9: M. flex. digitorum superficialis | |
| 10: M. flex. digitorum profundus | |
| 11: M. palmaris brevis | |



Abb. 48: Sequenz FLASH-WE

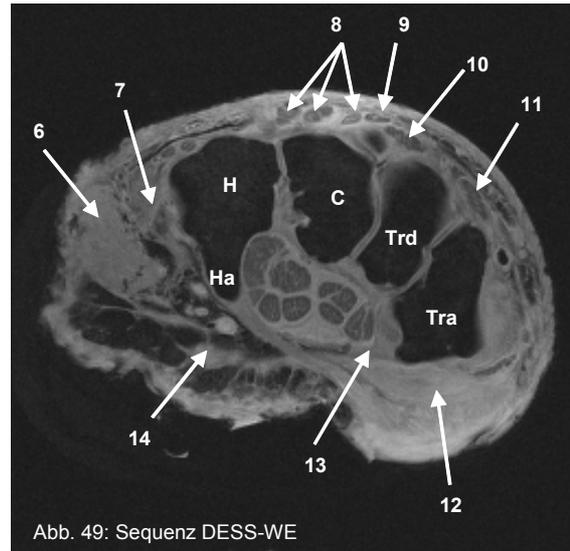


Abb. 49: Sequenz DESS-WE

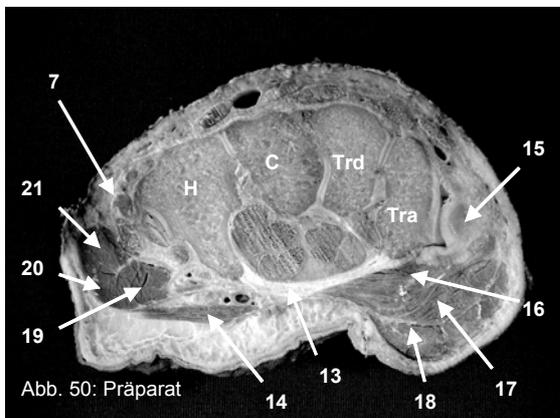


Abb. 50: Präparat

**Abb.48-50: Schnitt in Höhe der distalen Loge de Guyon/
Ende des Karpalkanals**

- 1: Ramus profundus nervi ulnaris
- 2: Os metacarpale III
- 3: Arteria radialis
- 4: Nervus ulnaris
- 5: Ramus superficialis nervi ulnaris
- 6: Hypothenar
- 7: Musculus extensor carpi ulnaris
- 8: Musculus extensor digitorum
- 9: Musculus extensor indicis
- 10: Musculus extensor carpi radialis brevis
- 11: Musculus extensor carpi radialis longus
- 12: Thenar
- C: Os capitatum
- Ha: Hamulus ossis hamati
- H: Os hamatum
- Tra: Os trapezium
- Trd: Os trapezoideum

- 13: Retinaculum flexorum
- 14: Musculus palmaris brevis
- 15: Os metacarpale pollicis
- 16: Musculus opponens pollicis
- 17: Musculus abductor pollicis brevis
- 18: Musculus abductor pollicis longus
- 19: Musculus abductor digiti minimi
- 20: Musculus flexor digiti minimi brevis
- 21: M. opponens digiti minimi

4.2.2 Koronare Schnittführung

Die Abbildungen 51-54 zeigen koronare Schnitte in Höhe des Os pisiforme bzw. des oberflächlichen Karpalkanal mit den darin enthaltenen Beugesehnen. Die zwei nächsten Korrelationen bilden die Anschnitte des Karpus mit Os lunatum, Os scaphoideum, Os triquetrum und den Vorderarmknochen ab (Abb. 56-65). In den Abbildungen 66-75 sind zwei zentrale Schichthöhen des Karpus erfasst.

4.2.2.1 Schichtung in Höhe des Karpalkanals

Zwischen dem Os pisiforme und dem Tuberculum ossis trapezii verlaufen die Sehnen der Fingerbeuger innerhalb des Karpalkanals. Die Sehnen des M. flexor digitorum superficialis liegen dabei auf der radialen Seite des Os trapezium (Abb. 51). Die Sehne des M. flexor pollicis longus verläuft medial des Os trapezium und biegt in Höhe der Art. carpometacarpale zum Daumen ab (Abb. 51/55).

In Abbildung 53 ist die Fläche des Karpalkanals und die lateral anliegende Loge de Guyon gekennzeichnet. Die ulnare Loge breitet sich vom Os pisiforme bis zur ersten Sehne des M. flexor digitorum profundus nach radial aus und reicht in proximodistaler Richtung bis zum Hamulus ossis hamati. Sie wird dabei in ventrodorsaler Schichtführung vom tiefer gelegenen Karpalkanal etwas überlappt.

Vom Erbsenbein nach distal erstreckt sich in mittlerer Signalintensität der M. abductor digiti minimi (Abb. 52/55). Weiter distal, medial der Basis des Os metacarpale V, hat der M. digiti minimi brevis am Hamulus ossis hamati seinen Ursprung.

4.2.2.2 Schichtung in Höhe des oberflächlichen Karpus

In den folgenden Abbildungen sind die Anschnitte der Vorderarmknochen, sowie Teile des Karpus abgebildet. Die Sehnen der Fingerbeuger verlassen den Karpalkanal zwischen Os hamatum und Os triquetrum um nach distal zu gelangen.

Ebenfalls gut beurteilbar sind die Gelenke zwischen den Metakarpalia I und V und dem Os hamatum bzw. dem Os trapezium. Auf der radialen Seite in Höhe der Art. scaphotriquetrale schlängelt sich die A. radialis um das Os trapezium, um in die Tabatiere und nach dorsal zu gelangen (Abb. 58). Auf der ulnaren Seite lateral der Ulna zieht die Sehne des M. flexor carpi ulnaris, nach distal zum Hamulus ossis hamati bzw. zum Metacarpale V (Abb. 63 und 65). Die kräftige Sehne des zweiten Handgelenksbeuger, der M. flexor carpi radialis, der neben dem Radius nach distal zum Metacarpale II läuft, ist in Abb. 56 in der T1-Wichtung und im makroskopischen Bild zu identifizieren.

Ebenfalls sehr deutlich ist in diesen Darstellungen das distale V-Band erkennbar. Die ligamentäre Verbindung zwischen Os triquetrum und dem nicht angeschnittenen Os capitatum, sowie der kräftigere Faserzug zwischen dem ebenfalls nicht abgebildeten Os scaphoideum und dem Os capitatum bilden das „deltoid ligament“. Die Spitze zeigt dabei nach distal. Das Band zwischen Os lunatum und Os capitatum kann fehlen, bzw. ist hier nicht abgebildet.

In Abbildung 62 und 65 ist die radiale Anheftung des TFCC durch den Kontrastunterschied zwischen Knorpel und ligamentären Zug gut abzugrenzen.

Vom Processus styloideus ulnae zum Os triquetrum zieht das Lig. collaterale ulnae, das neben anderen Bändern zum Verbund des TFCC zählt.

4.2.2.3 Schichtung in Höhe des zentralen Karpus

In den Abbildungen 66-75 sind zwei Schnitte innerhalb des Handgelenks dargestellt. Die Karpalia sind in den Panoramaausschnitten mit ihren gelenkigen Verbindungen untereinander zu sehen. V. a. in den GRE-Sequenzen (Abb. 68/69 und 73/74) ist der Knorpel zu beurteilen. Zusätzlich bilden sich die Metakarpalia mit ihrer Artikulation zum Karpus im oberen Bildausschnitt ab (Abb. 71-75).

Die signalstarken Knochendefekte des Os lunatum, Os triquetrum, Os capitatum und Os trapezoideum sind sowohl in den MR-tomographischen Sequenzen, als auch im makroskopischen Bild zu identifizieren. Die a.e degenerativ bedingten Synovialzysten stellen sich v.a. in der wassersensitiven Protonen-gewichteten Sequenz mit Fettsättigung gut dar (Abb.72). Zwischen Ulna, Radius, Os lunatum und Os triquetrum spannt sich der signalschwache TFCC in annähernd dreieckiger Konfiguration auf (Abb.67 und 70).

Das SL- und LT-Band ist trotz der sensiblen PD-FS-Sequenz (Abb. 67) nur schwer abgrenzbar. Die A. radialis ist in transversaler Schnittführung neben dem Os trapezium getroffen und stellt sich in Abbildung 68 und 70 mit einem Lumen dar.

Am unteren Bildausschnitt (Abb.73 und 74) erkennt man die Membrana interossea und den M. pronator quadratus in mittlerer Signalintensität.

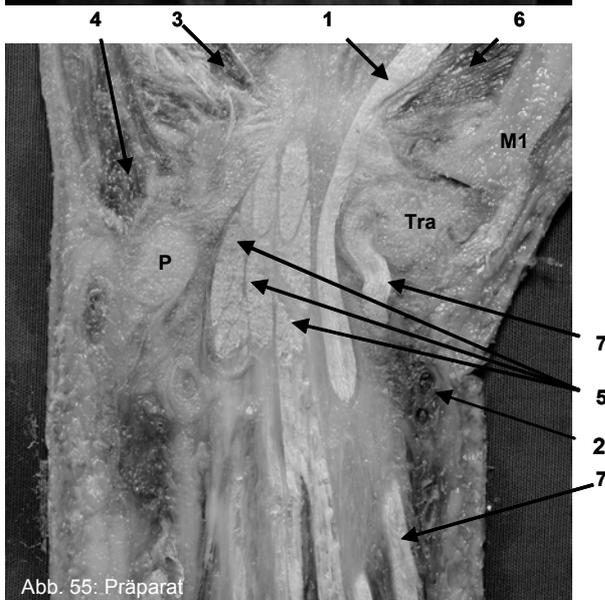
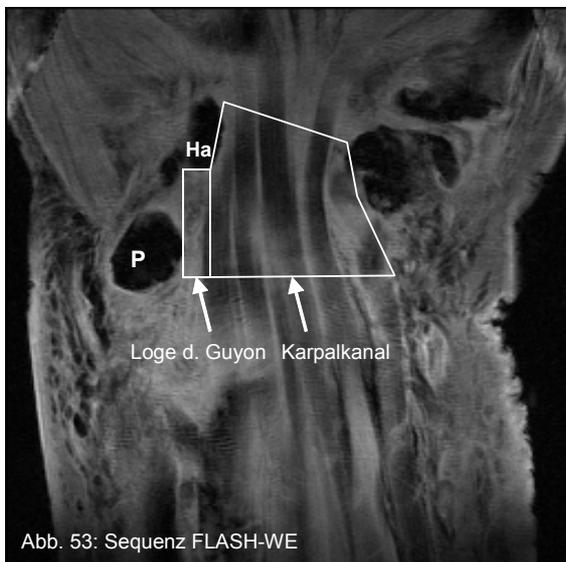
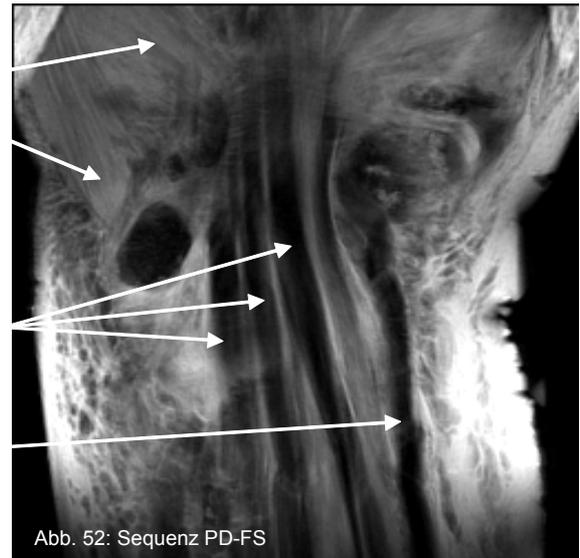


Abb. 51-55: Schnitt in Höhe der Thenarmuskulatur bzw. oberflächlicher Karpaltunnel

- 1: M. flexor pollicis longus
- 2: A. radialis
- 3: M. flexor digiti minimi brevis
- 4: M. abductor digiti minimi
- 5: M. flexor digitorum superf. et. prof.
- 6: M. flexor pollicis brevis
- 7: M. flexor carpi radialis
- Ha: Hamulus ossis hamati
- M1: Os metacarpale I
- M5: Basis metacarpale V
- P: Os pisiforme
- Tra: Os trapezium
- Tub: Tuberculum ossis trapezii
- U: Ulna

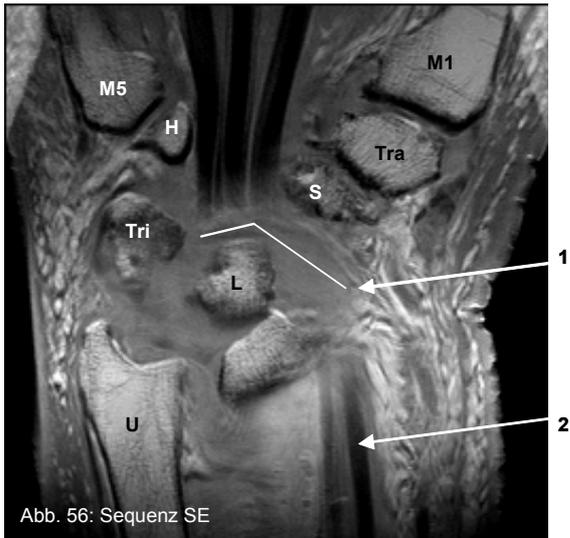


Abb. 56: Sequenz SE



Abb. 57: Sequenz PD-FS

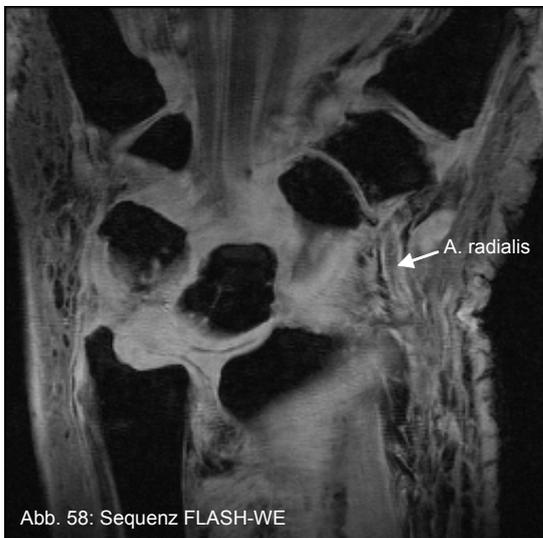


Abb. 58: Sequenz FLASH-WE



Abb. 59: Sequenz DESS-WE

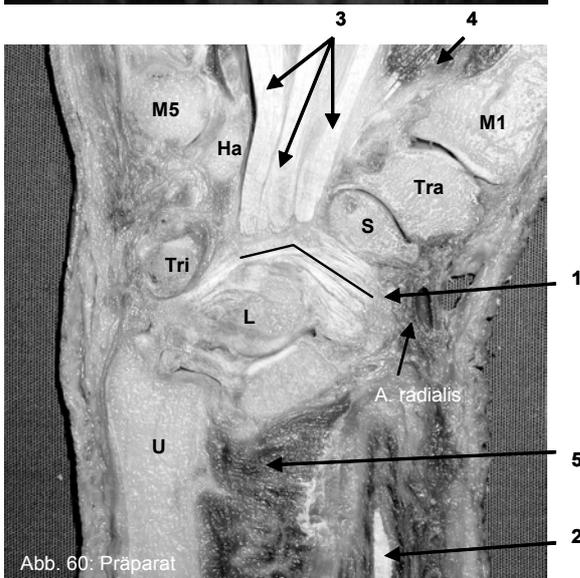


Abb. 60: Präparat

Abb.56-60: palmarer Schnitt in Höhe des beginnenden Karpus

- 1: distales V-Band
- 2: M. flexor carpi radialis (Sehne)
- 3: M. flexor digitorum superf. et. prof. (Sehnen)
- 4: M. flexor pollicis longus
- 5: M. flexor digitorum superficialis
- Ha: Hamulus ossis hamati
- H: Os hamatum
- L: Os lunatum
- M1: Os metacarpale I
- M5: Os metacarpale V
- S: Os scaphoideum
- Tra: Os trapezium
- Tri: Os triquetrum
- U: Ulna



Abb. 61: Sequenz SE

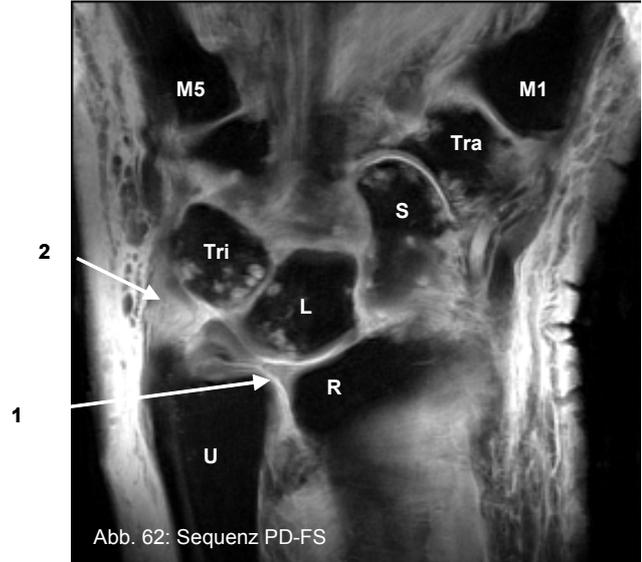


Abb. 62: Sequenz PD-FS

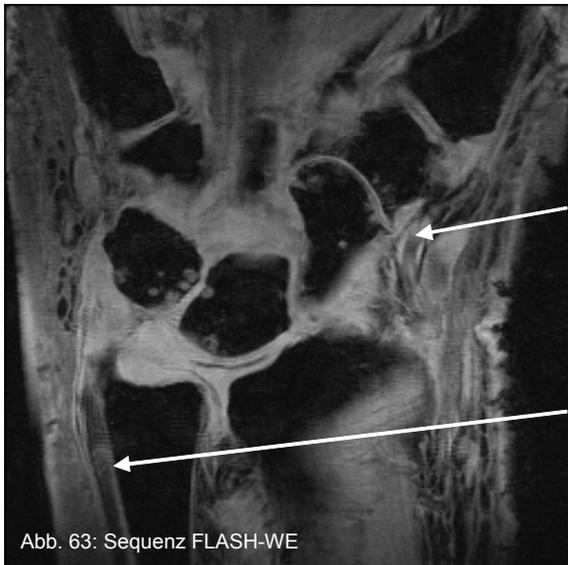


Abb. 63: Sequenz FLASH-WE



Abb. 64: Sequenz DESS-WE

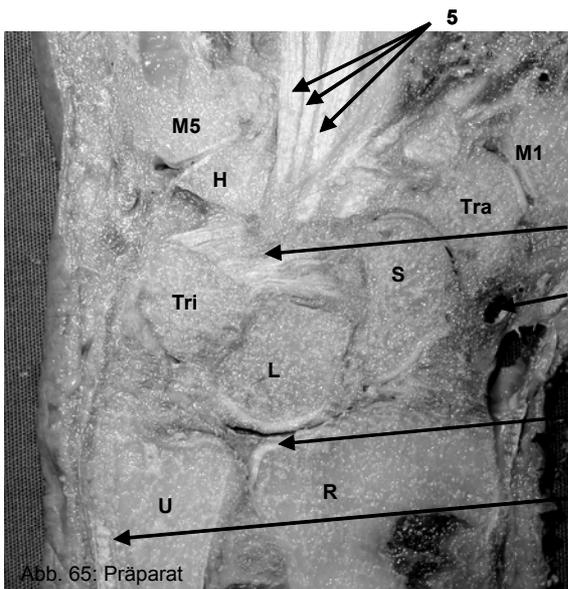


Abb. 65: Präparat

Abb. 61-65: zentraler Schnitt durch den Karpus

- 1: radiale Anheftung des TFCC
- 2: Lig. collaterale carpi ulnare
- 3: A. radialis
- 4: M. extensor carpi ulnaris
- 5: M. flexor digitorum superf. et prof.
- 6: distales V-Band
- H: Os hamatum
- M1: Os metacarpale I
- M5: Os metacarpale V
- R: Radius
- S: Os scaphoideum
- Tra: Os trapezium
- Tri: Os triquetrum
- U: Ulna



Abb. 66: Sequenz SE



Abb. 67: Sequenz PD-FS

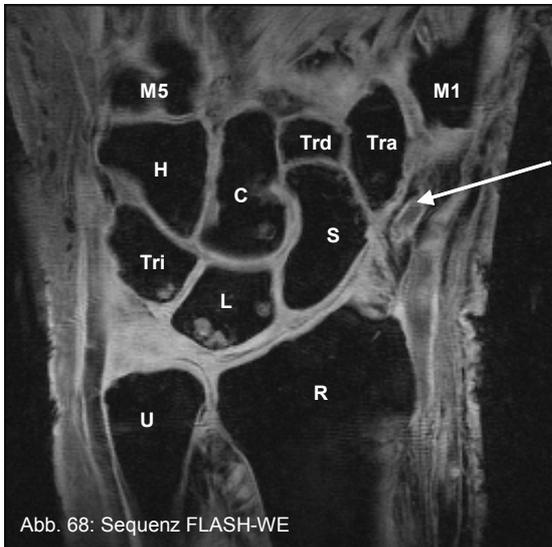


Abb. 68: Sequenz FLASH-WE



Abb. 69: Sequenz DESS-WE

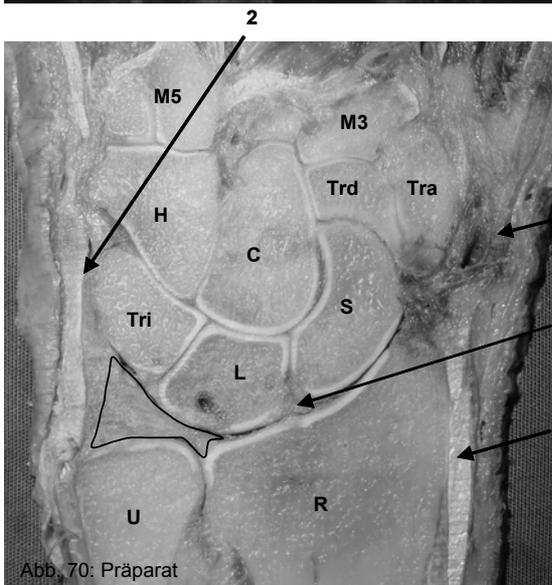


Abb. 70: Präparat

Abb. 66-70: Schnittführung durch den Karpus mit Darstellung des TFCC

- 1: TFCC
 - 2: M. extensor carpi ulnaris (zum TFCC gehörig)
 - 3: A. radialis
 - 4: Knochenzyste
 - 5: M. ext. carpi radialis longus
- | | |
|------------------------|----------------------|
| C: Os capitatum | S: Os scaphoideum |
| H: Os hamatum | Tra: Os trapezium |
| L: Os lunatum | Trd: Os trapezoideum |
| M1: Os metacarpale I | Tri: Os triquetrum |
| M3: Os metacarpale III | U: Ulna |
| M5: Os metacarpale V | R: Radius |



Abb. 71: Sequenz SE



Abb. 72 Sequenz PD-FS

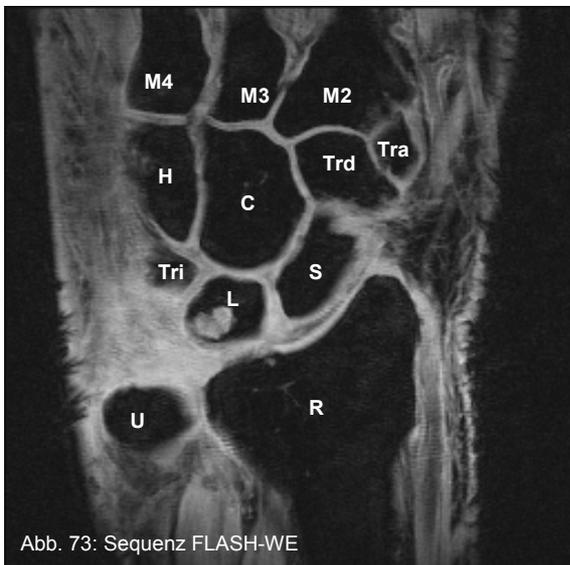


Abb. 73: Sequenz FLASH-WE



Abb. 74: Sequenz DESS-WE

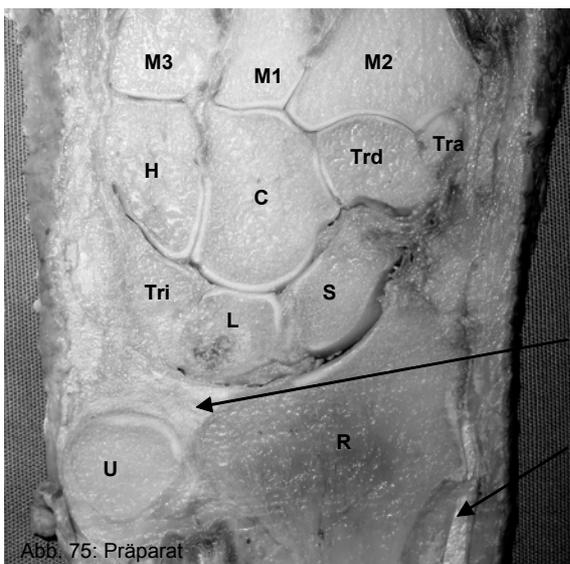


Abb. 75: Präparat

Abb. 71-75: koronarer Schnitt durch den Karpus mit Darstellung der Metacarpalia

- 1: M. ext. carpi radialis longus
 - 2: Membrana interossea und M. pronator quadratus
 - 3: TFCC (Lig. radioulnare dorsale)
- C: Os capitatum
H: Os hamatum
L: Os lunatum
M1: Os metacarpale I
M2: Os metacarpale II
M3: Os metacarpale III
R: Radius
S: Os scaphoideum
Tra: Os trapezium
Trd: Os trapezoideum
Tri: Os triquetrum

4.2.3 Sagittale Schnitfführung

Die folgenden Korrelationen zeigen sagittale Schnitte im Bereich des Karpus von radial nach ulnar. Sie erstrecken sich in proximodistaler Richtung von den distalen Vorderarmknochen bis zu den Basen der Metakarpalia. Die Abbildungen 76-80 zeigen dabei einen Schnitt im Bereich des lateralen Radius mit Anschnitt des Os scaphoideum, Os trapezium und der Basis des Os metacarpale II. Dies entspricht dem radialen Kompartiment des proximalen Handgelenks. Die Abbildungen 81-85 präsentieren den zentralen Schnitt durch das Handgelenk in Höhe des medialen und ulnaren Radius. Die Anschnitte der Ulna und der ulnaren Karpalia mit dem ulnaren Handgelenkskompartiment sind in den Abbildungen 86-89 zu erkennen.

4.2.3.1 Schichtung in Höhe des radialen Kompartiments der Art. radiocarpalis

Diese Schicht dient vor allem der Beurteilung von Instabilitäten bei Handgelenkstraumen bzw. Fehlstellungen.

In Abbildung 79 ist die Achse Radius-Os-scaphoideum-Os trapezium-Metacarpale II und die um ca. 40 Grad nach palmar gekippte Scaphoidachse kenntlich gemacht. Bei einer Lunatumluxation mit Verletzung des lunären Bandapparats ist eine Drehung des Lunatum bis 90 Grad nach palmar möglich.

Auf der palmaren Seite sind, wie schon zuvor in den anderen Schnittebenen, die oberflächlichen und tiefen Sehnen der Fingerbeuger zu identifizieren. Die Sehne des M. flexor digitorum superficialis für den 2. Strahl verläuft dabei im Bereich des Radius und der Art. radiocarpalis relativ oberflächlich unter dem subkutanen Fettgewebe, schmiegt sich dem Scaphoid an und verschwindet in Höhe der distalen Karpalreihe zum Mittelphalangen II in die Tiefe. Die tiefe Sehne liegt näher am Radius und stellt sich im unteren Bildausschnitt mit größerem Durchschnitt dar. Dies ist der Übergang zum Muskelbauch des tiefen Fingerbeugers (Abb. 77-80).

Der radiale Anteil des Ligamentum radioscapoideum ist in der Abbildung 77-79 undeutlich abgebildet. Die Insertion ins Kahnbein kann in unserem MR-tomographischen Bild und dieser Ebene nicht dargestellt werden.

In den 2 Gradienten-Echo-Sequenzen (Abb.78 und 79) ist etwas mehr in palmarer Richtung des Radius eine zweite Struktur zum Os scaphoideum mit schwacher Signalintensität zu identifizieren. Hierbei handelt es sich hier um das in Längsschnitt getroffene neurovaskuläre Bündel (Testutsches Band) zwischen Radius, Os lunatum und Os scaphoideum. Diese fälschlicherweise als Ligament bezeichnete Struktur

zieht vom palmaren Radius zum Gelenk zwischen Lunatum und Skaphoid und inseriert in das intrinsische SL-Band.

4.2.3.2 Schichtung in Höhe des zentralen Karpus

In dieser Ebene stellt sich der Rest der Thenarmuskulatur am oberen Bildrand in Höhe der distalen Karpalreihe bzw. palmar des Metacarpus dar. Die signalschwache Muskulatur wird dabei von den hellen und signalstarken Septen des Fettgewebes durchzogen (Abb. 82-84).

Das Lunatum zeigt sich zwischen Radius und Os capitatum in seiner typischen halbmondförmigen Darstellung.

Auf der Dorsalseite ist in allen Sequenzen und im makroskopischen Schnitt die 3. Sehne des M. extensor digitorum zu erkennen. Sie zieht dabei vom Unterarm über das proximale und distale Handgelenk oberflächlich zur Dorsalaponeurose des 3.Strahls.

4.2.3.3 Schichtung in Höhe des ulnaren Kompartiments der Art. radiocarpalis

Zwischen der distalen Ulna und dem angeschnittenen Os triquetrum spannt sich der TFCC in dem ulnaren Kompartiment der Art. radiocarpalis auf. In unserem MR-tomographischen Bild (Abb. 87) sind mehrere signalschwache Anteile des Komplexes abgebildet. Eine exakte Differenzierung und Zuordnung verschiedener Faserzüge ist in dieser Darstellung nicht möglich. In der unteren Korrelation (Abb. 88 und 89) kann man jedoch die ulnare Insertion des Komplexes am Processus styloideus ulnae erkennen.

Zusätzlich lässt sich auf beiden Darstellungen die Sehne des M. flexor carpi ulnaris am rechten Bildrand identifizieren. Sie zieht nach distal zum Hamulus ossis hamati und bindet das Os pisiforme als Sesambein ein.

Die Loge de Guyon breitet sich in diesen sagittalen Ebenen zwischen dem Os pisiforme und dem knöchernen Haken des Os hamatum aus. Der enthaltene Nervus bzw. A. ulnaris und ihre venösen Begleitgefäße sind in diesem Anschnitt nicht getroffen.

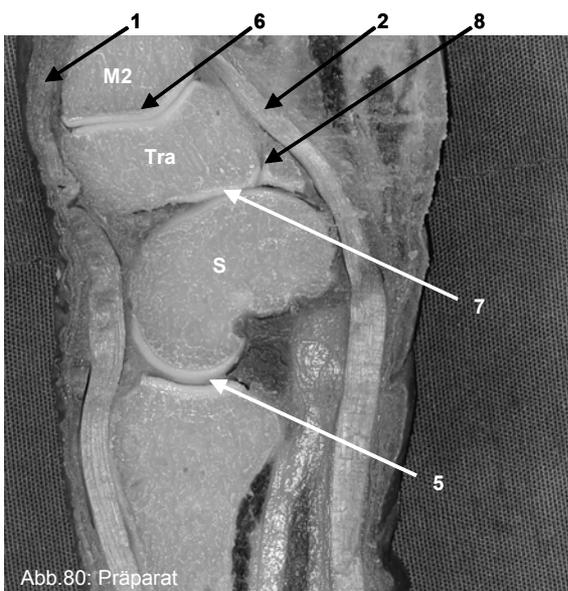


Abb. 76-80: sagittaler Schnitt durch Vorderarm, Carpus und Metacarpus mit Darstellung der Karpuslängsachse, sowie der gekippten Skaphoidachse

- 1: Sehne des M. extensor digitorum
 - 2: Sehne des M. flexor digitorum superficialis
 - 3: Sehne bzw. Muskelbauch des M. flex. dig. profundus
 - 4: Lig. radioscapoideum
 - 5: radiocarpales Kompartiment des proximalen Handgelenks
 - 6: Art. carpometacarpale
 - 7: distales Handgelenk
 - 8: Nebengelenk (Art. intercarpale)
 - 9: Lig. radioscapolunatum (neurovaskuläres Bündel)
- M2: Os metacarpale II
S: Os scaphoideum
Tra: Os trapezoideum



Abb. 81: Sequenz SE



Abb. 82: Sequenz PD-FS



Abb. 83: Sequenz FLASH-WE

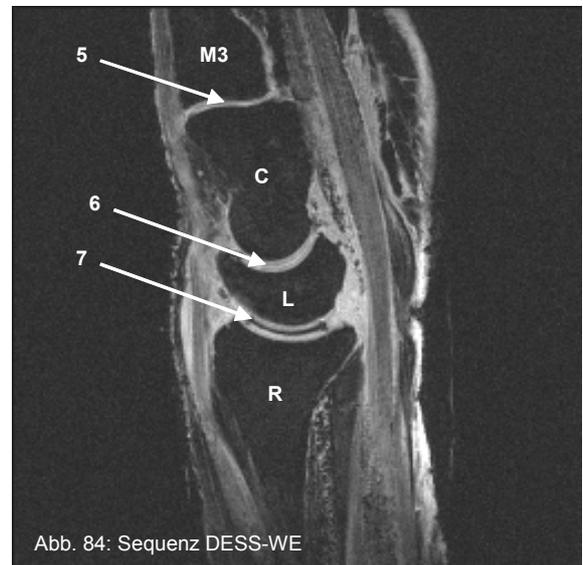


Abb. 84: Sequenz DESS-WE

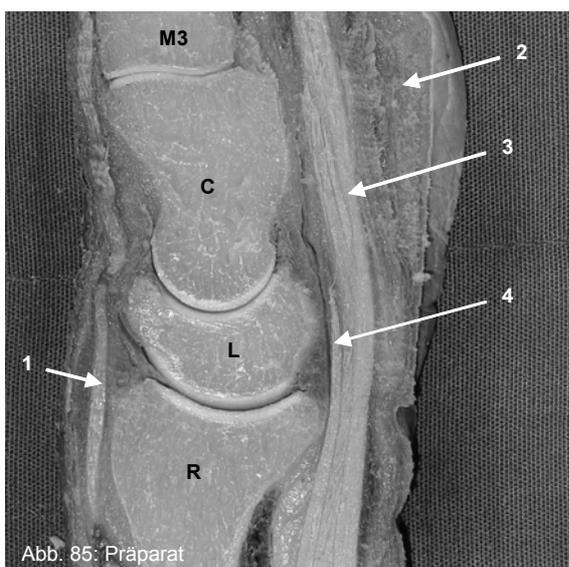


Abb. 85: Präparat

Abb.81-85: sagittaler Schnitt durch das Zentrum der Hand (radio-ulnare Ausrichtung)

- 1: M. extensor digitorum (Sehne)
- 2: Thenarmuskulatur
- 3: M. flexor digitorum superficialis (Sehne)
- 4: M. flexor digitorum profundus (Sehne)
- 5: Art. carpometacarpale
- 6: distales Handgelenk
- 7: proximales Handgelenk
- C: Os capitatum
- L: Os lunatum
- M3: Os metacarpale III
- R: Radius

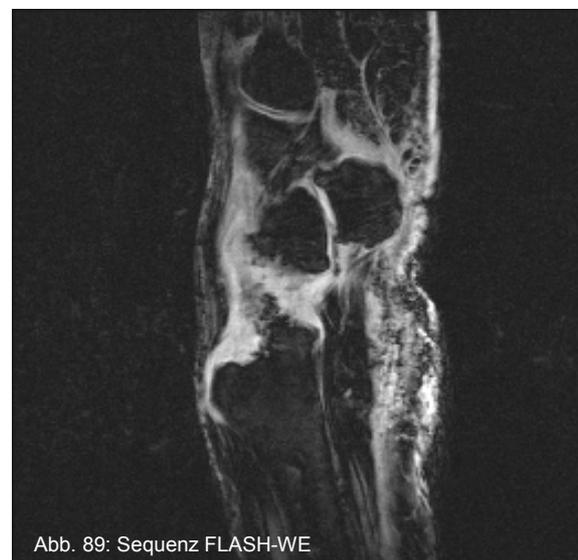
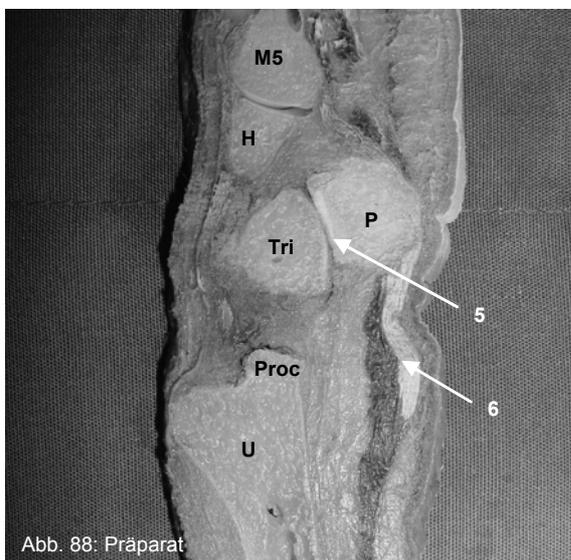
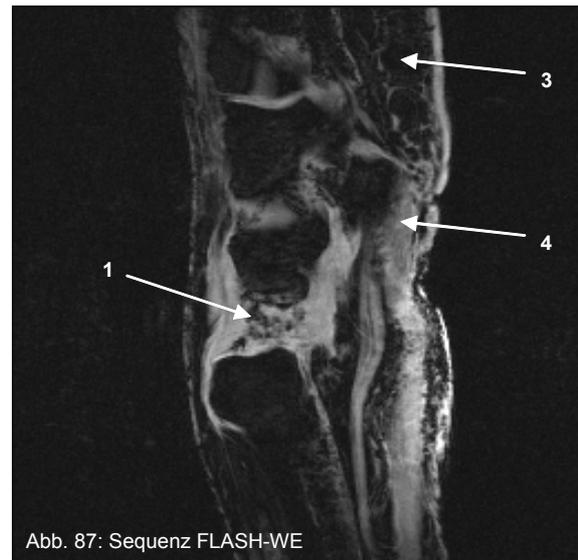
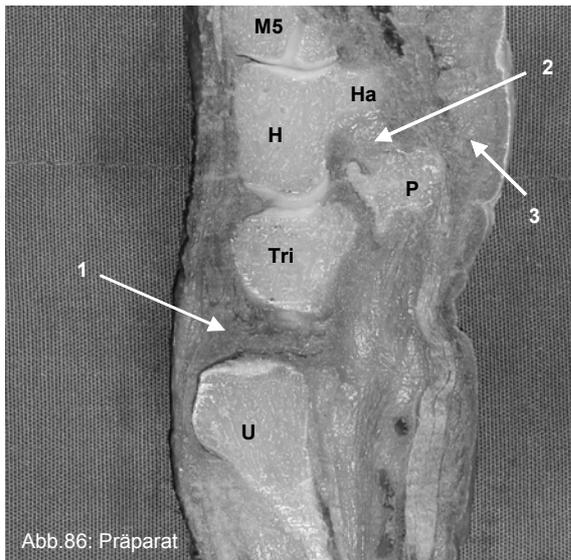


Abb. 86-89: sagittale Schnitte durch Ulna, Carpus, Metacarpus in Höhe der Loge de Guyon (ulnare Seite des Handgelenkes)

- 1: TFCC
- 2: Loge de Guyon
- 3: Hypothenar mit subcutanem Fettgewebe
- 4: M. flexor carpi ulnaris mit eingelassenem Erbsenbein
- 5: Art. ossis pisiformis
- 6: M. flexor carpi ulnaris (Sehne)
- H: Os hamatum
- Ha: Hamulus ossis hamati
- M5: Os metacarpale V
- P: Os pisiforme
- Tri: Os triquetrum
- U: Ulna

4.2.4 Ulnarer Faserkomplex (TFCC)

In den Abbildungen 91 bis 97 sind koronare MR-tomographische Vergrößerung von Probanden und Präparaten mit ihrer makroskopischen Korrelation des „triangular fibrocartilage complex“ (TFCC) abgebildet. Die Form ist annähernd dreieckig mit einem länglichen Zug in Richtung Radius. Hier kann man v.a. in den Protonengewichteten Sequenzen (Abb. 91 und 92) die Insertion in den knorpeligen Überzug der Speiche erkennen.

In der Abbildung 92 und 97 des Probanden 1 ist der breite Ansatz des Bandkomplexes in der Fovea der Ulna zu identifizieren. Dabei ist eine Unterbrechung und Fragmentation zum Discus auffällig.

Das Ligamentum lunotriquetrale ist von dem Bandkomplex getrennt und stellt sich in den MR-tomographischen Abbildungen nur undeutlich dar (Abb. 90/91/97). Die ulnare Insertion am Processus styloideus ulnae ist in der Darstellung 92 des Probanden 1 abgebildet.

Das zum TFCC zugehörige Lig. collaterale carpi ulnare bildet sich signalschwach bei dem Probanden 1 in der T1-gewichteten Sequenz ab. Es ist schwach ausgeprägt, gehört zur Gelenkkapsel und zieht vom Processus styloideus ulnae zum Os pisiforme und Os triquetrum (Insertion nicht sichtbar).

Die Sehne des M. extensor carpi ulnaris, die im Präparat (Abb. 90) auf der linken Bildseite angeschnitten ist, bildet mit dem ulnaren Seitenband die laterale Begrenzung des Komplexes. Dabei strahlen Faserzüge des TFCC in die dorsomediane Sehnenscheide des ulnaren Handgelenksstreckers ein.

Die dorsalen und volaren radioulnaren Bänder, die normalerweise vom vorderen bzw. hinteren Rand der radialen Notch zum Processus styloideus ulnae ziehen und die palmare und dorsale Begrenzung bilden, sind aufgrund der höheren bzw. tieferen Lage in dieser koronaren Ebene nicht angeschnitten.

Ebenso können die feinen Züge der ulnocarpalen Bänder (Ligg. ulnolunatum und ulnotriquetrale), die im mittleren Drittel der palmare TFCC-Fläche entspringen und an der palmaren Seite von Lunatum und Triquetrum inserieren, nicht dargestellt werden. Im makroskopischen Schnitt des Präparates sind Knochenzysten im Os lunatum und Os triquetrum identifizierbar, die v.a. in den wassersensitiven Sequenzen signalstark zur Darstellung kommen (Abb. 91).

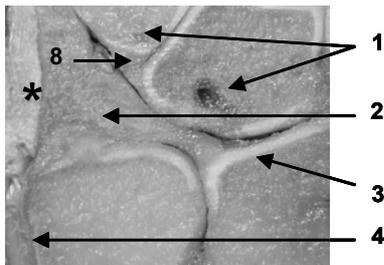


Abb. 90: makroskopischer Schnitt des Präparates 2

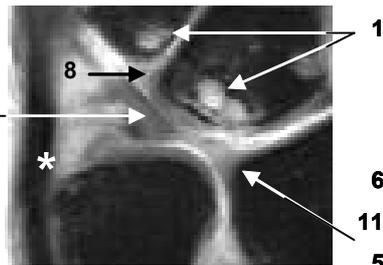


Abb. 91: PD-FS-Sequenz des Präparates 2 (TR 3000/ TE 34)

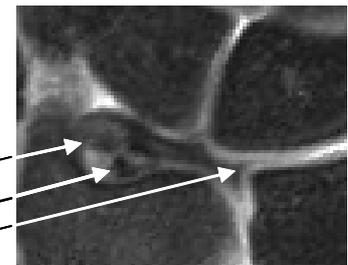


Abb. 92: PD-FS-Sequenz des Probanden 1 (TR 3000/ TE 34)

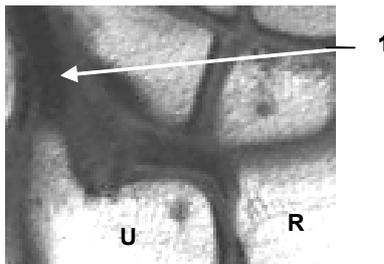


Abb. 93: SE-Sequenz des Probanden 1 (TR 400/ TE 20)

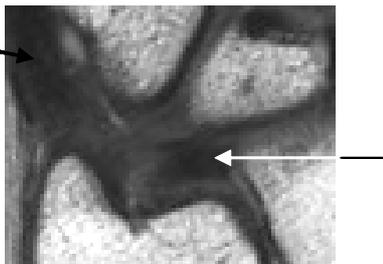


Abb. 94: SE-Sequenz des Probanden 2 (TR 400/ TE 20)

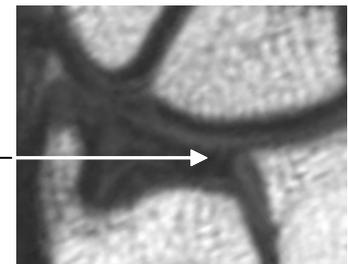


Abb. 95: SE-Sequenz des Probanden 3 (TR 400/ TE 20)

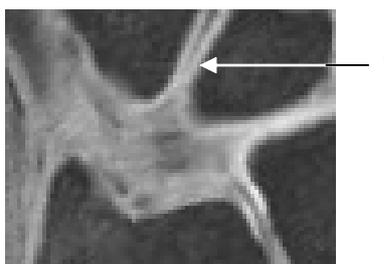


Abb. 96: Sequenz FLASH-WE des Probanden 2 (TR 19/TE 10)

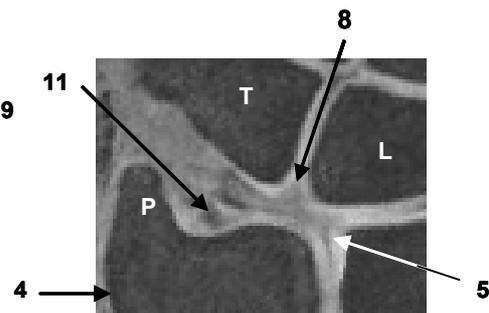


Abb. 97: Sequenz FLASH-WE des Probanden 1 (TR 19/TE 10)

Abb. 90-97: verschiedene Handgelenksausschnitte des TFCC dreier Probanden/ Präparate in der zentralen koronaren Schicht des Handgelenks.

- 1: Knochenzysten
- 2: TFCC
- 3: Knorpelüberzug des Radius
- 4: Kortikalis der lateralen Ulna
- 5: radiale Anheftung des TFCC
- 6: ulnare Anheftung des TFCC
- 8: Lig. lunotriquetrale (LT-Band)
- 9: Gelenkspalt mit Knorpel (Art. lunotriquetale)

- L: Os lunatum
- P: Processus styloideus ulnae
- R: Radius
- T: Os triquetrum
- U: Ulna
- M. extensor carpi ulnaris (Stern)
- 10: Lig. collaterale ulnae
- 11: TFCC-Ansatz in der ulnaren Notch (Fovea ulnaris)

4.2.5 Loge de Guyon

In den Abbildungen 98-106 ist die Loge de Guyon in transversalen makroskopischen und MR-tomographischen Schnitten in drei unterschiedlichen Höhen dargestellt.

Der proximale Abschnitt (Abb. 98-100) im mittleren Bereich des Os pisiforme und in Höhe des Pisotriquetralgelenkes stellt sich im Querschnitt mit dreieckiger Grundfläche dar. Der N. ulnaris liegt dabei ulnar der A. ulnaris mit ihren Begleitvenen, umgeben von signalschwachem Fettgewebe in der wasserangeregten Sequenz. Die Gefäße stellen sich in dem makroskopischen Bild mit einem Lumen dar (Abb. 99).

Im mittleren Abschnitt der Loge, noch proximal der Bifurkation des N. ulnaris in seine tiefe und oberflächliche Portion, erscheint der Querschnitt länglich. Die Arterie bildet sich direkt unterhalb des Hamulus, ohne radiale bzw. ulnare Abweichung ab. Der Nerv hat mittlerweile seine oberflächliche Lage verlassen und zieht noch ungeteilt in Richtung Hamulus und Eminentia hypothenaris (Abb. 101-103).

Im distalen Bereich der Loge in Höhe des Hamulus ossis hamati teilt sich der Tunnel in zwei Kanäle. Im superfiziellen Anteil folgt der oberflächliche Ramus nervi ulnaris der A. ulnaris nach distal. Der motorische Anteil des N. ulnaris, der zur Hypothenarmuskulatur zieht, ist im tiefen Kanal zu finden (Abb. 104-106). Ein dünner fibröser Bandzug aus dem M. abductor digiti minimi separiert dabei die zwei übereinander liegenden Nervenstraßen (Abb. 105).

Den Boden der Loge de Guyon bildet der direkt darüber liegende M. palmaris brevis (Abb. 126 und 129). Das Dach des Kanals wird einerseits durch das radial zum Hamulus verlaufende Retinaculum flexorum, sowie ulnar durch die Ursprungsfaszie der Hypothenarmuskulatur, bestehend aus den Mm. opponens digiti minimi, flexor digiti minimi und abductor digiti minimi, gebildet.

Die radiale Begrenzung entsteht durch die winkelige Verbindung des M. palmaris brevis mit dem Retinaculum flexorum auf der radialen Seite des Hamulus bzw. im weiteren distalen Verlauf direkt unterhalb.

Die ulnare Grenze des „carpal ulnar neurovascular space“ wird einerseits körpernah durch das Erbsenbein und andererseits weiter distal durch den Zusammenschluss der Hypothenarfaszie mit den Ursprungsfasern der Kleinfingerballenmuskulatur am Hamulus gebildet.

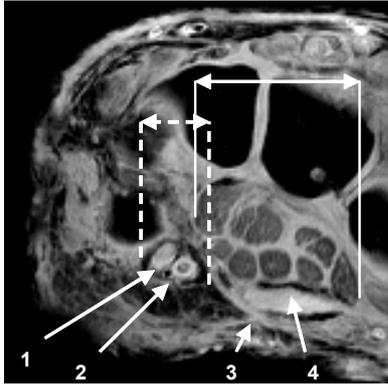


Abb. 98: Präparat/ Sequenz FLASH-WE

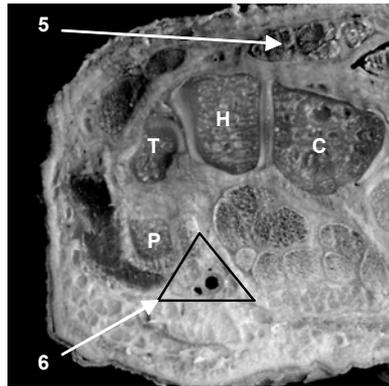


Abb. 99: Präparat/ makroskopischer Schnitt

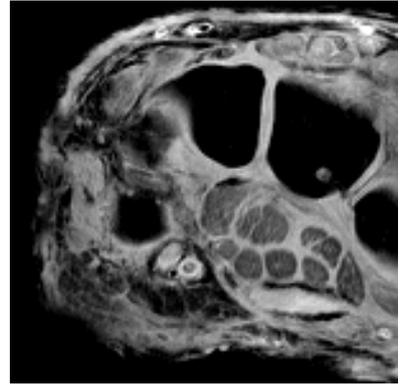


Abb.100: Präparat/Sequenz FLASH-WE

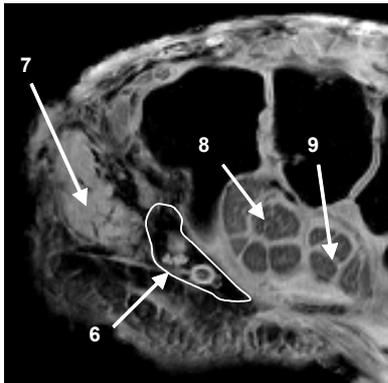


Abb. 101: Präparat/ Sequenz FLASH-WE

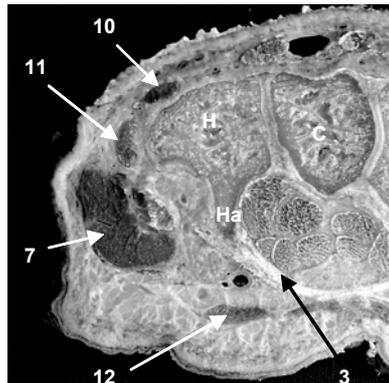


Abb. 102: Präparat/ makroskopischer Schnitt

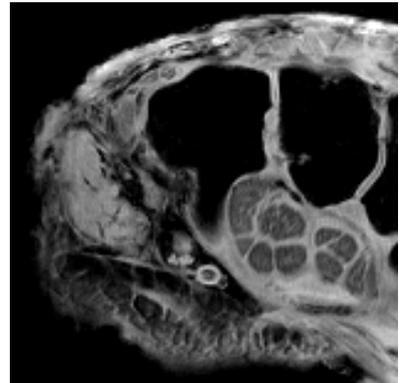


Abb.103: Präparat/Sequenz FLASH-WE

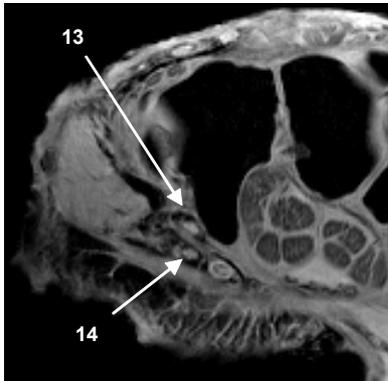


Abb. 104: Präparat Sequenz FLASH-WE

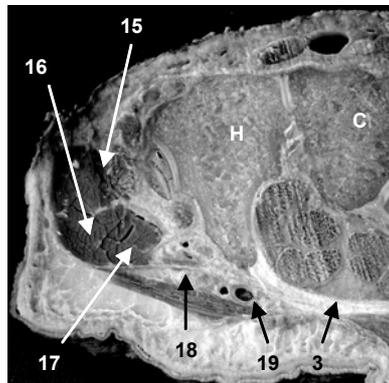


Abb. 105: Präparat/ makroskopischer Schnitt

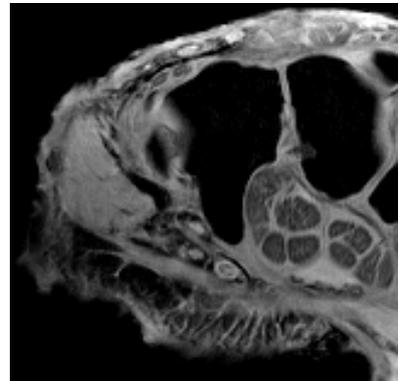


Abb. 106: Präparat/Sequenz FLASH-WE

Abb. 98-100: Loge de Guyon in Höhe des Pisotriquetralgelenkes/ Abb. 101-103: Loge de Guyon im mittleren Drittel, proximal der Nervenbifurkation/ Abb. 104-106: distale Loge de Guyon mit oberfl. und tiefem Anteil d. N. ulnaris

- 1: N. ulnaris
- 2: A. ulnaris mit Lumen
- 3: Retinaculum flexorum
- 4: N. medianus
- 5: Mme. extensorum dig.
- 6: Loge de Guyon
- 7: Hypothenar
- 8: Mme. flex. digitorum prof.

- 9: M. flex. digitorum superfic.
- 10: M. ext. digiti minimi
- 11: M. ext. carpi ulnaris
- 12: M. palmaris brevis
- 13: Ramus prof. nervi ulnaris
- 14: Ramus superf. nervi ulnaris
- 15: M. opponens digiti minimi
- 16: M. flex. digiti minimi

- 17: M. abductor digiti minimi
- 18: fibröser Bandzug
- 19: A. ulnaris + Vve. communicantes
- C: Os capitatum
- H: Os hamatum
- Ha: Hamulus ossis hamati
- P: Os pisiforme
- T: Os triquetrum

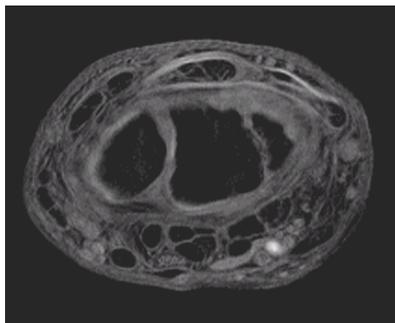


Abb. 107: Pat. M.M. rechts/ FLASH WE axial
TR 19,2 / TE 9,4/ FOV 100/
Matrix 512x512

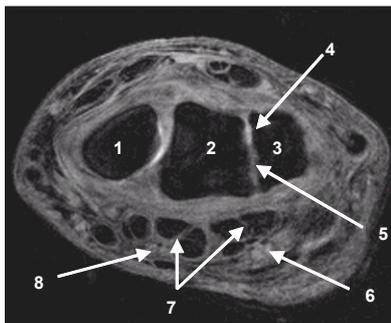


Abb. 108: Pat. M.M. rechts/ FLASH WE axial
TR 19,2 / TE 9,4/ FOV 100/
Matrix 512x512

- 1:Os scaphoideum
- 2:Os lunatum
- 3:Os triquetrum
- 4:knorpelige Art. lunotriquetrale
- 5:fibröse Art. lunotriquetrale
- 6:N. ulnaris in der Loge de Guyon
- 7:Beugesehnen (prof. et. superf.)
- 8:N. medianus im Karpaltunnel

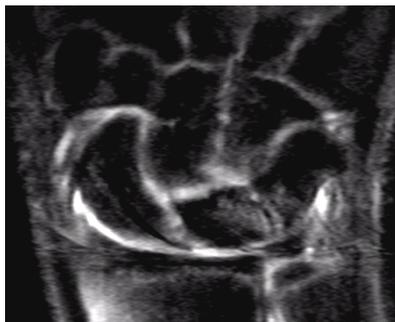


Abb. 109: Pat. M.M. links/ PD-FS koronar
TR 3500 / TE 15/ FOV 100/
Matrix 512x256

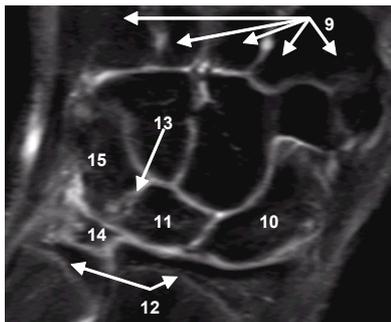


Abb. 110: Pat. M.M. rechts/ PD-FS koronar
TR 3500 / TE 15/ FOV 100/
Matrix 512x256

- 9: Metacarpale I-V
- 10:Os scaphoideum
- 11:Os lunatum
- 12:Epiphysenfugen
- 13:fibröse Koalition
- 14:TFCC
- 15:Os lunatum

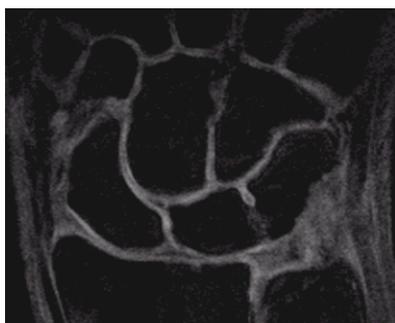


Abb. 111: Pat. M.M. links/ FLASH WE koronar
TR 19,2 / TE 9,4/ FOV 100/
Matrix 512x512

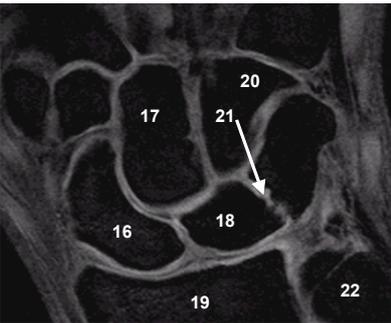


Abb. 112: Pat. M.M. links/ FLASH WE koronar
TR 19,2 / TE 9,4/ FOV 100/
Matrix 512x512

- 16:Os scaphoideum
- 17:Os capitatum
- 18:Os lunatum
- 19:Radiusepiphyse
- 20:Os hamatum
- 21:bindegewebige Brücke
- 22:Ulnadiaphyse

4.3. Exemplarische Pathologiedarstellung anhand einer fibrösen luno-triquetraler Koalition

Abb. 107-112: 17jähriger Patient mit beidseitiger fibröser luno-triquetralen Koalition (Typ I/ Minaar-Klassifikation) in koronarer und axialer Schichtung/ FLASH-WE und PD-FS-Sequenz. Im proximalen Anteil kann v.a. in der koronaren wassersensitiven FLASH-Sequenz der fibröse Zusammenschluss beobachtet werden. Der signalstarke Knorpelanteil wird hier durch signalschwaches Bindegewebe unterbrochen. Die Inzidenz dieser Knochenanomalie wird mit 0,1% in der Bevölkerung angegeben.

5 Diskussion

5.1 Methodikdiskussion

Erste anatomische Untersuchungen am Handgelenk mittels Magnetresonanztomographie führte Hinshaw (1979) an menschlichen Leichen und Probanden durch. Der routinemäßige Einsatz der MRT zur Untersuchung des Handgelenks erfolgte allerdings erst Mitte der 80iger Jahre mit der Entwicklung von hochauflösenden Oberflächenspulen (Middleton 1987). Mittlerweile stellt die MRT neben dem Projektionsradiographischen Bild die nächste Stufe zur Untersuchung eines schmerzhaften Handgelenks dar. Sie ermöglicht damit den Ausschluss bzw. die Bestätigung diverser Differentialdiagnosen.

Bei der Diagnose von aseptischen Knochennekrosen und bei der Evaluierung und Staging von Weichteiltumoren ist die MRT die Untersuchungsmethode der Wahl (Pretorius 1997). Zusätzlich kommt sie bei der Untersuchung von Sehnenpathologien oder bei Nervenkompressionssyndromen zum Einsatz, wenn die klinische Diagnose nicht klar ist oder der Patient nach operativer Behandlung weiterhin über Beschwerden klagt.

Zu Beginn wurde für die vorliegende Arbeit ein spezielles Handgelenk-messprotokoll an 12 Probanden getestet und für die Anforderung der später durchzuführenden quantitativen Spulenevaluation, als auch für die qualitative anatomischen Bildkorrelation zusammengestellt. Wir bezogen die Ergebnisse der Sequenzvergleichsstudie von Stäbler (2000) mit ein und verwendeten nach eingehender Testung die gebräuchliche Spin-Echo-Sequenz mit kurzer Repetitionszeit, geringer Artefaktanfälligkeit bei guter Signalhomogenität und hohem SNR. Zusätzlich kamen zwei Gradienten-Echo-Sequenzen zum Einsatz. Die FLASH-WE-Sequenz („fast-low-angle-shot/ water-excitation“) weist die beste Knorpeldarstellung auf. Die DESS-WE-Sequenz („dual-echo-steady-state/ water-excitation“) erzielt gute SNR und bietet einen stärkeren T2-Kontrast. Sie kann gut zwischen Gelenkflüssigkeit und Knorpelstrukturen differenzieren. Wir gaben aufgrund unserer Sequenztestung der Fettsignalunterdrückung mittels selektiver Wassersignalanregung den Vorrang gegenüber der frequenzselektiven Fettgewebssignalunterdrückung. Die Wasseranregung kann die Untersuchungszeit verkürzen und subjektiv, wie auch objektiv (Stäbler 2000) bessere MR-Bilder akquirieren. Die STIR-Sequenz („short-tau-inversion-recovery“) wurde aufgrund des

relativ schlechten SNR, sowie der Anfälligkeit für Bewegungsartefakte nicht aufgenommen. Für die Darstellung des protonendichten Gewebes bei Signalunterdrückung des Fettgewebes wurde die PD-FS-Sequenz („proton-density/fat-sat“) mit kürzerer Messzeit verwendet.

Die Evaluation der drei technisch unterschiedlichen Spulen (4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule/ 2-Kanal-phased-array-Prototyp/ Volumen-Kniegelenksspule) wurde mit der artefaktstabilen Spin-Echo-Sequenz durchgeführt. Neben drei Probanden kamen drei Formalin-Ethanol-fixierte Handgelenke menschlicher Leichen zum Einsatz. Obwohl die Untersuchung von Baker (1987) keinen Unterschied in der MR-tomographischen Untersuchung von Präparaten und lebenden Probanden ergab, wurde die Signalevaluation in unserer Studie sowohl an Leichen, als auch an Probanden durchgeführt, um einen möglichen Fehler erster Art zu korrigieren.

In der Anwendung der drei Spulen, zeigte sich, dass die neue Anordnung der Mehrkanalspule der Fa. MRI Devices mit drehbarem Aufbau die Bewegungsartefakte, die sonst durch die unbequeme Lagerung in der „Supermannposition“ anderer Spulen auftraten, minimiert werden konnten. Hier ist eine Positionierung des zu untersuchenden Handgelenks ohne wesentliche Ulnardeviation oder Dorsalextension, annähernd der Neutralstellung, mit geringer Schulterabduktion und angenehmer Ellenbogenbeugung möglich. Gerade ältere Patienten mit eingeschränkter Schulterbeweglichkeit tolerieren die Untersuchung so besser.

Um eine anatomisch-magnetresonanztomographische Auswertung mit makroskopischer Korrelation des Handgelenkes durchzuführen, ist eine hochauflösende Bildgebung nötig. Wir verwendeten ein Hochfeld-Magnetresonanztomographen (Magnetom Symphony, Siemens AG, Medizintechnik, Erlangen, Feldstärke 1,5 Tesla) mit 30mT/m Stärke in Kombination mit der hochauflösenden 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule (MRI Devices Inc., USA) mit kleinstmöglichem Volumen und 4-facher paralleler Signalakquisition, die in unserer quantitativen Untersuchung am besten abschnitt.

Für die anatomische Beurteilung der MRT-Bilder kamen die oben beschriebenen modernen Pulssequenzen zum Einsatz. In Kombination lassen sich so alle anatomisch wichtigen Strukturen und Gewebetypen in den 3 Schichtebenen identifizieren und mit der anschließend durchgeführten makroskopischen

Aufbearbeitung der Präparate in 3mm Schnitte entlang der MR-tomographischen Schichtung vergleichen.

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an Arbeiten zum Thema MRT und Handgelenk veröffentlicht. In der weiter unten folgenden Tabelle sind aktuelle MR-tomographische Studien des Handgelenkes mit ihrem Messprotokoll aufgelistet.

Mäurer (2000) erreichte bei Verwendung einer Oberflächenspule, einem FOV von $50 \times 50 \text{ mm}^2$, einer Matrix von 256×256 und einer Schichtdicke von 2mm, eine Voxelgröße von $0,195 \times 0,195 \times 2 \text{ mm}^3$ ($0,0761 \text{ mm}^3$). Er musste damit jedoch durch das kleinere Voxelvolumen und der schlechteren Signalakquisition der Spule in den GRE-Sequenzen einen SNR-Verlust in Kauf nehmen. Wir gingen in unserer Studie den Kompromiss zwischen kleinstmöglicher Auflösung für die anatomische Region und größtmögliche SNR-Werte ein. Unser field-of-view (FoV) von $80 \times 80 \text{ mm}^2$ erlaubte auch bei größeren Handgelenken eine Abbildung des gesamten Karpus und seiner Peripherie. Die verwendete Bildmatrix von 256×256 und dünne Schichtdicken von 1,5 mm in den Gradienten-Echo-Sequenzen ergab eine Voxelgröße von $0,3 \times 0,3 \times 1,5 \text{ mm}^3$ ($0,135 \text{ mm}^3$). Durch die damit hohen SNR- und CNR-Werte und der verwendeten phased-array-Technik, waren wir in der Lage extrem kleine Strukturen (z.B. Nervenbifurkationen) zu beurteilen. Jarvik (2000) der sich mit dem Karpaltunnelsyndrom im MR-Bild beschäftigte, verwendete eine grobkörnige Auflösung von $0,43 \text{ mm} \times 0,43 \text{ mm}$ und dicker Schichtdicke von 4mm. GRE-Sequenzen kamen in seiner Arbeit nicht zum Einsatz. Um die Signalerhöhung des N. medianus, bzw. eine palmare Bursitis oder Beugesehnensynovitis darzustellen genügte ihm die axiale STIR-Sequenz. Haims (2002) verwendete zur Abbildung peripherer TFCC-Rupturen 3D-Gradienten-Echo-Sequenzen mit einer geringen Schichtdicke von 1,2mm. Die dreidimensionale Auflösung der schwierig darzustellenden Bandläsionen ergab bei einem FoV von 8cm und einer Matrix von 256×128 eine Voxelgröße von $0,230 \text{ mm}^3$. Die schlechtere Auflösung wurde durch die bessere Signalakquisition aus den größeren Voxeln kompensiert. Zudem erhielten die Patienten vor der MR-Untersuchung eine intravenöse Kontrastmittelgabe. Durch die intraartikuläre Signalverstärkung konnten die zu untersuchenden Ligamente in bestechender Qualität abgebildet werden. Bei unseren Probanden wurde aufgrund der Invasivität keine direkte oder indirekte Arthrographie vor der MR-Untersuchung durchgeführt.

Lediglich Jacobson, Kocharian, Weinberg und Jarvik benutzten die neu zur Verfügung stehende phased-array-Technik zur Untersuchung des Handgelenkes. Die restlichen Autoren verwendeten entweder gebräuchliche Handgelenksspulen oder optimierte Oberflächenspulen. Das field-of-view variierte von 12 bis 5 cm, die verwendeten Messprotokolle enthielten T1- und T2-gewichtete Spin-Echo-, sowie Fast-Spin-Echo und Gradienten-Echo-Sequenzen mit Fettsignalunterdrückung.

Autor-Jahr	Thema	Feld	Sequenz	Matrix	FOV	Auflösung	AC.	Schichtdicke	Distanz	Spule
Haims 2002	TFCC + periphere Rupturen	1,5 T	T2-FSE-FS cor.	256x256	10 cm	0,39x0,39	4	3,0 mm	1,0 mm	7,62 cm-
			3D-GRE cor.	256x128	8 cm	0,31x0,62	2	1,2 mm	0,0 mm	Oberfl.spule/ gebräuchliche
			T1-SE cor.	256x192	10 cm	0,39x0,52	2	3,0 mm	1,0 mm	Hg-Spule
			T2-FSE-FS ax.	256x256	10 cm	0,39x0,39	4	3,0 mm	1,0 mm	
Jacobson 2002	SL-Band	1,5 T	T1-SE ax.	256x192	k.A.	k.A.	2	3,0 mm	0,3 mm	phased-array
			T1-SE-FS ax.	256x192	k.A.	k.A.	2	3,0 mm	0,3 mm	wrist-coil
Kocharian 2002	Vergleich birdcage/ phased- array Spule	1,5 T	T1-SE cor.	256x256	10 cm	0,39x0,39	2	3,0 mm	1,5 mm	optimierte
			T1-SE sag.	256x256	10 cm	0,39x0,39	2	3,0 mm	1,5 mm	10,5 cm Spule/ zylindrische
			T1-SE ax.	512x384	10 cm	0,19x0,26	2	3,0 mm	1,5 mm	phased-array
			T2-FSE ax.	256x256	10 cm	0,39x0,39	2	3,0 mm	1,5 mm	Spule
			T2-FSE cor.	256x256	10 cm	0,39x0,39	2	3,0 mm	1,5 mm	
Connell 2001	intrins- ische Ligamente	1,5 T	3D-GRE cor.	256x256	8 cm	0,31x0,31	2	1,0 mm	k.A.	gebräuchliche
			3D-GRE ax.	256x256	8 cm	0,31x0,31	2	1,0 mm	k.A.	Hg-Spule
			T2-FSE ax.	512x256	9 cm	0,17x0,35	2	3,0 mm	k.A.	
			T2-FSE sag.	512x256	9 cm	0,17x0,35	2	3,0 mm	k.A.	
			T2-FS cor.	256x224	10cm	0,39x0,44	2	3,0 mm	k.A.	
Manton 2001	intrinsische Ligamente/ partielle Rupturen	1,5 T	3D-GRE cor.	256x256	11 cm	0,42x0,42	2	1,2 mm	1,0 mm	gebräuchliche
			3D-GRE ax.	256x256	11 cm	0,42x0,42	2	1,2 mm	1,0 mm	Hg-Spule
			T1-SE cor.	256x256	11 cm	0,42x0,42	2	3,0 mm	1,0 mm	
			T1-SE ax.	256x256	11 cm	0,42x0,42	2	3,0 mm	1,0 mm	
			T2-FSE-FS cor.	256x256	11 cm	0,42x0,42	4	3,0 mm	1,0 mm	
			T2-FSE-FS ax.	256x256	11 cm	0,42x0,42	4	3,0 mm	1,0 mm	
			Interm.-SE cor.	256x256	11 cm	0,42x0,42	2	3,0 mm	1,0 mm	
			Interm.-SE ax.	256x256	11 cm	0,42x0,42	2	3,0 mm	1,0 mm	
Keberle 2001	Karpal- tunnel	1,5 T	T1-SE ax.	512x256	12 cm	0,23x0,46	k.A	3,0 mm	0,3 mm	9 cm
			T2-TSE ax.	256x256	12 cm	0,46x0,46	k.A	3,0 mm	0,3 mm	Oberfl.spule
Sofka 2001	Review	k.A.	T2-FSE ax.	512x320	9cm	0,17x0,28	2	3,0mm	0,0mm	gebräuchliche
			T1 cor.	256x256	8cm	0,31x0,31	2	1,0mm	k.A.	Hg-Spule
			T2-FSE sag.	512x384	9cm	0,17x0,23	2	3,0mm	k.A.	
			STIR cor.	256x192	10cm	0,39x0,52	2	3,0mm	0,0mm	
			T2-FSE cor.	512x384	9cm	0,17x0,23	2	2,0mm	0,0mm	
Weinberg 2001	Review	1,5 T	Interm.FSE-FS	256x192	8cm	0,31x0,41	2	3,0mm	0,0mm	2-Kanal
			PD-FSE-FS ax.	256x256	8cm	0,31x0,31	2	3,0mm	0,0mm	phased-array
			Interm.FSE-FS	256x192	8cm	0,31x0,41	2	1,5mm	0,5mm	Hg-Spule
			PD-FSE-FS cor.	256x256	8cm	0,31x0,31	2	1,5mm	0,5mm	
Mäurer 2000	Karpal- tunnel	1,5 T	T1-SE ax.	256x256	5cm	0,19x0,19	3	2,0 mm	0,1mm	5 cm Prototyp-
			T2 ax.	256x256	5cm	0,19x0,19	1	2,0 mm	0,1mm	Oberfl.spule
Jarvik 2000	periphere Nerven	k.A	T1-SE ax.	256x256	11cm	0,43x0,43	k.A	4,0mm	1mm	phased-array
			STIR ax.	256x224	11cm	0,43x0,49	k.A	4,0mm	1mm	Spule/ Hg-Sp.

Tab.11: Protokollübersicht anderer Autoren. In den vorhandenen Studien der letzten Jahre, die sich mit unterschiedlichen Themen der Magnetresonanztomographie am Handgelenk beschäftigen, zeigen sich die unterschiedlichsten Messprotokolle und verschiedene verwendete MRT-Spulen. Lediglich Jacobson, Kocharian, Weinberg und Jarvik benutzten die neu zur Verfügung stehende phased-array-Technik. Das verwendete field-of-view variierte von 12 bis 5 cm. Die beste Auflösung erreichte Mäurer für seine anatomische Untersuchung des Karpaltunnels mit einer Voxelgröße von nur 0,0761 mm³. Die verwendeten Messprotokolle enthielten T1- und T2-gewichtete Spin-Echo-, sowie Fast-Spin-Echo und Gradienten-Echo-Sequenzen mit Fettsignalunterdrückung.

5.2 Quantitative Ergebnisse- Evaluierung der Spulen

5.2.1 Rauschen

In einer MR-Aufnahme bildet sich nicht nur das reine Signal eines vorher definierten Bereichs ab, sondern der Grauwert eines Pixels setzt sich letztendlich aus der Signalintensität des zugehörigen Voxels und dem nicht zu vermeidenden Rauschen zusammen. Das Rauschen im Bild schwankt statistisch und wird mathematisch durch die Standardabweichung des Hintergrundsignals ausgedrückt. Es erscheint in der MR-Aufnahme als körniges regelloses Muster. Das Gewebesignal wird dabei von dem Rauschen überlagert. Die physikalischen Ursachen des Rauschens liegen einerseits in der Molekularbewegung geladener Teilchen im Untersuchungsobjekt und andererseits im elektrischen Widerstand der Empfängerspule und der Messelektronik begründet. Weitere wichtige Einflussgrößen auf die Höhe des Rauschens sind die Spulenbauart bzw. die -größe und die Sequenzart.

In der vorliegenden Studie untersuchten wir qualitativ 3 Probanden und 3 Handgelenke menschlicher Leichen an drei verschiedenen MR-Spulen mit der Spin-Echo-Sequenz (TR 400/ TE 20). Um repräsentative Werte des Rauschens zu erhalten, wurden insgesamt 8 gleich große ROI's in zwei zentralen koronaren Schichten in den Hintergrund, neben dem eigentlichen Handgelenk, platziert und die Standardabweichung berechnet. Es zeigten sich große Unterschiede bzgl. des Rauschens zwischen den Spulen. Die Mehrkanalspule der Firma MRI Devices schnitt hierbei am besten ab ($15,1 \pm 0,4$). Sie lag damit 38,3% unterhalb des Rauschwertes des Phased-array-Prototypen ($24,5 \pm 6,4$) und 71,7% unterhalb der Kniespule ($53,4 \pm 7,9$). Durch die deutlich niedrigeren Rauschwerte der Phased-array-Spulen lassen sich daher erheblich bessere SNR und CNR-Werte erreichen, da das Rauschen in den Nenner des Quotienten eingeht.

In den vergangenen Jahren wurden die lokalen Spulen durch kleinstmögliche Größe bzw. Volumina dem zu untersuchenden Gebiet angepasst. Hierdurch kann durch einen hohen Füllfaktor das Rauschen minimiert und somit das SNR erhöht werden. Bleiben die Mess- und Gewebeparameter in einer Untersuchung unverändert, verringert sich das Hintergrundrauschen proportional zum verwendeten Spulenvolumen

In unserer Studie war das Volumen des 2-Kanal-phased-array-Prototypen der Fa. Siemens mit $V = 970 \text{ cm}^3$ am kleinsten und lag 18% unterhalb dem Volumen der 4-

Kanal-phased-array-Spule der Fa. MRI Devices Inc. ($V = 1180 \text{ cm}^3$). Auf Grund der vierfachen Bildakquisition und der speziellen Wichtung des Datenalgorithmus produzierte die 4-Kanal-phased-array-spule jedoch trotz des größeren Volumens bzw. kleineren Füllfaktor geringere Rauschwerte, die 38% unterhalb des 2-Kanal-phased-array-prototypen der Fa. Siemens lagen.

5.2.2 Signal-zu-Rausch-Verhältnisse (SNR)

Das Signal verschiedener Gewebearten bzw. Strukturen wird durch mehrere Größen beeinflusst. Neben den Gewebeparametern, wie Protonendichte und spezifische Relaxationskonstanten, wirken die Messparameter auf die Signalintensität ein. Hierzu gehören die individuellen Eigenschaften der verwendeten Sequenzen: Pulsparameter (TR, TE, Kippwinkel u.a.), Schichtparameter (Schichtdicke u.a.) Matrixparameter (Matrixgröße, Auflösung u.a.), Akquisitionsparameter (Akquisitionen, Messungen) und Rekonstruktionsparameter (Filter, Interpolation u.a.). Weitere Einflussgrößen sind die Geräteparameter: Magnetfeldstärke und Spulentyp. In unserer Untersuchung wurden zur Bestimmung des Rauschens, der SNR- und CNR-Werte nur der Spulentyp verändert und die restlichen Parameter konstant belassen.

Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird als ein Kriterium für die Qualität eines MRT-Bildes verwendet. Wir bestimmten die Signalwerte 4 verschiedener Gewebe (Spongiosa, Knorpel, Diskus triangularis, Kortikalis) an 6 Handgelenken unterschiedlicher Individuen (3 Probanden + 3 Präparate) und bildeten mit der Standardabweichung des Hintergrundrauschens die SNR für die untersuchten Strukturen. Um einen möglichst repräsentativen Vergleich zuzulassen, wurden 8 gleichgroße ROI's pro Gewebeart und Handgelenk in den zentralen koronaren Schichten gesetzt, intra- und interindividuell beibehalten und der Mittelwert berechnet. Bei sehr kleinen Strukturen (Kortikalis, Knorpel und Diskus) musste der Bildausschnitt vergrößert werden, um eine exakte Positionierung der ROI's zu gewährleisten. Als geeignete Sequenz bot sich die Spin-Echo-Sequenz an. Sie bietet neben einer kurzen Untersuchungszeit (3,04min), eine überdurchschnittliche Bildhomogenität und eine geringe Artefaktanfälligkeit. Fettunterdrückte Sequenzen wurden in die statistische Auswertung nicht mit einbezogen, da trotz vorgeschaltetem Shim v.a. in dem Zweikanal-Prototypen eine partiell inhomogene Fettunterdrückung beobachtet wurde, die einen Vergleich mit den anderen Spulen verhinderte.

Die Signal-zu-Rausch-Verhältnisse der Gewebearten zeigten in den 3 Spulen signifikante Unterschiede. Die 4-Kanal-Spule der Fa. MRI Devices Inc. produzierte auf Grund ihrer 4 überlagerten Einzelemente erheblich größere SNR als die verbleibenden Spulen. Werden die SNR der Gewebe zusammengefasst, erreichen die 2-Kanal-Spule 85% und die Volumenspule nur 44% des SNR-Niveaus der 4-Kanal-Handgelenksspule. Somit ist neben einem kleinen Volumen und dem daraus resultierenden geringeren Rauschen, auch zu einem großen Anteil die parallele Signalakquisition der phased-array-Technik für die hohen SNR-Werte verantwortlich.

5.2.3 Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR)

Um eine hohe Bildqualität zu erreichen, ist neben einem guten Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Bildkontrast von Bedeutung. Der Kontrast wird durch den relativen Unterschied der Signalstärken in zwei benachbarten Gewebetypen ausgedrückt. Der Kontrast ist wie die Signalstärke ebenfalls von den gleichen Parametern, wie oben beschrieben, abhängig. Hierzu gehören die Art und die Eigenschaften der Pulssequenzen und die Verwendung eines Kontrastmittels. Setzt man die SNR-Werte mit dem Kontrast in Beziehung, erhält man als Qualitätsmaßstab die kombinierte Messgröße: Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR).

Wir berechneten die CNR für insgesamt 7 Gewebepaare aus den SNR der einzelnen Strukturen. Es zeigte sich, dass bis auf das CNR zwischen Diskus und Knorpel sich alle weiteren CNR-Werte (Knorpel u. Spongiosa/ Kortikalis u. Spongiosa/ Diskus u. Spongiosa/ Diskus u. Knorpel/ Knorpel u. Kortikalis/ Kortikalis u. Diskus) signifikant voneinander unterschieden. Der fehlende signifikante Unterschied bei dem CNR-Wert, der Diskus und Knorpel in Beziehung setzt, lässt sich durch eine ungenaue Signalwert-Bestimmung oder durch spulenspezifische Eigenschaften erklären.

Die 4-Kanal-Handgelenksspule übertraf den phased-array-Prototypen bei Zusammenfassung aller 4 CNR Werte um 8 %. Die zirkular polarisierte Volumen-Kniespule erreichte nur 41% des CNR-Niveaus der 4-Kanal-Spule und 44% des CNR-Niveaus des 2-Kanal-Prototyps.

5.2.4 Bildqualität

Die Qualität eines MRT-Bildes ist neben dem Rauschen, dem SNR, dem CNR auch noch von der Auflösung und dem Auftreten von Artefakten abhängig. Die quantitativen Ergebnisse zeigten einen deutlichen signifikanten Qualitätsunterschied der 4-Kanal-Spule im Vergleich zu den verbleibenden Spulen. Der Prototyp der Fa.

Siemens weist bei der Untersuchung von Probanden und Patienten eine partiell inhomogene Fettsignalunterdrückung bei off-center-Positionierung auf. In der direkten Gegenüberstellung der MRT-Bilder, ist die Abnahme des Rauschens bei den Spulen der phased-array-Technik zu erkennen. Wang (1995) belegte mathematisch, dass die SNR-Ausbeute bei einer weiteren Parallelschaltung von Einzelementen in der phased-array-Technik ein Maximum erreicht. Dieser maximale SNR-Wert der phased-array-Spule liegt 35,8% über einer vergleichbaren größenoptimierten linear-polarisierten Einzelspule. In unserem Fall liefert die 4-Kanal-Spule um 56% größere SNR-Werte als die Volumen-Kniespule. Dabei ist zu beachten, dass die Volumenspule in erster Linie für die Untersuchung von Knie- und Fußgelenke konzipierte und somit ein größeres Volumen besitzt. Dadurch wird ein höheres Rauschen erzeugt und es resultiert ein größerer SNR-Unterschied als Wang (1995) errechnete.

5.3 Qualitative Ergebnisse- Anatomisch-MR-tomographische Bildkorrelation

5.3.1 Transversale Schichtführung

Die transversale oder axiale Schichtung wurde schon von Mesgarzadeh (1989) als eine äußerst informative Ebene bezeichnet, um Bänder, Sehnen, Nerven und Gefäße des Handgelenks zu identifizieren. Lageanomalien, Nervenkompressionssyndrome, entzündliche Veränderungen mit Flüssigkeitsansammlung im Bereich der Sehnenscheiden oder Ergussbildung können in dieser Schnittführung gut erkannt werden. Die knorpeligen Gelenke der Karpalia lassen sich neben der koronaren Ebene auch in der axialen Schichtung begutachten.

Die Beugesehnen stellen sich als rundliche Strukturen in Beziehung zum Karpaltunnel dar. Der Karpalkanal wird dorsal durch die bogenförmig angeordneten Handwurzelknochen und palmar durch das signalarme Retinaculum flexorum begrenzt. In ihm verlaufen die Sehnen und Sehnenscheiden der Fingerbeuger und der durch seinen höheren Lipidgehalt faszikulär darstellbare N. medianus. Hier sind die Anzeichen einer Kompression zu suchen:

- (1) Vorwölbung des Retinaculum flexorum,
- (2) Anschwellung der Faszikel des N. medianus in Höhe des Os pisiforme,
- (3) Abflachung des N. medianus in Höhe des Hamulus ossis hamati,
- (4) Signalintensitätserhöhung des N. medianus in T2-gewichteten Sequenzen,

(5) Synoviale Schwellung

(6) Flüssigkeitsansammlung im Karpalkanal (Mesgarzadeh 1989/ Allmann 1997/ Brahme 1997/ Jarvik 2002).

In der ulnaren Loge de Guyon lässt sich der Durchtritt des N. ulnaris zu den Fingern verfolgen. Durch einen ständigen technischen Fortschritt in Sequenztechnik, Spulenbau und Weiterentwicklung von Magnetresonanztomographen kann die Nervenverzweigung des N. ulnaris und der Verlauf des tiefen motorischen Anteils zum Hypothenar mit einer hohen Auflösung von 0,31mm x 0,31mm von uns dargestellt werden. Dies kann in der Diagnostik von Nervenkompressionssyndromen dem Untersucher bzw. Operateur wertvolle Hinweise auf die genaue Lokalisation einer pathologischen Veränderung liefern.

Im Bereich der distalen Handwurzelreihe bildet sich im Verlauf auf ulnarer Seite der Hypothenar und auf radialer Seite die Muskelmassen des Thenars mit spitzer Insertion in das Retinaculum flexorum in mittlerer Signalintensität ab. Eine Unterteilung in die verschiedenen Anteile ist durch die septenartige Darstellung mit signalstärkerer Unterbrechung möglich.

Zusätzlich sind auf der dorsalen Seite die Sehnen der Extensoren aufgrund ihrer festgelegten Verteilung identifizierbar und beurteilbar. Die Sehnenscheiden grenzen sich in den GRE- und wassersensitiven Sequenzen signalstark ab.

Die ligamentären Verbindungen inklusive des TFCC und der Handgelenksfaszien auf palmarer und dorsaler Seite sind nur eingeschränkt beurteilbar. Um sämtliche intrinsischen Bänder am Handgelenk optimal darzustellen, ist nach unserer Meinung eine zusätzliche Kontrastmittelanwendung nötig. In den Schichtungen im Bereich der Art. radiocarpalis ist jedoch das Lig. radioscapulohumeralis oder Testutsches Band mit mittlerer Signalintensität und in einer etwas geschwungenen Form angeschnitten (s.a. sagittale Schnittführung).

5.3.2 Koronare Schichtführung

Die koronare Schnittführung stellt die Standardschichtebene zur Untersuchung des Handgelenks dar. Sie bietet dem Untersucher einen guten Überblick über eine Vielzahl von anatomischen Strukturen.

Die Knocheninnenräume von Radius, Ulna, Karpus und Metakarpus stellen sich vor allem in der T1-Sequenz anatomisch gut aufgelöst und signalstark dar. Kang und

Dalinka (1991) untersuchten Gelenkknorpeldestruktionen am Os lunatum und berichteten noch über eine eingeschränkte Darstellung von Knorpelschäden im Frühstadium. Mit knorpelsensitiven wasserangeregten 3D-Gradienten-Echo-Sequenzen lässt sich heute jedoch der hyaline Gelenkknorpel von der signalärmeren Spongiosa der Ossa carpalia bzw. den Vorderarmknochen gut abgrenzen und Knorpelschäden in der zentralen Schicht des Handgelenks gut erkennen.

Koronare Schichten stellen den Verlauf der Beugersehnen und die Beziehungen zu Nerven und Gefäßen übersichtlich dar. Der Durchtritt durch den Karpaltunnel und die daran angrenzenden knöchernen Strukturen werden sichtbar. Entzündungen können hier durch peritendinöse Flüssigkeitsansammlung identifiziert werden.

In enger Nachbarschaft zum Karpalkanal verläuft die Loge de Guyon auf ulnarer Seite zwischen Os pisiforme und Hamulus ossis hamati. Die A. und N. ulnaris ist in unserer Ebene nicht getroffen.

Der TFCC spannt sich zwischen Ulna und Radius in distaler Richtung zum Os lunatum und triquetrum in dreieckiger Form und in mittlerer Signalstärke auf.

Die degenerativen Veränderungen, die in vielen Handgelenken auftreten, führen zu Signalerhöhungen und dürfen nicht mit akuten Rupturen und Entzündungen verwechselt werden (Stäbler u. Vahlensieck 2002).

Für die Differentialdiagnose des Handgelenkschmerzes, spielen die Interkarpalbänder (SL- und LT-Band) eine wichtige Rolle. Das SL-Band stellt sich in der koronaren Schichtung mit 3D-Gradienten-Echo-Sequenzen als entweder dreieckiges (90%) oder lineares (10%) Gebilde mit mittlerer Signalintensität dar (Smith 1994/ Tottermann 1996). In unserer Arbeit kann es in der Vergrößerung als dreieckiges intaktes Band abgegrenzt werden. Zudem ist es in der axialen Schichtung auf der palmaren und dorsalen Seite zu identifizieren. Zlatkin (1989) berichtete über drei diagnostische Kriterien bei interossären Bandrupturen:

- (1) Nichtabbildung der Bandstruktur,
- (2) Flüssigkeitsansammlung im Bandbereich auf T2-gewichteten Bildern und
- (3) morphologische Entstellung.

In der Literatur werden unterschiedliche Sensitivitäten (20-93%) und Spezifitäten (35-100%) in Bezug auf die Diagnostik von Rupturen des SL-Bandes publiziert (Zlatkin 1989/ Schweitzer 1992/ Scheck 1996/ Schadel-Hopfner 2001/ Manton 2001). Aktuellere Untersuchungen bestätigen diese früheren Ergebnisse nicht mehr. Vor allem bei partiellen Rupturen sind die Sensitivitäten und Spezifitäten deutlich

geringer. Manton und Schadel-Hopfner sind der Meinung, dass die Bewertung von SL-Bandrupturen in der nativen MRT nur eingeschränkt möglich ist.

Für das schlechter darstellbare LT-Band erreicht die MRT trotz weiterentwickelter Magnetresonanztomographen und hochauflösender Sequenzen in der Rupturdetektion ebenfalls widersprüchliche Sensitivitäten (12-50%) und Spezifitäten (76-100%) (Zlatkin 1989/ Schweitzer 1992/ Ahn 1998/ Haims 2003/ Manton 2001). Kato (2000) ist daher der Meinung, dass eine technische Weiterentwicklung und Verbesserung der MRT notwendig ist. Trotz unserer hohen Auflösung mit Dünnschichtaufnahmen, neuesten Handgelenksspulen und optimierten Sequenzprotokollen, lassen sich die interossären Bänder in unserer Arbeit nur teilweise darstellen. Dies ist möglicherweise durch degenerative Veränderungen der Strukturen zu erklären, die bei 75% der über 75-jährigen auftreten.

5.3.3 Sagittale Schichtführung

Die sagittale Schnittführung wird zur Beurteilung der Achsenverhältnisse der Karpalia zueinander bzw. zum Radius herangezogen. In dieser Schicht können, ähnlich wie in einem seitlichen Röntgenbild, die Winkel von Radius, Os lunatum, Os capitatum und Os scaphoideum überlagerungsfrei dargestellt werden (Stäbler 2002). Alleine in dieser Ansicht kann der Verdacht einer dorsalen oder palmaren Segmentinstabilität ausgeräumt oder bestätigt werden. In unseren Abbildungen ist die Skaphoidachse zur Beurteilung des Winkels kenntlich gemacht.

Eine weitere Indikation für eine sagittale Schichtung stellt die Osteonekrose des Os lunatum dar. In der computertomographischen Diagnostik wird ebenfalls die sagittale Bildgebung, der koronaren Betrachtungsweise, vorgezogen (Schmitt 1997/ Obletter 1997).

In unseren Korrelationen können neben den Extensoren und Flexoren die Art. radiocarpalis, Artt. intercarpales und die Karpometacarpalgelenke mit knorpeligen Überzug begutachtet werden. Der ligamentäre TFCC ist aufgrund seiner Fragmentation bzw. Degeneration nur eingeschränkt zu identifizieren. Einzig die Insertion am Proc. styloideus ulnae ist in schwacher Signalintensität dargestellt.

Im proximalen Handgelenk ist zwischen Radius und Os lunatum eine signalschwache Struktur in der FLASH-WE-Sequenz getroffen. Hier handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um das Lig. radioscapulolunatum (Testutsches Band/ „radioscapulolunate neurovascular bundle“). Es entspringt in einer kleinen Vertiefung

am distalen palmaren Radius und inseriert am ulnaren Rand des Os scaphoideum, am radialen Rand des Os lunatum und am Lig. scapholunatum interosseum (SL-Band). Der radioskapholunäre Strang besitzt kein echtes Bandgewebe, sondern besteht aus Gefäß- und Nervengewebe, weist aber trotzdem eine große mechanische Belastbarkeit auf. Die enthaltenen Gefäße erhalten ihr Blut über die Arteria radialis, sowie über den Ramus dorsalis der Arteria interossea anterior. Das neurale Gewebe konnte als Zweig des Nervus interosseus anterior identifiziert werden (Brown 1998). In unserer Abbildung könnte es sich um den Anteil handeln, der im Os lunatum inseriert. Vergleicht man die Schnittebene mit koronaren Schichtungen, würde dieser sagittaler Schnitt mit Darstellung des Metacarpale II, Os capitatum und Os scaphoideum der richtigen Höhe entsprechen. Andererseits ist das Gelenk zwischen Mond- und Kahnbein nicht getroffen und die makroskopische Abbildung (Abb.80) kann durch die abweichende Ebene zum MR-Bild die Vermutung nicht bestätigen. Hier sind ggfs. weitere MR-tomographische Untersuchungen mit Beschreibung von Varianten notwendig.

5.3.4 Ulnarer Faserkomplex (TFCC)

Der TFCC bildet sich im koronaren MR-Bild als dreieckiges Gebilde zwischen distaler Ulna, ulnarem Radius und dem Os lunatum bzw. dem Os triquetrum mit einem asymmetrischen, signalarmen und bogenförmigen Signal ab. Signaldifferenzen können auf ulnarer bzw. radialer Seite bestehen.

Nakamura (1999) konnte mit einer fettsignalunterdrückten T1-Sequenz drei Kompartimente des TFCC klar darstellen: eine distale hängemattenartige Struktur, ein proximales trianguläres Ligament und das ulnare Seitenband.

Haims (2002) erzielte dagegen in seiner Studie eine nur durchschnittliche Abbildbarkeit der peripheren TFCC-Anheftungen.

Nur durch spezifische, auf die genaue Abbildung der Anatomie ausgerichtete Sequenzprotokolle mit gleichzeitiger intraartikulärer Kontrastmittelanwendung, wie in der Studie von Brown (1998), können die verschiedenen Anteile des Komplexes und weitere ligamentäre Strukturen des Handgelenks in zufriedenstellender Weise abgebildet werden. Diese Protokolle sind aber in der täglichen klinischen Routine aufgrund der langen Untersuchungszeit, Invasivität und Spezifität nicht anwendbar.

In der Literatur sind Untersuchungen zur optimalen Rupturdarstellung des TFCC mit unterschiedlichen Sequenzen zu finden (Kang 1991/ Schweitzer 1992/ Tottermann

1996/ Pretorius 1997/ Potter 1997/ Ahn 1998/ Nakamura 1999/ Steinbach 2000/ Stähler 2000).

Stähler (2000) und Ahn (1998) bevorzugen zur Darstellung des TFCC fettgesättigte Proton-Density-gewichtete- (PD) und Short-tau-inversion-recovery- (STIR) Sequenzen. Nakamura (1999) bestätigt hingegen der frequenzselektiven fettsignalgesättigten T1-gewichteten Sequenz die beste Abbildbarkeit.

Eine ebenfalls geeignete Sequenz zur Beurteilung des Discus articularis und dessen Bandstruktur ist eine 3D-Gradienten-Echo-Sequenz in T2-Wichtung (Kang 1991/ Tottermann 1996/ Pretorius 1997/ Nakamura 1999/ Steinbach 2000). Hiermit können komplette und inkomplette Rupturen, sowie Verletzungen der dorsalen und palmaren radioulnaren Ligamente diagnostiziert werden.

In unserer Studie wählten wir ein Sequenzprotokoll, das im klinischen Alltag anwendbar ist, eine tolerierbare Untersuchungszeit unter einer halben Stunde besitzt und gleichzeitig nicht auf die notwendigen spezifischen Anforderungen der TFCC-Darstellung verzichtet. Unsere Sequenzen zur Abbildung von ligamentären Strukturen und des ulnocarpalen Bandkomplexes wurde in Anlehnung an die Untersuchung von Stähler (2000) in das Protokoll aufgenommen. Hierbei handelt es sich um die PD-FS-Sequenz mit überlegenerer Wasserdarstellung als die STIR-Sequenz und zum anderen um die FLASH-WE-Sequenz.

In der Protonen-gewichteten Abbildung hebt sich durch den Kontrast der Gelenkflüssigkeit die signalarme Bandstruktur des TFCC gut hervor. Selbst die peripheren Insertionen sind in unseren MR-Bildern eindeutig erkennbar. Zum einen die Anheftung an der Ulna, die Insertion der triangulären Struktur in der Fovea des Radius und am Processus styloideus ulnae.

Die auffällige Fragmentation mit Kontinuitätsunterbrechung des TFCC bei Proband 1 könnte einer Verletzung dieser Struktur entsprechen. Begleitende Ödembildung mit geforderter Signalanhebung (s.u.) in den wassersensitiven Sequenzen, bzw. Rupturen an anderer Stelle sind nicht zu finden. Ein Handgelenkstrauma konnte nicht eruiert werden, so dass am ehesten von einer beginnenden degenerativen Veränderung bei anamnestisch bekanntem Mountain-bikefahren ausgegangen werden muss.

Kang (1991) übertrug die bestehende Hypothese, dass bei einer Meniskusdegeneration die Rotationsgeschwindigkeit der Protonen durch die Interaktion zwischen Synovia und großen Meniskusmolekülen abnimmt, auf die

Degeneration des TFCC. Es ergab sich in beiden Fällen in den degenerativen Gebieten in der T1-Sequenz eine fokale oder lineare Signalzunahme bzw. in der T2-Sequenz eine Signalabnahme. Die Perforationen werden in T2-gewichteten Aufnahmen durch erhöhten synovialen Flüssigkeitsstrom signalstark abgebildet, während Degenerationen sich durch eine Signalabnahme auszeichnen.

Durch die Ruptur des TFCC ist eine Verbindung zwischen dem distalen Radioulnargelenk und dem proximalen Handgelenk möglich. Ein dabei entstehender Erguss kann somit in das Radioulnargelenk übertreten. Der Flüssigkeitsnachweis im distalen Radioulnargelenk spricht daher für eine Läsion bzw. traumatische Ruptur des TFCC (Schweitzer 1992). Es muss differentialdiagnostisch berücksichtigt werden, dass bei Patienten mit Synovialitis oder mechanischen Überlastungszuständen ebenfalls Flüssigkeitsansammlungen im distalen Radioulnargelenk zu finden sind (Steinbach 2000). Zum Nachweis des Ergusses eignen sich die STIR-Sequenz, die T2-gewichtete- oder Gradienten-Echo-Sequenzen.

Die MRT, verglichen mit Arthroskopie und Arthrographie als Goldstandard, zeigt unterschiedliche Sensitivitäten und Spezifitäten in der Genauigkeit der Rupturdetektion. Die Sensitivität reicht in den verschiedenen Studien von 72% bis 100%, die Spezifität von 89% bis 100% (Golimbu 1989/ Zlatkin 1989/ Schweitzer 1992/ Kato 2000/ Meier 2003/ Haims 2003). Die Sensitivität und Spezifität von peripheren Rissen ist dagegen deutlich geringer (Oneson 1997/ Haims 2002/ Haims 2003). Haims (2002) erreichte Sensitivitäten von 17% bei Spezifität von 79% in der Detektion von peripheren TFCC-Rissen. Seiner Meinung nach sind die gefundenen Ergebnisse enttäuschend und für eine sinnvolle präoperative Planung ungenügend.

Blazar (2002) betonte in seiner Studie, dass die publizierten positiven Ergebnisse nur von erfahrenen Untersuchern und in spezialisierten Zentren mit zusätzlicher Kontrastmittelinstitution ins Gelenk erreicht werden können.

Aus diesen Gründen wies Beyermann schon 1999 darauf hin, dass die MRT-Untersuchung des Handgelenks für die Diagnostik von TFCC-Läsionen nur Ausnahmefällen vorbehalten sein sollte. Ihm ist die untersuchte Treffsicherheit mit den unterschiedlichen Sensitivitäten und Spezifitäten in der Literatur zu unterschiedlich. Bei anhaltenden Beschwerden ist dann trotz negativem Befund eine Arthroskopie erforderlich. Zusätzlich lassen sich Verletzungen oder Veränderungen des lunotriquetralen Bandapparats, die als Differentialdiagnose in Betracht kommen,

arthroskopisch sicherer erfassen und meistens durch eine Intervention in einem Schritt beseitigen. Potter (1997) jedoch ist der Meinung, dass die MR-tomographische Untersuchung mit einer geeigneten Puls-Sequenz eine exakte Lokalisation der TFCC-Pathologie gewährleistet.

Um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten ist neben der geeigneten Sequenzwahl auch die Schichtdicke zu berücksichtigen. Bei Verdacht auf Verletzung des ulnaren Komplexes sind koronare Schichten mit 1mm Dicke empfohlen. Diese spezifischen Sequenzen sind meist im Routineprotokoll zur Handgelenksequenz nicht enthalten. Um die oben angesprochenen peripheren Rupturen des TFCC zu erkennen, sollte die Untersuchung durch axiale und sagittale Schichten ergänzt werden (Haims 2002). Meier (2003) ist der Ansicht, dass die MRT des TFCC zur Diagnostik und Indikationsstellung zur Operation am Handgelenk beitragen und so die Anzahl der rein diagnostischen Arthroscopien reduzieren kann.

Die Notwendigkeit der technischen Weiterentwicklung der MRT in Bezug auf die Evaluierung des „triangular fibrocartilage complex“ besteht aber weiterhin (Kato 2000/ Haims 2002/ Meier 2003). Auch in unserer Studie mit spezieller Handgelenksspule und spezifischen Sequenzen bildet sich der TFCC nur signalschwach ab. Die zentral gelegenen Strukturen sind jedoch in unseren MRT-Bildern gut zu erkennen.

Magnetresonanztomographen mit größerer Feldstärke werden in naher Zukunft in die klinische Routinediagnostik Einzug halten und die Bildgebung auch in Bezug auf die TFCC-Darstellung weiter optimieren. Hierbei müssen die länderspezifischen Hochfrequenzabsorptionsgrenzwerte berücksichtigt werden.

5.3.5 Loge de Guyon

Die größten Hindernisse in der magnetresonanztomographischen Darstellung der peripheren Nerven waren früher das schwache Signal/ Rausch-Verhältnis und die lange Messzeit (Jarvik 2000). Mit kleineren Handgelenksspulen, oder jetzt mit phased-array Spulen, sind hohe Auflösungen bis zu 0,17mm x 0,17mm (Mäurer 2000) möglich. Die dadurch erreichbaren Signal/ Rausch- bzw. Kontrast/ Rausch-Verhältnisse stellen neben dem leicht erkennbaren N. medianus nun auch den im Durchschnitt kleineren N. ulnaris mit seiner Bifurkation in hochqualitativen MRT-Bildern dar. Damit ist allgemein eine bessere Evaluierung der Loge de Guyon und deren Pathologien möglich. Wir verwendeten ein field-of-view von 8cm, um auch

größere Handgelenke untersuchen zu können. Unsere Auflösung betrug $0,135\text{mm}^3$, bei hohen Signalwerten.

Für eine optimale Beurteilung der Handgelenksnerven sind T1- bzw. T2-gewichtete Sequenzen in axialer Schichtführung geeignet. Der T1-Kontrast stellt dabei die anatomischen Verhältnisse und die Begrenzungen der Loge de Guyon dar. Im T2-Kontrast können dagegen besser Pathologien abgebildet und unterschieden werden. Die Nerven zeigen sich dabei isointens gegenüber der Hypothenarmuskulatur und nehmen bei pathologischer Veränderung in der Signalintensität zu (Jarvik 2000). Wir verwendeten die FLASH-WE-Sequenz, die sowohl die knöchernen Landmarken, als auch die Nerven selbst und das umliegende Binde- bzw. Fettgewebe gut erkennen lassen.

Mehrere Autoren (Gross 1985/ Zeiss 1992/ Cobb 1996) unterteilen den ulnaren Tunnel in drei Abschnitte. Im Verlauf vom Hiatus proximalis zum Hiatus distalis verändert die Loge de Guyon sowohl ihren Querschnitt, als auch die Form. Das proximale Segment besitzt eine dreieckige Grundfläche. Die Basis des Dreiecks lehnt sich an die radiale Fläche des Erbsenbeins an und die, durch das Zusammenlaufen von Retinaculum flexorum und Lig. carpi palmare, entstehende Spitze zeigt in Richtung Karpaltunnel. Der mittlere Tunnelabschnitt (zwischen Os pisiforme und Hamulus ossis hamati), mit der darin enthaltenen Nervenauzweigung, zeigt einen ovalen bis triangulären Querschnitt. Im distalen Gebiet der Loge de Guyon liegen dann zwei separate Kanäle für die oberflächlichen und tiefen Anteile des N. und A. ulnaris vor. Die Unterteilung erfolgt durch ein dünnes fibröses Band bzw. durch den am Hamulus inserierenden Muskelbauch des M. flexor digiti minimi brevis (Zeiss 1992). In unserer Arbeit konnten wir die drei Zonen mit den noch nicht MR-tomographisch beschriebenen Kanälen in hochauflösenden Bildern darstellen. Der fibröse Bandzug ist jedoch nur in der makroskopischen Aufbearbeitung sichtbar.

Auffallend ist die enge Nachbarschaft der Loge de Guyon zum Karpalkanal. Die beiden Tunnel sind somit lediglich durch das kräftige Retinaculum flexorum voneinander getrennt. Diese Tatsache ist bei der endoskopischen Karpaltunneloperation mit dem Release des Retinaculum flexorum von großer Bedeutung. Hierbei wird zwangsweise der Boden der Loge de Guyon miteröffnet. Cobb (1996) ist jedoch der Ansicht, dass eine Verletzung des Gefäß-Nervenstranges

während der endoskopischen Karpaltunneloperation durch das umgebende Fettgewebe und der damit verbundenen hohen Flexibilität verhindert wird.

Bei Übergang des Handgelenkes von Flexion in Extension zeigt sich eine deutliche radiale Verschiebung der Loge de Guyon gegen den Karpalkanal. Die Überlappung ist in Extension 50% größer als in Flexion. Diese Tatsache kann für den endoskopisch arbeitenden Operateur wichtig sein, da die Hand für die Operation meistens in Dorsalextension positioniert ist (Netscher 1996). In der MR-tomographischen Untersuchung wird das Handgelenk möglichst in Normal-Null-Stellung gelagert. Hier zeigt sich in unseren Bildern nur eine geringfügige Überlappung des Karpalkanals.

Anatomische Variationen des Nervus und Arteria ulnaris bzw. der Muskeln, finden sich in der Loge de Guyon relativ häufig.

Besonders atypische oder akzessorische Muskelzüge treten in 22-25% der Fälle auf (Dodds 1990/ Zeiss 1992). Weitere zusätzliche Muskeln entspringen an der Fascia antebrachii oder proximal des Handgelenks. Seltenerer Varianten nehmen ihren Ursprung an der radialen Fläche des Os pisiforme oder am mittleren Unterarm. Alle Muskeln inserieren aber mit dem M. abductor digiti minimi an der Grundphalanx des Kleinfingers. Die klinische Bedeutung liegt in der auftretenden Kompression des N. ulnaris in der Loge de Guyon durch eine Hypertrophierung dieser Muskeläste. In unseren Präparaten konnten keine pathologischen Muskelvariationen gefunden werden.

Die neurovaskulären Varianten wurden erstmalig von Lindsey (1996) in einer Klassifikation zusammengefasst. Hierbei wird der Aufteilung des N. ulnaris, der Anzahl der Hypothenaräste und dem Kreuzungsverhalten der Arteria ulnaris Rechnung getragen. Diese Einteilung kann in der axialen Schichtung nicht vorgenommen werden. Klinische Bedeutung haben diese Variationen für den Handchirurgen bei der Präparation des OP-Situs.

Netscher führte eine Untersuchung zur Lage der A. ulnaris innerhalb der Loge de Guyon durch. Zu 30% bildet sich die Arterie dabei radial des Hamulus ossis hamati ab. Unser Präparat zählt zu dem 60%-Anteil, in dem sich die Arterie ulnaria direkt unterhalb des knöchernen Hakens des Os hamatum darstellt. Die dynamische Veränderung bei Bewegung des Handgelenks in Dorsalextension, Palmarflexion bzw. bei Ulnarabduktion, die bei älteren Spulen zur bequemen Positionierung notwendig war, muss berücksichtigt werden.

6 Zusammenfassung

Die MRT ist auch am Handgelenk die umfassendste Untersuchungstechnik. Die erzielbare Abbildungsgüte hängt besonders von der Gerätetechnik und von den Oberflächenspulen ab.

Zur Untersuchung des Fortschrittes der Spulenentwicklung in Bezug auf die Handgelenkuntersuchung und die Bildqualität, wurden drei technisch unterschiedliche Handgelenksspulen quantitativ untersucht und für den Vergleich die artefaktstabile Spin-Echo-Sequenz in koronarer Ebene (FOV 80/ AQ 2/ Voxelgröße 0,4x0,3x3mm) verwendet.

1. 2-Kanal-phased-array-Handgelenksspule; Prototyp; Siemens AG Medizintechnik, Erlangen; Baujahr '99; Spulenvolumen $V=970 \text{ cm}^3$,
2. 4-Kanal-phased-array-Handgelenksspule; HRW U1108; MRI Devices Corporation, USA; Baujahr '01; Spulenvolumen $V=1180 \text{ cm}^3$,
3. zirkular polarisierte Volumenspule (CP Extremitätenspule; Siemens Medizintechnik AG, Erlangen; Spulenvolumen $V=8500 \text{ cm}^3$).

Zur Anwendung kamen zwei 1,5 Tesla MR-Geräte der Baureihe Magnetom Vision und Magnetom Symphony (Siemens AG Medizintechnik, Erlangen), die sich durch höchste Gradientenleistung auszeichnen.

Die Untersuchungen wurden an 6 Handgelenken (3 Formalin-Ethanol-fixierte Handgelenkspräparate menschlicher Leichen + 3 Probanden) durchgeführt.

Es erfolgte eine statistische Auswertung anhand der Signal-zu-Rausch (SNR) und Kontrast-zu-Rausch-Werte (CNR) des Diskus articularis, der Spongiosa, der Kortikalis und des Knorpels.

Im Vergleich der SNR-Werte lag die neue phased-array-Spule 64% über der Volumen-Kniespule und 15% über dem 2-Kanal-Prototypen.

Die CNR-Werte der beiden spezifischen Spulen zeigten nur 8% Unterschied zu Gunsten der 4-Kanal-Handgelenksspule. Die zirkular-polarisierte Kniespule zeigte ein um 41% bzw. 44% niedrigeres Kontrast-zu-Rausch-Niveau im Vergleich zu den zwei anderen Spulen auf.

Im direkten Vergleich der Rauschwerte schnitt ebenfalls die neue Spule mit 4-Kanal-phased-array Technik am besten ab. Im Ergebnis lag sie 38% unterhalb des Rauschwertes der 2-Kanal-Spule und 71% unterhalb der Volumen-Knie-Spule.

Neben der statistischen Untersuchung wurde anhand der technisch am weitesten entwickelten Handgelenksspule mit 4-Kanal-phased-array-Technik eine anatomisch-

magnetresonanztomographische Bildkorrelation in den 3 Ebenen des Handgelenkes vorgenommen. Hierbei lag neben der allgemeinen Anatomie das Augenmerk auf der Abbildbarkeit der Landmarken und der beinhalteten Strukturen in der bisher nur wenig untersuchten Loge de Guyon. Wir legten besonderen Wert auf die Darstellung des TFCC, sowie auf die ligamentären Strukturen und den Kontrast zwischen den Geweben.

Das Sequenzprotokoll aus der Routineuntersuchung wurde zuvor an 12 Probanden ausführlich getestet, in den Messparametern modifiziert und optimiert. Dadurch ist eine Darstellung der komplexen weichteiligen, knorpeligen und knöchernen Strukturen des Handgelenkes in hoher Bildqualität möglich. Um eine Anwendung im klinischen Alltag zu gewährleisten wurde die Untersuchungszeit auf 29 Minuten begrenzt.

Zum Einsatz kamen folgende Sequenzen:

1. T1-gewichtete Spin-Echo-Sequenz,
2. Protonen-gewichtete Turbo-Spin-Echo-Sequenz mit selektiver Fettsättigung,
3. DESS-Sequenz mit frequenzselektiver Wasseranregung
4. FLASH-Sequenz mit frequenzselektiver Wasseranregung.

Um die erhaltenen Ergebnisse vergleichen und interpretieren zu können, wurden nach der Bildakquisition die Präparate tiefgefroren und entlang der MR-tomographischen Schnittführung in 3mm Schichten zersägt und fotografiert.

Die axialen Schnitte eigneten sich sehr gut für die Identifikation von Ligamenten, Sehnen, Nerven und Gefäße des Handgelenkes. Anhand hochauflösender Bilder konnten durch den makroskopischen Vergleich die Strukturen in hervorragender Bildqualität dargestellt werden. Besonders die Loge de Guyon war in ihrer gesamten Länge mit Inhalt und umgebenden Landmarken klar definiert dargestellt. Die Nervenbifurkation und der weitere Verlauf des oberflächlichen und tiefen Anteils des N. ulnaris konnte durch die gewählten Sequenzen und der speziellen Handgelenkspule sichtbar gemacht werden.

Die vorliegende Untersuchung zeigte, dass zur Untersuchung des Handgelenkes spezielle Handgelenksspulen mit Phased-array-Technologie und spezifische Sequenzprotokolle notwendig sind. Die Phased-array-Technik verbessert die Signal- und Kontrastwerte signifikant und ermöglicht die umfassende Darstellung der komplexen Anatomie des Handgelenkes in sehr guter Bildqualität. Um spezielle

Fragestellungen, z.B. Evaluation von TFFC-Pathologien oder Verletzungen von Bandstrukturen beantworten zu können, sind trotz der jetzt durch die Phased-array-Spulen erzielbaren Bildqualitätssteigerungen weitere technische Entwicklungen und Fortschritte in der MRT des Handgelenkes wünschenswert.

7 Literatur

Ahn JM, Brown RR, Kwak SM, Kang HS, Muhle C, Botte MJ, Trudell D, Haghghi P, Resnick D.

Evaluation of the triangular fibrocartilage and the scapholunate and lunotriquetral ligaments in cadavers with low-field-strength extremity-only magnet. Comparison of available imaging sequences and macroscopic findings.

Invest Radiol. 1998 Jul;33(7):401-6.

Allmann KH, Horch R, Uhl M, Gufler H, Althoefer C, Stark GB, Langer M.

MR imaging of the carpal tunnel.

Eur J Radiol. 1997 Sep;25(2):141-5.

Baker LL, Hajek PC, Bjorkengren A, Galbraith R, Sartoris DJ, Gelberman RH, Resnick D.

High-resolution magnetic resonance imaging of the wrist: normal anatomy.

Skeletal Radiol. 1987;16(2):128-32.

Bartelmann U, Kalb K, Schmitt R, Frohner S.

Radiologic diagnosis of lunate necrosis

Handchir Mikrochir Plast Chir. 2001 Nov;33(6):365-78.

Berger RA, Blair WF.

The radioscapulohumeral ligament: a gross and histologic description.

Anat Rec. 1984 Oct;210(2):393-405.

Berkowitz AR, Melone CP Jr, Belsky MR.

Pisiform-hamate coalition with ulnar neuropathy.

J Hand Surg [Am]. 1992 Jul;17(4):657-62.

Berquist TH

MRI of the muskuloskeletal system

Raven, Lippincott, Philadelphia, 673-734, 1996

Beyermann K, Krimmer H, Lanz U.

TFCC (Triangular Fibrocartilage Complex) lesions. Diagnosis and therapy
Orthopäde. 1999 Oct;28(10):891-8.

Biebuyck JC, Katz LD, McCauley T.

Soft tissue edema in osteoid osteoma.
Skeletal Radiol. 1993;22(1):37-41.

Binkovitz LA, Berquist TH, McLeod RA.

Masses of the hand and wrist: detection and characterization with MR imaging.
AJR Am J Roentgenol. 1990 Feb;154(2):323-6.

Brahme SK, Hodler J, Braun RM, Sebrechts C, Jackson W, Resnick D.

Dynamic MR imaging of carpal tunnel syndrome.
Skeletal Radiol. 1997 Aug;26(8):482-7.

Breitenseher MJ, Gaebler C.

Trauma of the wrist.
Eur J Radiol. 1997 Sep;25(2):129-39.

Breitenseher MJ, Metz VM, Gilula LA, Gaebler C, Kukla C, Fleischmann D, Imhof H, Trattnig S.

Radiographically occult scaphoid fractures: value of MR imaging in detection.
Radiology. 1997 Apr;203(1):245-50.

Brown RR, Fliszar E, Cotten A, Trudell D, Resnick D.

Extrinsic and intrinsic ligaments of the wrist: normal and pathologic anatomy at MR arthrography with three-compartment enhancement.
Radiographics. 1998 May-Jun;18(3):667-74.

Buchberger W.

Radiologic imaging of the carpal tunnel.
Eur J Radiol. 1997 Sep;25(2):112-7.

Buchberger W, Judmaier W, Birbamer G, Lener M, Schmidauer C.
Carpal tunnel syndrome: diagnosis with high-resolution sonography.
AJR Am J Roentgenol. 1992 Oct;159(4):793-8.

Bui-Mansfield LT, Williamson M, Wheeler DT, Johnstone F.
Guyon's canal lipoma causing ulnar neuropathy.
AJR Am J Roentgenol. 2002 Jun;178(6):1458.

Butler ED, Hamell JP, Seipel RS, de Lorimier AA.
Tumors of the Hand. A 10-year survey and report of 437 cases.
Am J Surg 1960; 100: 293

Capelastegui A, Astigarraga E, Fernandez-Canton G, Saralegui I, Larena JA, Merino A.
Masses and pseudomasses of the hand and wrist: MR findings in 134 cases.
Skeletal Radiol. 1999 Sep;28(9):498-507.

Cerezal L, del Pinal F, Abascal F, Garcia-Valtuille R, Pereda T, Canga A.
Imaging findings in ulnar-sided wrist impaction syndromes.
Radiographics. 2002 Jan-Feb;22(1):105-21.

Cobb TK, Carmichael SW, Cooney WP.
Guyon's canal revisited: an anatomic study of the carpal ulnar neurovascular space.
J Hand Surg [Am]. 1996 Sep;21(5):861-9.

Connell D, Page P, Wright W, Hoy G.
Magnetic resonance imaging of the wrist ligaments.
Australas Radiol. 2001 Nov;45(4):411-22.

Dahlin DC
Bone tumors. General aspect and data of 6221 cases
3rd. edn. Thomas, Springfield, Illinois, 1995.

Dalinka MK, Meyer S, Kricun ME, Vanel D.

Magnetic resonance imaging of the wrist.

Hand Clin. 1991 Feb;7(1):87-98.

De Beuckeleer L, De Schepper A, De Belder F, Van Goethem J, Marques MC, Broeckx J, Verstraete K, Vermaut F.

Magnetic resonance imaging of localized giant cell tumour of the tendon sheath (MRI of localized GCTTS).

Eur Radiol. 1997;7(2):198-201.

Decoulx P, Marchand M, Minet P, Razemon JP.

La maladie de Kienböck chez le mineur.

Lille chir 1957; 12: 65-73

Denman EE.

The anatomy of the space of Guyon.

Hand. 1978 Feb;10(1):69-76.

Desser TS, McCarthy S, Trumble T.

Scaphoid fractures and Kienbock's disease of the lunate: MR imaging with histopathologic correlation.

Magn Reson Imaging. 1990;8(4):357-61.

Drenckhan D, Zenker W.

Anatomie: Makroskopische Anatomie, Embryologie und Histologie des Menschen

Benninghoff A (Hrsgb.), U&S, München, Wien, Baltimore, 1994

Dodds GA 3rd, Hale D, Jackson WT.

Incidence of anatomic variants in Guyon's canal.

J Hand Surg [Am]. 1990 Mar;15(2):352-5.

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. 2001 Dec;177(6):1257-63.

Eckman PB, Perlstein G, Altrocchi PH.

Ulnar neuropathy in bicycle riders.

Arch Neurol. 1975 Feb;32(2):130-2.

Escobedo EM, Bergman AG, Hunter JC.

MR imaging of ulnar impaction.

Skeletal Radiol. 1995 Feb;24(2):85-90.

Fischer M, Denzler C, Sennwald G.

Carpal ligament lesions associated with fresh distal radius fractures: arthroscopic study of 54 cases.

Swiss Surg. 1996;2(6):269-72;

Fisk GR.

The wrist.

J Bone Joint Surg Br. 1984 May;66(3):396-407.

Fisk GR.

The influence of the transverse carpal ligament (flexor retinaculum) on carpal stability

Ann Chir Main. 1984;3(4):297-9

Frick H, Leonhardt H, Starck D.

Allgemeine Anatomie, Spezielle Anatomie I.

Taschenlehrbuch, Band I, Kühnel W, Putz R, Georg Thieme Verlag Stuttgart, New York, 4, überarb. Auflage, 1992

Friedman SL, Palmer AK.

The ulnar impaction syndrome.

Hand Clin. 1991 May;7(2):295-310.

Gabler C, Kukla C, Breitenheher MJ, Trattnig S, Vecsei V.

Diagnosis of occult scaphoid fractures and other wrist injuries. Are repeated clinical examinations and plain radiographs still state of the art?

Langenbecks Arch Surg. 2001 Mar;386(2):150-4.

Garcia J, Bianchi S.

Diagnostic imaging of tumors of the hand and wrist.

Eur Radiol. 2001;11(8):1470-82.

Gelberman RH, Panagis JS, Taleisnik J, Baumgaertner M.

The arterial anatomy of the human carpus. Part I: The extraosseous vascularity.

J Hand Surg [Am]. 1983 Jul;8(4):367-75.

Glaser C, Faber S, Eckstein F, Fischer H, Springer V, Heudorfer L, Stammberger T, Englmeier KH, Reiser M.

Optimization and validation of a rapid high-resolution T1-w 3D FLASH water excitation MRI sequence for the quantitative assessment of articular cartilage volume and thickness.

Magn Reson Imaging. 2001 Feb;19(2):177-85.

Golimbu CN, Firooznia H, Melone CP Jr, Rafii M, Weinreb J, Leber C.

Tears of the triangular fibrocartilage of the wrist: MR imaging.

Radiology. 1989 Dec;173(3):731-3.

Greene MH, Hadied AM.

Bipartite hamulus with ulnar tunnel syndrome-case report and literature review.

J Hand Surg [Am]. 1981 Nov;6(6):605-9.

Gross MS, Gelberman RH.

The anatomy of the distal ulnar tunnel.

Clin Orthop. 1985 Jun;(196):238-47.

Haims AH, Schweitzer ME, Morrison WB, Deely D, Lange RC, Osterman AL, Bednar JM, Taras JS, Culp RW.

Internal derangement of the wrist: indirect MR arthrography versus unenhanced MR imaging.

Radiology. 2003 Jun;227(3):701-7.

Haims AH, Schweitzer ME, Morrison WB, Deely D, Lange R, Osterman AL, Bednar JM, Taras JS, Culp RW.

Limitations of MR imaging in the diagnosis of peripheral tears of the triangular fibrocartilage of the wrist.

AJR Am J Roentgenol. 2002 Feb;178(2):419-22.

Hayes CE, Hattes N, Roemer PB.

Volume imaging with MR phased arrays.

Magn Reson Med. 1991 Apr;18(2):309-19.

Hinshaw WS, Andrew ER, Bottomley PA, Holland GN, Moore WS, Worthington BS.

An in vivo study of the fore-arm and hand by thin section NMR imaging.

Br J Radiol. 1979 Jan;52(613):36-43.

Hulten O.

Über anatomische Variationen der Handgelenksknochen.

Acta Radiol Scand, 1928; 9: 155

Hunter JC, Escobedo EM, Wilson AJ, Hanel DP, Zink-Brody GC, Mann FA.

MR imaging of clinically suspected scaphoid fractures.

AJR Am J Roentgenol. 1997 May;168(5):1287-93

Jablecki CK, Andary MT, So YT, Wilkins DE, Williams FH.

Literature review of the usefulness of nerve conduction studies and electromyography for the evaluation of patients with carpal tunnel syndrome. AAEM Quality Assurance Committee.

Muscle Nerve. 1993 Dec;16(12):1392-414.

Jacobson JA, Oh E, Propeck T, Jebson PJ, Jamadar DA, Hayes CW.

Sonography of the scapholunate ligament in four cadaveric wrists: correlation with MR arthrography and anatomy.

AJR Am J Roentgenol. 2002 Aug;179(2):523-7.

Jarvik JG, Kliot M, Maravilla KR.

MR nerve imaging of the wrist and hand.

Hand Clin. 2000 Feb;16(1):13-24, vii.

Jarvik JG, Yuen E, Haynor DR, Bradley CM, Fulton-Kehoe D, Smith-Weller T, Wu R, Kliot M, Kraft G, Wang L, Erlich V, Heagerty PJ, Franklin GM.

MR nerve imaging in a prospective cohort of patients with suspected carpal tunnel syndrome.

Neurology. 2002 Jun 11;58(11):1597-602.

Kalisman M, Laborde K, Wolff TW.

Ulnar nerve compression secondary to ulnar artery false aneurysm at the Guyon's canal.

J Hand Surg [Am]. 1982 Mar;7(2):137-9.

Kang HS, Kindynis P, Brahme SK, Resnick D, Haghghi P, Haller J, Sartoris DJ.

Triangular fibrocartilage and intercarpal ligaments of the wrist: MR imaging. Cadaveric study with gross pathologic and histologic correlation.

Radiology. 1991 Nov;181(2):401-4.

Karasick D, Karasick S.

Giant cell tumor of tendon sheath: spectrum of radiologic findings.

Skeletal Radiol. 1992;21(4):219-24.

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]. 2000 Oct;25(5):487-91.

Katz JN, Larson MG, Fossel AH, Liang MH.

Validation of a surveillance case definition of carpal tunnel syndrome.

Am J Public Health. 1991 Feb;81(2):189-93.

Keberle M, Jenett M, Kenn W, Reiners K, Peter M, Haerten R, Hahn D.

Technical advances in ultrasound and MR imaging of carpal tunnel syndrome.

Eur Radiol. 2000;10(7):1043-50.

Kneeland JB.

Technical considerations for MR imaging of the hand and wrist.

Magn Reson Imaging Clin N Am. 1995 May;3(2):191-6.

Kobayashi N, Koshino T, Nakazawa A, Saito T.

Neuropathy of motor branch of median or ulnar nerve induced by midpalm ganglion.

J Hand Surg [Am]. 2001 May;26(3):474-7.

Kocharian A, Adkins MC, Amrami KK, McGee KP, Rouleau PA, Wenger DE, Ehman RL, Felmlee JP.

Wrist: improved MR imaging with optimized transmit-receive coil design.

Radiology. 2002 Jun;223(3):870-6.

Koskinen SK, Mattila KT, Alanen AM, Aro HT.

Stress fracture of the ulnar diaphysis in a recreational golfer.

Clin J Sport Med. 1997 Jan;7(1):63-5.

Kukla C, Gaebler C, Breitenseher MJ, Trattnig 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]. 1997 Dec;22(6):810-3.

Lanz U.

Variations of the median nerve at the carpal tunnel

Handchirurgie. 1975;7(4):163-4.

Lee JK, Yao L.

Stress fractures: MR imaging.

Radiology. 1988 Oct;169(1):217-20.

Lichtman DM, Alexander AH, Mack GR, Gunther SF.

Kienbock's disease--update on silicone replacement arthroplasty.

J Hand Surg [Am]. 1982 Jul;7(4):343-7.

Lichtman DM, Alexander AH, Mack GR, Gunther SF.

Kienböck's disease.

In Gelbermann RH (Hrsg.), The wrist. New York: Raven Press, 1994

Lichtman DM, Schneider JR, Swafford AR, Mack GR.

Ulnar midcarpal instability-clinical and laboratory analysis.

J Hand Surg [Am]. 1981 Sep;6(5):515-23.

Lindsey JT, Watumull D.

Anatomic study of the ulnar nerve and related vascular anatomy at Guyon's canal: a practical classification system.

J Hand Surg [Am]. 1996 Jul;21(4):626-33.

Linscheid RL.

Ulnar lengthening and shortening.

Hand Clin. 1987 Feb;3(1):69-79.

Mäurer J, Bleschkowski A, Tempka A, Felix R.

High-resolution MR imaging of the carpal tunnel and the wrist. Application of a 5-cm surface coil.

Acta Radiol. 2000 Jan;41(1):78-83.

Manton GL, Schweitzer ME, Weishaupt D, Morrison WB, Osterman AL, Culp RW, Shabshin N.

Partial interosseous ligament tears of the wrist: difficulty in utilizing either primary or secondary MRI signs.

J Comput Assist Tomogr. 2001 Sep-Oct;25(5):671-6

Martini AK, Schiltewolf M.

A new classification of semilunar bone necrosis

Handchir Mikrochir Plast Chir. 1998 May;30(3):151-7.

Meier R, Schmitt R, Christopoulos G, Krimmer H.

TFCC-lesion. MR arthrography vs. arthroscopy of the wrist

Unfallchirurg. 2003 Mar;106(3):190-4.

Mesgarzadeh M, Schneck CD, Bonakdarpour A.

Carpal tunnel: MR imaging. Part I. Normal anatomy.

Radiology. 1989 Jun;171(3):743-8.

Mesgarzadeh M, Schneck CD, Bonakdarpour A, Mitra A, Conaway D.

Carpal tunnel: MR imaging. Part II. Carpal tunnel syndrome.

Radiology. 1989 Jun;171(3):749-54.

Micic A

Age changes in the triangular fibrocartilage complex of the wrist joint.

J Anat 1978/ 126/ 367

Middleton WD, Kneeland JB, Kellman GM, Cates JD, Sanger JR, Jesmanowicz A, Froncisz W, Hyde JS.

MR imaging of the carpal tunnel: normal anatomy and preliminary findings in the carpal tunnel syndrome.

AJR Am J Roentgenol. 1987 Feb;148(2):307-16.

Milberg P, Kleinert HE.

Giant cell tumor compression of the deep branch of the ulnar nerve.

Ann Plast Surg. 1980 May;4(5):426-9.

Miller TT, Potter HG, McCormack RR Jr.

Benign soft tissue masses of the wrist and hand: MRI appearances.

Skeletal Radiol. 1994 Jul;23(5):327-32.

Murray PM, Berger RA, Inwards CY.

Primary neoplasms of the carpal bones.

J Hand Surg [Am]. 1999 Sep;24(5):1008-13.

Nakamura T, Takayama S, Horiuchi Y, Yabe Y.

Origins and insertions of the triangular fibrocartilage complex: a histological study.

J Hand Surg [Br]. 2001 Oct;26(5):446-54.

Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y.

Fat suppression magnetic resonance imaging of the triangular fibrocartilage complex.

Comparison with spin echo, gradient echo pulse sequences and histology.

J Hand Surg [Br]. 1999 Feb;24(1):22-6.

Nakamura T, Yabe Y, Horiuchi Y.

Functional anatomy of the triangular fibrocartilage complex.

J Hand Surg [Br]. 1996 Oct;21(5):581-6.

Nelson MC, Stull MA, Teitelbaum GP, Patt RH, Lack EE, Bogumill GP, Freedman MT.

Magnetic resonance imaging of peripheral soft tissue hemangiomas.

Skeletal Radiol. 1990;19(7):477-82

Netscher D, Polsen C, Thornby J, Choi H, Udeh J.

Anatomic delineation of the ulnar nerve and ulnar artery in relation to the carpal tunnel by axial magnetic resonance imaging scanning.

J Hand Surg [Am]. 1996 Mar;21(2):273-6.

Obletter N, Schmitt R.

Avaskuläre Osteonekrosen.

In Schmitt R, Lanz U, (Hrsg.). Bildgebende Diagnostik der Hand. Stuttgart Hippokrates, 1996, 303-310.

O'Hara JJ, Stone JH.

Ulnar neuropathy at the wrist associated with aberrant flexor carpi ulnaris insertion.

J Hand Surg [Am]. 1988 May;13(3):370-2.

Oneson SR, Timins ME, Scales LM, Erickson SJ, Chamoy L.

MR imaging diagnosis of triangular fibrocartilage pathology with arthroscopic correlation.

AJR Am J Roentgenol. 1997 Jun;168(6):1513-8

Palmer AK.

Triangular fibrocartilage complex lesions: a classification.

J Hand Surg [Am]. 1989 Jul;14(4):594-606.

Palmer AK, Werner FW.

The triangular fibrocartilage complex of the wrist--anatomy and function.

J Hand Surg [Am]. 1981 Mar;6(2):153-62.

Pechlaner S, Lohmann H, Buck-Gramcko D, Martin L.

Pseudarthrosis of the scaphoid bone. Experiences in 240 cases

Handchir Mikrochir Plast Chir. 1987 Nov;19(6):306-9.

Peh WC, Truong NP, Totty WG, Gilula LA.

Pictorial review: magnetic resonance imaging of benign soft tissue masses of the hand and wrist.

Clin Radiol. 1995 Aug;50(8):519-25.

Polesuk BS, Helms CA.

Hypertrophied palmaris longus muscle, a pseudomass of the forearm: MR appearance--case report and review of the literature.

Radiology. 1998 May;207(2):361-2.

Potter HG, Asnis-Ernsberg L, Weiland AJ, Hotchkiss RN, Peterson M, McCormack RR Jr.

The utility of high-resolution magnetic resonance imaging in the evaluation of the triangular fibrocartilage complex of the wrist.

J Bone Joint Surg Am 1997 Nov;79(11):1675-84

Pretorius ES, Epstein RE, Dalinka MK.

MR imaging of the wrist.

Radiol Clin North Am. 1997 Jan;35(1):145-61.

Roemer PB, Edelstein WA, Hayes CE, Souza SP, Mueller OM.

The NMR phased array.

Magn Reson Med. 1990 Nov;16(2):192-225.

Rominger MB, Bernreuter WK, Kenney PJ, Lee DH.

MR imaging of anatomy and tears of wrist ligaments.

Radiographics. 1993 Nov;13(6):1233-46;

Ruocco MJ, Walsh JJ, Jackson JP.

MR imaging of ulnar nerve entrapment secondary to an anomalous wrist muscle.

Skeletal Radiol. 1998 Apr;27(4):218-21.

Salzberg CA, Weinberg H.

Dupuytren's disease as a cause of ulnar tunnel syndrome.

J Hand Surg [Am]. 1987 Jan;12(1):91-2.

Schadel-Hopfner M, Iwinska-Zelder J, Braus T, Bohringer G, Klose KJ, Gotzen L.

MRI versus arthroscopy in the diagnosis of scapholunate ligament injury.

J Hand Surg [Br]. 2001 Feb;26(1):17-21.

Scheck RJ, Kubitzek C, Hierner R, Szeimies U, Pfluger T, Wilhelm K, Hahn K.

The scapholunate interosseous ligament in MR arthrography of the wrist: correlation with non-enhanced MRI and wrist arthroscopy.

Skeletal Radiol. 1997 May;26(5):263-71.

Schindler G, Schmitt R, Spitz J.

Frakturen des Skaphoids.

In Schmitt R, Lanz U, (Hrsg.). Bildgebende Diagnostik der Hand. Stuttgart Hippokrates, 1996, 149-157.

Schmidt HM, Lanz U.

Chirurgische Anatomie der Hand

Hippokrates, Stuttgart, 1992

Schmitt R, Heinze A, Fellner F, Obletter N, Struhn R, Bautz W.

Imaging and staging of avascular osteonecroses at the wrist and hand.

Eur J Radiol. 1997 Sep;25(2):92-103.

Schmitt R, Spitz J, Krimmer H.

Skaphoidpseudarthrose

In Schmitt R, Lanz U, (Hrsg.). Bildgebende Diagnostik der Hand. Stuttgart Hippokrates, 1996, 157-165.

Schweitzer ME, Brahme SK, Hodler J, Hanker GJ, Lynch TP, Flannigan BD, Godzik CA, Resnick D.

Chronic wrist pain: spin-echo and short tau inversion recovery MR imaging and conventional and MR arthrography.

Radiology. 1992 Jan;182(1):205-11.

Shea JD, McClain EJ.

Ulnar-nerve compression syndromes at and below the wrist.

J Bone Joint Surg Am. 1969 Sep;51(6):1095-103.

Smith DK.

Scapholunate interosseous ligament of the wrist: MR appearances in asymptomatic volunteers and arthrographically normal wrists.

Radiology. 1994 Jul;192(1):217-21.

Smith DK, Snearly WN.

Lunotriquetral interosseous ligament of the wrist: MR appearances in asymptomatic volunteers and arthrographically normal wrists.

Radiology. 1994 Apr;191(1):199-202.

Sofka CM, Potter HG.

Magnetic resonance imaging of the wrist.

Semin Musculoskelet Radiol. 2001 Sep;5(3):217-26.

Sowa DT, Holder LE, Patt PG, Weiland AJ.

Application of magnetic resonance imaging to ischemic necrosis of the lunate.

J Hand Surg [Am]. 1989 Nov;14(6):1008-16.

Stäbler A, Heuck A, Reiser M.

Imaging of the hand: degeneration, impingement and overuse.

Eur J Radiol. 1997 Sep;25(2):118-28.

Stäbler A, Spieker A, Bonel H, Schrank C, Glaser C, Petsch R, Putz R, Reiser M.

Magnetic resonance imaging of the wrist--comparison of high resolution pulse sequences and different fat signal suppression techniques in cadavers

Rofo Fortschr Geb Rontgenstr Neuen Bildgeb Verfahr. 2000 Feb;172(2):168-74.

Stäbler A, Vahlensiek M.

Handgelenk

In *MRT des Bewegungsapparat, Vahlensiek M, Reiser M, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 2 vollst. überarb. u. erw. Auflage, 2002*

Steinbach LS, Smith DK.

MRI of the wrist.

Clin Imaging. 2000 Sep-Oct;24(5):298-322.

Steiner E, Steinbach LS, Schnarkowski P, Tirman PF, Genant HK.

Ganglia and cysts around joints.

Radiol Clin North Am. 1996 Mar;34(2):395-425

Taleisnik J.

The ligaments of the wrist.

J Hand Surg [Am]. 1976 Sep;1(2):110-8.

Tanaka H, Araki Y, Yamamoto H, Yamamoto T, Tsukaguchi I.

Intraosseous ganglion.

Skeletal Radiol. 1995 Feb;24(2):155-7.

Taylor AR.

Ulnar nerve compression at the wrist in rheumatoid arthritis. Report of a case.

J Bone Joint Surg Br. 1974 Feb;56(1):142-3.

Timins ME.

Muscular anatomic variants of the wrist and hand: findings on MR imaging.

AJR Am J Roentgenol. 1999 May;172(5):1397-401.

Tomaino MM.

Ulnar impaction syndrome in the ulnar negative and neutral wrist. Diagnosis and pathoanatomy.

J Hand Surg [Br]. 1998 Dec;23(6):754-7.

Totterman SM, Miller RJ.

Scapholunate ligament: normal MR appearance on three-dimensional gradient-recalled-echo images.

Radiology. 1996 Jul;200(1):237-41.

Totterman SM, Miller RJ, McCance SE, Meyers SP.

Lesions of the triangular fibrocartilage complex: MR findings with a three-dimensional gradient-recalled-echo sequence.

Radiology. 1996 Apr;199(1):227-32.

Trumble TE, Irving J.

Histologic and magnetic resonance imaging correlations in Kienbock's disease.

J Hand Surg [Am]. 1990 Nov;15(6):879-84.

Van Gelderen W, Gale RS, Steward AH.

Short tau inversion recovery magnetic resonance imaging in occult scaphoid injuries: effect on management.

Australas Radiol. 1998 Feb;42(1):20-4.

Weinberg EP, Hollenberg GM, Adams MJ, Tan RK, Lechner MJ.

High-resolution outpatient imaging of the wrist.

Semin Musculoskelet Radiol. 2001 Sep;5(3):227-34.

White WL, Hauna DC.

Troublesome lipomata of the upper extremity.

J Bone Joint Surg 44A: 1353, 1962

Wilner D

Radiology of bone tumors and allied disorders.

Saunders, Philadelphia, 1982

Wright SM, Wald LL.

Theory and application of array coils in MR spectroscopy.

NMR Biomed. 1997 Dec;10(8):394-410.

Zeiss J, Jakab E.

MR demonstration of an anomalous muscle in a patient with coexistent carpal and ulnar tunnel syndrome. Case report and literature summary.

Clin Imaging. 1995 Apr-Jun;19(2):102-5.

Zeiss J, Jakab E, Khimji T, Imbriglia J.

The ulnar tunnel at the wrist (Guyon's canal): normal MR anatomy and variants.

AJR Am J Roentgenol. 1992 May;158(5):1081-5.

Zlatkin MB, Chao PC, Osterman AL, Schnall MD, Dalinka MK, Kressel HY.

Chronic wrist pain: evaluation with high-resolution MR imaging.

Radiology. 1989 Dec;173(3):723-9.

Proband 1			Proband 2			Proband 3			Präp.1			Präp.2			Präp.3		
S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE
Spong.	Spong.	Spong.															
HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.															
1285,7	2269,8	2242,9	1346,3	2599,1	2106,1	1261,7	2075,5	2418,4	1458,8	1935,6	1851,7	978,7	1383,8	2197,7	1365,4	1645,3	2261,1
1345,9	1808,5	2269,7	1180,0	2545,6	2547,3	1302,2	1864,9	2500,1	1297,7	1511,6	1571,8	1478,8	1463,0	2273,8	1221,8	1292,9	2052,5
1329,2	1632,2	2212,5	1140,3	2676,6	2364,0	1034,8	2211,5	2233,7	1150,4	1559,7	1561,7	1428,5	1295,4	2100,5	1195,9	1290,5	1742,6
1023,5	1455,7	2025,9	1183,7	2851,4	2285,1	1344,0	1674,2	2248,2	804,5	1719,2	1734,9	1430,6	1360,8	1969,7	887,4	1363,9	1990,0
934,4	1877,3	2065,2	1209,6	2399,3	2443,2	1134,5	1849,7	2180,0	1354,4	1351,6	1627,6	1426,6	1338,7	1954,0	1410,3	1551,2	2088,4
1289,3	2033,1	1973,0	1372,4	2310,5	2573,0	1154,3	1690,0	2180,8	1385,1	1730,2	1714,7	1345,8	1535,5	1793,8	1265,8	1396,5	2126,4
1188,5	1597,3	2130,8	1239,7	2812,2	2343,0	1271,5	1650,5	2108,2	1593,0	1717,5	1649,3	966,7	1307,5	2068,3	1266,7	1203,6	1732,8
1328,5	1839,0	1873,2	1302,4	2761,0	2495,5	1341,2	1561,1	2105,2	1417,3	1879,0	1637,1	1098,6	1446,2	1860,4	1144,2	1324,8	1683,9
MW	MW	MW															
1215,6	1814,1	2099,2	1246,8	2619,5	2394,7	1230,5	1822,2	2246,8	1307,7	1675,6	1668,6	1269,3	1391,4	2027,3	1219,7	1383,6	1959,7
STABW	STABW	STABW															
155,7	258,8	139,9	84,5	194,2	154,2	111,0	225,3	142,4	239,8	193,1	95,5	217,5	83,6	163,8	159,7	146,3	213,6
S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE
Kortik.	Kortik.	Kortik.															
HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.															
231,0	370,8	684,4	264,8	428,4	522,2	394,4	416,8	321,4	321,0	589,7	348,4	226,8	387,7	650,2	345,4	299,6	426,1
305,0	326,2	604,5	261,2	492,6	661,6	314,0	397,6	488,2	344,8	549,1	428,0	385,4	309,2	634,8	304,5	275,1	561,7
305,4	275,4	554,0	160,0	527,4	615,4	313,2	388,8	437,0	321,1	481,0	473,6	373,0	345,7	717,4	322,3	231,9	513,4
220,4	309,4	461,8	248,8	477,2	574,0	386,8	576,4	398,0	299,6	536,0	373,6	369,0	336,4	646,6	386,6	289,6	491,8
287,0	307,5	485,9	218,2	488,0	565,4	397,1	484,6	439,8	265,6	459,6	425,0	342,3	316,3	621,4	303,5	356,6	441,8
269,0	313,8	540,8	173,0	382,0	622,2	333,4	417,4	518,0	307,4	428,8	297,3	313,5	308,8	611,3	233,4	378,5	512,0
149,4	342,6	658,1	148,0	433,0	611,2	324,5	395,4	419,9	365,8	527,0	494,7	337,4	306,4	688,4	342,3	300,6	511,9
191,0	416,2	626,1	148,6	416,0	580,6	314,7	406,4	427,8	326,8	603,8	512,7	324,5	321,4	623,0	356,0	269,9	482,0
MW	MW	MW															
244,8	332,7	577,0	202,8	455,6	594,1	347,3	435,4	431,3	319,0	521,9	419,2	334,0	329,0	649,1	324,3	300,2	492,6
STABW	STABW	STABW															
56,6	43,7	79,9	51,1	48,2	42,5	38,4	64,4	58,8	30,0	61,5	75,1	50,0	27,5	36,4	45,9	47,3	43,2

Signalwerte für Spongiosa und Kortikalis aller Präparate, Probanden und Spulen

Proband 1			Proband 2			Proband 3			Präp.1			Präp.2			Präp.3		
S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE
Knorpel	Knorpel	Knorpel															
HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.															
333,5	623,4	558,0	316,2	773,2	653,4	327,6	468,8	575,2	596,8	704,1	724,8	594,4	724,6	753,5	552,8	480,3	750,0
346,7	601,9	559,5	340,8	751,5	553,4	387,4	507,1	585,0	622,8	633,0	725,0	589,8	671,6	754,5	499,6	547,7	646,1
327,4	577,4	599,5	307,6	698,0	534,3	393,0	434,8	512,9	621,2	651,2	710,5	564,8	658,4	671,4	492,4	568,8	706,8
317,2	549,2	632,4	407,8	656,4	674,9	334,4	471,4	529,6	616,4	660,1	704,6	610,0	669,6	635,6	559,9	593,6	698,8
308,6	565,9	568,0	387,6	744,3	587,4	401,4	463,5	564,3	593,8	744,4	695,9	594,2	598,7	678,4	519,8	586,0	638,0
335,0	522,0	612,4	388,4	731,8	627,6	343,8	472,1	551,8	625,0	771,6	685,0	611,2	596,6	649,6	587,4	608,5	643,0
337,8	577,1	568,5	311,4	710,1	643,8	413,4	496,2	525,2	643,0	707,9	752,2	593,0	683,6	611,4	522,0	611,6	634,2
345,2	621,0	634,5	387,8	692,1	567,8	372,6	528,8	457,9	604,8	669,8	754,4	589,2	668,2	588,3	562,6	593,3	720,5
MW	MW	MW															
331,4	579,7	591,6	356,0	719,7	605,3	371,7	480,3	537,7	615,5	692,8	719,1	593,3	658,9	667,8	537,1	573,7	679,7
STABW	STABW	STABW															
13,2	35,0	32,2	41,2	37,7	51,5	32,6	29,2	41,0		48,0	25,1	14,4	42,8	60,8	33,5	43,1	44,7
S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE	S. SE
Diskus	Diskus	Diskus															
HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.															
92,0	124,1	179,5	130,8	273,7	155,2	93,7	142,0	121,1	360,1	298,4	277,8	417,6	370,3	322,1	462,0	382,2	384,4
102,8	125,9	159,5	97,6	313,4	195,9	100,5	97,1	164,8	304,6	295,3	315,1	392,8	338,5	324,3	422,8	267,8	267,6
108,6	124,0	106,0	111,5	322,2	196,1	63,8	95,5	235,6	322,6	301,2	298,4	403,8	331,9	279,1	445,7	363,8	177,9
121,7	122,6	131,4	80,6	263,5	279,1	94,3	171,8	132,4	396,2	309,4	351,4	392,8	337,5	329,7	404,3	319,5	388,6
117,8	223,8	286,4	145,9	211,0	310,2	140,2	212,7	206,0	389,2	303,1	292,0	410,4	380,2	234,4	413,4	290,5	362,4
143,6	213,3	235,5	111,1	280,3	254,8	120,1	203,3	222,7	408,4	295,2	332,2	417,6	392,0	299,6	450,0	288,7	357,7
88,4	210,4	180,9	97,8	362,4	215,7	77,0	117,7	214,6	360,0	294,7	312,0	421,2	373,0	301,2	426,0	219,6	414,9
117,5	197,4	135,9	105,3	339,3	220,8	116,0	150,5	177,0	339,0	304,8	338,2	403,8	336,2	288,4	434,5	238,6	306,2
MW	MW	MW															
111,6	167,7	176,9	110,1	295,7	228,5	100,7	148,8	184,3	360,0	300,3	314,6	407,5	357,5	297,4	432,3	296,3	332,5
STABW	STABW	STABW															
17,8	47,1	59,2	20,4	48,3	50,2	24,4	44,9	42,5	36,7	5,3	24,9	11,1	23,8	31,1	19,5	56,8	78,3

Signalwerte für Knorpel und Diskus aller Präparate, Probanden und Spulen

Proband 1			Proband 2			Proband 3			Präp.1			Präp.2			Präp.3		
SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE	SD SE
Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.	Rausch.
HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.	HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.	HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.	HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.	HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.	HG-Sp(4)	HG-Sp(2)	KN-Sp.
14,9	26,8	62,1	14,4	39,1	66,8	14,4	21,6	62,3	14,5	22,0	50,7	15,7	19,8	40,6	14,2	20,3	40,1
15,2	26,3	57,1	15,0	30,7	65,1	15,7	24,0	61,1	15,6	19,2	48,0	15,5	21,1	43,7	15,4	18,9	46,2
15,5	25,6	60,4	15,6	37,6	59,0	15,9	22,0	55,8	14,2	19,4	43,8	16,0	23,1	41,9	17,3	18,3	42,1
15,3	23,5	60,2	14,0	30,7	66,5	15,2	26,6	54,8	14,7	17,7	44,4	14,9	21,4	41,6	14,9	19,1	51,9
13,7	35,5	51,8	15,0	33,8	62,0	14,5	27,2	53,4	13,0	13,5	45,5	15,7	19,8	41,1	15,2	20,2	61,1
15,1	23,7	54,7	15,6	44,5	60,8	14,2	23,3	60,7	15,1	23,2	56,1	15,1	21,2	40,7	14,2	28,9	64,1
16,2	23,7	59,7	14,0	36,3	57,4	17,1	21,8	62,1	14,0	16,4	57,3	16,2	21,2	43,1	14,6	21,3	42,4
15,8	24,3	59,3	14,5	39,7	69,0	15,7	20,8	59,0	15,9	20,3	51,1	15,6	19,1	44,3	14,9	21,6	40,7
MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW	MW
15,2	26,2	58,2	14,8	36,6	63,3	15,3	23,4	58,7	14,6	19,0	49,6	15,6	20,8	42,1	15,1	21,1	48,6
STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW	STABW
0,7	4,0	3,4	0,6	4,7	4,1	1,0	2,4	3,5	0,9	3,1	5,1	0,4	1,3	1,4	1,0	3,4	9,5

Standardabweichung des Hintergrundrauschens aller Präparate, Probanden und Spulen

9 Danksagung

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. med. A. Stähler, danke ich für die Bereitstellung des Themas und die gute Beratung während der Entstehung der Arbeit.

Meinem Betreuer, Herrn Dr. med. C. Glaser, Oberarzt am Institut für klinische Radiologie danke ich für sein persönliches Engagement, die große Geduld und die gute Betreuung bei der Einarbeitung und Durchführung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. med. Dr. h.c. M. Reiser, Direktor des Instituts für klinische Radiologie am Klinikum Großhadern der LMU München, danke ich für die hervorragenden Arbeitsmöglichkeiten.

Herrn Prof. Dr. med. R. Putz, Direktor der Anatomischen Anstalt der Universität München, danke ich für die Überlassung der Handgelenkspräparate und die Möglichkeit der technischen Aufbearbeitung.

Den Präparatoren der Anatomischen Anstalt möchte ich meinen besonderen Dank für die Auswahl der Handgelenkspräparate und deren Bearbeitung aussprechen.

Allen weiteren Mitarbeitern des Instituts für klinische Radiologie, sowie der Anatomischen Anstalt, die in irgendeiner Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, danke ich für die freundliche Unterstützung.

Meiner Familie und meiner Freundin Natalie danke ich für die große Geduld und fortwährende Motivation.

10 Lebenslauf

PERSÖNLICHE DATEN

- (7) Familienstand: ledig
- (8) Staatsangehörigkeit: deutsch
- (9) Geburtsdatum: 14/08/75
- (10) Geburtsort: München
- (11) Vater: Dr. med. Artur Mackel, Facharzt für Orthopädie
- (12) Mutter: Petra Mackel, Hausfrau

SCHULAUSBILDUNG UND ZIVILDIENTST

- 09/81 – 07/85 **Grundschule am Canisiusplatz, München**
- 09/85 – 07/86 **Nymphenburger Gymnasium, München**
- 09/86 – 07/94 **Erasmus-Grasser-Gymnasium, München**
- 07/94 Abschluss mit der Allgemeinen Hochschulreife
- 08/94 – 10/95 **Katholisches Familien und Altenpflegewerk, München**
 - Essen auf Rädern
 - Ambulanter Dienst für pflegebedürftige Menschen
 - Verwaltungstätigkeit

HOCHSCHULAUSBILDUNG

- 10/95 **Ludwig-Maximilians-Universität, München**
Studium der Humanmedizin
- 08/97 Ärztliche Vorprüfung
- 08/98 1. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
- 04/01 2. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung
- 05/02 3. Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

FAMULATUREN

- 03/98 **Orthopädische Klinik, Klinikum Großhadern, LMU München**
Orthopädische Chirurgie
- 09/98 **Orthopädische Praxis Dr. Mackel, München**
Konservative Orthopädie
- 10/98 **Chirurgische Klinik Dr. Rinecker, München**
Viszeralchirurgie
- 03/99 **Orthopädische Klinik, Klinikum Großhadern, LMU München**
Orthopädische Chirurgie

08/99	Institut für Radiologische Diagnostik, Klinikum Großhadern, LMU München MRT-Technik/Anwendung
10/98	Chirurgische Klinik Dr. Rinecker, München Unfallchirurgie

PRAKTISCHES JAHR

04/01 – 08/01	Städtisches Krankenhaus München Harlaching Viszeralchirurgie und Unfallchirurgie
08/01 – 12/01	Schulthess Klinik, A-Klinik der Universität Zürich, Schweiz Orthopädische Chirurgie
12/01 – 03/02	II. Medizinische Klinik, Klinikum Großhadern, LMU München Gastroenterologie und Endokrinologie

BERUFSTÄTIGKEIT

07/02 – 10/02	Praktischer Teil der Dissertation am Institut für klinische Radiologie des Klinikums Großhadern der LMU München
11/02 – 06/04	Arzt im Praktikum in der orthopädischen Abteilung des Rehabilitationskrankenhauses Ulm/ Orthopädische Klinik und Poliklinik mit Querschnittsgelähmtenzentrum der Universität Ulm
07/04 – 08/05	Assistenzarzt in der unfallchirurgischen Abteilung des Klinikums Kaufbeuren
09/05 – 06/06	Assistenzarzt Orthopädie/ Hand- und Fußchirurgie OCM-Klinik München
07/06	Assistenzarzt Orthozentrum München – Orthopädische Klinik - Wirbelsäulenzentrum