

Aus der Orthopädischen Klinik und Poliklinik
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Direktor: Prof. Dr.med. R. Krauspe

**Untersuchung zur Kinematik im Bereich
des Scapho-Trapezio-Trapezoidalgelenks
der menschlichen Hand bei Zirkumduktion
des Daumens**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der
Medizin

Der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf

vorgelegt von

Frank Eßers

2002

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

gez. Univ.-Prof. Dr. med. Dr. phil. Alfons Labisch, M.A.
Dekan

Referent: Priv.-Doz. Dr. Jantea
Korreferent: Prof. Dr. Fürst

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides Statt, das ich die vorliegende Doktorarbeit ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, das benutzte Schrifttum vollständig erwähnt habe, und daß die Doktorarbeit an keiner anderen Fakultät vorgelegt wurde.

Düsseldorf, den 28.01.2003

Widmung

Meiner Tochter Isabel Sophie

1	EINLEITUNG.....	7
1.1	ANATOMISCHE UND KINEMATISCHE GRUNDLAGEN.....	10
1.1.1	<i>Definition der radialen Karpussäule.....</i>	10
1.1.2	<i>Funktionelle Anatomie des Daumensattelgelenks (Carpometacarpal[CMC]-Gelenk 1).....</i>	11
1.1.3	<i>Funktionelle Anatomie des Scapho-Trapezio-Trapezoidal - (STT) Gelenkes.....</i>	12
1.1.4	<i>Experimentelle Verfahren zur Ermittlung der karpalen Kinematik.....</i>	13
2	FRAGESTELLUNG UND ZIEL DER ARBEIT.....	16
3	MATERIAL UND METHODEN.....	17
3.1	MATERIAL.....	17
3.2	METHODEN.....	19
3.2.1	<i>Grundlagen des biomechanischen Meßverfahrens.....</i>	19
3.2.2	<i>Versuchsapparatur.....</i>	26
3.2.3	<i>Anatomische Präparation der Versuchsobjekte.....</i>	27
3.2.4	<i>Experimenteller Ablauf.....</i>	28
3.2.5	<i>Darstellung der ermittelten Daten.....</i>	33
4	ERGEBNISSE.....	42
4.1	BEWEGUNGSUMFANG DES TRAPEZIUMS.....	42
4.1.1	<i>Intakte STT-Ligamente mit leichtem Muskelzug (n-ll).....</i>	43
4.1.2	<i>Intakte STT-Ligamente und starker Muskelzug (n-hl).....</i>	44
4.1.3	<i>Durchtrennte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (2-ll).....</i>	45
4.1.4	<i>Durchtrennte STT-Ligamente und starker Muskelzug (2-hl).....</i>	46
4.1.5	<i>Bewegungsumfänge des Trapezium in den Handgelenkpositionen.....</i>	46
4.2	BEWEGUNGSUMFANG DES SCAPHOIDS.....	52
4.2.1	<i>Intakte Ligamente mit leichtem Muskelzug (n-ll).....</i>	53
4.2.2	<i>Intakte Ligamente und starker Muskelzug (n-hl).....</i>	54
4.2.3	<i>Durchtrennte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (2-ll).....</i>	55
4.2.4	<i>Durchtrennte STT-Ligamente und starker Muskelzug (2-hl).....</i>	56
4.2.5	<i>Bewegungsumfänge des Scaphoid in den Handgelenkpositionen.....</i>	57
4.3	STELLUNG DES TRAPEZIUM IN RELATION ZUM SCAPHOID IN REPOSITION / OPPOSITION UND IN ADDUKTION / ABDUKTION DES DAUMENS.....	62
4.3.1	<i>Neutralposition des Handgelenks.....</i>	63
4.3.2	<i>Maximale Flexion des Handgelenks.....</i>	65
4.3.3	<i>Maximale Extension des Handgelenks.....</i>	67
4.3.4	<i>Maximale ulnare Deviation des Handgelenks.....</i>	69
4.3.5	<i>Maximale radiale Deviation des Handgelenks.....</i>	71
4.4	STELLUNG DES SCAPHOIDS IN RELATION ZUM RADIUS IN REPOSITION / OPPOSITION UND IN ADDUKTION / ABDUKTION DES DAUMENS.....	73
4.4.1	<i>Neutralposition des Handgelenks.....</i>	74
4.4.2	<i>Maximale Flexion des Handgelenks.....</i>	76
4.4.3	<i>Maximale Extension des Handgelenks.....</i>	78
4.4.4	<i>Maximale ulnare Deviation des Handgelenks.....</i>	80
4.4.5	<i>Maximale radiale Deviation des Handgelenks.....</i>	82
5	DISKUSSION.....	84
5.1	EINFÜHRUNG.....	84
5.2	KINEMATIK DES TRAPEZIUM BEI ZIRKUMDUKTION DES DAUMENS.....	86
5.2.1	<i>Einfluß der Handgelenkstellung auf die Kinematik des STT-Gelenks.....</i>	87
5.2.2	<i>Beeinflussung der Kinematik innerhalb des STT-Gelenks bei Muskelzug und intakten und durchtrennten STT-Ligamenten.....</i>	87
5.2.3	<i>Effekt einer Zirkumduktion des Daumens auf die Bewegung des Trapezium.....</i>	89
5.3	KINEMATIK DES SCAPHOID BEI ZIRKUMDUKTION DES DAUMENS.....	90
5.3.1	<i>Einfluß der Handgelenkstellung auf die Kinematik des RS-Gelenks.....</i>	90
5.3.2	<i>Beeinflussung der Kinematik innerhalb des RS-Gelenks bei Muskelzug und intakten und durchtrennten STT-Ligamenten.....</i>	91
5.3.3	<i>Effekt einer Zirkumduktion des Daumens auf die Bewegung des Scaphoid.....</i>	92

5.4	FAZIT: KINEMATIK IM BEREICH DES STT-GELENKS UND DES RADIALEN KARPUS BEI ZIRKUMDUKTION DES DAUMENS	92
6	ZUSAMMENFASSUNG	98
7	ANHANG	101
7.1	TABELLEN 1-18: BEWEGUNGSUMFANG DES TRAPEZIUM	101
7.2	TABELLEN 19-36: BEWEGUNGSUMFANG DES SCAPHOID	107
7.3	TABELLEN 37-43: TRAPEZIUM UND METAKARPALE 1	113
7.4	TABELLEN 44-50: SCAPHOID UND METAKARPALE 1	119
7.5	LISTE DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN	126
8	LITERATURVERZEICHNIS	128
9	CURRICULUM VITAE	136
10	DANKSAGUNG	137

1 Einleitung

Wissenschaftliche Untersuchungen zur Morphologie und Funktion des Handskeletts sind in der abendländischen Kultur ca. 2000 Jahre zurückzuverfolgen.

Daß der Karpus aus acht Knochen besteht, wußte man bereits im Altertum (Nigst 1990). Bereits in den Werken von Galen tritt der Begriff "karpos" (Taleisnik 1985) auf. Im ersten Jahrhundert n.Ch. soll Galen als erster die acht Handwurzelknochen, die in zwei queren Reihen zueinander im Karpus angeordnet sind, beschrieben haben. Anatomische Präparationen an der Affenhand, die wegen vieler phylogenetischer Ähnlichkeiten auch auf den Menschen übertragen wurden (Daremborg 1854), dienten Galens Erkenntnissen als Grundlage. Im 16.Jahrhundert beschrieb Vesalius in seinem Werk "De humani corporis fabrica" (1543) erneut die Karpalknochen, die zunächst nur durchnummeriert wurden, später, im 17.Jahrhundert wurden die Karpalknochen von Lyser mit Eigennamen benannt (Nigst 1990).

Bereits bei Galen finden sich Beschreibungen der Kapselbandstrukturen, wobei erstmals auch funktionelle Aspekte berücksichtigt wurden. Palmare Kapsel und Strecksehnen führen zu einer festen Führung der Handwurzel und verhindern eine Luxation des Karpus bei Handgelenksbewegungen. Taleisnik (1985) und Sennwald (1993) unternahmen den Versuch, die deskriptive Anatomie, die schon durch Weitbrecht (1742) eine exakte Beschreibung der karpalen Ligamente ermöglichte, mit funktionellen Gesichtspunkten zu verknüpfen, um hieraus Aussagen und klinische Aspekte bei Instabilitäten ableiten zu können.

Eingeteilt werden die Bandverbindungen des Karpus in zwei Gruppen:

- *extrinsische* Ligamente verbinden die Handwurzelknochen mit dem Unterarm
- *intrinsische* Ligamente verbinden die Handwurzelknochen untereinander und liegen in der Regel in der Tiefe unter den extrinsischen Ligamenten.

Ausgehend von der zunächst rein deskriptiv - statischen Beschreibung wurde in den 80er Jahren damit begonnen, sich vermehrt mit der funktionellen Beschreibung der Ligamentstrukturen im Rahmen von Handgelenksbewegungen zu beschäftigen (Kapandji 1984).

Die extrinsischen Ligamente sind die funktionell wichtigsten Stabilisatoren des Handgelenks. Sie limitieren extreme Bewegungsausschläge des Karpus. Neben Verletzungen der extrinsischen Ligamente gibt es eine Reihe von intrinsischen Bandstrukturen, die bei Handverletzungen oder anderen pathologischen Veränderungen betroffen sind. So gab es zur häufig diagnostizierten Verletzung des scapho-lunaren Bandes zahlreiche Arbeiten die Morphologie (Berger 1982) und Funktion (Mayfield 1980, Koebke 1983, Ruby 1988) betreffend.

Das Handgelenk ermöglicht Bewegungen der Hand in Extension-Flexion und in radiale-ulnare Deviation. Unter der Zirkumduktionsbewegung der Hand versteht man eine Bewegung, die sich aus einem Bewegungsbogen der Hand von Extension über radiale Deviation über Flexion in ulnare Deviation und zurück in Extension zusammensetzt, wobei eine durch den Mittelfinger gezogene Achse einen asymmetrischen Kegel bildet, dessen Achse sich um ca. 15 Grad ulnar der verlängerten Unterarmachse befindet. Dies zeigt, daß das Handgelenk kein einfaches Scharniergelenk ist; die variable Form des Karpus in den verschiedenen Bewegungspositionen ermöglicht eine komplexe Bewegung, die kombiniert mit der Unterarmumwendbewegung zum enormen Bewegungsradius der Hand führt (Kauer 1974, Saraffian 1977, Taleisnik 1985, Sennwald 1987).

Die Flexions-Extensionsbewegung der Hand erfolgt zu etwa 60% im radio-karpalen Gelenk. Die Radiusgelenkfläche ist gegenüber der Unterarmachse um durchschnittlich ca. 10 Grad nach palmar und in radio-ulnarer Richtung um ca. 20 Grad geneigt (Herzog 1963). Im interkarpalen Gelenk finden ca. 40% der Flexions-Extensionsbewegung statt. Den proximalen Gelenkanteil bilden Scaphoid, Lunatum und Triquetrum, den distalen Trapezium, Trapezoid, Kapitatium und Hamatum. Dabei handelt es sich um eine synergistische Bewegung aller miteinander artikulierenden Karpalknochen (Youm 1978, Kauer 1980, Sennwald 1993).

Bei ulnarer-radialer Deviationsbewegung im Handgelenk findet keine synergistische Bewegung des Karpus statt. Bei radialer Deviation kommt es zu einer Flexion des Scaphoids, wobei das Lunatum durch ligamentäre Kopplung gleichgerichtet mitbewegt wird. Das Triquetrum wird extendiert. Bei ulnarer Deviation kommt es zu einer Extension (Aufrichtung) des Scaphoid, das dadurch in der Frontalprojektion länger erscheint. Das Triquetrum bewegt sich nach palmar (Flexion) und ermöglicht dadurch die Bewegung des Metakarpus nach ulnar. Es findet eine Relativbewegung des Scaphoids gegenüber dem Radius sowie gegenüber dem Trapezium statt. Die Knochen der distalen karpalen Reihe verhalten sich synergistisch (Berger 1982, Lange de 1987).

Die Anordnung von Bandstrukturen im Karpus, die für die synergistische Bewegung im interkarpalen Gelenk bei Flexions - Extensionsbewegung der Hand verantwortlich sind, führte bei funktioneller Betrachtung des Karpus zum Konzept zweier querer karpaler Knochenreihen (Kuhlmann 1985). Die variable Geometrie des Karpus bei ulnarer und radialer Deviation der Hand kann damit aber nicht ausreichend erklärt werden.

Um die variable funktionelle Geometrie bei ulnarer und radialer Deviation zu erklären, wurde in Anlehnung an die Ansatzstellen der Muskulatur im Bereich des Karpus und der Hand, unter Berücksichtigung der axialen Anordnung und Beziehung der Gelenkflächen, ein längs aufgebauter Karpus beschrieben (Taleisnik 1985, Kuhlmann 1985). Scaphoid, Trapezium

und Trapezoid wurden als radiale, Lunatum und Capitatium als zentrale und Triquetrum und Hamatum als ulnare Karpussäule zusammengefaßt.

Auf der radialen Seite der Hand befindet sich mit dem Daumen ein Greifinstrument, das in dieser Art einzigartig ist. Der den vier Langfingern gegenübergestellte Daumen, ermöglicht durch seine Fähigkeit zur Opposition der menschlichen Hand im Vergleich z.B. mit der Affenhand einen enormen Gewinn an Einsatzmöglichkeiten. So ist ein Teil der größeren Hirnmasse beim Menschen im Vergleich mit der Masse eines Affenhirns durch die größere Repräsentation des Daumens im senso-motorischen Kortex verursacht.

Die Rolle des Daumenstrahls für die volle Funktion der menschlichen Hand zeigt sich bei traumatischen und degenerativen Läsionen der daumenseitigen Hand. So führen Verletzungen, wie z.B. die Scaphoidfraktur mit der Gefahr der Pseudarthrose, die scapholunäre Dissoziation, karpometakarpale Verletzungen des Daumenstrahls und Erkrankungen aus dem rheumatischen Formenkreis zu degenerativen Schädigungen der radialen Handseite und damit zu Funktionsverlusten der gesamten Hand. So kommen degenerative Veränderungen in der Hand v.a. im Bereich der radialen Karpussäule vor. Hierbei startet die Degeneration oft im Carpometacarpalgelenk(CMC)-Gelenk (Rhizarthrose) (s. Kap.1.1.2), um sekundär auch die proximale Gelenkfläche des Trapezium im Scapho-Trapezio-Trapezoidal(STT)-Gelenk (s.Kap.1.1.3) zu betreffen. Zuletzt kann hieraus eine Arthrose des Radio-Scaphoidal (RS-) Gelenks resultieren, was in der Gesamtheit einen erheblichen Funktionsverlust der Hand und des Daumens verursacht. Die Entstehung dieser Arthrosen wird einer Schädigung karpaler Bandstrukturen akuter oder chronischer Natur zugeschrieben. Die dadurch mögliche karpale ligamentäre Instabilität führt über repetitive Subluxationsereignisse zu einer veränderten Kraftübertragung und letztlich, auch bei geringer Kraffteinwirkung, zu einer Schädigung des Gelenkknorpels. Diese Problematik führte zu einer ausgedehnten wissenschaftlichen Tätigkeit in diesem Gebiet.

Zur experimentellen Untersuchung der Kinematik des Karpus sind in der Vergangenheit verschiedene Methoden verwendet worden. So wurde die Röntgenkinematografie, die mittels biplanarer Röntgenbilder und implantierten Metallmarkern eine Berechnung der karpalen Kinematik zuläßt, häufig angewendet. Als neueres Verfahren werden z.B. sogenannte „magnetic-tracking-devices“ verwendet. Diese ermöglichen mittels Befestigung von Sensoren an den zu untersuchenden Knochen eine kontinuierliche Berechnung der kinematischen Parameter. Dies geschieht durch Bewegung der Knochen respektive der Sensoren in einem durch eine Magnetfeldquelle erzeugten Magnetfeld. Die Anwendbarkeit dieses Meßsystems zur Untersuchung der karpalen Kinematik wurde erstmals durch Wissenschaftler des Orthopedics Biomechanics Laboratory der Mayo Clinic, Minnesota, USA erprobt und beschrieben (An 1988, Jantea 1994).

Eine experimentelle Untersuchung, welche Bedeutung dem STT-Bandkomplex für die funktionell-kinematische Führung des Scaphoids während der Zirkumduktion des Daumens zukommt, ist bisher in der Literatur nicht erwähnt.

Die Experimente in dieser Arbeit sollten, unter Verwendung eines Magnetfeldmeßsystems (ISOTRACK-System) untersuchen, ob es bei Zirkumduktion des Daumens zu einer Veränderung der Kinematik des STT-Gelenks bei normalen und pathologischen Verhältnissen sowie unterschiedlichen Handgelenkpositionen kommt.

1.1 Anatomische und Kinematische Grundlagen

1.1.1 Definition der radialen Karpussäule

Zur Erklärung der benötigten Stabilität, Kraftübertragung und der physiologisch erforderlichen Beweglichkeit zwischen den einzelnen Handwurzelknochen wurden verschiedene Konzepte entwickelt.

Das Säulenkonzept wurde 1911 von Navarro nicht nur unter deskriptiven sondern auch unter funktionellen Aspekten beschrieben (Taleisnik 1985). Hierbei ist die radiale Karpussäule, bestehend aus Scaphoid, Trapezium und Trapezoid für eine Mobilitätsfunktion bei ulnarer und radialer Deviation des Handgelenks zuständig. Die zentrale Karpussäule bestehend aus Lunatum und Kapitatum hingegen ist im wesentlichen bei Flexion-Extension beteiligt. Die ulnare Karpussäule übt insbesondere bei Kombinationsbewegungen eine Kontrollfunktion auf den Karpus aus. Als Indiz für die funktionelle Einheit der radialen Karpussäule gilt z.B. die klinische Beobachtung von Trapezium-Trapezoid Synostosen (Weinzeig 1997). In der Kraftübertragung am Handgelenk übernimmt die radiale Karpussäule eine zentrale Rolle. Darauf konnte durch Interposition von drucksensitiven Filmen zwischen Scaphoid-Radius und Lunatum-Radius geschlossen werden, da bei der Auswertung eine deutlich größere Kraftübertragung zwischen Scaphoid und Radius als zwischen Lunatum und Radius gemessen wurde. (Palmer 1984). Dies führt zu einer Veränderung der subchondralen Knochendichte, welche beim Scaphoid größer als beim Lunatum ist (Koebke 1989).

Das Scaphoid ist das Schlüsselement der radialen Karpussäule. Es besitzt fünf mit den Nachbarknochen artikulierende Gelenkflächen. Die Tatsache, daß die distale Gelenkfläche horizontal ausgerichtet ist und ausschließlich Kontakt zu Trapezium und Trapezoid hat, wird als Argument für das Säulenkonzept angeführt. Der proximale Scaphoidpol steht seitlich mit den Karpalknochen der zentralen Säule in Verbindung.

Das STT-Gelenk (Scaphoid-Trapezio-Trapezoidal-Gelenk, Kap.1.1.3) ist Teil des Interkarpalgelenks. Das CMC-Gelenk 1 (Carpometacarpalgelenk 1, das Daumensattelgelenk, Kap.1.1.2), und das CMC-Gelenk 2 am Zeigefinger setzen die radiale Karpussäule nach distal fort.

Das Konzept der „radialen Karpussäule“ wird außerdem mit topographischen Betrachtungen der Knochenstruktur, Studien zur subchondralen Dichteverteilung, und klinische Beobachtungen bei Bandinstabilitäten und posttraumatischen Schäden begründet (Linscheid 1972, Taleisnik 1985, Koebke 1989).

Das Trapezium besitzt innerhalb des STT-Gelenks die dominante Kontaktfläche zum Scaphoid (Kapandji 1984). Eine relevante Relativbewegung zwischen Trapezium und Trapezoideum findet nicht statt, so daß beide Knochen als Einheit betrachtet werden können (Berger 1982, Lange de 1987).

Die funktionell wichtigsten Gelenke der menschlichen Hand sind in der radialen Karpussäule lokalisiert:

- Die Opposition des Daumens als wesentliche Funktion der menschlichen Hand beim Greifakt wird durch das Daumensattelgelenk (CMC-Gelenk 1) ermöglicht.
- Die variable Geometrie / Formveränderung des Karpus innerhalb der radialen Karpussäule und dem Radio-Scaphoidalgelenk ist Grundlage für die Zirkumduktionsbewegung der Hand.

1.1.2 Funktionelle Anatomie des Daumensattelgelenks (Carpometacarpal[CMC]-Gelenk 1)

Die Oppositionsfähigkeit des Daumens ist ein Charakteristikum der menschlichen Hand und wird durch die Form und Anordnung des Daumensattelgelenks ermöglicht. In diesem Gelenk sind Bewegungen um zwei Achsen möglich, die sich nicht in einer Ebene schneiden (Kapandji 1984). So gibt es eine volare-dorsale Achse, die eine Abduktion und Adduktion des Daumens, teilweise auch als radiale-ulnare Deviation bezeichnet, zuläßt. Die zweite Achse wird als Flexions-Extensions, Reposition-Oppositions und Antepulsion-Retropulsionsachse bezeichnet und verläuft radio-ulnar (Kuczynski 1974, Cooney 1981, Kapandji 1984, Zancolli 1987) (Abb. 3.2.10). Die Kombination aus maximaler Reposition über maximale Abduktion in maximale Opposition über maximale Adduktion wieder zurück in Reposition beschreibt die Zirkumduktionsbewegung des Daumens (Debrunner 1987). Zusätzlich zu den beiden Hauptachsen kommt es während der Zirkumduktionsbewegung zu einer kurzfristigen axialen Rotation im Sinne einer Pronation, ausgelöst durch den M.opponens pollicis (Koebke 1983).

Die Muskulatur des Daumens setzt sich aus *extrinsischen*, das Handgelenk überbrückende, und *intrinsischen*, innerhalb der Hand liegende Muskeln zusammen:

- *extrinsische* Muskeln: Flexor pollicis longus, Abductor pollicis longus, Extensor pollicis brevis, Extensor pollicis longus

- *intrinsische* Muskeln: Flexor pollicis brevis, Opponens pollicis, Abductor pollicis brevis, Adductor pollicis brevis, Interosseus palmaris

Diese Muskeln ermöglichen den Bewegungsradius des Daumens, und dienen auch dazu den labilen Gleichgewichtszustand des Metakarpale 1 gegenüber dem Trapezium zu neutralisieren.

Stabilisiert wird das Gelenk außerdem durch ein Kapselbandsystem, das von Pieron 1973 detailliert beschrieben wurde. Es gibt vier Haupt-Ligamente:

- das anteriore schräge Band (anterior oblique ligament) AOL
- das dorsale Band (dorso-radial ligament) DRL
- das posteriore schräge Band (posterior oblique ligament) POL
- das intermetakarpale Band (intermetacarpal ligament) IML

Es besteht ein funktioneller Synergismus des DRL und IML, die bei Abduktion stabilisierend wirken. Zwischen dem POL und AOL besteht ein funktioneller Antagonismus. Bei Pronation spannt sich das POL, bei Supination das AOL an (Caffiniere de la 1970).

1.1.3 Funktionelle Anatomie des Scapho-Trapezio-Trapezoidal - (STT) Gelenks

Die genaueste Beschreibung der STT-Ligamente findet man bei Guyot (1981) und Jantea (1992), die sich mit der exakten Beschreibung des scapho-trapezio-trapezoidalen Bandsystems auseinandergesetzt haben.

Das STT-Gelenk wird durch eine Vielzahl von Band- Kapselband- und muskulären Zügelungen stabilisiert:

- Das **palmare interkarpale Ligament** verbindet den distalen Pol des Scaphoid in Richtung der ulnaren Seite des Kapitatums. Ein v-förmiger zweiter Bandzügel überspannt den palmaren Teil des STT-Gelenks.
- Das **scapho-trapeziale Ligament** verläuft radial vom palmaren interkarpalen Ligament und liegt medial vom distalen Scaphoidpol unter der Flexor-Carpi-Radialis-(FCR)-Sehne und verläuft streng longitudinal.
- Das **radiale Kollateralligament** ganz radial liegend verläuft vom distalen Scaphoidpol und setzt basal und radial am Trapezium an. In Richtung Handgelenk verläuft es proximal aufgefächert bis zum Processus styloideus radii.
- Dem STT-Gelenk liegt direkt die Sehne des **FCR** auf und wird von der Sehne des Flexor-Pollicis-Longus (**FPL**) überkreuzt. Eine Relativbewegung in Höhe des STT-Gelenks wird durch diese Muskelgruppe im Sinne einer Flexions- und Abduktionsbewegung des Scaphoids gegenüber dem Trapezium erzeugt (Kapandji 1984).

- Ein **extrinsisches radiokarpales Ligament** und das sogenannte **radio-scapho-lunäre Band** sind nicht als eigentliche STT-Ligamente zu bezeichnen sollten aber wegen der Nähe zum Scaphoid und als Teil des palmaren Bandsystems berücksichtigt werden.
- Da die extrinsischen Muskeln distal des Scaphoids und STT-Gelenks inserieren, haben diese eine indirekte Wirkung auf das Scaphoid und damit auf das STT-Gelenk.
- Kurze horizontal verlaufende Ligamente verbinden das Trapezium mit dem Trapezoideum.
- Dorsal verläuft mittig an der crista dorsalis des Scaphoids ein vertikal ausgerichtetes zum Trapezium ziehendes Band.

Funktionell gesehen lassen sich die Bänder des Scaphoids in ein proximales intrinsisches System, das durch die Koppelung an die zentrale Säule von Bedeutung ist (Linscheid 1972, Mayfield 1976, Taleisnik 1976, Berger 1982), und ein distales intrinsisches System, das das Scaphoid innerhalb der radialen Säule mit dem Trapezium koppelt (Drewniany 1985), einteilen.

Die Bedeutung des distalen Bandsystems wurde anhand von klinischen Beobachtungen bei traumatischer Luxation des Trapeziums im STT-Gelenk erkannt (Kuur 1986, Sherlock 1987, Hankin 1988). Das physiologische Gleiten des Trapezium nach dorsal auf dem distalen Scaphoidpol bei axialer Kraft wird durch die palmaren STT-Ligamente limitiert (Kauer 1980, Drewniany 1985, Kuhlmann 1985). Die palmaren STT-Ligamente begrenzen außerdem eine vermehrte Flexion des Scaphoids, indem das Scaphoid bei Handgelenkbewegungen durch einen Mitnehmereffekt passiv aufgerichtet, bzw. an einer vermehrten Beugung gehindert wird (Kuhlmann 1985).

Anatomische Studien führten zu einer Typisierung von zwei verschiedenen angeordneten funktionellen Bandsystemen des STT- und RS-Gelenks, die folgenden Funktionen gerecht werden (Jantea 1994) :

- Als transversal / horizontal ausgerichtetes Bandsystem mit **statisch-stabiler Funktion**, wobei die zirkulär angeordneten Bänder einen axialen Kraftvektor zügeln, der subluxierend im STT- und RS-Gelenk wirken würde.
- Als vertikal ausgerichtetes Bandsystem mit **dynamischer Funktion**, die eine vermehrte Mobilität im Bereich der radialen Karpussäule bei offener kreuzförmiger Anordnung der Ligamente erwarten läßt.

1.1.4 Experimentelle Verfahren zur Ermittlung der karpalen Kinematik

Die Untersuchungen der karpalen Kinematik begannen mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen, mit der sich eine Möglichkeit bot, ohne anatomische Präparation am Nativpräparat Bewegungen im Skelett darzustellen. Anfang des 20. Jahrhunderts fanden im deutschsprachigen Raum durch Fick (1901) derartige Versuche erstmals statt.

Die Röntgenkinematographie ist das Verfahren mit dem auch heute noch die meisten namhaften biomechanischen Laboratorien bei kinematischen Experimenten arbeiten (Linscheid 1972). Die Grundlagen der Stereokinematographie unter Verwendung von Röntgenstrahlen wurden 1974 durch Selvik beschrieben. Neben den technischen Voraussetzungen entwickelte er mathematische Berechnungen, um die exakte mathematische Beschreibung der Bewegung eines Körpers im Raum anhand von Rotationsmatrix und Translationsmatrix zu ermöglichen. Insbesondere Forschergruppen an den biomechanischen Laboratorien der Mayo Clinic, Rochester, USA und Universität Nijmegen, Niederlande nutzen diese Untersuchungstechnik intensiv für kinematische Untersuchungen am Handgelenk sowie für Untersuchungen an anderen Skelettabschnitten (Selvik 1974, Lange de 1987, Ruby 1987, Smith 1989).

Für kinematische Untersuchungen am Bewegungsapparat war die Röntgenstereokinematografie lange der Einzige und ist bis heute ein Standard bei zahlreichen experimentellen Fragestellungen geblieben. Bei der Röntgenstereokinematografie ist die Implantation von mindestens vier Metallmarkern in jedem Knochen notwendig, so daß diese Untersuchungsmethode rein experimentell zu nutzen ist. Der Bewegungszyklus muß in definierten Abständen für Röntgenaufnahmen unterbrochen werden. Deshalb ist mit dieser Methode letztlich nur eine Zusammenfassung von vielen statischen Einzelbildern zur Darstellung eines Bewegungsablaufes möglich. Die Position der Metallmarker zwischen den Meßpositionen, die je nach Studiendesign in unterschiedlichen Abständen erhoben wird, läßt sich zur Darstellung einer Bewegungsmatrix mathematisch interpolieren. Die zunächst biplanare Bestimmung der Position der Metallmarker auf einem Digitalisierbrett, wird mit einem Computerprogramm in ein räumliches Referenzsystem, z.B. in Bezug auf einen fixierten Knochen, z.B. dem Radius eingefügt. Der zunächst große Rechenaufwand führte in der Anfangszeit zu einer Limitierung der Anzahl der verwendeten Präparate. Voraussichtlich wird diese Methode von sog. dynamischen Meßmethoden wie LED- (Light-emitting-diodes) Kinematografie, Ultraschalltopometrie, Magnetfeldmeßinstrumenten wie das hier verwendete ISOTRACK-system und seit neustem auch durch die kinematische Kernspintomografie abgelöst werden. Ziel der neuen und weiterentwickelten Methoden wird es sein auch in vivo Untersuchungen durchführen zu können.

Um Bewegungen eines bewegten Körpers auch ohne Umrechnung über viele einzelne statische biplanare Röntgenbilder messen und darstellen zu können, verwendet man in der Biomechanik eine Meßmethode, die aus der Navigations- und Radartechnologie übernommen wurde. Hierbei besteht die Meßvorrichtung aus einer zentralen Systemeinheit und daran angeschlossen eine Magnetfeldquelle, die ein niederfrequentes elektromagnetisches Feld erzeugt. Ein oder mehrere Sensoren messen die Position innerhalb des Magnetfeldes. Die zur Umrechnung der Bewegungsdaten von Sensor auf die Kinematik eines untersuchten Knochens notwendigen Grundlagen entstammen der Festkörpermechanik und stellen eine Modifizierung der schon bei anderen Meßverfahren

verwendeten mathematischen Grundlagen dar. Eine freie Bewegung eines solchen Festkörpers findet als beliebige Translation entlang aller drei Raumachsen x -, y - und z - und Rotation um diese Achsen statt und wird als Bewegung in sechs Freiheitsgraden bezeichnet.

Die Berechnung der Relativbewegung von sich frei in sechs Freiheitsgraden bewegten Knochen, wie bei Scaphoid und Trapezium, ist bei Positionierung von jeweils einem Sensor in jedem Knochen möglich. Dabei kann durch mathematische Kalkulationen die relative Bewegung des Knochens zu einem beliebigen Bezugssystem, das z.B. im benachbarten Knochen liegen kann, bestimmt werden. Da ein Magnetfeld durch metallische Gegenstände innerhalb oder in der Nähe desselben gestört wird, und die Datenerhebung nur bis zu einer bestimmten Maximalgeschwindigkeit erfolgt, bestehen auch für diese Methode Limitierungen, die bei einem experimentellen Design zu berücksichtigen sind.

Die Anwendbarkeit des ISOTRACK-Systems unter kinematischen Aspekten und Einbindung des Systems in experimentelle Abläufe wurde erstmalig durch Wissenschaftler der Mayoklinik, Minnesota, USA überprüft (An 1988). Nach experimentellen Testreihen und Vorversuchen wurde die ISOTRACK-Technologie erstmalig Anfang der 90er Jahre zur Messung der Kinematik am Handgelenk eingesetzt (Jantea 1994).

2 Fragestellung und Ziel der Arbeit

Die besondere Fähigkeit der menschlichen Hand, die Oppositionsfähigkeit des ersten Mittelhandknochens und damit des Daumens, spielt sich im Daumensattelgelenk ab. Die Bedeutung des funktionellen Säulenkonzepts des Handgelenks bei der Zirkumduktion des ersten Metakarpale im Daumensattelgelenk sollte mit dieser Arbeit untersucht werden. In dieser experimentellen Arbeit wurde der Effekt, den die Daumenzirkumduktion, bei physiologischen und pathologischen Bedingungen, über das Scapho-Trapezio-Trapezoidale-(STT)-Gelenk, auf das Scapoid ausübt, mit Hilfe eines Magnetfeldmeßverfahrens untersucht.

Folgende Fragen sollten experimentell beantwortet werden:

1. Läßt sich eine Bewegung in der radialen Karpussäule bei Zirkumduktion des Daumens feststellen ?
2. Wie verändert sich die Kinematik von Trapezium und Scaphoid unter Belastung ?
3. Wie verändert sich die Kinematik der untersuchten Karpalknochen (Trapezium, Scaphoid) nach einer experimentellen Bandinstabilität (Dissoziation des STT-Gelenks)?
4. Wie verändert sich der Bewegungsumfang von Trapezium und Scaphoid in Abhängigkeit der Stellung des Handgelenks?

3 Material und Methoden

Die kinematischen Experimente betrafen das Gelenk zwischen dem Trapezium und dem Metakarpale 1 (Daumensattelgelenk) und das Gelenk zwischen dem Scaphoid, Trapezium und dem Trapezoideum (STT-Gelenk), sowie den das Gelenk stabilisierenden Kapsel-Bandkomplex beim normalen Handgelenk und bei simulierten Bandläsionen im STT-Gelenk.

Der Einfluß, der von Muskelzug, Handgelenkstellung und vom Scapho-Trapezio-Trapezoidalen (STT-) Bandkomplex auf die Kinematik im Bereich des STT-Gelenks bei Zirkumduktion des Daumens ausgeht wurde in dieser Arbeit untersucht.

Die in dieser Arbeit dargestellten Experimente wurden an der Mayo Clinic, Rochester, USA im Orthopedic Biomechanics Laboratory durchgeführt.

3.1 Material

Untersucht wurden 14 nicht fixierte humane Handpräparate, die in einem Zeitraum bis 24 Stunden post mortem abgenommen wurden. Die Präparate wurden bei -20° Celsius tiefgefroren und vor den Experimenten bei Zimmertemperatur aufgetaut. Zur Standardisierung des Versuchsablaufes wurden vier Präparate in einem Vorversuch verwendet.

Die Präparate wurden vom anatomischen Institut der Mayo Clinic, Rochester, Minnesota, USA zur Verfügung gestellt.

In der Studie sollte die Kinematik des STT-Gelenks an nicht pathologisch veränderten Handgelenken untersucht werden. Da die Experimente ohne Gelenkeröffnung stattfanden, wurden zunächst alle Präparate einer genauen manuellen Untersuchung, Röntgen- und CT-Untersuchung unterzogen, damit pathologische Veränderungen im Bereich des Handgelenkes, die auf eine Läsion karpaler Bänder oder Knochen hinwiesen, ausgeschlossen werden konnten. Ein Präparat mit einer scapho-lunären Dissoziation von 0,7cm wurde deshalb von der Untersuchung ausgeschlossen.

Die verbliebenden neun Präparate der Hauptstudie, deren Ergebnisse hier präsentiert werden, stammten von sechs Spendern (3 weiblich, 3 männlich), wobei von 3 Spendern beide Hände vorlagen (2 weiblich, 1 männlich) (Tab.3.1.1).

<u>Spender Nr.</u>	<u>Alter</u>	<u>Geschlecht</u>	<u>rechte Hand</u>	<u>linke Hand</u>
1	45	weiblich		x
2	33	weiblich	x	x
3	53	männlich	x	
4	29	weiblich	x	x
5	56	männlich	x	x
6	62	männlich	x	

Tab. 3.1.1: Liste der verwendeten Hand-Präparate: 9 Präparate von 6 Körperspendern, das durchschnittliche Alter der Präparate betrug 44 Jahre (29-62 Jahre).

3.2 Methoden

3.2.1 Grundlagen des biomechanischen Meßverfahrens

Zur Messung der Kinematik im zu untersuchenden Karpalbereich wurde das 3Space ISOTRACK-System der Firma Polhemus, Burlington, Vermont, USA verwendet.

Das 3Space ISOTRACK Meßsystem besteht aus drei Komponenten: einer elektronischen Systemeinheit, einer Magnetfeldquelle (Source) und einem Sensor. Magnetfeldquelle und Sensor sind durch Kabel mit der Systemeinheit verbunden. Die Magnetfeldquelle sendet, der Sensor empfängt und mißt ein niederfrequentes elektromagnetisches Feld. Die elektronische Systemeinheit beinhaltet analoge Instrumente zur Erzeugung und Messung eines magnetischen Feldes. Sie verfügt ebenso über Hard- und Software, die zur Kontrolle der analogen Funktionen, zur Digitalisierung der Signale und für die Kalkulationen zur Ermittlung der Position und relativen Orientierung des Sensors in Bezug zur Magnetfeldquelle, oder in Bezug zu einem definierten Referenzrahmen relativ zur Quelle, benötigt wird. Die Systemeinheit kann über eine serielle Schnittstelle mit einem handelsüblichen PC verbunden werden.

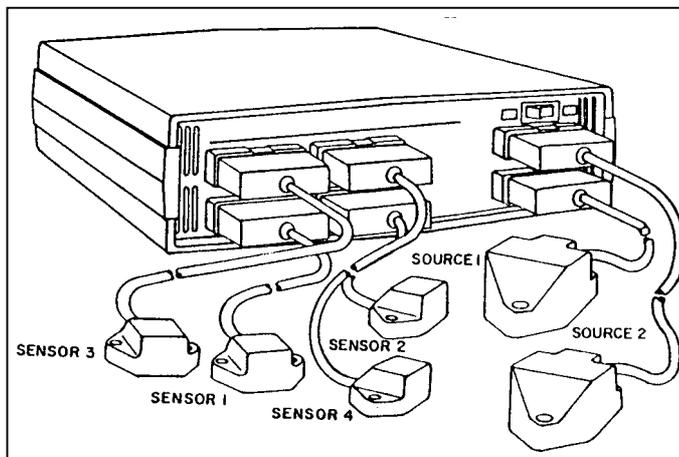


Abb.3.2.1: Das 3Space-Isotrack-Meßsystem. Die Aggregate Source (= Magnetfeldquelle) und Sensor erzeugen bzw. messen ein niederfrequentes elektromagnetisches Feld. Quelle und Sensor sind an der Systemeinheit angeschlossen, die mit einem handelsüblichen PC verbunden werden kann.

Es können bis zu vier Sensoren angeschlossen werden. Die Sensoren zeigen die relative Position innerhalb der Magnetfeldhemisphäre (Abb.3.2.7), einen halbkugelförmigen elektromagnetisch umschriebenen Raum, in Winkelgraden und Entfernung zum in der Quelle positionierten Referenzkoordinatensystem, an. Änderung der Position und relativen Orientierung werden vom Sensor durch eine Veränderung des Magnetfeldes während einer Bewegung wahrgenommen, die dann zu einer Veränderung der angegebenen Daten führt. Zu große Winkelunterschiede in zu kurzer Zeit können zu fehlerhafter bzw. lückenhafter Datenermittlung führen. Die maximale Update-Rate, das ist die Anzahl der möglichen Anzahl von Meßschritten, beträgt 60/sec, d.h. es können maximal 60 Messungen pro Sekunde registriert werden. Die Geschwindigkeit mit der ein Körper bewegt wird und bei der das Meßsystem noch ausreichend genau messen kann, wird dadurch limitiert. Da die

Magnetfeldquelle automatisch die Feldstärke des Magnetfeldes auf einem konstanten Level hält, in Abhängigkeit zur Entfernung der Sensoren, können zu rasche Bewegungen, die den Sensor direkt auf die Quelle hin- oder von ihr fortbewegen zu lückenhafter Datenerhebung führen. Außerdem beeinflussen metallische, nichtabgeschirmte Materialien in näherer Umgebung der Meßapparatur das magnetische Feld und damit die Datenerhebung (An 1988).

Mit Hilfe von speziellen Computerprogrammen kann eine Relativbewegung zwischen den einzelnen Sensoren dargestellt werden. Hierbei wird ein Sensor rechnerisch als fixiert betrachtet, und die Bewegung des betreffenden Sensors relativ zum Koordinatensystem des fixierten Sensors dargestellt. Die simultane Datenspeicherung erfolgte auf einem angeschlossenen Computer, im UNIX-Betriebssystem. Die Berechnung der kinematischen Parameter erfolgte später unter Verwendung transformierender, im Orthopedic Biomechanics Laboratory der Mayo Clinic, Minnesota, USA, speziell für den hier verwendeten Versuchsaufbau entwickelter Software.

Zur Standardisierung des experimentellen Ablaufes wurde in Vorversuchen ein Gerät mit einem Sensor verwendet. Ein ISOTRACK-Gerät mit vier Sensoren wurde dann in der Hauptstudie verwendet. Dieses hatte sich in anderen kinematischen Experimenten bewährt (An 1988, Percy 1989).

Der Vorteil des ISOTRACK-Meßsystem ist die kontinuierliche Registrierung aller der zur Darstellung einer dreidimensionalen Bewegung benötigten Parameter. Eine Unterbrechung des Bewegungsablaufes ist im Gegensatz zur Röntgenstereogrammetrie somit nicht erforderlich.

Zur Darstellung einer freien dreidimensionalen Bewegung bedarf es sechs Variablen, die in zwei mathematischen Systemen zu je drei Variablen betrachtet werden. Es handelt sich hierbei um die

-Translationsmatrix mit der die Bewegung eines Sensors im kartesischen Koordinatensystem entlang der x-, y- und z-Achse beschrieben wird (Angabe in cm oder inch).

-Rotationsmatrix, mit der die Rotation, die Sensoren während der Translationsbewegung um die x-,y- und z-Achse, vollführt, beschrieben wird (Angabe in Winkelgraden) (Shapiro 1978, Woltring 1985, Youm 1980, An 1988).

Die zunächst ermittelten Daten beschrieben die Bewegungen, die die Sensoren im Magnetfeld vollführen. Pro Meßzeitpunkt erhielt man zweimal drei Koordinatenpunkte, die Rotation (Drehung) des Sensors um die im Referenzkoordinatensystem liegenden Achsen x, y und z, und die Translation (Verschiebung) entlang dieser Achsen. Die Darstellung der Bewegung der Knochen, an denen die Sensoren fest durch Fiberglasstifte fixiert waren,

erforderte mathematisch-biomechanische Umrechnungen. Berechnet wurde das geometrische Zentrum der untersuchten Knochen, in dem das Koordinatensystem des jeweiligen Knochens seinen Ursprung hat. Zur Berechnung des geometrischen Zentrums wurden die untersuchten Knochen, Scaphoid, Trapezium und Metakarpale 1 nach Beendigung aller Experimente exartikuliert und deren Knochenoberflächen mit Hilfe des vierten Sensors digitalisiert. Hierzu wurden zahlreiche Digitalisierungspunkte auf der Knochenoberfläche mittels eines speziell entwickelten und für diese experimentelle Anordnung modifizierten Computerprogramms erhoben (Abb.3.2.2, Abb. 3.2.3).



Abb.3.2.2: Benutzung des vierten Sensors am Beispiel des Radius. Zur Digitalisierung der Gelenkoberfläche wurden viele Meßpunkte auf der Gelenkfläche des Knochens erhoben. Anschließend erfolgte die Berechnung des geometrischen Zentrums zur Ermittlung des Koordinatensystems des

untersuchten Knochens. Im Hintergrund die exartikulierten Karpalknochen Scaphoid und Trapezium mit verbliebenen Sensoren. Die Gelenkflächen von Scaphoid und Trapezium wurden in gleicher Weise digitalisiert und in Koordinatensysteme der Knochen transformiert.

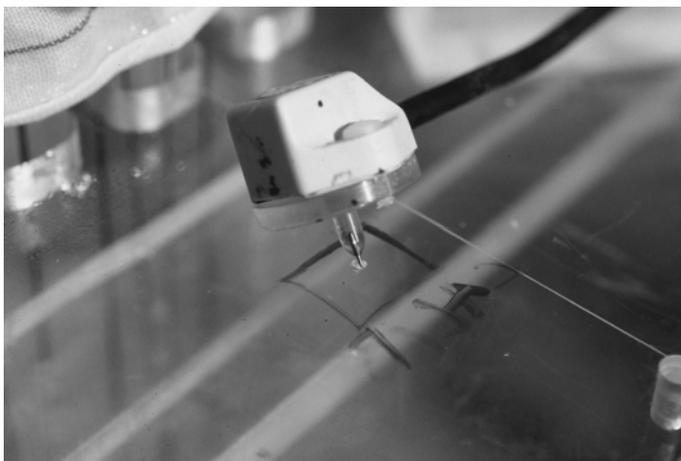


Abb.3.2.3: Kalibrierung des Digitizers. Die Position des Digitizers zur fixierten Magnetfeldquelle blieb jeweils auch nach Umbau des Aufbaus unverändert. So konnten einheitliche Meßverhältnisse für alle untersuchten Hände geschaffen werden.

Zur kinematischen Darstellung und Berechnung der so ermittelten Bewegungs- und morphologische Daten der untersuchten Knochen wurde das Schrauben-Achse-Konzept (screw-axis) verwendet, welches experimenteller Standard bei kinematischen Untersuchungen an Handgelenk und Hand ist (Youm 1979, Lange de 1987, An 1988, Smith 1989, Garcia-Elias 1989, Horii 1991) (Abb.3.2.5).

Die Berechnung entstammt der Festkörpermechanik, d.h. die Mechanik eines Objektes, welches seine Struktur und Geometrie während der Bewegung nicht ändert. Dies ist auch für die Knochen der radialen Karpussäule anzunehmen.

Eine freie Bewegung eines solchen Festkörpers findet als beliebige Translation entlang aller drei Raumachsen x-, y- und z- und als Rotation um diese Achsen statt.

Diese Bewegung wird durch die Translations- und Rotationsmatrix (s.o.) beschrieben und ist eine Bewegung mit sechs Freiheitsgraden (6dof-motion = six-degree of freedom motion).

Erklären lässt sich dieses Phänomen beispielhaft anhand des Fingergrundgelenks. Dieses erlaubt eine Beugung und Streckung um die transversale (radiale-ulnare) Achse und eine Ab- und Adduktion um die dorsopalmare Achse in einer frontalen Ebene, d.h. eine Bewegung in zwei Freiheitsgraden bzw. zwei Rotationsfreiheitsgrade. Beispielhaft für die Bewegung entlang einer Gelenkachse ist das Rollgleiten im Kniegelenk zu nennen, bei der es zu einer Verschiebung der Femurrolle entlang der dorso-ventralen Achse bei Beugung in Kniegelenk kommt (nach Kapandji, 1984)

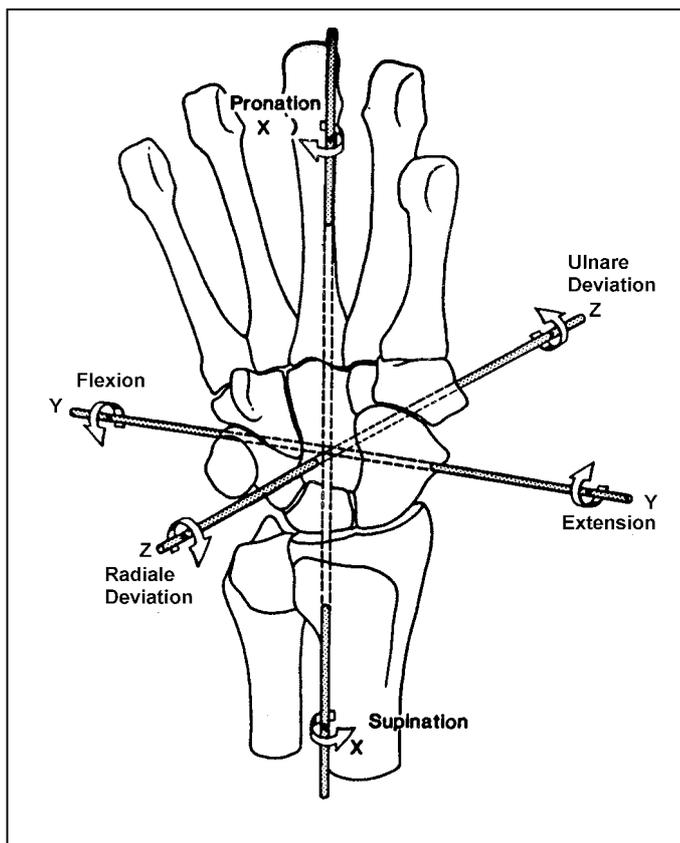


Abb.3.2.4: Darstellung des Koordinatensystems für Handgelenkbewegungen. Die proximale-distale x-Achse entspricht der Pronations – Supinationsachse. Bei Ansicht von distal stellt die Rotation um diese Achse im Uhrzeigersinn eine Pronation, entgegen des Uhrzeigersinns eine Supination dar. Die radiale-ulnare y-Achse ist die Extensions – Flexionsachse. Bei Ansicht von radial stellt die Rotation im Uhrzeigersinn eine Extension, entgegen des Uhrzeigersinns eine Flexion dar. Die volare-dorsale z-Achse ist die radiale- und ulnare Deviationsachse. Bei

Ansicht von volar stellt die Rotation im Uhrzeigersinn eine radiale Deviation, die Rotation entgegen des Uhrzeigersinns eine ulnare Deviation dar (modifiziert nach Garcia-Elias 1989).

Die Translations- und Rotationsmatrix der gemessenen Bewegung für jeden einzelnen Sensor, respektive deren Koordinatensysteme, wurde in dieser Studie mit einer Frequenz von 15 Hz während eines kontinuierlichen Bewegungszyklus von 10 sec Dauer gemessen. Das Bezugssystem wurde durch die Hemisphäre der Quelle definiert, in dessen

Koordinatensystem sich die vier Sensoren bzw. deren Koordinatensysteme bewegen (Abb.3.2.7).

Da Quelle und Radius fest auf der Versuchsplattform angebracht wurden, war es möglich das Koordinatensystem der Quelle auf den Radius zu übertragen, so daß die Bewegung der Sensoren, der hier untersuchten Karpalknochen auch in Relation zum Radius betrachtet werden konnte.

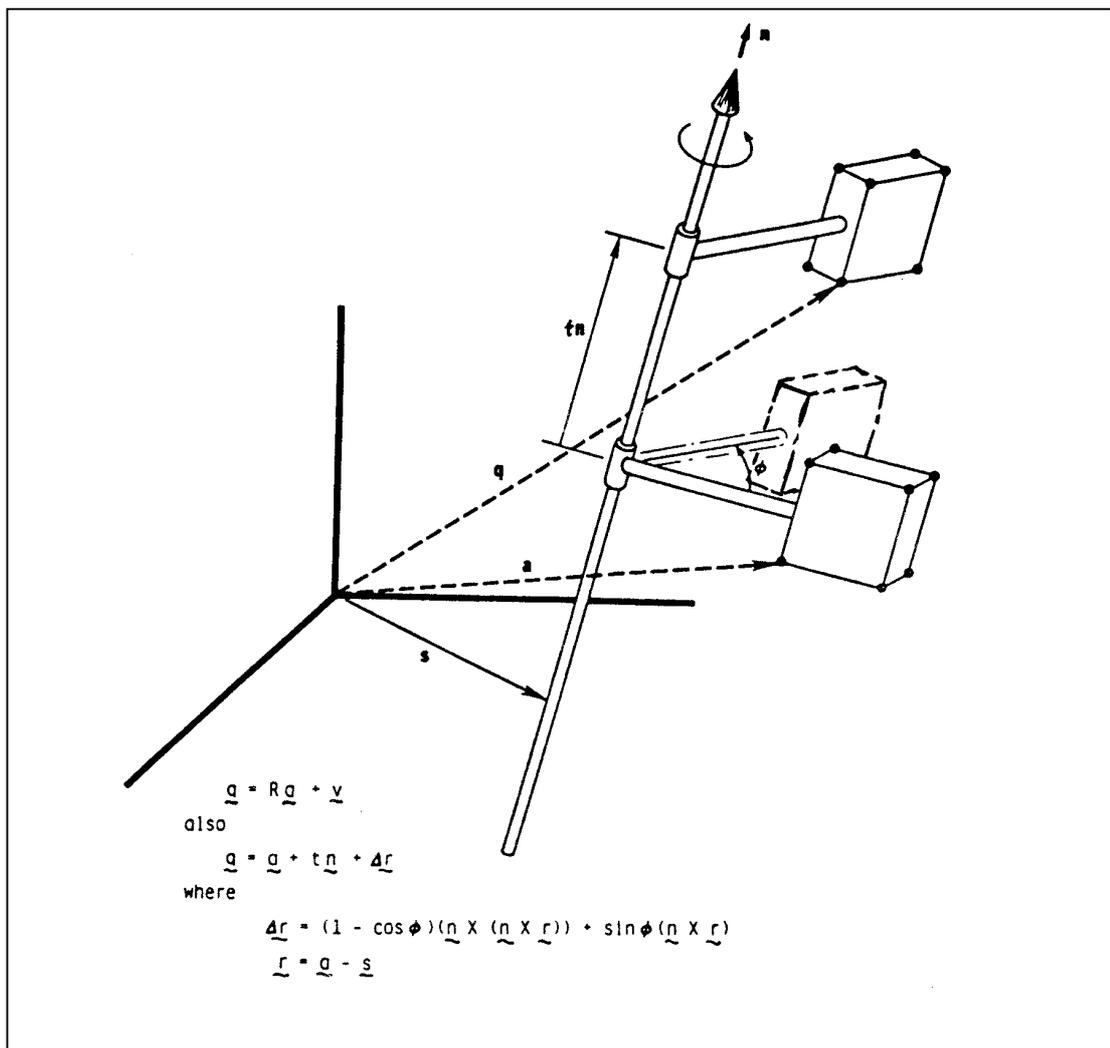


Abb.3.2.5: Das Schrauben-Achsen-Konzept (screw-axis-concept): Eine relative Bewegung eines „rigid body“ (Festkörpers), kann als eine Rotation (Φ) um und als eine Translation (t_n) entlang einer Vektorachse (screw displacement axis, n), die im Verlaufe einer Bewegung verschiedene Ausrichtungen hat, beschrieben werden. Das heißt, daß man eine Bewegung mit einer durchschnittlichen screw axis, aber auch mit mehreren screw-axes als Ausschnitt aus einem gesamten Bewegungszyklus, beschreiben kann (Youm1979, An 1984).

Als Beispiel für eine Anwendung der screw-axis Methode soll der Vergleich der screw-axis für das Scaphoid bei ulnarer Deviation des Handgelenks bei physiologischen Verhältnissen und nach scapho-trapezialer Fusion, wie sie z.B. bei STT-Arthrose durchgeführt wird, dienen (Garcia-Elias 1989):

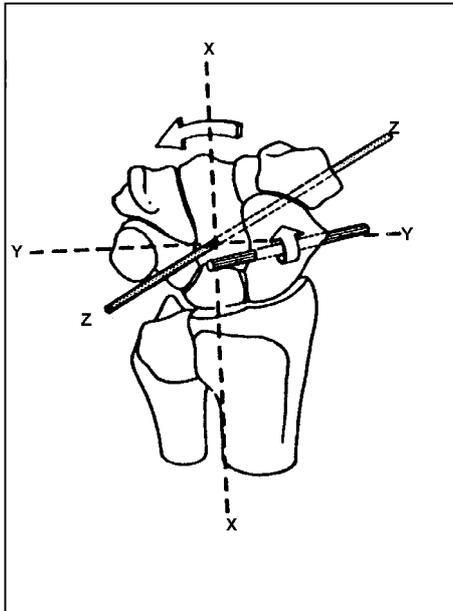


Abb.3.2.6a: Das Koordinatensystem für Handgelenkbewegungen liegt im Kapitulum (s.Abb.3.2.4). Bei ulnarer Deviation und intakten Verhältnissen des Handgelenks steht die screw-axis für das Scaphoid in Extension, ulnarer Deviation und Pronation im Vergleich mit dem Referenzkoordinatensystem im Kapitulum (modifiziert n. Garcia Elias 1989).

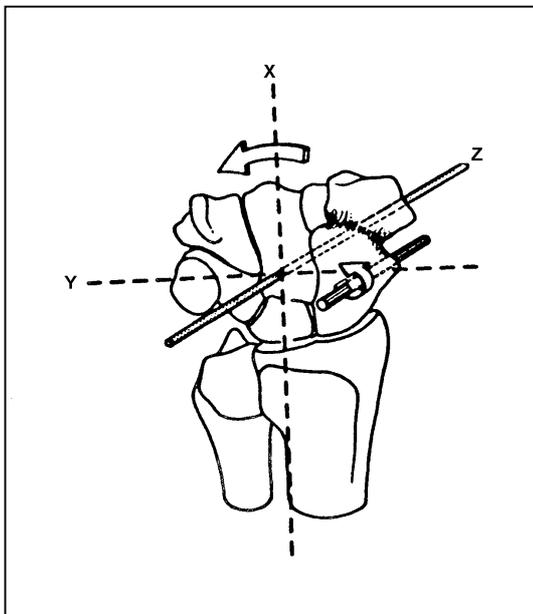


Abb.3.2.6b: Nach scapho-trapezialer Fusion ist die screw-axis annähernd parallel zum Referenzkoordinatensystem, welches im Kapitulum liegt. Dies bedeutet, daß sich das Scaphoid nicht mehr länger als separate Einheit bewegt, und bei Belastungssituationen v.a. bei radialer Deviation ausweichen kann. Es stellen sich im Vergleich mit den normalen Verhältnissen veränderte biomechanische Bedingungen im Bereich des scapho-radialen Gelenks ein (modifiziert nach Garcia-Elias 1989).

Anhand der Orientierung einer screw-axis kann demnach ein verändertes Verhalten eines Knochens, hier in einer bestimmten Bewegungsrichtung, beschrieben werden. Im hier beschriebenen Beispiel hat das Scaphoid durch Fusion seine spezielle

Bewegungsorientierung und Anpassungsmöglichkeit verloren, was durch die Angleichung der screw-axis des Scaphoid an die screw-axis des Capitatum gezeigt werden kann.

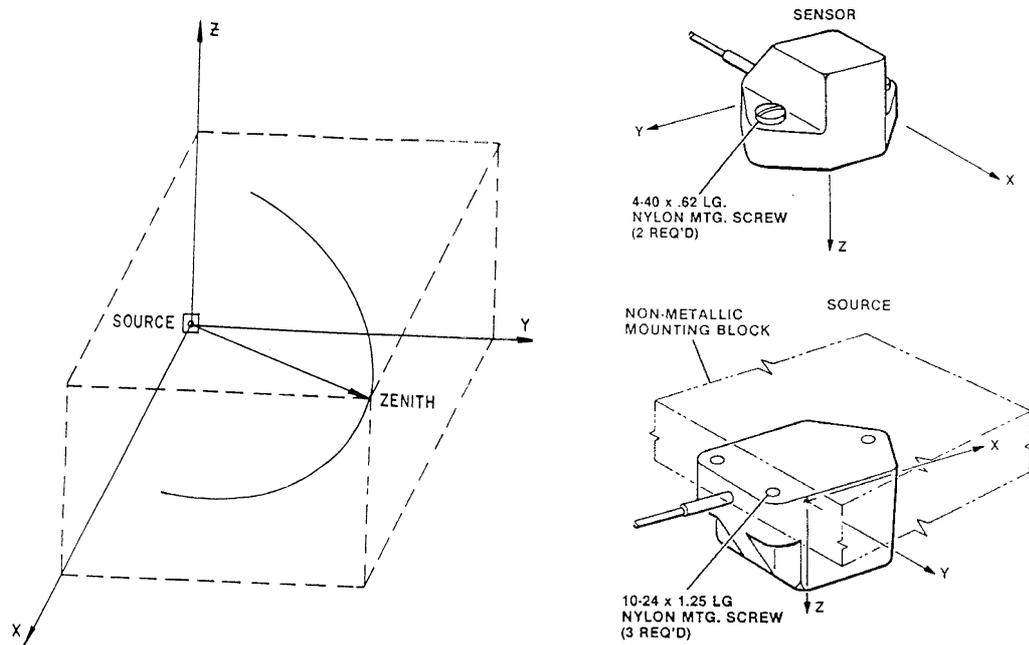


Abb.3.2.7: Koordinatensysteme von Magnetfeldquelle (Source) und Sensor. Darstellung der Magnetfeldhemisphäre, die man sich als eine elektromagnetische Halbkugel vorstellen kann, in der die Bewegung der Sensoren gemessen wird. Die Bewegung wird als Rotation und Translation innerhalb des Referenzkoordinatensystems, das durch die Magnetfeldquelle vorgegeben ist, erfasst (ISOTRACK 1990).

3.2.2 Versuchsapparatur

Der Radius wurde im distalen Drittel abgesetzt und nach subfaszialer Präparation der Unterarmmuskulatur in einem speziellen Sockel einzementiert. Die feste Verankerung auf einem Plexiglastisch wurde vom Anfang bis zur Beendigung der Experimente beibehalten. An der Versuchsapparatur waren Vorrichtungen befestigt, an denen das Handgelenk in bestimmten Positionen fixiert werden konnte und man den Daumen in einem definierten Drehungsumfang bewegen konnte (Abb.3.2.8 - 3.2.10). Darüberhinaus wurden Löcher gebohrt, durch die später mit den Sehnen der Handmuskeln verbundene Fäden geführt werden konnten, die der Befestigung frei unter dem Versuchstisch hängender Gewichte dienten.

Mittels fester Verankerung der Quelle auf der Versuchsplattform konnten Relativbewegungen zwischen Magnetfeldquelle und Radius bis zur Beendigung des Versuchsreihe verhindert werden.

Da Metall die Ausbreitung des Magnetfeldes empfindlich beeinflussen kann, wurden alle Teile des Versuchsaufbaus aus Kunststoffen und Fiberglas hergestellt. An vorher angebrachten Fiberglasstifte in Scaphoid, Trapezium und Metakarpale 1 wurden die Sensoren auf kleine Plattformen fixiert. Zuletzt wurden Sensoren und Quelle mit dem ISOTRACK-System verbunden und in Kommunikation mit einem angeschlossenen Computer gebracht.

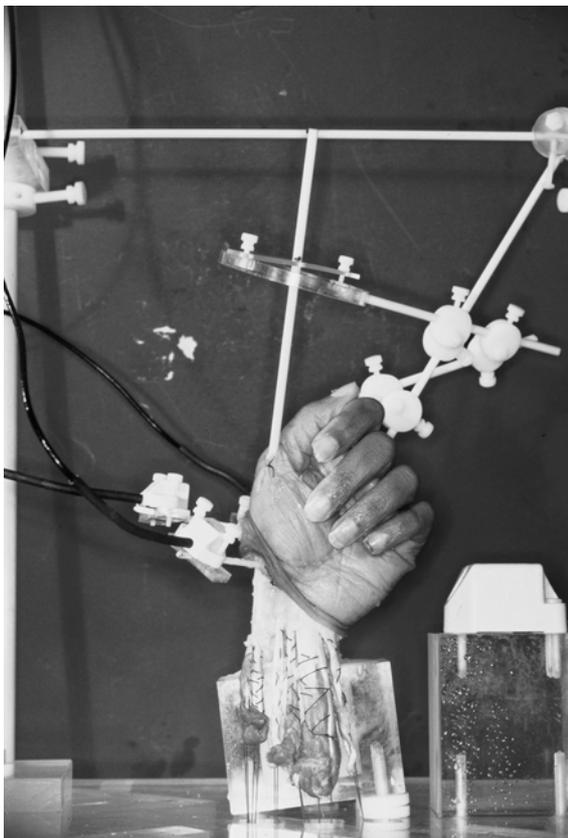


Abb.3.2.8: Aufbau für die kinematischen Experimente am STT-Gelenk. Feste Befestigung von Radius und Magnetfeldquelle auf der Unterlage. Fixierung der Sensoren im Scaphoid, Trapezium und Metakarpale 1. Ein in das Metakarpale 1 eingebrachter Fiberglasstift ermöglichte durch Bewegung in einem Fiberglasring eine definierte Zirkumduktionsbewegung im CMC-Gelenk. Ein im Metakarpale 3 implantierter Fiberglasstift ermöglichte die Fixierung der Hand in der gewünschten Handgelenkstellung, hier ulnare Deviation über Befestigung an eine Querstrebe. Sichtbar sind die mit den Sehnen verwobenen Fäden, die die Befestigung von Gewichten unter dem Versuchstisch ermöglichten.

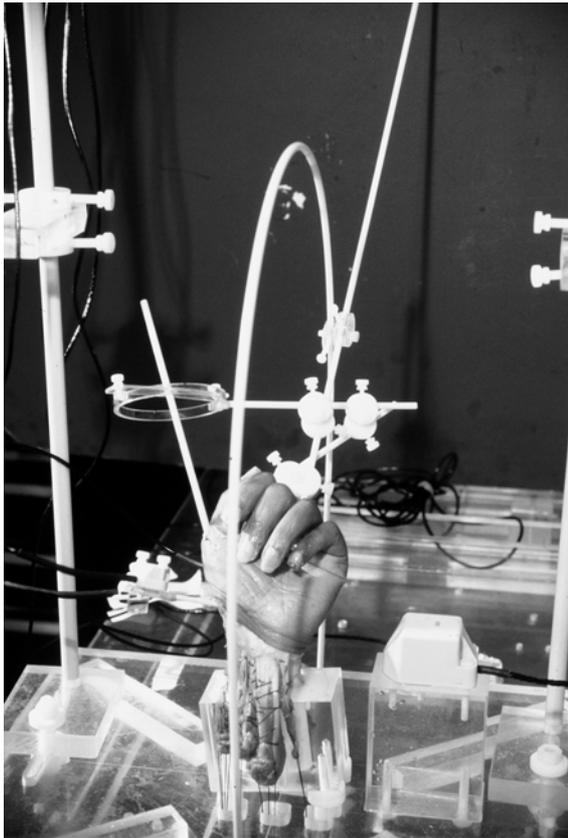


Abb.3.2.9: Aufbau für die kinematischen Experimente am STT-Gelenk. Feste Befestigung von Radius und Magnetfeldquelle auf der Unterlage. Fixierung der Sensoren im Scaphoid, Trapezium und Metakarpale 1. Ein in das Metakarpale 1 eingebrachter Fiberglasstift ermöglichte durch Bewegung in einem Fiberglasring eine definierte Zirkumduktionsbewegung im CMC-Gelenk. Ein im Metakarpale 3 implantierter Fiberglasstift ermöglichte die Fixierung der Hand in der gewünschten Handgelenkstellung, hier Extension über Befestigung an eine Fiberglasbogen. Sichtbar sind die mit den Sehnen verwobenen Fäden, die die Befestigung verschiedener Gewichte unter dem Versuchstisch ermöglichten.

3.2.3 Anatomische Präparation der Versuchsobjekte

Nach Durchtrennung des Radius im distalen Drittel erfolgte die subfasziale Präparation der Unterarmmuskulatur. Anschließend wurden sämtliche Sehnen der Hand jeweils proximal des Retinaculum flexorum und extensorum präpariert, durchflochten und mit einer Aufhängevorrichtung zum Anbringen von Gewichten versehen. Es wurden die Sehnen folgender Muskeln präpariert:

Extensor pollicis longus (EPL), Extensor pollicis brevis (EPB), Abductor pollicis longus (APL), Flexor pollicis longus (FPL), Flexores digitorum superficiales (FLEX-DIGIT-SUPERF), Flexores digitorum profundes (FLEX-DIGIT-PROF), Extensor carpi radialis brevis (ERCB), Extensor carpi radialis longus (ERCL), Extensor carpi ulnaris (ECU), Flexor carpi radialis (FCR), Flexor carpi ulnaris (FCU) und Extensores digitorum communis (EXT-DIGIT-COM).

Beim Scaphoid erfolgte die Einbohrung des Fiberglasstiftes zur Befestigung des Sensors von dorsal durch die crista dorsalis zwischen dem 2.- und 3. Strecksehnenfach (s. Abb.3.2.12).

In dem knorpelfreien Knochenbereich liegt der Ansatzbereich für das Lig. radio-carpeum arcuatum dorsale, welches vom Triquetrum und Kapitatum bis zum Scaphoid verläuft (Guyot 1981, Kapandji 1984).

Nach Abschluß einer Versuchsreihe erfolgte die Exartikulation und die zusätzliche Kontrolle der Lage der Fiberglasstifte. Beim Trapezium erfolgte die Implantation des Stiftes von palmar und radial. Beim Metakarpale 1 erfolgte die Implantation in die Basis von radial. Verletzungen des STT- oder CMC-Gelenkes oder Läsionen der Sehnenscheide der m. flexor pollicis longus und m. flexor carpi radialis Sehne konnten so vermieden werden (Abb. 3.2.12 und 3.2.13).

3.2.4 Experimenteller Ablauf

Während der Experimente wurde das Metakarpale 1 in einem Plexiglasring in einer definierten Zirkumduktion bewegt.

Dies erfolgte in der Reihenfolge **Adduktion - Opposition - Abduktion - Reposition** und zurück in **Adduktion** als kompletter Zirkumduktionsvorgang (Abb. 3.2.10). Der hierfür benötigte Fiberglasstift war im Metakarpale 1 implantiert (Abb.3.2.11). Zur Messung der Bewegung in verschiedenen Handgelenkpositionen wurde das Handgelenk jeweils in maximaler **Flexion, Extension, ulnarer und radialer Deviation** sowie in **Neutralposition** fixiert. Dies wurde durch einen im Metakarpale 3 angebrachten Fiberglasstift, welcher das Handgelenk in einer Fiberglasvorrichtung in den genannten Positionen fixierte, ermöglicht (Abb. 3.2.8 und 3.2.9). Die Zirkumduktion des Daumenstrahls wurde in den fünf verschiedenen Handgelenkpositionen durchgeführt.

Die Oppositionsfähigkeit des menschlichen Daumens ist durch Form und Anordnung des Daumensattelgelenks möglich. Es finden Bewegungen um zwei Achsen statt. Diese Achsen schneiden sich nicht in einer Ebene (Kapandji 1984). Eine Achse (in Abb. 3.2.10 mit a bezeichnet) läßt eine Ab- / Adduktion bzw. radiale / ulnare Deviation zu. In dieser Arbeit wird von Abduktion als Abspreizung des Daumens vom zweiten Strahl, und von Adduktion als Heranführen des Daumens an den zweiten Strahl gesprochen. Die zweite (in Abb. 3.2.10 mit b bezeichnet) Achse wird als Flexions-Extensions, Reposition-Oppositions und Antepulsion-Retropulsionsachse bezeichnet (Kuczynski 1974, Zancolli 1979, Cooney 1981, Kapandji 1984). In dieser Arbeit soll von Reposition und Opposition gesprochen werden. Die Kombination aus maximaler Reposition in maximale Abduktion in maximale Opposition in maximale Adduktion und wieder zurück in Reposition beschreibt die Zirkumduktionsbewegung des Daumens (Debrunner 1987).

Eine Vielzahl von Muskeln ermöglicht den Bewegungsradius des Daumens, auch um den labilen Gleichgewichtszustand des Metakarpale 1 gegenüber dem Trapezium zu neutralisieren. Zusätzlich zu den beiden Hauptachsen kommt es während der Zirkumduktionsbewegung zu einer kurzfristigen axialen Rotation im Sinne einer Pronation, ausgelöst durch den M.opponens pollicis (Koebe 1983). Diese Rotation ist eine

automatische Längsrotation, die bei Bewegungen zweier Gelenkkörper an sattelförmigen Gelenkflächen auftritt (Kapandji 1984)

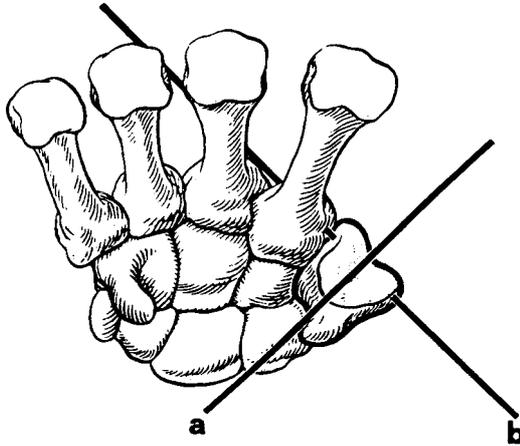


Abb.3.2.10: Schematisierung des Karpus und der Metakarpalia 2-5. Darstellung der beiden Rotationshauptachsen des Carpometacarpalgelenk 1 (a: Abduktion und Adduktion und b: Reposition und Opposition. Als Translation bezeichnet man eine Bewegung entlang der Achse a in dorso-volarer, entlang der Achse b in radio-ulnarer Richtung (modifiziert nach von Lanz 1957).



Abb.3.2.11: Nahaufnahme des experimentellen Setups. Rechts unten vorne ist der von palmar in das Trapezium eingebrachte Sensor zu sehen. Radial davon, ist der in der Basis des Metakarpale 1 befestigte Sensor abgebildet, dahinter der von dorsal in das Scaphoid eingebrachte Sensor. In das Metakarpale 1 sieht man den zusätzlich implantierten Fiberglasstift, mit am oberen Bildrand sichtbaren Plexiglasring zur Führung einer Zirkumduktionsbewegung. Am unteren Bildrand sind die Sehnen zu sehen, an denen über befestigte Fäden, frei hängende Gewichte angebracht waren. Am unteren Bildrand der in einem Fiberglasblock einzementierte Radius.

Es wurden folgende Experimente durchgeführt:

1.Experiment n-ll

Hierbei waren die STT-Ligamente intakt. Es wurde die Kraft von insgesamt 1,3 kg auf die Sehnen der Hand appliziert (n-ll = normal low load), um einen physiologischen Muskeltonus zu simulieren. Es erfolgte die Datenerhebung in fünf Durchgängen bei Stellung des Handgelenks in maximaler Flexion , Extension, ulnarer und radialer Deviation sowie in Neutralstellung nach der Neutral-Null-Methode.

Die einzelnen Sehnen wurden wie folgt beladen: Jeweils Gewichte von jeweils 100g wurden an die Sehnen des EPL, EPB, APL, FPL, FLEX-DIGIT-SUPERF, FLEX-DIGIT-PROF, ERCB, ERCL, ECU, FCR und FCU gehängt. Gewichte von 200g wurden an die Sehnen des EXT-DIGIT-COM befestigt.

2.Experiment n-hl

Mit diesem Versuch sollte die Bewegung des Handgelenkes ebenfalls bei intakten Ligamenten unter einer axialen Kraffteinwirkung simuliert werden. Es erfolgte die Datenerhebung in fünf Durchgängen bei Stellung des Handgelenks in maximaler Flexion, Extension, ulnarer und radialer Deviation und in Neutralstellung nach der Neutral-Null-Methode.

In diesem Versuch wurde insgesamt ein Gewicht von 23,5 kg auf die Sehnen der Hand wie folgt verteilt (n-hl = normal high load): EPL 1,0 kg, EPB 0,5 kg, APL 0,5 kg, FPL 1,5 kg, EXT-DIGIT-COM. 4,0 kg, FLEX-DIGIT-SUP. 2,0 kg, FLEX-DIGIT-PROF. 2,0 kg, ERCB 0,75 kg, ERCL 0,75 kg, ECU 3,5 kg, FCR 3,5kg, FCU 3,5 kg.

3.Experiment 2-ll

In diesem Versuch wurde eine komplette Dissoziation der STT-Ligamente simuliert. Der Kapsel-Band-Apparat des STT-Gelenks wurde von dorsal nach palmar durchschnitten, ohne hierbei den Radius aus seiner Halterung und die Lage der implantierten Sensoren zu verändern.

Um exakt eine artifizielle Verletzung ausschließlich des palmaren Kapsel-Band-Komplexes des STT-Gelenks zu setzen, wurde in dorso-palmarer Richtung eine Spinalnadel tangential am distalen Pol des Scaphoid eingeführt. So konnten einerseits sämtliche palmaren STT-Ligamente selektiv durchschnitten werden, andererseits konnte eine Verletzung der Sehne des m. flexor carpi radialis vermieden werden (Abb.3.2.13). Die Sehnen der Hand wurden mit einem Gewicht von 1,3 kg wie im 1.Experiment n-ll während der Bewegung beladen. Es erfolgte die Datenerhebung in fünf Durchgängen bei Stellung des Handgelenks in maximaler Flexion , Extension, ulnarer und radialer Deviation sowie in Neutralstellung nach der Neutral-Null-Methode.

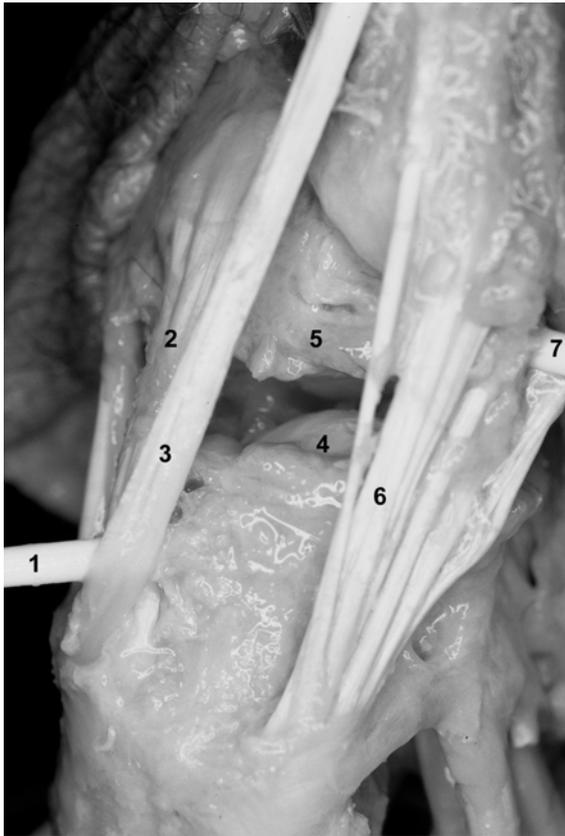


Abb.3.2.12: Anatomischer Situs nach Durchtrennung der STT-Ligamente, bei Blick ins STT-Gelenk entspricht dies hier der Situation bei Experiment 2-II. Ansicht von dorso-radial, der linke Bildrand ist dorsal und der rechte Bildrand volar. Die Sicht zentral auf den distalen Scaphoidpol (4) und Trapezium (5). Dorsal zwischen EPL- (3) und ECRL-Sehne (2) ist der Sensor über einen Fiberglasstift (1) in die crista dorsalis implantiert. Volar die APL-Sehne (6) und die Sensorbefestigung im Trapezium von radio-volar (7).

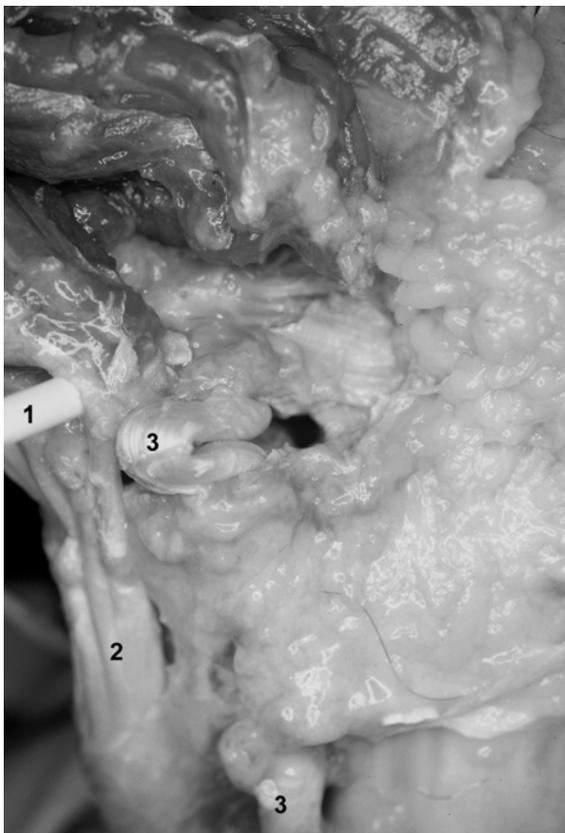


Abb.3.2.13: Ansicht von volar, linker Bildrand radial, rechter Bildrand ulnar. Von radio-volar in das Trapezium eingebrachter Sensor (1), entsprechend (7) in Abb.3.2.12. Die Sehne des FCR (3) ist nach distal aus dem Sehnenfach angehoben. Radial davon die APL-Sehne (2).

4.Experiment 2-II

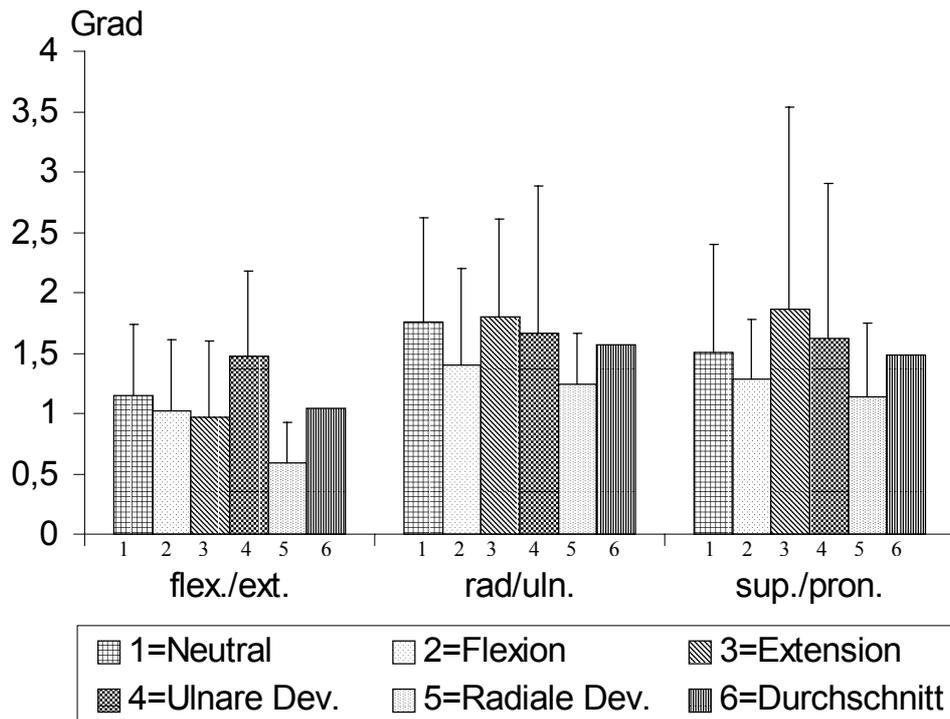
In diesem Versuch wurde die Bewegung der untersuchten Karpalknochen unter Belastung mit dissoziierten STT-Bandkomplex simuliert. Es erfolgte die Datenerhebung in fünf Etappen bei Stellung des Handgelenks in maximaler Flexion , Extension, ulnarer und radialer Deviation sowie in Neutralstellung nach der Neutral-Null-Methode. Hierzu wurden die Sehnen wie bei Experiment n-hI mit 23,5 kg beladen

Die vier Experimente wurden entsprechend obiger Reihenfolge für jedes Präparat während eines Bewegungszyklus von 10 Sekunden in den oben beschriebenen fünf Handgelenkpositionen durchgeführt. Somit standen pro Hand und je untersuchtem Karpalknochen ein Datensatz aus 20 Versuchen zur Verfügung. Am Ende der Versuche wurde die Lage der Sensoren und Fiberglasstifte nach anatomischer Präparation überprüft. Die speziell für diese Versuchsreihe geschriebene Software ermöglichte die Registrierung der Translations- und Rotationsmatrizes bei einer Meßfrequenz von 15Hz.

Graphische und statistische Analyse der Datensätze wurde mit im Handel erhältlichen Softwarepaketen durchgeführt (ANOVA = Analysis of Variance im SAS-Statistikprogramm in UNIX, paired T-Test in Excel 5.0-Tabellenkalkulationsprogramm der Firma Microsoft Betriebssystem Windows).

3.2.5 Darstellung der ermittelten Daten

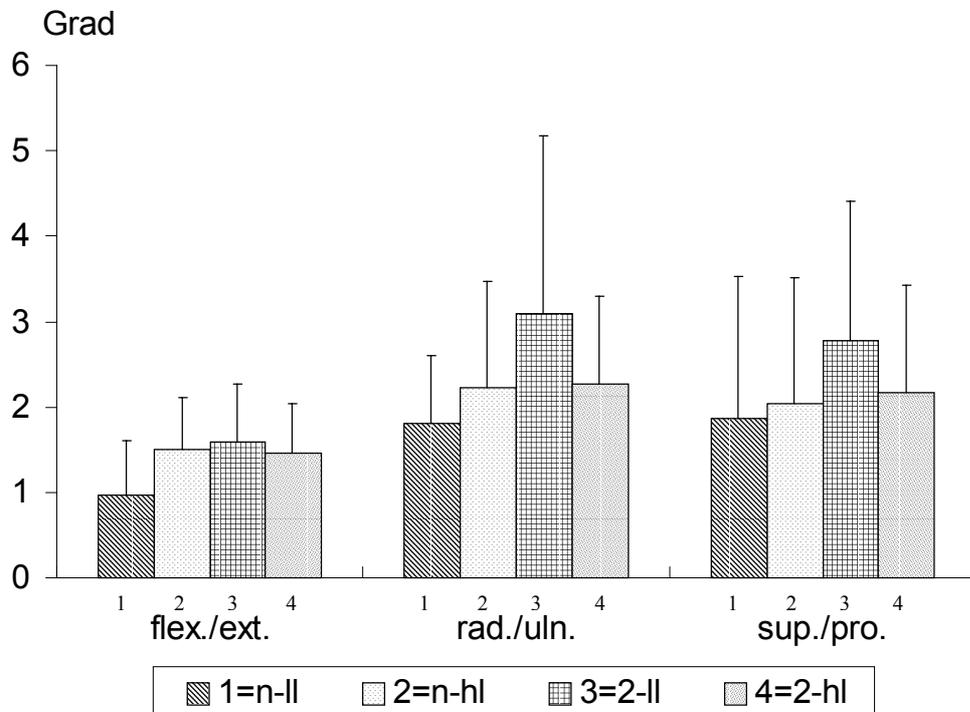
Die im Kapitel 4 „Ergebnisse“ verwendeten Abbildungen sollen im folgenden ausführlich beschrieben und erklärt werden. Die verwendeten Abbildungstypen sind für das Trapezium und Scaphoid und innerhalb der Unterkapitel gleich aufgebaut und werden daher nur anhand jeweils einer exemplarischen Abbildung ausführlich erklärt.



Abbildungen in Kap.4.1. „Bewegungsumfang des Trapezium“ und in Kap.4.2 „Bewegungsumfang des Scaphoid“ während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions-**(flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations-** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) des Trapezium respektive Scaphoid, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral** (1), **Flexion** (2), **Extension** (3), **ulnare** (4) und **radiale Deviation** (5) erhoben. Die Datenerhebung wurde bei folgenden Experimenten durchgeführt: Bei jeweils intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II) und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (2-II) und mit starkem Muskelzug (2-hI). Dargestellt wird jeweils ein Experiment pro Grafik. Der Bewegungsumfang in Grad wird jeweils relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid bei Bewegungen des Trapezium (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) und bei Bewegungen des Scaphoid im Vergleich zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt.

Dargestellt und untersucht wurde anhand dieser Abbildungen das Ausmaß einer Bewegungsinduktion durch Zirkumduktion des Metakarpale 1 in den verschiedenen

Handgelenkpositionen. Außerdem wurde verglichen, ob es Unterschiede im Ausmaß der Bewegung von Trapezium und Scaphoid bei unterschiedlichen Handgelenkpositionen gibt. Hierbei wurde insbesondere der Unterschied bei Extension gegenüber Flexion und bei radialer gegenüber ulnarer Deviation des Handgelenks untersucht.



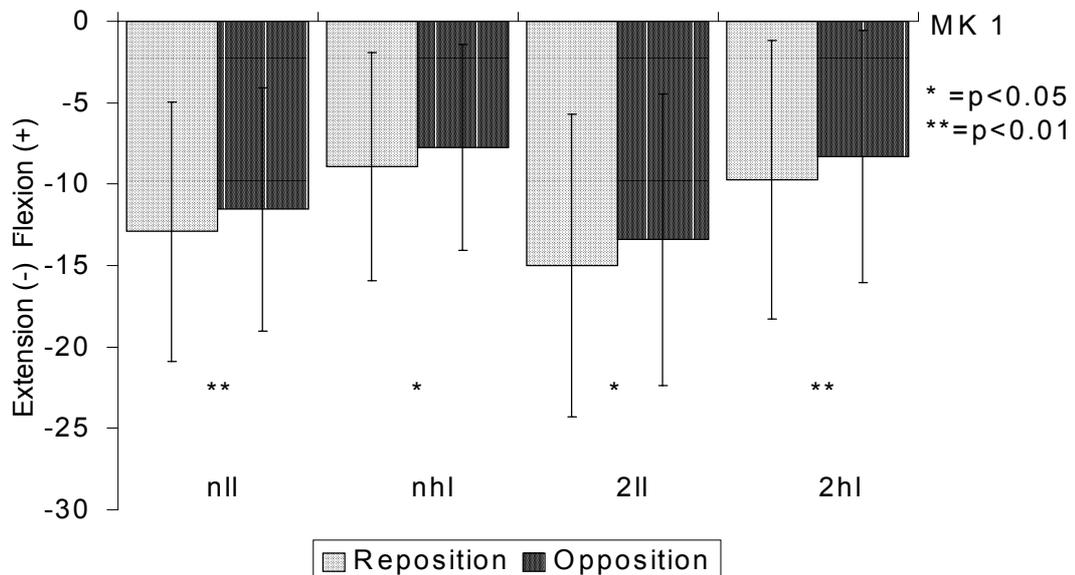
Abbildungen in Kap.4.1.5 (Trapezium) und Kap.4.2.5 (Scaphoid): Bewegungsumfang des Trapezium (Scaphoid) während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions-** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations-** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Trapezium (Scaphoid) erhoben. Darstellung der Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hI), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) und mit **starkem Muskelzug** (2-hI). Pro Grafik wurde jeweils eine der fünf Handgelenkstellungen Neutral, Flexion, Extension, ulnare und radiale Deviation dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid bei Bewegungen des Trapezium (Bewegungsdaten des STT-Gelenk) und bei Bewegungen des Scaphoid im Vergleich zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt.

Anhand dieser Abbildungen konnte dargestellt und untersucht werden, ob ein Unterschied des Bewegungsausmaßes von Trapezium und Scaphoid während der Zirkumduktion des Metakarpale bei unterschiedlichem Muskelzug und bei intakten und durchtrennten Ligamenten besteht. Verglichen wurde hier jeweils das Experiment nII mit nhl und 2II mit 2hI, um die Auswirkung einer erhöhten Muskelkraft bei physiologischem und pathologischem STT-Gelenk zu untersuchen. Desweiteren wurden die Experimente nII mit 2II sowie nhl mit

2hl verglichen, um die Auswirkung einer STT-Ligamentdissektion bei leichtem und starkem Muskelzug zu untersuchen.

In dem folgenden Abbildungstyp ist das Bewegungsverhalten des Trapezium bzw. Scaphoid dargestellt, das während der Reposition und Opposition des Metakarpale 1 stattfindet. Reposition ist hierbei ein Zurückführen des Metakarpale 1 nach dorsal. In Bezug auf die Extensions - Flexionsachse der Karpalknochen ist dies eine Extension. Opposition führt das Metakarpale 1 nach volar, dem Metakarpale 2 in Opposition gegenübergestellt, was einer Flexion entspricht.

Steht nun Scaphoid bzw. Trapezium bei Reposition des Metakarpale 1 mehr in Extension als bei Opposition des Metakarpale 1, kann von einem gleichgerichteten Bewegungsverhalten gesprochen werden, ausgelöst durch die Metakarpalbewegung des Daumens. Besteht zwischen den Positionen von Trapezium bzw. Scaphoid, zwischen den Werten bei Reposition und Opposition des MT1, ein signifikanter Unterschied, wird dies in der Abbildung mit angegeben (paired t-test). In der unten angegebenen Abbildungen kann abgelesen werden, daß der betreffende Karpalknochen insgesamt in Extension (negative Gradzahlen) steht, beim Trapezium in Bezug zum Scaphoid, beim Scaphoid in Bezug zum Radius. Bei Reposition besteht im Vergleich zur Stellung bei Opposition des MK1 eine verstärkte Extensionsstellung des Trapezium bzw. Scaphoid, so daß von einer Extensionsbewegung des Karpalknochens bei einer Bewegung des Metakarpale von Opposition nach Reposition ausgegangen werden kann, einer gleichsinnigen Bewegung entsprechend.

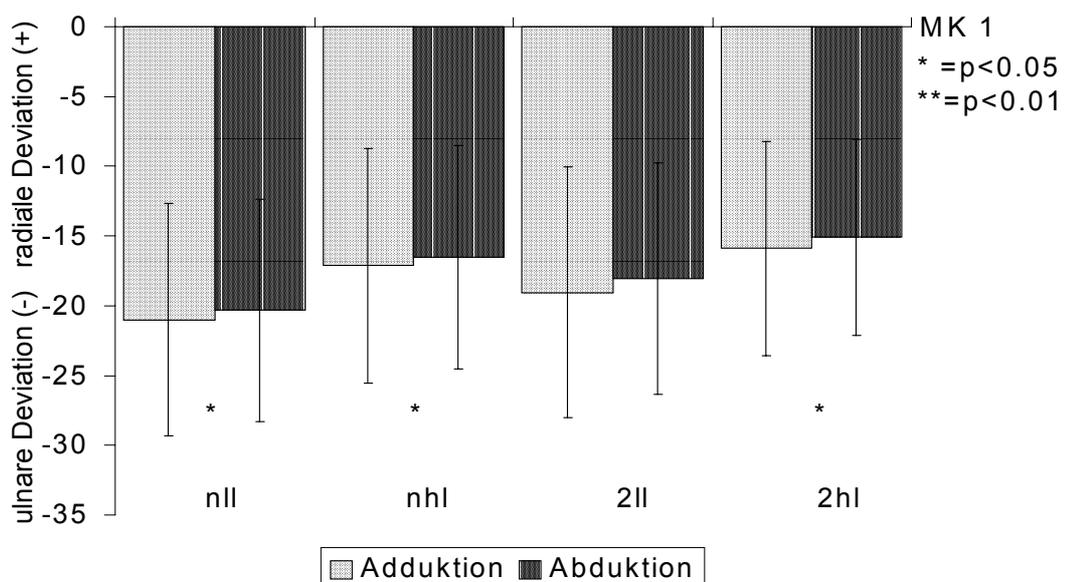


Abbildungen in Kap.4.3.1-4.3.5 (Trapezium) und 4.4.1-4.4.5 (Scaphoid): Dargestellt ist die Position des Trapezium (Scaphoid) auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (zum fixierten Radius) jeweils in max. Flexion, Extension, ulnarer-, radialer Deviation und Neutralstellung des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Pro Abbildung wird eine Handgelenkstellung,

jeweils in den vier Experimenten intakte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (n-II), intakte STT-Ligamente und starker Muskelzug (n-hI), durchtrennte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (2-II) und durchtrennte STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI), dargestellt.

In dem folgenden Abbildungstyp ist das Bewegungsverhalten von Trapezium bzw. Scaphoid veranschaulicht, das während Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 stattfindet. Adduktion ist hierbei ein Heranführen, Abduktion ein Abspreizen des Metakarpale in Bezug auf das Metakarpale 2. In Bezug auf die ulnare - radiale Deviationsachse der Karpalknochen Trapezium und Scaphoid entspricht eine ulnare Deviation einer Adduktion, eine radiale Deviation entspricht einer Abduktion. Steht nun Scaphoid bzw. Trapezium bei Adduktion des Metakarpale 1 mehr in ulnarer Deviation als bei Abduktion des Metakarpale 1, dann kann von einem gleichgerichteten Bewegungsverhalten gesprochen werden, ausgelöst durch die Metakarpalbewegung des Daumens. Besteht zwischen den Positionen von Trapezium bzw. Scaphoid zwischen den Werten bei Adduktion und Abduktion des MT1 ein signifikanter Unterschied, dann ist dies in der Abbildung mit angegeben (paired t-test).

Anhand der unten gezeigten Abbildung kann gezeigt werden, daß der betreffende Karpalknochen insgesamt in ulnarer Deviation, beim Trapezium in Bezug zum Scaphoid und beim Scaphoid in Bezug zum Radius, steht (negative Gradzahlen). Bei einer Adduktion des Metakarpale 1 besteht eine verstärkte ulnare Deviation des Karpalknochens (negativere Gradzahlen) als bei Abduktion des Metakarpale 1, es besteht also eine radiale Deviationsbewegung des Karpalknochens bei einer Bewegung des Metakarpale von Adduktion in Abduktion, einer gleichgerichteten Bewegung entsprechend.



Abbildungen in Kap.4.3.1-4.3.5 (Trapezium) und Kap.4.4.1-4.4.5 (Scaphoid): Dargestellt wird die Position des Trapezium (Scaphoid) auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Scaphoid (zum fixierten Radius) jeweils in max. Flexion, Extension, ulnarer-, radialer Deviation und Neutralstellung des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Die vier Experimente bei intakten STT-Ligamenten und

leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamenten mit starkem Muskelzug (2-hI) werden in der Abbildung dargestellt.

Die folgenden Tabellen sind ein Überblick über die im Kapitel 9 „Anhang“ verwendeten Tabellentypen. Die Tabellen der Ergebnisse für das Trapezium und Scaphoid sind gleich aufgebaut und werden daher nur anhand jeweils einer exemplarischen Tabelle erklärt. Angaben für das Scaphoid werden kursiv dargestellt.

	Neutral (Grad)	Flexion (Grad)	Extension(Grad)	Uln.Dev. (Grad)	Rad.Dev.(Grad)
1l	0,74349	0,81206	0,63098	1,92143	0,39072
2l	1,42788	0,90869	1,2389	0,55439	1,09244
2r	1,38789	0,58534	2,53272	1,40005	1,17708
3r	2,25962	2,22185	0,79906	2,73505	0,45957
4l	0,54845	1,27264	0,4367	1,75978	0,69566
4r	1,38152	1,01009	0,5858	1,68828	0,37485
5l	0,52993	0,42397	0,73485	1,29132	0,32174
5r	0,54972	0,43478	0,89806	0,41053	0,21849
7r	1,48644	1,53964	0,87167	1,50236	0,55345

Anhand dieses Tabellentyps erfolgt die Darstellung der Bewegungsdaten des Trapezium im Anhang in den Tabellen 1-19, und die Darstellung der Bewegungsdaten des Scaphoid im Anhang in den Tabellen 19-30:

Dargestellt wird der Bewegungsumfang während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei den Handgelenkpositionen Neutral, Flexion, Extension, ulnare und radiale Deviation. Pro Tabelle kann jeweils eines der Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (nII) und starkem (nhI) Muskelzug, durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2II) oder starkem (2hI) Muskelzug in Grad abgelesen werden. Pro Experiment gibt es jeweils drei Tabellen zur Darstellung der Bewegung von Trapezium und Scaphoid in der Flexions / Extensions-, ulnaren-radialen Deviations oder Pronations - Supinationsachse.

Die Angaben zur Bewegung des Trapezium erfolgten relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid, die Angaben zur Bewegung des Scaphoid relativ zum fixierten Radius. Es sind die Bewegungsdaten der neun verwendeten Handpräparate (1l-7r, siehe hierzu Tab 3.1.1 in Kap. 3.1) ablesbar.

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	1,15	0,59	1,06	0,6	1,78	1,58	1,38	0,75
Flex.	1,02	0,58	0,91	0,53	1,13	1,02	0,8	0,57
Ext.	0,97	0,63	1,5	0,61	1,59	0,67	1,46	0,59
uln.Dev.	1,47	0,7	1,13	0,79	2,2	1,2	1,29	0,79
rad.Dev.	0,59	0,34	0,94	0,45	1	0,37	1,17	0,62

Mit diesem Tabellentyp erfolgt die Darstellung der Bewegungsdaten des Trapezium im Anhang in den Tabellen 13-15, und die Darstellung der Bewegungsdaten des Scaphoid im Anhang in den Tabellen 31-33:

Abzulesen ist die Zusammenfassung der Präparate (μ =Mittelwert) und Standardabweichung (s) in Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnarer (uln. Dev.) und radialer (rad. Dev.) Deviation des Handgelenks. Man sieht die Auflistung der Experimente (Exp.) bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (n-ll) / starken (n-hl) Muskelzug und bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2-ll) / starken (2-hl) Muskelzug. Pro Tabelle erfolgte die Darstellung des Bewegungsumfang des Trapezium (Scaphoid) um die **Flexions- / Extensions-** (Tab.13, 31), **ulnaren-radialen Deviations-**(Tab.14, 32) und der **Pronations - Supinationsachse** (Tab.15, 33) in Grad.

Anhand dieser Tabellen lassen sich die Bewegungsdaten der Abbildungen in Kap.4.1. (Trapezium) und 4.2 (*Scaphoid*) und in Kap.4.1.5 (Trapezium) und 4.2.5 (*Scaphoid*) ablesen.

Die Darstellung der Translationsdaten erfolgte in gleicher Weise in den Tabellen 16-18 (Trapezium) und *Tab.34-36 (Scaphoid)*:

Zu sehen ist die Zusammenfassung der Präparate (μ =Mittelwert) und Standardabweichung (s) in Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnare (uln. Dev.) und radiale (rad. Dev.) Deviation des Handgelenks. Aufgelistet wurden die Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (n-ll) / starken (n-hl) Muskelzug und bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2-ll) / starken (2-hl) Muskelzug.

Der Bewegungsumfang des Trapezium (*Scaphoid*) entlang der Flexions- / Extensionsachse, was einer **ulnaren-radialen Translation** entspricht können in den Tabellen 16 (Trapezium) und 34 (Scaphoid) abgelesen werden. Der Bewegungsumfang entlang der ulnaren-radialen Deviationsachse, was einer **dorso-palmaren Translation** entspricht kann in den Tabellen 17 (Trapezium) und 35 (Scaphoid) abgelesen werden. Der Bewegungsumfang entlang der Pronations – Supinationsachse, was einer **distalen-proximale Translation** entspricht kann in den Tabellen 18 (Trapezium) und 36 (Scaphoid) abgelesen werden. Die Angaben erfolgten in Millimetern.

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	-1,12	-0,68	-1,74	-0,37	0,02	0,32	-0,67	0,88
2l	0,76	-0,28	-0,32	-0,26	-0,59	-0,72	-0,74	-0,42
2r	-1,46	-0,47	-1,22	-0,52	-1,05	-0,71	-1,81	-0,62
3r	-0,03	-0,18	0,21	-0,34	2,23	-0,49	-0,16	-0,12
4l	0,37	0,52	0,27	0,85	-1,88	-0,51	-0,59	0,07
4r	0,38	-0,08	-0,85	-0,59	2,39	1,77	1	0,56
5l	-0,47	-0,53	-1,78	-1,07	-0,44	-0,53	-0,45	-0,24
5r	0,08	0,31	0,06	0,16	-0,14	-0,08	-0,07	0
7r	0,72	-0,26	0,55	-0,02	0,09	-0,58	0,78	0,15
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	-2,11	0,2	-3,08	1,85	-1,25	1,73	0,09	3,69
2l	-0,77	0,26	-0,02	0,53	0,12	0,68	-0,22	1,17
2r	-1,08	-0,13	-0,1	0,28	-0,09	0,12	-0,07	0,59
3r	-1,25	0,93	-2,25	0,38	-4,4	0,01	-2,47	0,39
4l	0,25	-1,49	-0,2	-0,29	2,16	-3,32	1,13	-0,82
4r	-0,88	0,18	-0,66	0,17	-1	0,76	-1,5	0,13
5l	-1,3	0,05	-0,09	0,49	-0,48	-0,16	-0,3	0,07
5r	-0,15	-0,22	0,08	0,08	0,74	0,98	0,43	0,14
7r	0,07	0,71	-0,51	0,27	0,15	0,32	-0,59	0,42

Mit diesem Tabellentyp erfolgt die Darstellung der Bewegungsdaten des Trapezium im Anhang in den Tabellen 37-41, und die Darstellung der Bewegungsdaten des Scaphoid im Anhang in den Tabellen 44-48:

In der oberen Hälfte der Tabellen sind die Positionen des Trapezium (*Scaphoid*) relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (*relativ zum fixierten Radius*) in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) abzulesen. Die Positionen des Trapezium (*Scaphoid*) in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 sind in der unteren Hälfte abzulesen. Es sind die Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (nll) bzw. starkem (nhl) Muskelzug und durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2ll) bzw. starkem Muskelzug (2hl) jeweils bei einer der fünf Handgelenkstellungen dargestellt.

Es sind die Bewegungsdaten der neun verwendeten Handpräparate (1l-7r, siehe hierzu Tab 3.1.1 in Kap. 3.1. "Material") ablesbar.

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
MK1								
Neutral μ	-0,08	-0,18	-0,54	-0,24	0,07	-0,17	-0,3	0,03
Neutral s	0,79	0,39	0,89	0,54	1,41	0,8	0,84	0,47
Extens. μ	-9,16	-8,86	-5,06	-4,7	-12,01	-11,55	-5,27	-4,9
Extens. s	11,83	12,07	8,29	8,34	10,8	10,8	7,33	7,52
Flexion μ	3,68	3,76	4,09	4,09	1,75	1,53	3,92	3,99
Flexion s	6,58	6,53	9,94	9,65	7,94	7,77	10,56	10,25
ul.Dev. μ	10,07	10,09	10,1	10,47	10,94	11,21	9,78	10,29
ul.Dev. s	11,18	10,74	12,03	11,36	14,51	14,02	13,06	12,76
ra.Dev. μ	-10,27	-10,19	-10,23	-9,96	-11,68	-11,55	-10,97	-10,66
ra.Dev. s	10,49	10,8	8,73	8,67	10,11	10,25	7,47	7,42

Mit diesem Tabellentyp erfolgt die Darstellung der Bewegungsdaten im Anhang in den Tabellen 42 (Trapezium) und 49 (Scaphoid):

Dargestellt ist die Zusammenfassung der neun Handpräparate mit Mittelwert (μ), Standardabweichung (s) jeweils in den fünf Handgelenkpositionen. Es können die Bewegungsdaten von Trapezium und Scaphoid in Extension/Flexionsrichtung, beim Trapezium in Bezug zum Scaphoid beim Scaphoid in Bezug zum Radius, bei Reposition und Opposition des Metakarpale1 abgelesen werden. Angegeben sind die Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (n-ll) bzw. starkem (n-hl) Muskelzug und durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2-ll) bzw. starkem Muskelzug (2-hl).

Anhand dieser Tabellen lassen sich die Bewegungsdaten der Abbildungen in Kap.4.3. (Trapezium; Abbildungen 4.3.1a; 4.3.2a; 4.3.3a; 4.3.4a; 4.3.5a) und 4.4. (Scaphoid; Abbildungen 4.4.1a; 4.4.2a; 4.4.3a; 4.4.4a; 4.4.5a) ablesen.

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
MK1								
Neutral μ	-0,8	0,06	-0,76	0,42	-0,45	0,13	-0,39	0,64
Neutral s	0,75	0,69	1,13	0,59	1,79	1,41	1,06	1,26
Ext. μ	6,34	6,9	2,46	2,81	6,22	6,68	2,97	3,38
Ext. s	7,14	8,61	3,81	4,48	5,83	7,71	4,05	4,26
Flex. μ	2,13	2,88	1,39	1,81	2,74	3,27	2,07	2,49
Flex. s	9,04	9,46	7,7	7,8	10,55	10,81	6,91	7,19
Ul.Dev. μ	-8,66	-8,23	-8,68	-8,18	-10,43	-9,98	-9,65	-8,84
ul.Dev. s	8,12	6,82	8,22	7,8	9,24	7,88	8,68	8,21
ra.Dev. μ	11,59	12,31	9	9,75	11,27	12,09	10,29	11,65
ra.Dev. s	12,77	13,37	12,68	13,02	14,23	14,96	11,95	12,22

Mit diesem Tabellentyp erfolgt die Darstellung der Bewegungsdaten im Anhang in den Tabellen 43 (Trapezium) und 50 (Scaphoid):

Dargestellt ist die Zusammenfassung der neun Handpräparate mit Mittelwert (μ), Standardabweichung (s) jeweils in den fünf Handgelenkpositionen. Es können die Bewegungsdaten von Trapezium und Scaphoid in ulnarer Deviation und radialer Deviation, beim Trapezium in Bezug zum Scaphoid beim Scaphoid in Bezug zum Radius, bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale1 abgelesen werden. Angegeben sind die Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (n-ll) bzw. starkem (n-hl) Muskelzug und durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2-ll) bzw. starkem Muskelzug (2-hl).

Anhand dieser Tabellen lassen sich die Bewegungsdaten der Abbildungen in Kap.4.3. (Trapezium; Abbildungen 4.3.1b; 4.3.2b; 4.3.3b; 4.3.4b; 4.3.5b) und 4.4. (Scaphoid; Abbildungen 4.4.1b; 4.4.2b; 4.4.3b; 4.4.4b; 4.4.5b) ablesen.

4 Ergebnisse

Zur Darstellung der kinematischen Ergebnisse wurde das sogenannte Schrauben-Achse- (screw axis) Konzept verwendet, welches bei kinematischen Untersuchungen am Handgelenk experimenteller Standard ist. Die Bewegung der untersuchten Karpalknochen findet als beliebige Translation entlang aller drei Raumachsen x-, y- und z- und Rotation um diese Achsen statt, bei den Angaben für das Trapezium handelt es sich um Relativbewegungen zum rechnerisch fixierten Scaphoid, beim Scaphoid um Relativbewegungen zum fixierten Radius (s. Kap.3.2.1 S.19ff.).

Zur Bewegungsanalyse des Trapeziums und Scaphoids und zur Simulation pathologischer Verhältnisse im Scapho-Trapezio-Trapezoidal (STT-) Gelenk wurden Experimente mit intakten STT-Ligamenten mit leichtem und starkem Zug auf die Sehnen der Hand und durchtrennten STT-Ligamenten mit leichtem und starkem Zug auf die Sehnen der Hand durchgeführt. Alle Experimente für jedes Präparat wurden jeweils in maximaler Flexion, Extension, ulnarer- und radialer Deviation sowie Neutralstellung des Handgelenks nach der Neutral-Null-Methode durchgeführt (s. Kap.3.2.4 S.26ff.).

Über die Umrechnung der Sensormeßdaten wurde die Bewegung des Trapeziums und des Scaphoids während eines vollen Zirkumduktionsvorganges des Metakarpale 1 ermittelt.

4.1 Bewegungsumfang des Trapeziums

Zu Beginn wurde untersucht, ob und in welchem Umfang und Modus sich eine Bewegung des Metakarpale 1 auf das Trapezium fortpflanzt. Dargestellt werden die Bewegungsumfänge in den Bewegungsrichtungen Extension - Flexion, radiale Deviation - ulnare Deviation und Supination - Pronation jeweils bezogen auf die im Scaphoid liegenden Hauptachsen. Der Bewegungsumfang ist die Summe der Gesamtbewegung, d.h. die Maximalausschläge in den jeweiligen Richtungen, die das Trapezium während eines kompletten Zirkumduktionsvorganges in Relation zum Scaphoid vollführt.

Dargestellt werden die Achsenbewegungen in Grad, d.h. die Rotation um die jeweiligen Drehachsen. Die Bewegungsausschläge in Translationsrichtung waren so gering, daß sie in der Mehrzahl unterhalb der Toleranzschwelle des Meßinstrumentes lagen. Diese liegt nach Angaben des Herstellers bei 0,13 inch oder 3,28 mm (An 1988).

Auf eine graphische Darstellung und statistische Aufarbeitung der Translationsdaten wurde verzichtet, da bei Meßwertunterschieden, die kleiner als die Toleranzschwelle sind, keine reliable Aussage zu signifikanten Unterschieden gemacht werden kann. Die Meßwerte für Translationsrichtungen lassen den Schluß zu, daß sich es um sehr kleine Bewegungsausschläge in den Translationsrichtungen gehandelt hat.

In der Beschreibung der Ergebnisse sollen jeweils die Bewegungsumfänge des Trapeziums in Extension und Flexion, sowie in ulnarer und radialer Deviationsstellung des Handgelenkes miteinander verglichen werden. Die genauen Meßwerte sind in den Tabellen des Anhangs abzulesen.

Die nachfolgenden Abbildungen und deren Beurteilung sind im Kapitel „Material und Methoden“ (Kap. 3.2.5) beschrieben und erläutert.

4.1.1 Intakte STT-Ligamente mit leichtem Muskelzug (n-II)

Bis auf die Flexions-Extensionsbewegung des Trapeziums bei der der Bewegungsumfang bei Flexionsstellung des Handgelenks etwas größer ist als in Extensionsstellung, zeigt sich in allen anderen Bewegungsrichtungen des Trapeziums, daß der Bewegungsausschlag bei Flexionsstellung geringer ist als bei Extensionsstellung des Handgelenkes, und daß ein geringerer Bewegungsumfang bei radialer Deviationsstellung als bei ulnarer Deviationsstellung zu verzeichnen ist. Hierbei besteht bei Flexions/Extensionsbewegung des Trapeziums ein signifikant geringerer Bewegungsumfang bei radialer- gegenüber bei ulnarer Deviation des Handgelenks.

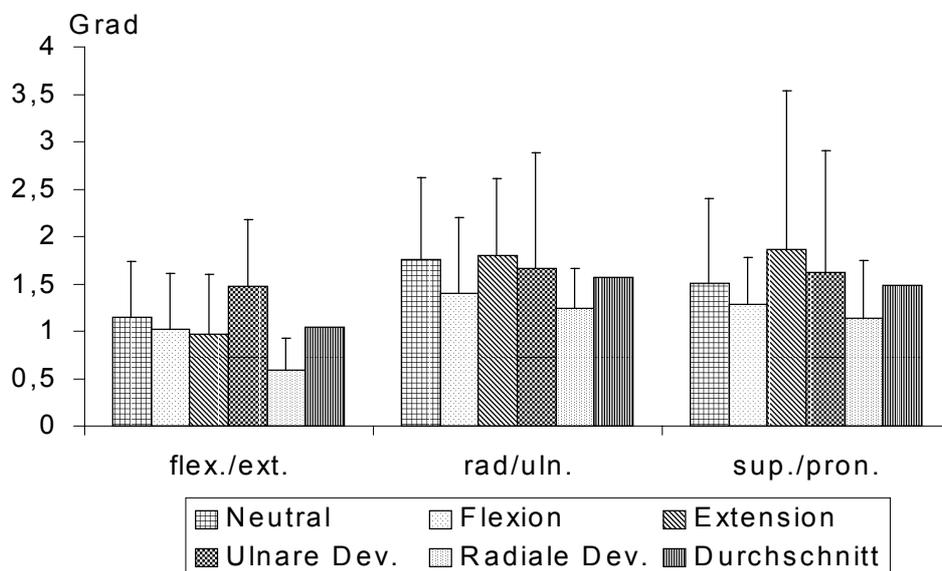


Abb. 4.1.1: Bewegungsumfang des Trapezium während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) des Trapezium, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral**, **Flexion**, **Extension**, **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 1-3, 13-15).

4.1.2 Intakte STT-Ligamente und starker Muskelzug (n=hl)

In diesem Experiment mit starkem Muskelzug bei intakten STT-Ligamenten zeigt sich, daß der Bewegungsausschlag in allen Bewegungsrichtungen des Trapeziums bei Flexionsstellung geringer ist als bei Extensionsstellung des Handgelenkes, und daß ein geringerer Bewegungsumfang bei radialer Deviationsstellung als bei ulnarer Deviationsstellung zu verzeichnen ist.

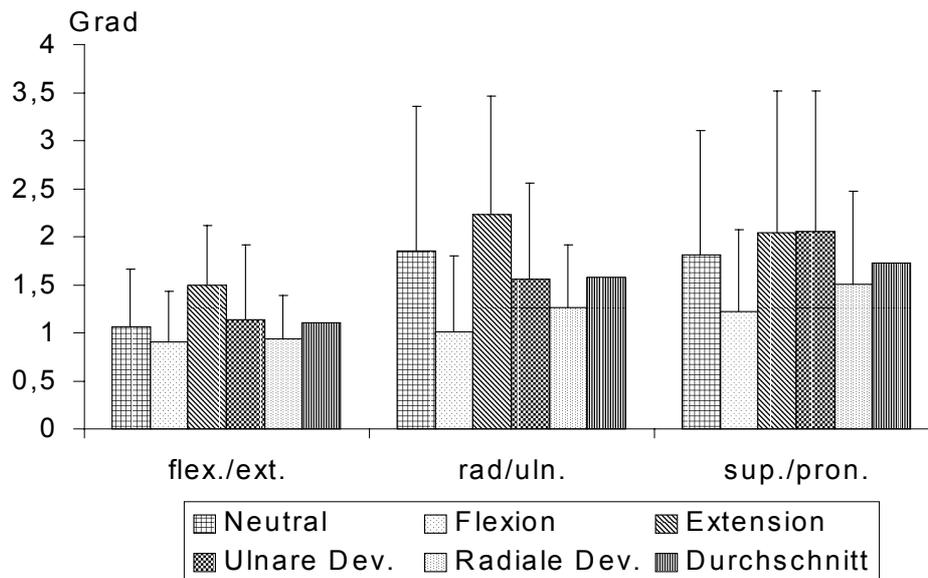


Abb. 4.1.2: Bewegungsumfang des Trapezium während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) des Trapezium, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral**, **Flexion**, **Extension**, **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 4-6, 13-15).

4.1.3 Durchtrennte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (2-II)

In diesem Experiment mit leichtem Muskelzug und durchtrennten STT-Ligamenten zeigt sich, daß der Bewegungsausschlag in allen Bewegungsrichtungen des Trapeziums bei Flexionsstellung geringer ist als bei Extensionsstellung des Handgelenkes, und daß ein geringerer Bewegungsumfang bei radialer Deviationsstellung als bei ulnarer Deviationsstellung zu verzeichnen ist. Hierbei besteht bei Flexion/Extension des Trapeziums ein signifikanter geringerer Bewegungsumfang bei radialer- gegenüber bei ulnarer Deviation des Handgelenks, bei radialer/ulnarer Deviation des Trapeziums ein signifikanter geringerer Bewegungsumfang bei Flexion gegenüber bei Extension des Handgelenks und bei Supination/Pronation des Trapeziums ein signifikanter geringerer Bewegungsumfang bei Flexion gegenüber bei Extension des Handgelenks.

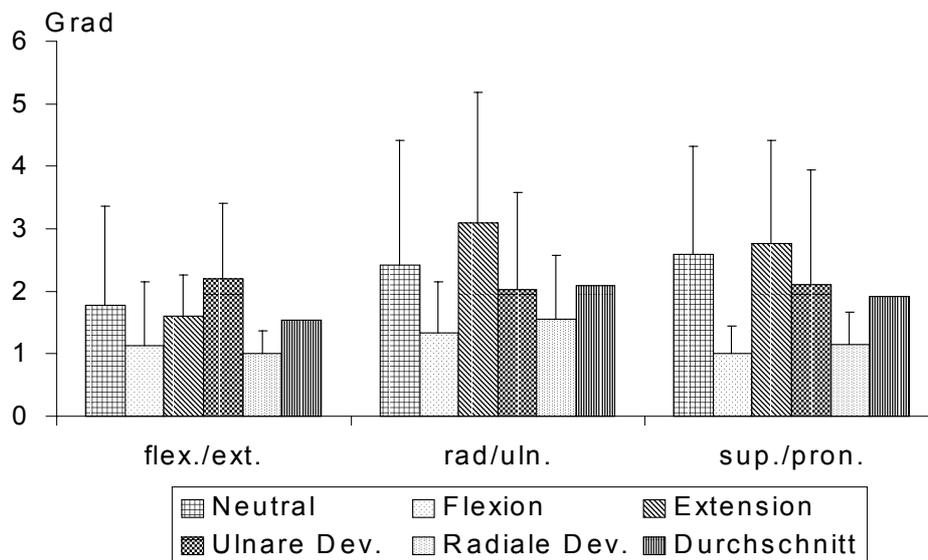


Abb. 4.1.3: Bewegungsumfang des Trapeziums während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) des Trapeziums, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral**, **Flexion**, **Extension**, **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 7-9, 13-15).

4.1.4 Durchtrennte STT-Ligamente und starker Muskelzug (2-hl)

In diesem Experiment mit starkem Muskelzug und durchtrennten STT-Ligamenten zeigt sich, daß der Bewegungsaus Schlag in allen Bewegungsrichtungen des Trapeziums bei Flexionsstellung geringer ist als bei Extensionsstellung des Handgelenks. Darüberhinaus kann ein geringerer Bewegungsumfang bei radialer Deviationsstellung als bei ulnarer Deviationsstellung bei Flexion/Extension und Supination/Pronation des Trapeziums zu verzeichnet werden. Der Bewegungsumfang in radialer-ulnarer Bewegungsrichtung des Trapeziums ist in radialer Deviationsstellung unwesentlich größer als in ulnarer Deviationsstellung des Handgelenks. In allen Bewegungsrichtungen des Trapeziums besteht ein signifikanter geringerer Bewegungsumfang bei Flexion als bei Extension des Handgelenks.

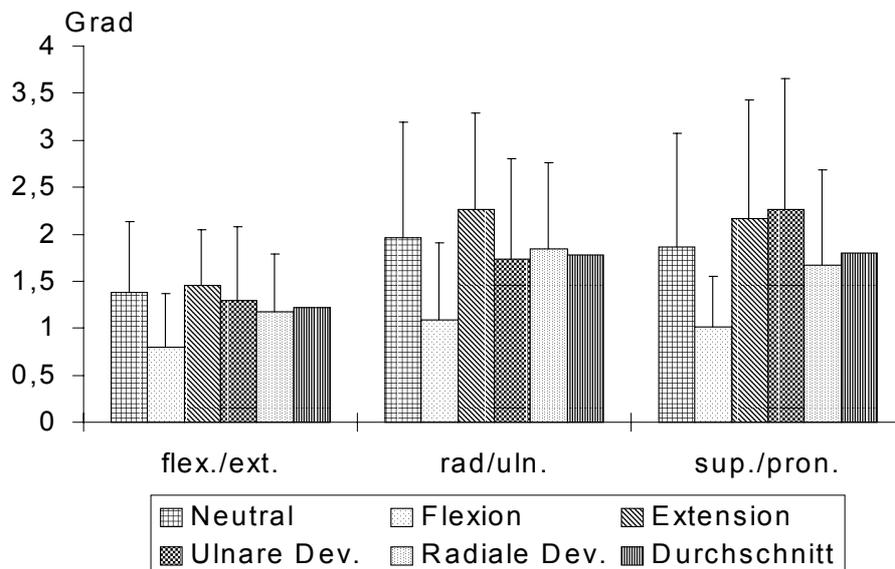


Abb. 4.1.4: Bewegungsumfang des Trapeziums während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei durchtrennten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) des Trapeziums, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral**, **Flexion**, **Extension**, **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 10-12, 13-15).

4.1.5 Bewegungsumfänge des Trapeziums in den Handgelenkpositionen

Im folgenden Abschnitt sollen die einzelnen Experimente jeweils in den fünf verschiedenen Handgelenkpositionen dargestellt werden. Hierbei wurde einerseits der Einfluß, der von

intakten und durchtrennten Ligamenten auf den Bewegungsumfang ausgeübt wird, jeweils bei leichtem und starkem Muskelzug (NLL/2LL; NHL/2HL) andererseits der Einfluß, der von leichtem und starkem Muskelzug auf den Bewegungsumfang ausgeübt wird jeweils bei intakten und durchtrennten Ligamenten (NLL/NHL; 2LL/2HL), miteinander verglichen und statistisch ausgewertet.

Der Bewegungsumfang des Trapeziums bei Neutralstellung des Handgelenks ist in Extensions/Flexionsrichtung des Trapeziums bei intakten Ligamenten (n-II verglichen mit n-hI) und starkem Muskelzug geringfügig kleiner als bei leichtem Muskelzug, in den beiden anderen Bewegungsrichtungen des Trapeziums verhält es sich umgekehrt. Bei durchtrennten Ligamenten (2-II verglichen mit 2-hI) ist in allen Bewegungsrichtungen bei starkem Muskelzug ein geringerer Bewegungsumfang zu verzeichnen. Bei leichtem (n-II verglichen mit 2-II) ebenso wie bei starkem Muskelzug (n-hI verglichen mit 2-hI) ist der Bewegungsumfang des Trapeziums in allen Bewegungsrichtungen bei durchtrennten Ligamenten größer als bei intakten Ligamenten (signifikant bei der Supination/Pronation des Trapeziums und leichtem Muskelzug).

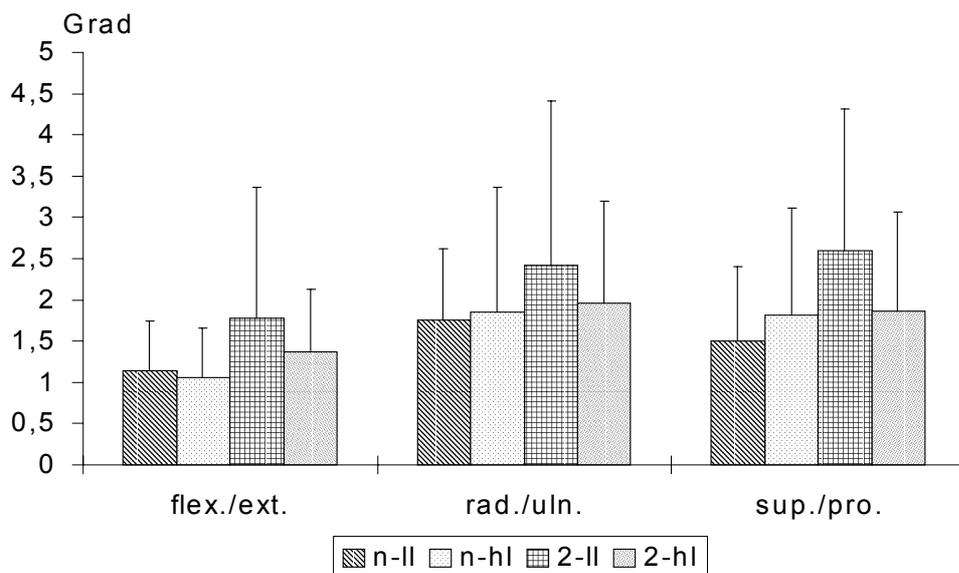


Abb. 4.1.5a: Bewegungsumfang des Trapezium während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und Neutralstellung des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Trapezium erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hI), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) **und mit starkem Muskelzug** (2-hI) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 1-15).

Bei Flexionsstellung des Handgelenks zeigt das Trapezium folgendes Bewegungsverhalten: Bei intakten Ligamenten (n-II verglichen mit n-hI) ist bei starkem Muskelzug der Bewegungsumfang geringer als bei leichtem Muskelzug. Bei durchtrennten Ligamenten (2-II verglichen mit 2-hI) verhält es sich für die Bewegungsrichtungen Flexion/Extension und Radiale/Ulnare- Deviation des Trapeziums ebenso, während in der Supinations/Pronationsrichtung bei starkem Muskelzug ein geringfügig größerer Bewegungsumfang als bei leichtem Muskelzug zu verzeichnen ist. Bei leichtem Muskelzug (n-II verglichen mit 2-II) ist in radialer/ulnarer Deviation und Supination/Pronation des Trapeziums bei intakten Ligamenten ein geringerer Bewegungsumfang als bei durchtrennten Ligamenten zu verzeichnen, in der Flexions/Extensionsrichtung des Trapeziums verhält es sich umgekehrt (signifikant bei der Supination/Pronation des Trapeziums). Bei starkem Muskelzug (n-hI verglichen mit 2-hI) ist bei intakten Ligamenten und Flexion/Extension und Supination/Pronation des Trapeziums ein größerer Bewegungsumfang als bei durchtrennten Ligamenten zu verzeichnen, in der radialen/ulnaren Deviationsrichtung des Trapeziums verhält es sich umgekehrt.

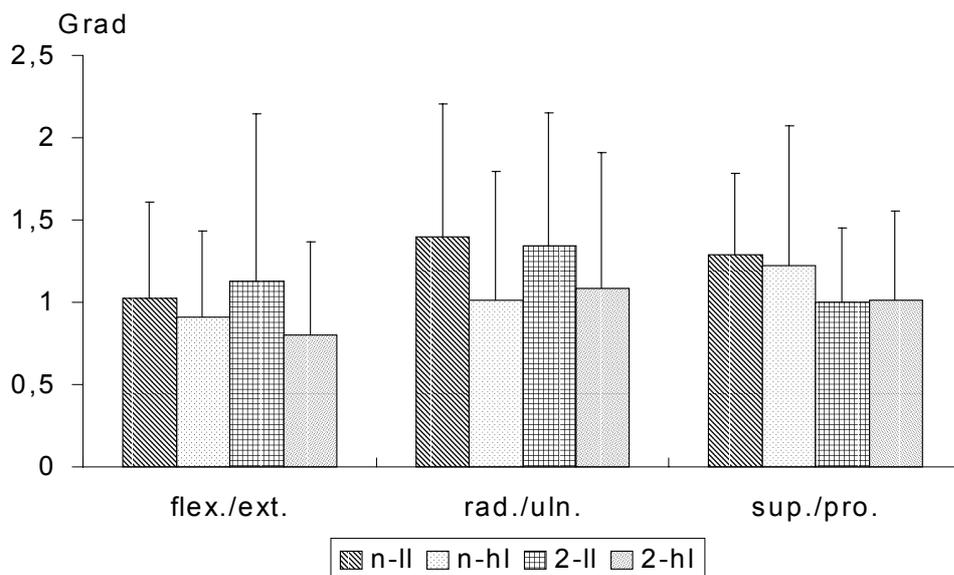


Abb. 4.1.5b: Bewegungsumfang des Trapezium während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und Flexion des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Trapezium erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hI), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) und **mit starkem Muskelzug** (2-hI) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 1-15).

Bei Extensionsstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Trapezium: Bei intakten Ligamenten (n-II verglichen mit n-hI) und leichtem Muskelzug ist der Bewegungsumfang geringer als bei starkem Muskelzug. Bei durchtrennten Ligamenten (2-II verglichen mit 2-hI) ist der Bewegungsumfang bei starkem Muskelzug geringer als bei leichtem Muskelzug. Bei leichtem Muskelzug (n-II verglichen mit 2-II) ist der Bewegungsumfang bei intakten Ligamenten geringer als bei durchtrennten Ligamenten (signifikant bei allen Bewegungsrichtungen des Trapeziums). Während bei starkem Muskelzug (n-hI verglichen mit 2-hI) der Bewegungsumfang in Flexions/Extensionsrichtung bei durchtrennten Ligamenten kleiner als bei intakten Ligamenten ist, besteht in den anderen Bewegungsrichtungen ebenso wie bei leichtem Muskelzug bei intakten Ligamenten ein geringerer Bewegungsumfang als bei durchtrennten Ligamenten.

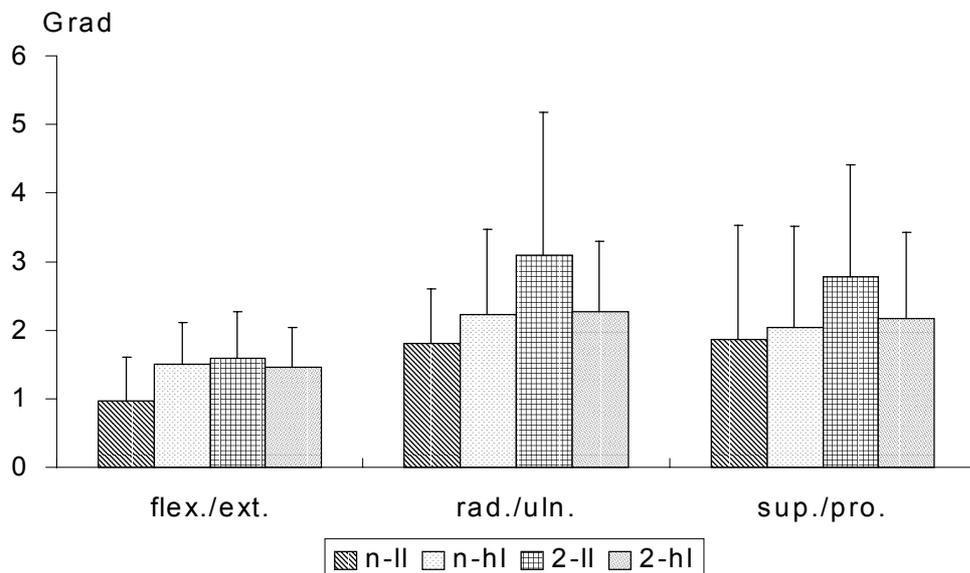


Abb. 4.1.5c: Bewegungsumfang des Trapezium während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und Extension des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Trapezium erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hI), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) **und mit starkem Muskelzug** (2-hI) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 1-15).

Bei ulnarer Deviationsstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Trapezium: Bei intakten (n-II verglichen mit n-hl) und durchtrennten Ligamenten (2-II verglichen mit 2-hl) ist der Bewegungsumfang bei starkem Muskelzug in Flexions/Extensions- und radialer/ulnarer Deviationsrichtung des Trapeziums geringer als bei leichtem Muskelzug. Bei Supination/Pronationsrichtung ist der Bewegungsumfang bei intakten Ligamenten geringer. Bei leichtem (n-II verglichen mit 2-II) und bei starkem (n-hl verglichen mit 2-hl) Muskelzug zeigt sich bei intakten Ligamenten ein geringerer Bewegungsumfang als bei durchtrennten Ligamenten (signifikant bei starkem Muskelzug und Flexions/Extensionsbewegung des Trapeziums).

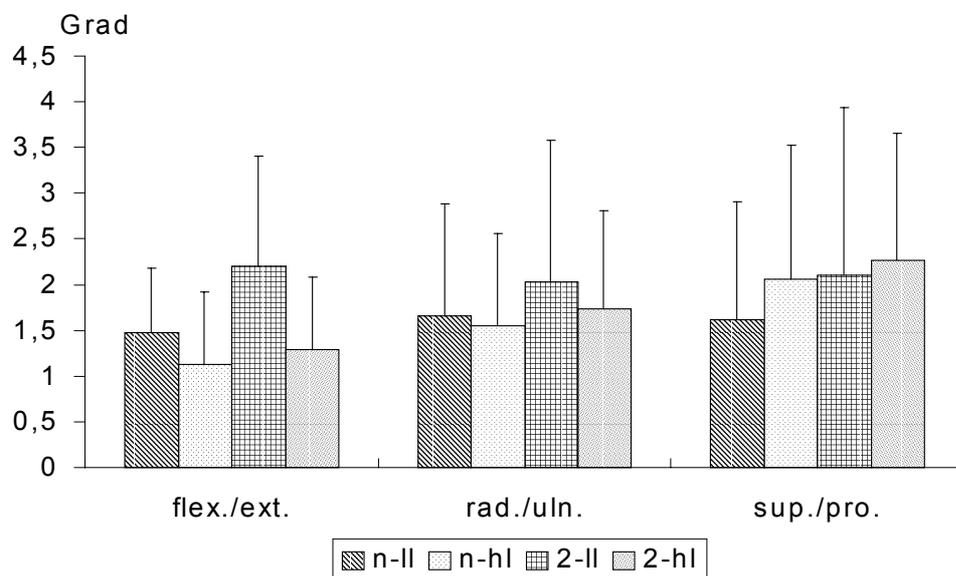


Abb. 4.1.5d: Bewegungsumfang des Trapezium während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und ulnarer Deviation des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Trapezium erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hl), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) und **mit starkem Muskelzug** (2-hl) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 1-15).

Bei radialer Deviationsstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Trapezium: Bei intakten (n-II verglichen mit n-hI) und bei durchtrennten (2-II verglichen mit 2-hI) Ligamenten ist der Bewegungsumfang bei leichtem Muskelzug geringer als bei starkem Muskelzug. Bei leichtem (n-II verglichen mit 2-II) und bei starkem (n-hI verglichen mit 2-hI) Muskelzug ist der Bewegungsumfang bei intakten Ligamenten geringer als bei durchtrennten Ligamenten (signifikant für Flexions/Extensionsbewegungen des Trapeziums).

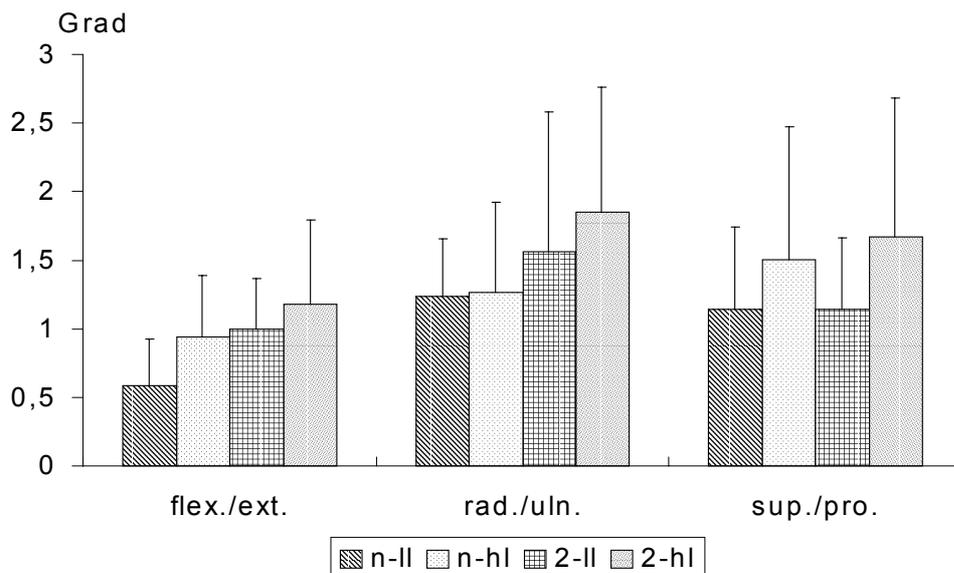


Abb. 4.1.5e: Bewegungsumfang des Trapezium während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und radialer Deviation des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Trapezium erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hI), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) **und mit starkem Muskelzug** (2-hI) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid (Bewegungsdaten des STT-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 1-15).

4.2 Bewegungsumfang des Scaphoids

Zu Beginn wurde untersucht ob sich eine Bewegung des Metakarpale 1 überhaupt auf das Scaphoid überträgt. Dargestellt werden die Bewegungsumfänge in den beiden Bewegungsrichtungen Extension / Flexion, radiale / ulnare Deviation und Supination / Pronation, jeweils bezogen auf die im Radius liegenden Hauptachsen. Der Bewegungsumfang ist die Summe der Gesamtbewegung, d.h. die Maximalausschläge in den jeweiligen Richtungen, die das Scaphoid während eines vollen Zirkumduktionsvorgangs in Relation zum Radius vollführt.

Es werden nur die Achsenbewegungen in Grad dargestellt, d.h. die Rotation um die jeweiligen Drehachsen. Die Bewegungsausschläge in Translationsrichtung waren derart gering, daß sie in der Mehrzahl unterhalb der Toleranzschwelle des Meßinstrumentes lagen. Diese liegt nach Angaben des Herstellers bei bei 0,13 inch oder 3,28 mm (An 1988).

Auf eine graphische Darstellung und statistische Aufarbeitung der Translationsdaten wurde verzichtet, da bei Meßwertunterschieden, die kleiner als die Toleranzschwelle sind, keine reliable Aussage zu signifikanten Unterschieden gemacht werden kann. Die Meßwerte für Translationsrichtungen lassen aber den Schluß zu, daß sich es um sehr kleine Bewegungsausschläge in den Translationsrichtungen handelt.

In der Beschreibung der Ergebnisse sollen jeweils die Bewegungsumfänge des Scaphoids Extension und Flexion, sowie in ulnarer und radialer Deviationsstellung des Handgelenkes miteinander verglichen werden. Die genauen Meßwerte sind in den Tabellen des Anhangs abzulesen.

Die nachfolgenden Abbildungen und deren Beurteilung sind im Kapitel „Material und Methoden“ (3.2.5) beschrieben und erläutert.

4.2.1 Intakte Ligamente mit leichtem Muskelzug (n-II)

Es konnte gezeigt werden, daß in allen Bewegungsrichtungen des Scaphoids der Bewegungsumfang bei radialer Deviationsstellung des Handgelenks geringer ist als in ulnarer Deviationsstellung des Handgelenks (signifikant in allen Bewegungsrichtungen des Scaphoid). In der radialen-ulnaren Deviationsrichtung des Scaphoids ist der Bewegungsumfang in Flexionsstellung geringer als in Extensionsstellung des Handgelenks. In der Flexions-Extensions und Supinations-Pronationsrichtung des Scaphoids ist dies umgekehrt, jedoch mit minimalen Unterschieden.

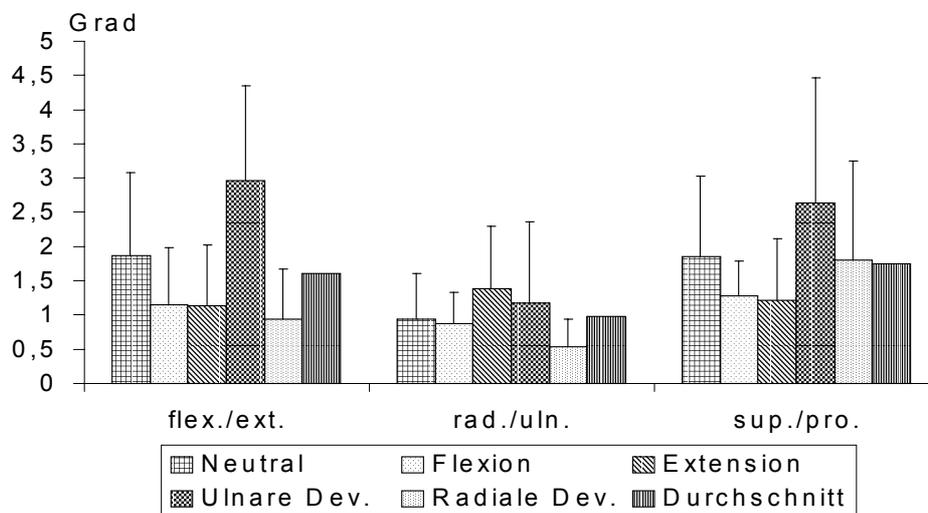


Abb. 4.1.1: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) Scaphoid, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral** , **Flexion** , **Extension** , **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 19-21, 31-33).

4.2.2 Intakte Ligamente und starker Muskelzug (n=1)

In dem Experiment mit starkem Muskelzug und intakten STT-Ligamenten konnte nachgewiesen werden, daß der Bewegungsaus Schlag in allen Bewegungsrichtungen des Scaphoids bei Flexionsstellung des Handgelenkes geringer ist als bei Extensionsstellung (signifikant bei Flexions/Extensionsbewegung und ulnarer/radialer Deviationsbewegung des Scaphoids), und daß ein geringerer Bewegungsumfang bei radialer Deviationsstellung als bei ulnarer Deviationsstellung zu verzeichnen ist (signifikant bei Flexions/Extensionsbewegung des Scaphoids).

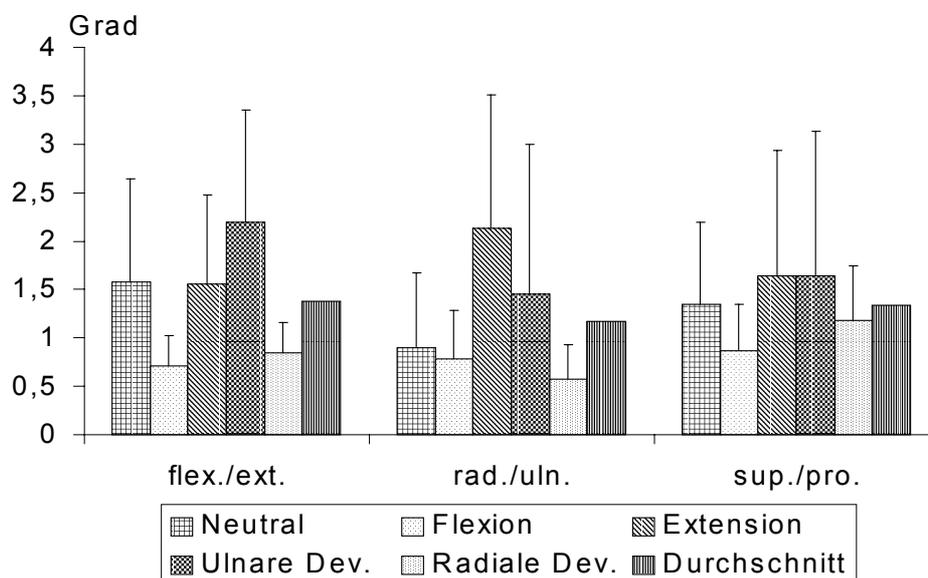


Abb. 4.1.2: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) Scaphoid, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral**, **Flexion**, **Extension**, **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 22-24, 31-33).

4.2.3 Durchtrennte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (2-II)

Bei leichtem Muskelzug und durchtrennten STT-Ligamenten zeigt ein geringerer Bewegungsaus Schlag in allen Bewegungsrichtungen des Scaphoids bei Flexionsstellung geringer ist als bei Extensionsstellung des Handgelenkes. Ebenso ist ein geringerer Bewegungsumfang bei radialer Deviationsstellung als bei ulnarer Deviationsstellung zu verzeichnen (signifikant bei Flexions/Extensions- und Supinations/Pronationsbewegungen des Scaphoid).

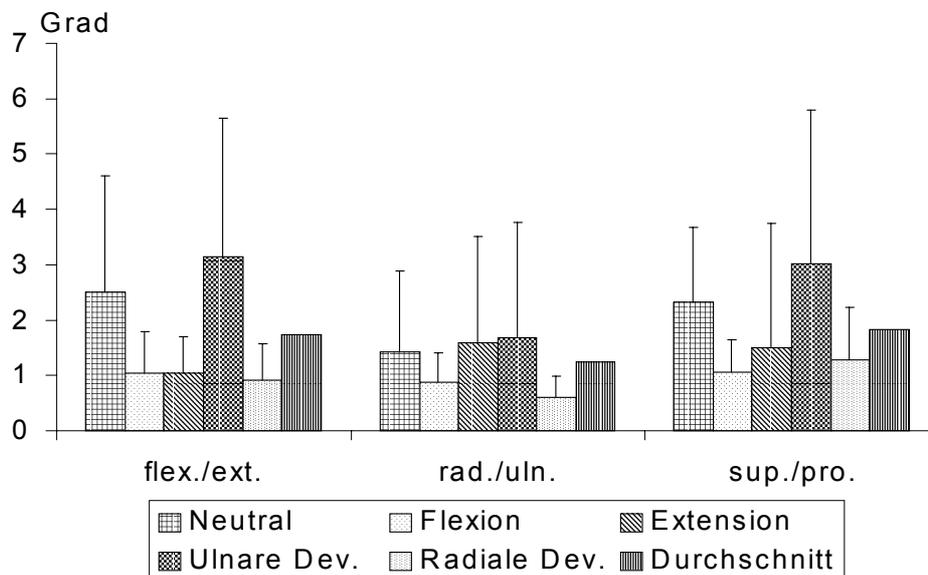


Abb. 4.1.3: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) Scaphoid, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral**, **Flexion**, **Extension**, **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 25-27, 31-33).

4.2.4 Durchtrennte STT-Ligamente und starker Muskelzug (2-hl)

Bei starkem Muskelzug und durchtrennten STT-Ligamenten konnte in allen Bewegungsrichtungen des Scaphoids bei Flexionsstellung ein geringerer Bewegungsumfang ist als bei Extensionsstellung des Handgelenkes gemessen werden (signifikant bei Flexions/Extensionsbewegung und ulnarer/radialer Deviationsbewegung des Scaphoids). Bei radialer Deviationsstellung ist ein geringerer Bewegungsumfang als bei ulnarer Deviationsstellung zu verzeichnen (signifikant bei Flexions/Extensionsbewegung des Scaphoids).

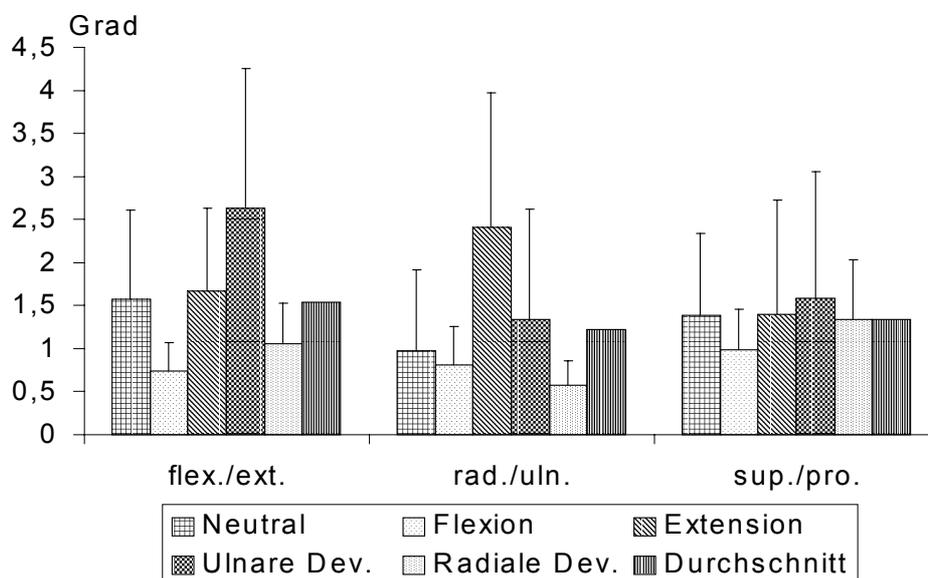


Abb. 4.1.4: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 bei durchtrennten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug. Die Bewegungsermittlung erfolgte in Bezug zur **Flexions – Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren Deviations** (rad./uln.) und **Supinations – Pronationsachse** (sup./pron.) Scaphoid, jeweils in den Handgelenkstellungen **Neutral** , **Flexion** , **Extension** , **ulnare** und **radiale Deviation**. Der Bewegungsumfang in Grad wird relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 28-30, 31-33).

4.2.5 Bewegungsumfänge des Scaphoid in den Handgelenkpositionen

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Experimente in den fünf verschiedenen Handgelenkpositionen dargestellt. Hierbei wurde einerseits der Einfluß, der von intakten und durchtrennten Ligamenten auf den Bewegungsumfang ausgeübt wird, jeweils bei leichtem und starkem Muskelzug (NLL/2LL; NHL/2HL) andererseits der Einfluß, der von leichtem und starkem Muskelzug auf den Bewegungsumfang ausgeübt wird jeweils bei intakten und durchtrennten Ligamenten (NLL/NHL; 2LL/2HL), miteinander verglichen und statistisch ausgewertet.

Bei Neutralstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Scaphoid: Bei intakten (n-II verglichen mit n-hI) und durchtrennten (2-II verglichen mit 2-hI) Ligamenten ist der Bewegungsumfang bei starkem Muskelzug geringer als bei leichtem Muskelzug (signifikant bei durchtrennten Ligamenten und Supinations / Pronationsbewegung des Scaphoids). Bei intakten Ligamenten ist der Bewegungsumfang bei leichtem (n-II verglichen mit 2-II) und starkem Muskelzug (n-hI verglichen mit 2-hI) geringer als bei durchtrennten Ligamenten.

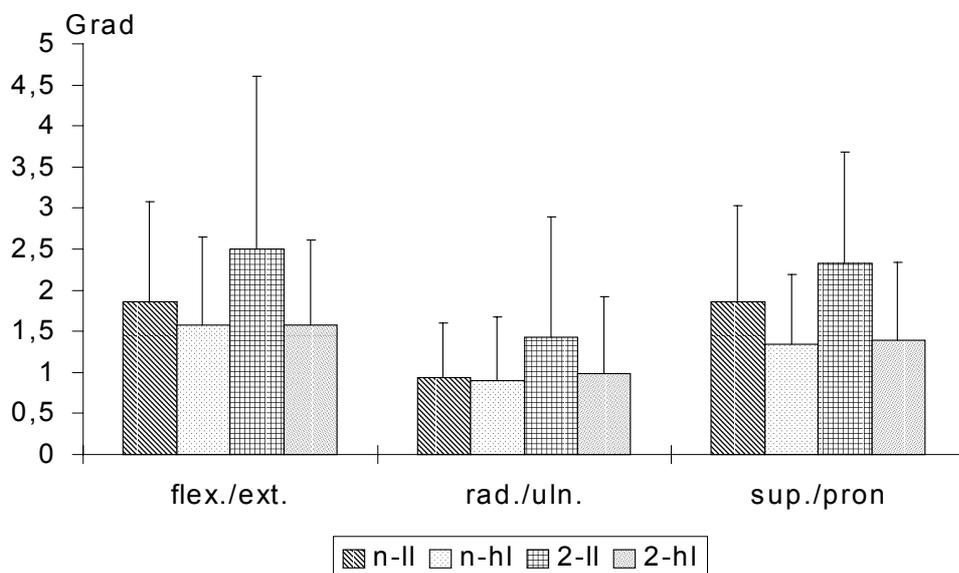


Abb. 4.2.5a: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und Neutralstellung des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Scaphoid erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hI), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) **und mit starkem Muskelzug** (2-hI) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 19-33).

Bei Flexionsstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Scaphoid: Bei intakten (n-II verglichen mit n-hl) und durchtrennten (2-II verglichen mit 2-hl) Ligamenten ist der Bewegungsumfang bei starkem Muskelzug geringer als bei leichtem Muskelzug. Bei leichtem Muskelzug (n-II verglichen mit 2-II) ist der Bewegungsumfang bei durchtrennten Ligamenten geringer, während bei starkem Muskelzug (n-hl verglichen mit 2-hl) der Bewegungsumfang bei intakten Ligamenten geringer ist.

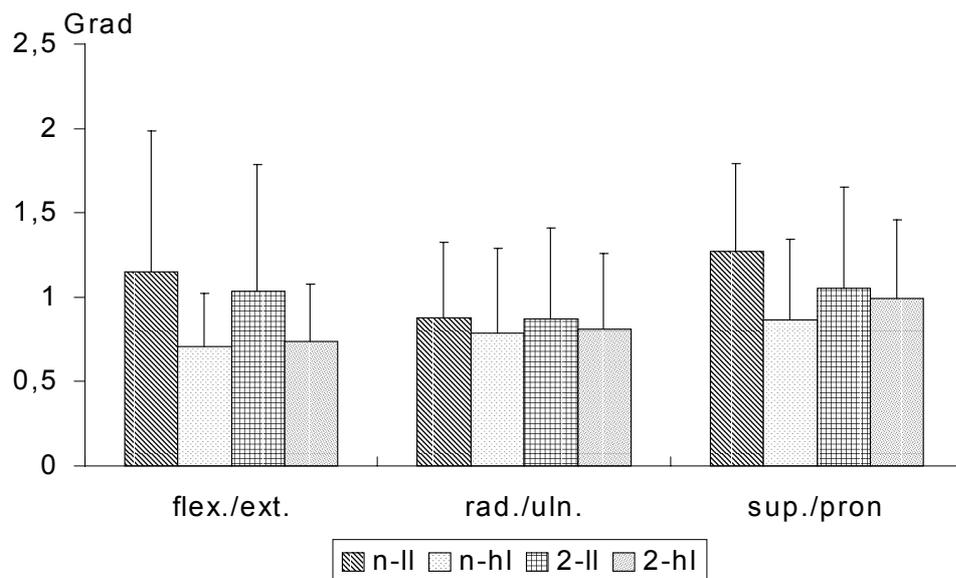


Abb. 4.2.5b: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und Flexion des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Scaphoid erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hl), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) und mit **starkem Muskelzug** (2-hl) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 19-33).

Bei Extensionsstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Scaphoid: Bei intakten Ligamenten (n-II verglichen mit n-hl) ist der Bewegungsumfang bei leichtem Muskelzug geringer als bei starkem Muskelzug. Bei durchtrennten Ligamenten (2-II verglichen mit 2-hl) ist der Bewegungsumfang in Flexions/Extensions- und radialer/ulnarer Deviationsrichtung bei leichtem Muskelzug geringer als bei starkem Muskelzug, in Supination/Pronation verhält es sich umgekehrt. Bei leichtem Muskelzug (n-II verglichen mit 2-II) ist der Bewegungsumfang in radialer/ulnarer Deviationsrichtung und bei Supination/Pronation des Scaphoids bei intakten Ligamenten geringer als bei durchtrennten Ligamenten. In Flexions/Extensionsrichtung zeigt sich entgegengesetztes Verhalten. Bei starkem Muskelzug (n-hl verglichen mit 2-hl) ist der Bewegungsumfang in Flexions/Extensions- und radialer/ulnarer Deviationsrichtung bei intakten Ligamenten geringer als bei durchtrennten Ligamenten. In Supination/Pronation zeigt sich ein umgekehrtes Bewegungsverhalten.

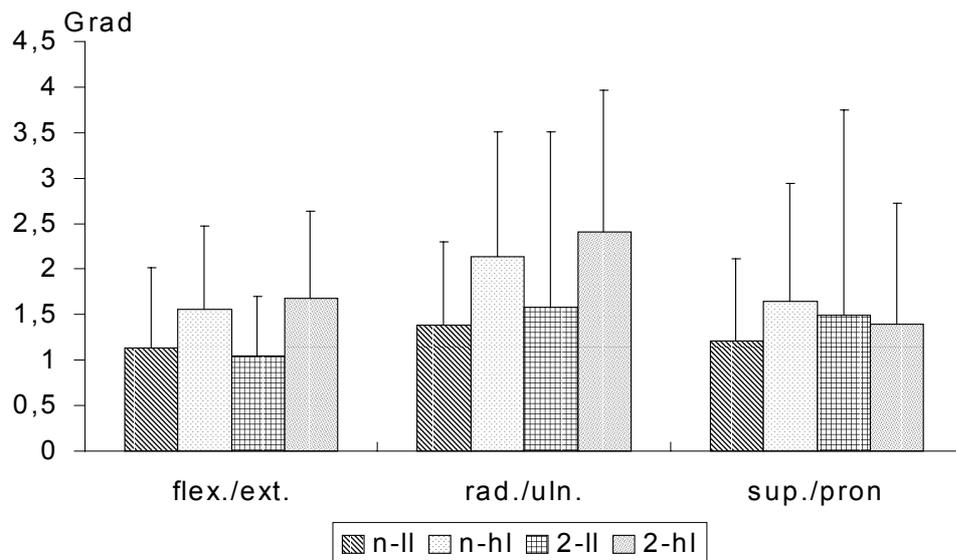


Abb. 4.2.5c: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und Extension des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Scaphoid erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hl), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) und **mit starkem Muskelzug** (2-hl) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 19-33).

Bei ulnarer Deviationsstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Scaphoid: Bei intakten Ligamenten (n-II verglichen mit n-hl) ist der Bewegungsumfang in Flexions/Extensionsrichtung sowie in Supination/Pronation bei starkem Muskelzug geringer als bei leichtem Muskelzug. In radialer/ulnarer Deviationsrichtung zeigt sich ein umgekehrtes Bewegungsverhalten. Bei durchtrennten Ligamenten (2-II verglichen mit 2-hl) ist der Bewegungsumfang bei starkem Muskelzug geringer als bei leichtem Muskelzug. Bei leichtem Muskelzug (n-II verglichen mit 2-II) ist der Bewegungsumfang bei intakten Ligamenten geringer als bei durchtrennten Ligamenten. Bei starkem Muskelzug (n-hl verglichen mit 2-hl) ist der Bewegungsumfang in Flexions/Extensionsrichtung des Scaphoids bei intakten Ligamenten geringer als bei durchtrennten Ligamenten. In radialer/ulnarer Deviation und in Supination/Pronation zeigt sich ein umgekehrtes Bewegungsverhalten.

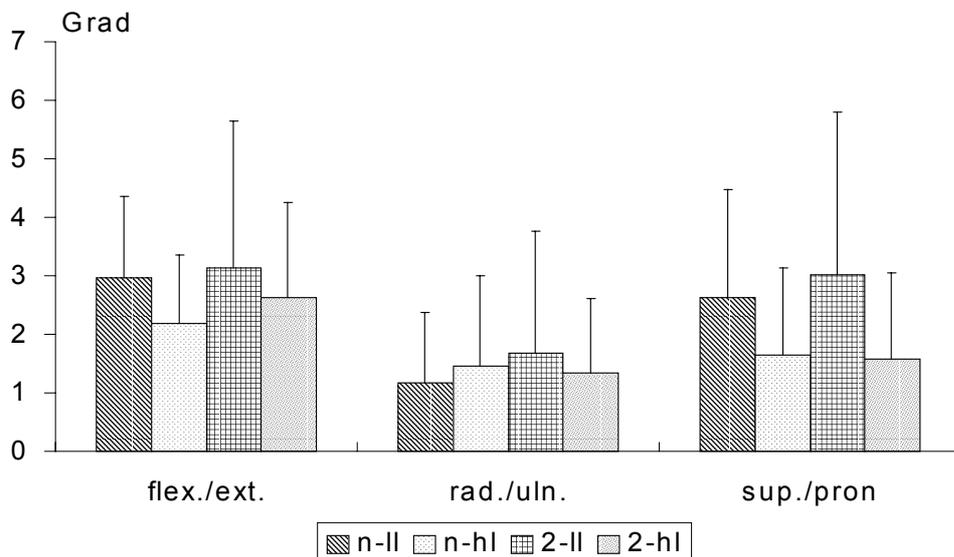


Abb. 4.2.5d: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und ulnarer Deviation des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Scaphoid erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hl), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) und **mit starkem Muskelzug** (2-hl) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 19-33).

Bei radialer Deviationsstellung des Handgelenks zeigt sich folgendes Bewegungsverhalten des Scaphoid: Bei intakten Ligamenten (n-II verglichen mit n-hl) ist der Bewegungsumfang in Flexions-/Extensionsrichtung und in Supination/Pronation des Scaphoids bei starkem Muskelzug geringer als bei leichtem Muskelzug. In radialer/ulnarer Deviationsrichtung zeigt sich ein umgekehrtes Verhalten. Bei durchtrennten Ligamenten (2-II verglichen mit 2-hl) ist der Bewegungsumfang in radialer/ulnarer Deviationsrichtung bei starkem Muskelzug geringer als bei leichtem Muskelzug, bei Flexions/Extensionsrichtung und Supination/Pronation zeigt sich ein umgekehrtes Bewegungsverhalten. Bei leichtem Muskelzug (n-II verglichen mit 2-II) ist der Bewegungsumfang in Flexions/Extensionsrichtung und radialer/ulnarer Deviationsrichtung des Scaphoids bei durchtrennten Ligamenten geringer als bei intakten Ligamenten, in Supination/Pronation verhält es sich umgekehrt. Bei starkem Muskelzug (n-hl verglichen mit 2-hl) ist der Bewegungsumfang bei durchtrennten Ligamenten größer als bei intakten Ligamenten.

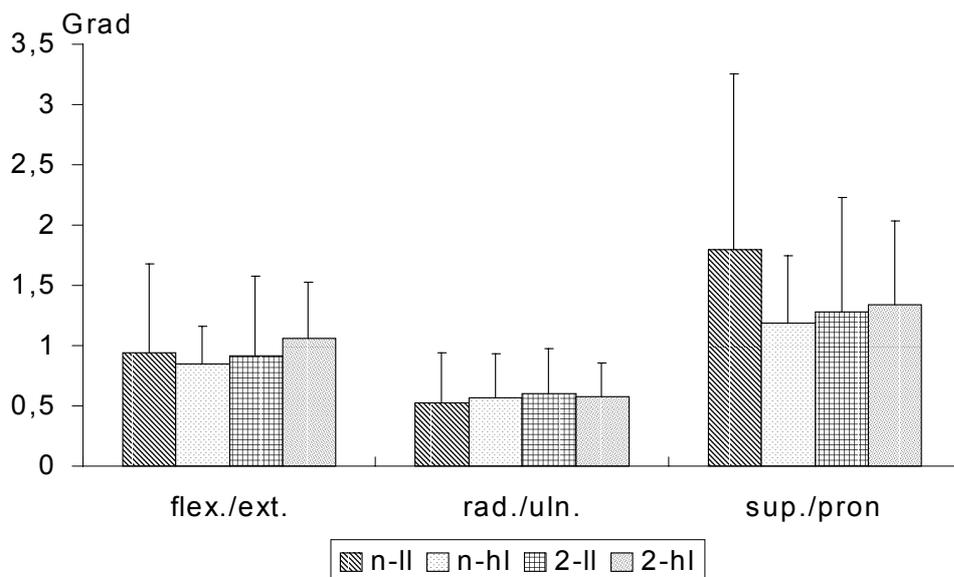


Abb. 4.2.5e: Bewegungsumfang des Scaphoid während einer vollen Zirkumduktion des Metakarpale 1 und radialer Deviation des Handgelenks. Die Bewegungsdaten wurden in Bezug zur **Flexions - Extensions** (flex./ext.), **radialen - ulnaren** (rad./uln.) **Deviations** und **Supinations - Pronationsachse** (sup./pro.) des Scaphoid erhoben. Es werden die Experimente bei **intakten STT-Ligamenten und leichtem** (n-II) Muskelzug sowie **starkem Muskelzug** (n-hl), und bei **durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug** (2-II) **und mit starkem Muskelzug** (2-hl) dargestellt. Der Bewegungsumfang wurde in Grad jeweils relativ zum fixierten Radius (Bewegungsdaten des RS-Gelenks) dargestellt (Anhang Tab. 19-33).

4.3 Stellung des Trapezium in Relation zum Scaphoid in Reposition / Opposition und in Adduktion / Abduktion des Daumens

Im folgenden wird dargestellt inwieweit sich die Bewegung des Metakarpale 1 reproduzierbar auf das Trapezium fortpflanzt. Dabei wird die Stellung des Trapeziums jeweils in Reposition und Opposition sowie in Adduktion und Abduktion des Daumens beschrieben.

Die Repositions-Oppositionsbewegung des Metakarpale 1, und somit des Daumens, entspricht einer Extensions-Flexionsbewegung des Trapezium, die Adduktions-Abduktionsbewegung entspricht einer ulnaren-radialen Deviation des Trapezium. Um die Überleitung einer Bewegung des Metakarpale 1 auf das Trapezium zu untersuchen wird im folgenden die **Repositions-Oppositionsbewegung** des Daumens der **Extensions-Flexionsbewegung**, sowie die **Adduktions-Abduktionsbewegungen** des Daumens der **ulnaren - radialen Deviationsbewegungen** des Trapeziums gegenübergestellt.

Die nachfolgenden Abbildungen sind im Kapitel „Material und Methoden“ (3.2.5) beschrieben und erläutert.

4.3.1 Neutralposition des Handgelenks

In Neutralstellung des Handgelenks ist das Trapezium bei leichtem Muskelzug (nII, 2II) und Reposition des Metakarpale 1 mehr flektiert als bei opponiertem Metakarpale 1. Bei starkem Muskelzug (nhI, 2hI) ist das Trapezium bei Reposition des MK1 in einer stärker extendierten Position als bei Opposition.

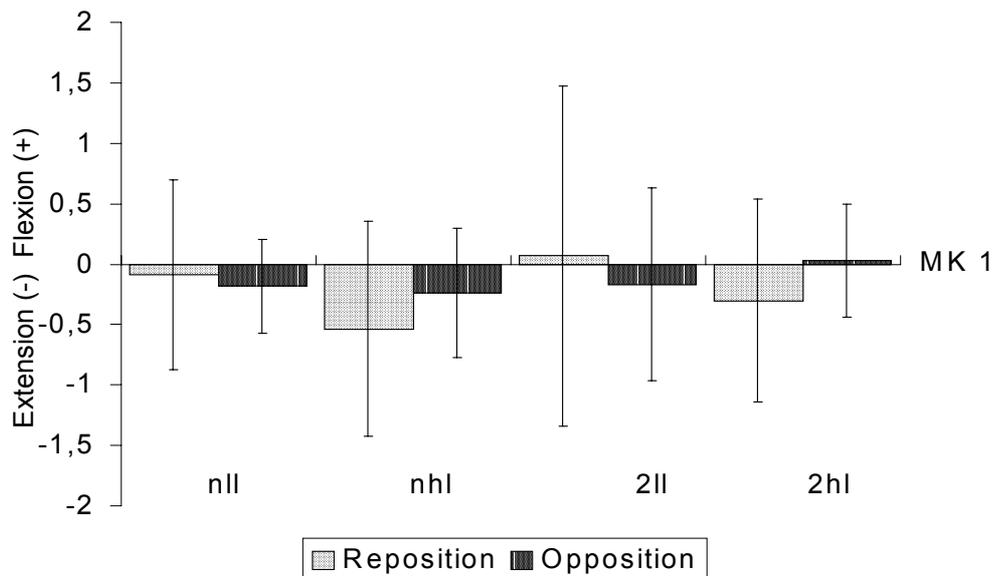


Abb. 4.3.1a: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Neutralstellung des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 37, 42).

Bei Abduktion - Adduktion des MK1 und Neutralstellung des Handgelenks steht das Trapezium jeweils bei Abduktion in radialer Deviationsstellung, bei Adduktion in ulnarer Deviationsstellung.

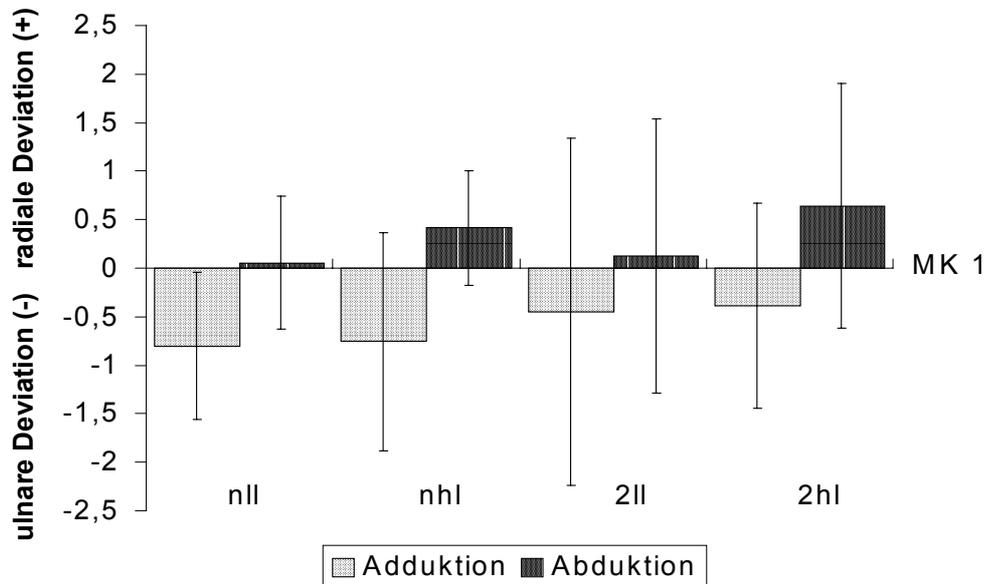


Abb.4.3.1b: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Scaphoid in Neutralstellung des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 37, 43).

4.3.2 Maximale Flexion des Handgelenks

In maximaler Flexion des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in einer stärker flektierten Position. Bei den Versuchen nII, nHI und 2hI steht das Trapezium bei Opposition des MK1 in mehr flektierter Stellung als bei Reposition (NHL gleiche Position). Beim Versuch 2II zeigt sich, daß das Trapezium in Opposition des MK1 dezent mehr in Flexion als bei Reposition des MK1 steht.

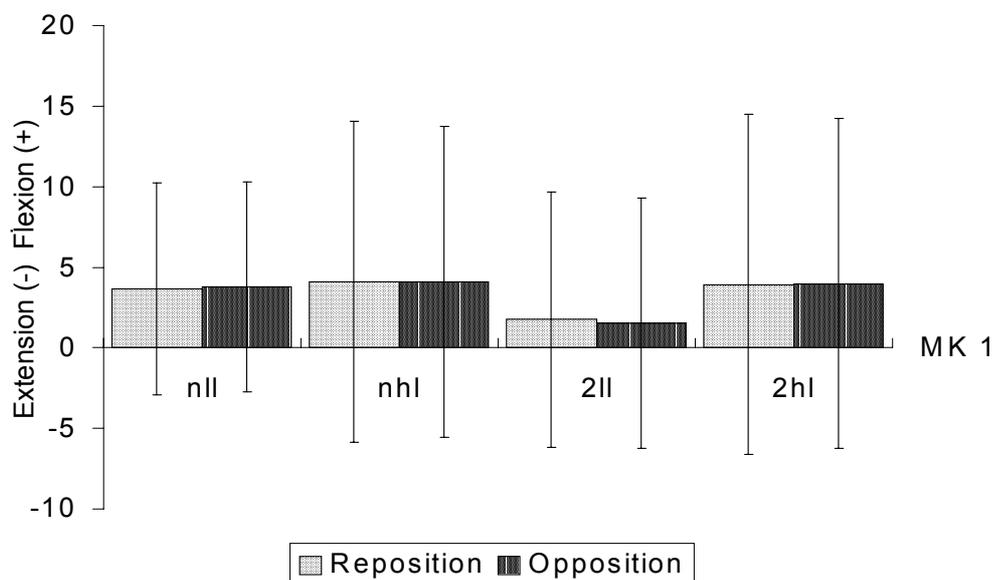


Abb. 4.3.2a: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Flexion des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 38, 42).

In maximaler Flexionsstellung des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in einer radialen Deviationsstellung. Bei Abduktions-Adduktionsstellung des MK1 steht das Trapezium jeweils bei Abduktion stärker in radialer Deviationsstellung als bei Adduktion.

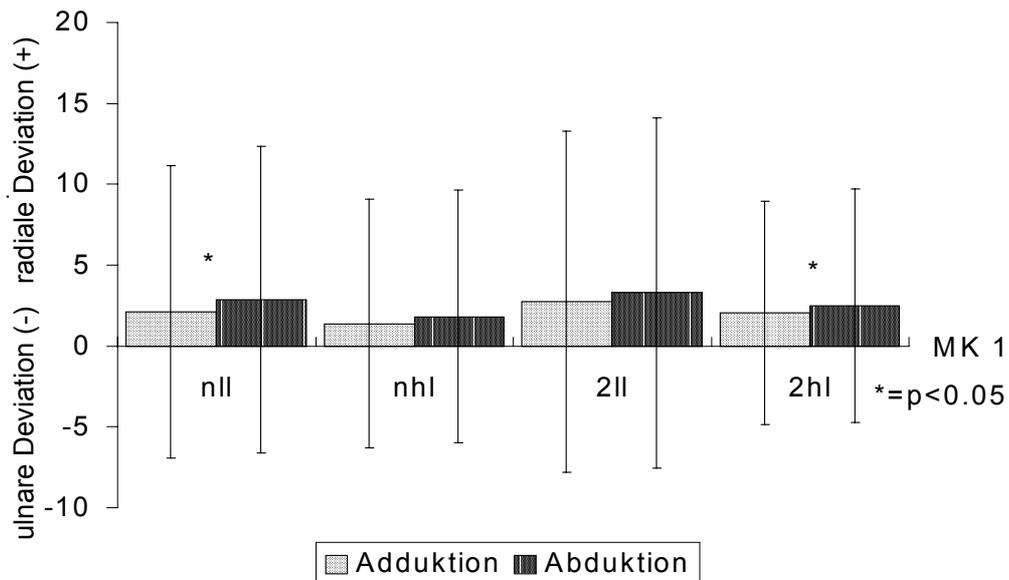


Abb.4.3.2b: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Scaphoid in Flexion des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 38, 43).

4.3.3 Maximale Extension des Handgelenks

In maximaler Extension des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in einer stärker extendierten Position. Bei Reposition des MK1 steht das Trapezium mehr in Extension als bei Opposition des MK1.

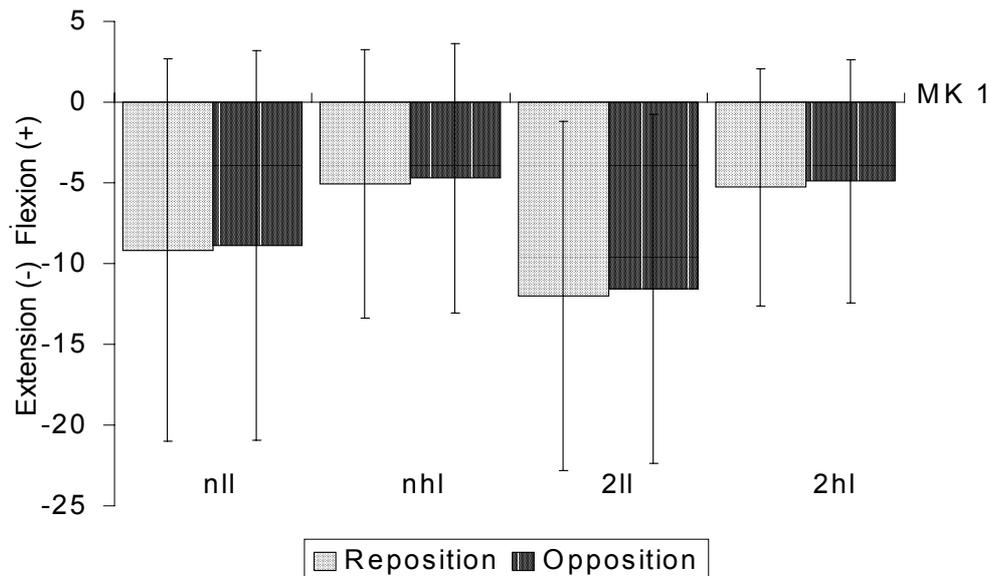


Abb. 4.3.3a: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Extension des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 39, 42).

In maximaler Extension des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in einer radialen Deviationsstellung. Bei Abduktions-Adduktionsstellung des MK1 steht das Trapezium jeweils bei Abduktion in mehr radialer Deviationsstellung als bei Adduktion.

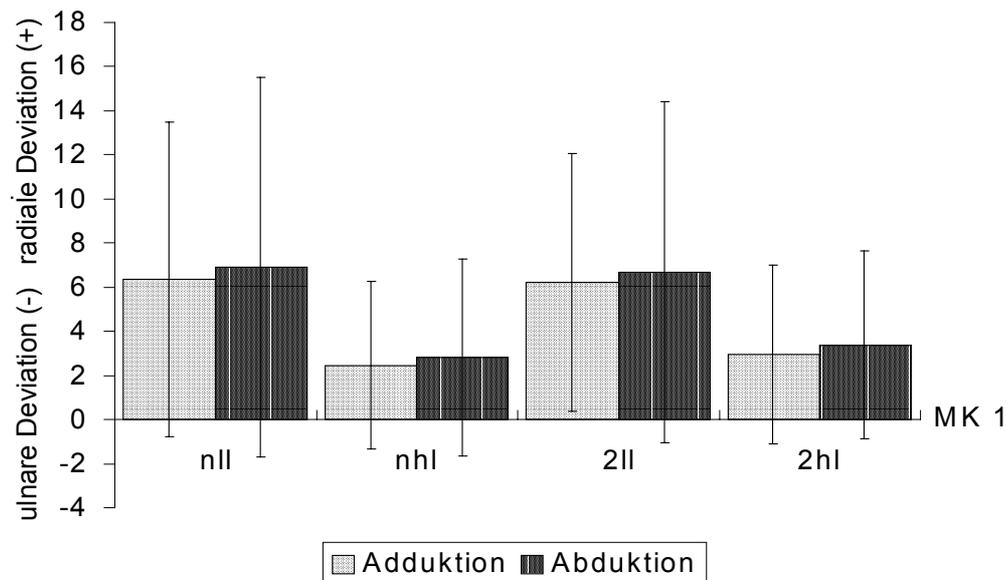


Abb.4.3.3b: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Scaphoid in Extension des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 39, 43).

4.3.4 Maximale ulnare Deviation des Handgelenks

In maximaler ulnarer Deviation des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in einer stärker flektierten Position. Bei Opposition des MK1 steht das Trapezium mehr in Flexion als bei Reposition des MK1.

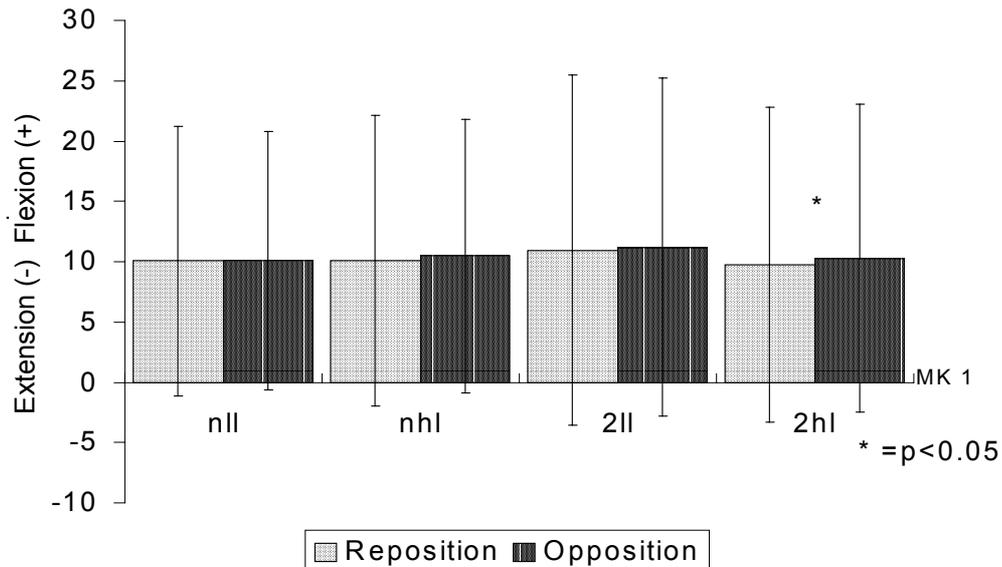


Abb. 4.3.4a: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in ulnarer Deviation des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 40, 42).

In maximaler ulnarer Deviation des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in einer ulnaren Deviation. Bei Abduktions-Adduktionsstellung des MK1 steht das Trapezium jeweils bei Adduktion in mehr ulnarer Deviation als bei Abduktion.

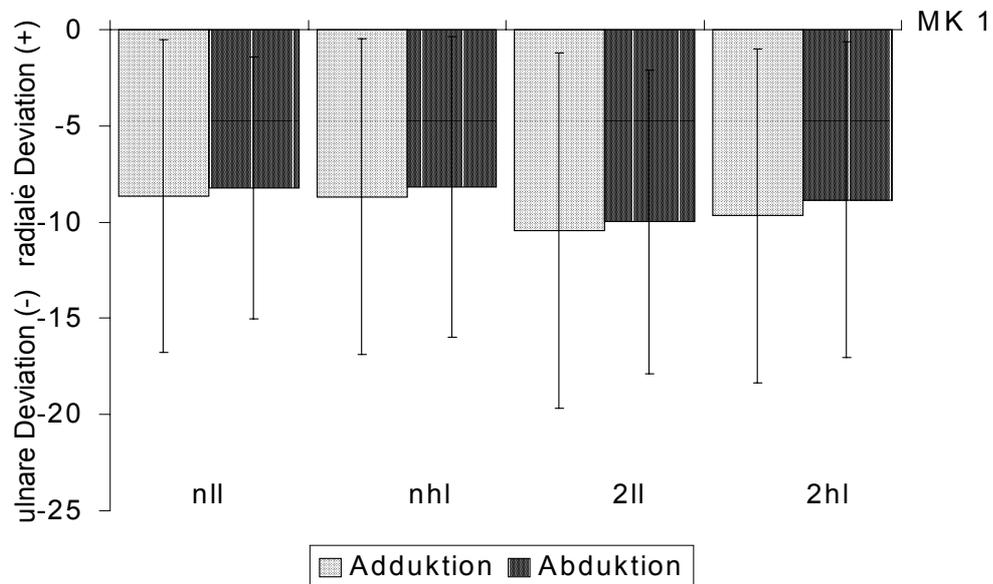


Abb.4.3.4b: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Scaphoid in ulnarer Deviation des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 40, 43).

4.3.5 Maximale radiale Deviation des Handgelenks

In maximaler radialer Deviation des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in einer stärker extendierten Position. Bei Reposition des MK1 steht das Trapezium mehr in Extension als bei Opposition des MK1.

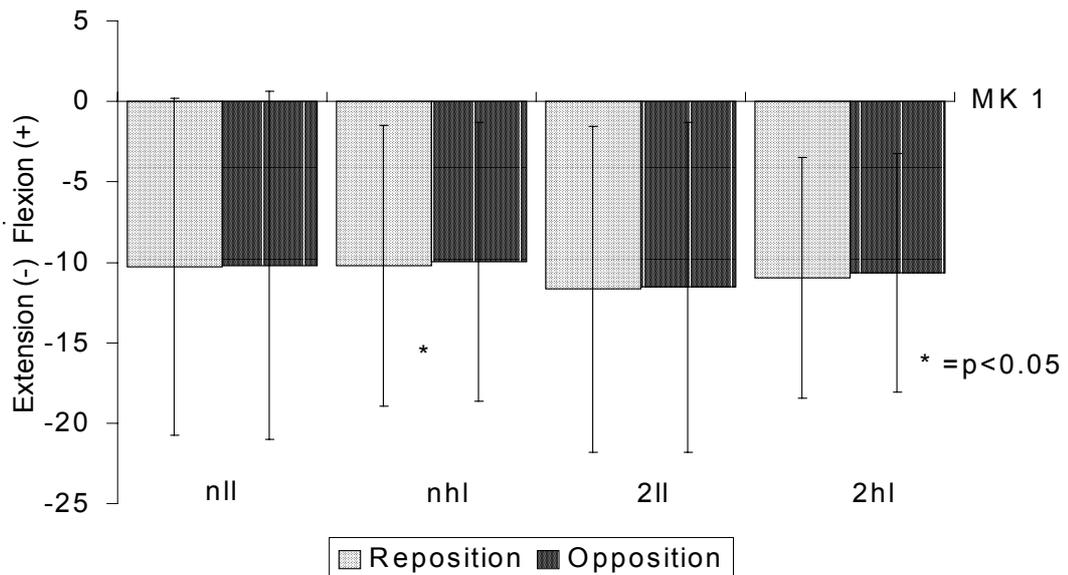


Abb. 4.3.5a: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in radialer Deviation des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 41, 42).

In maximaler radialer Deviation des Handgelenks steht das Trapezium in Vergleich mit dem Scaphoid in radialer Deviation. Bei Abduktions-Adduktionsstellung des MK1 steht das Trapezium jeweils bei Abduktion in mehr radialer Deviation als bei Adduktion.

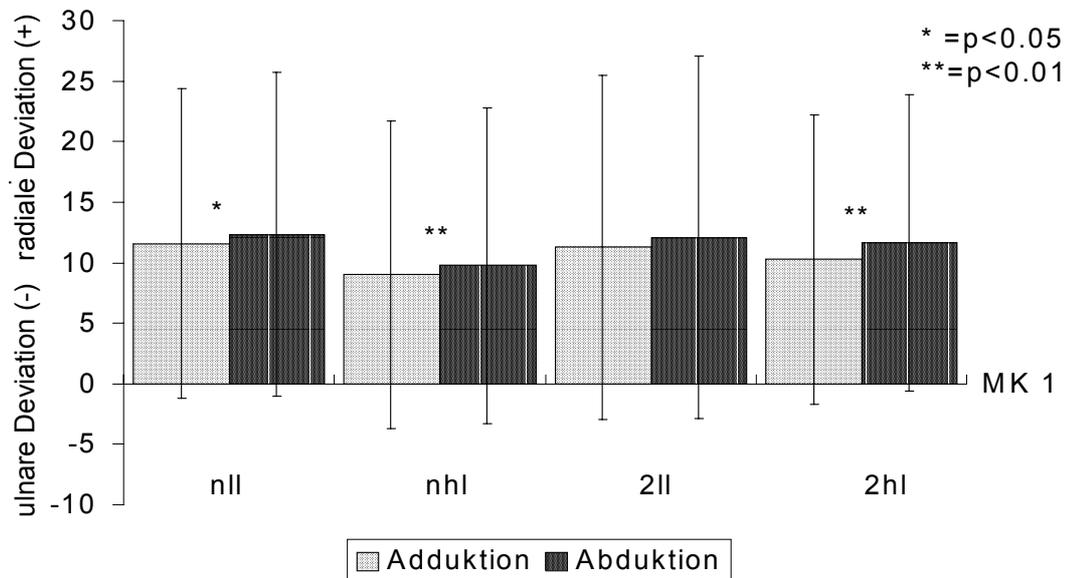


Abb.4.3.5b: Dargestellt ist die Position des Trapezium auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Scaphoid in radialer Deviation des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 41, 43).

4.4 Stellung des Scaphoids in Relation zum Radius in Reposition / Opposition und in Adduktion / Abduktion des Daumens

Im folgenden wird dargestellt inwieweit sich die Bewegung des Metakarpale 1 reproduzierbar auf das Scaphoid fortpflanzt. Dargestellt wird die Stellung des Scaphoids jeweils in Reposition und Opposition sowie in Adduktion und Abduktion des Daumens.

Die Repositions-Oppositionsbewegung des Metakarpale 1, und somit des Daumens, entspricht einer Extensions-Flexionsbewegung des Scaphoid, die Adduktions-Abduktionsbewegung entspricht einer ulnaren-radialen Deviation des Scaphoid. Um die Überleitung einer Bewegung des Metakarpale 1 auf das Scaphoid zu untersuchen wird im folgenden die **Repositions-Oppositionsbewegung** des Daumens der **Extensions-Flexionsbewegung** des Scaphoid, sowie die **Adduktions-Abduktionsbewegungen** des Daumens der **ulnaren - radialen Deviationsbewegungen** des Scaphoid gegenübergestellt.

Die nachfolgenden Abbildungen sind im Kapitel „Material und Methoden“ (3.2.5) beschrieben und erläutert.

4.4.1 Neutralposition des Handgelenks

In Neutralstellung des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in einer neutralen Position. Bei Reposition des MK1 steht das Scaphoid in Extension, bei Opposition des MK1 in Flexion.

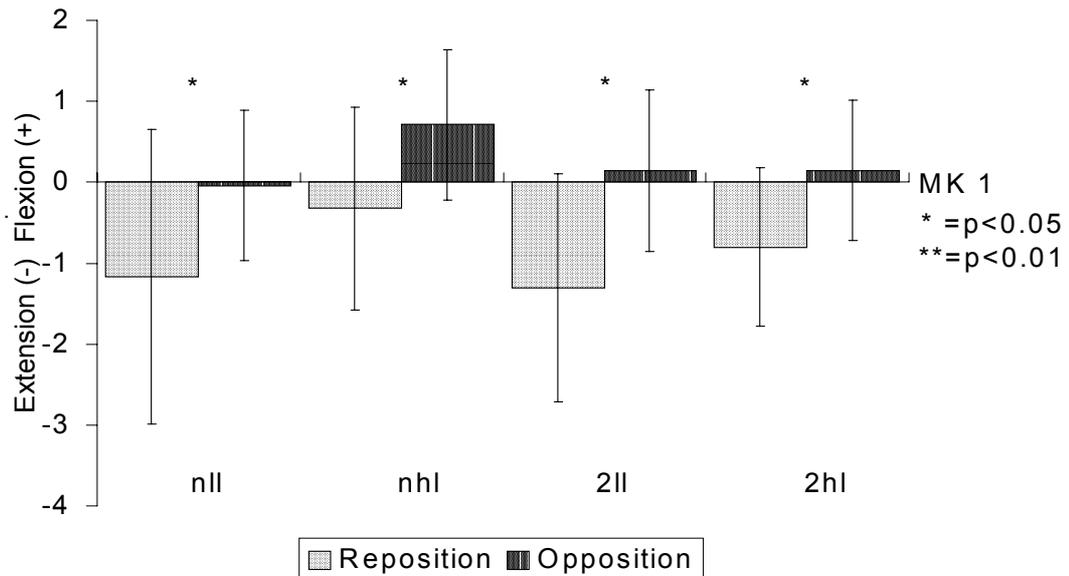


Abb. 4.4.1a: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum fixierten Radius in Neutralstellung des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-ll), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-ll) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 44, 49).

In Neutralstellung des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in einer neutralen Position. Bei Abduktion-Adduktion des MK1 steht das Scaphoid jeweils bei Abduktion in radialer Deviation, bei Adduktion in ulnarer Deviation.

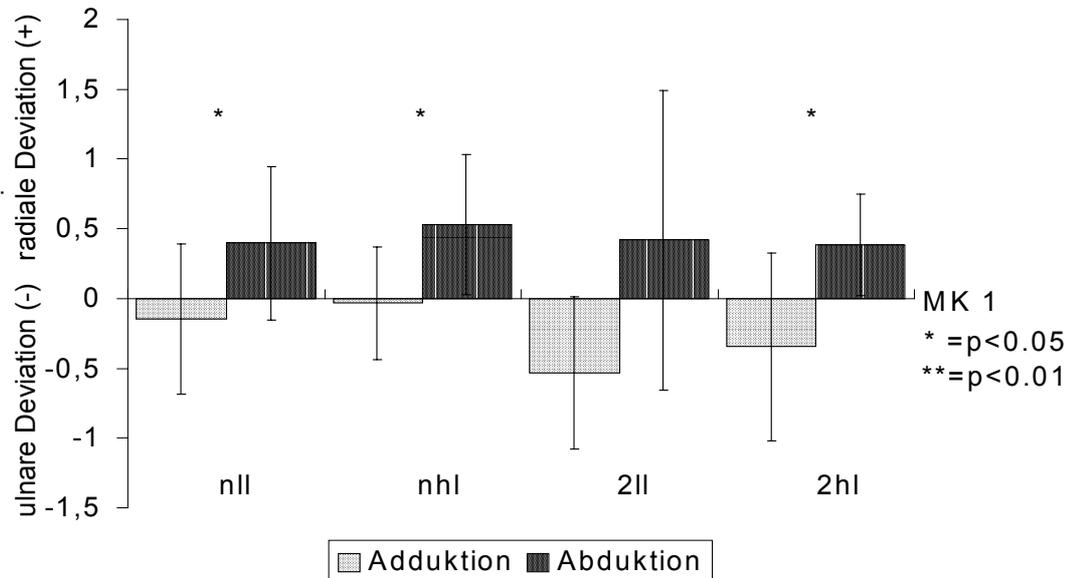


Abb.4.4.1b: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Radius in Neutralstellung des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 44, 50).

4.4.2 Maximale Flexion des Handgelenks

In maximaler Flexion des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in Flexion. Bei Opposition des MK1 steht das Scaphoid in stärkerer Flexion als bei Reposition des MK1.

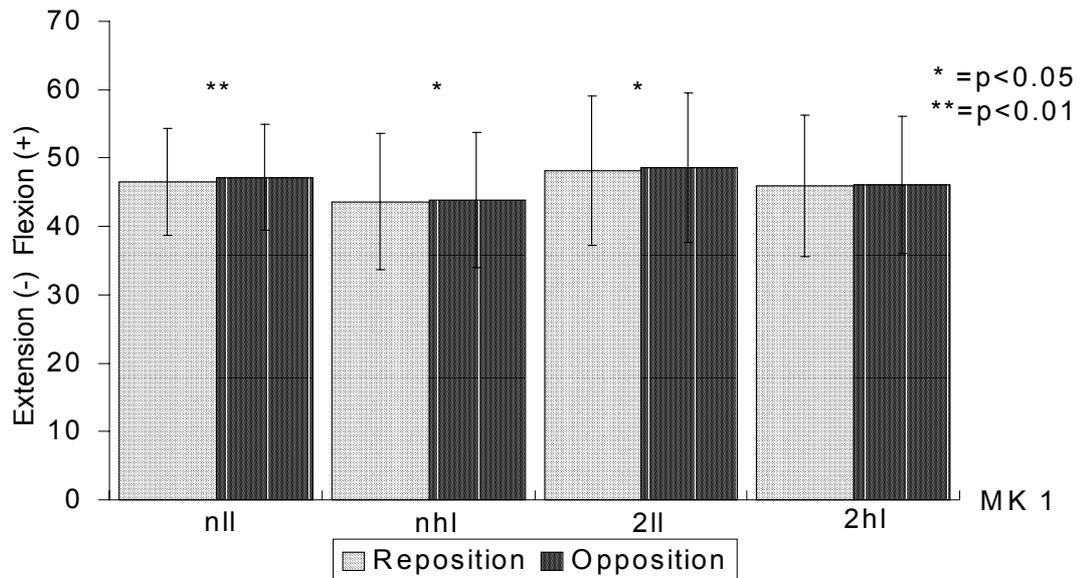


Abb. 4.4.2a: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum fixierten Radius in Flexion des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-ll), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-ll) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 45, 49).

In maximaler Flexion des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in ulnarer Deviation. Bei Abduktion - Adduktion des MK1 steht das Scaphoid jeweils bei Adduktion in stärkerer ulnarer Deviation als bei Abduktion.

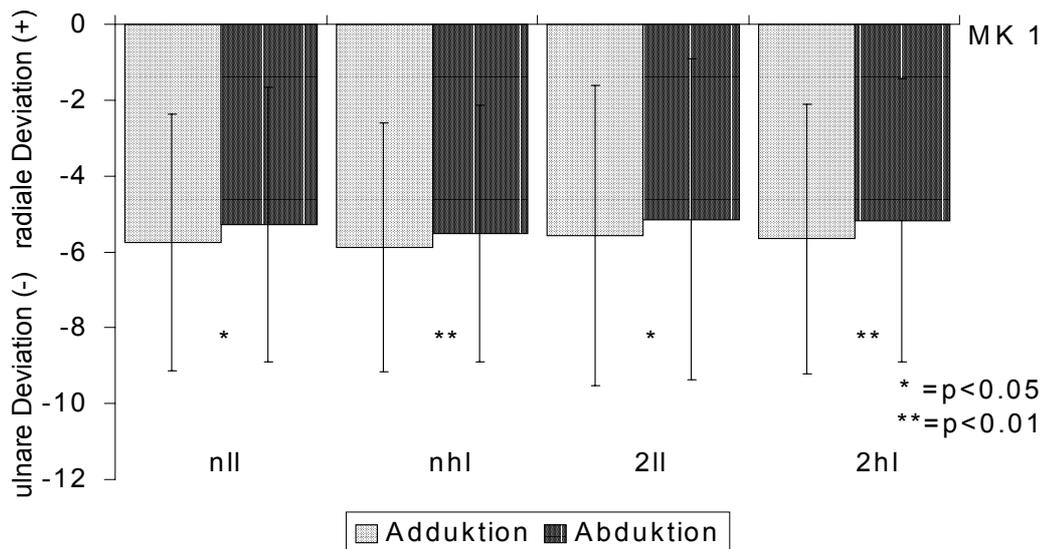


Abb.4.4.2b: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Radius in Flexion des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 45, 50).

4.4.3 Maximale Extension des Handgelenks

In maximaler Extension des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in Extension. Bei Reposition des MK1 steht das Scaphoid in stärkerer Extension als bei Opposition des MK1.

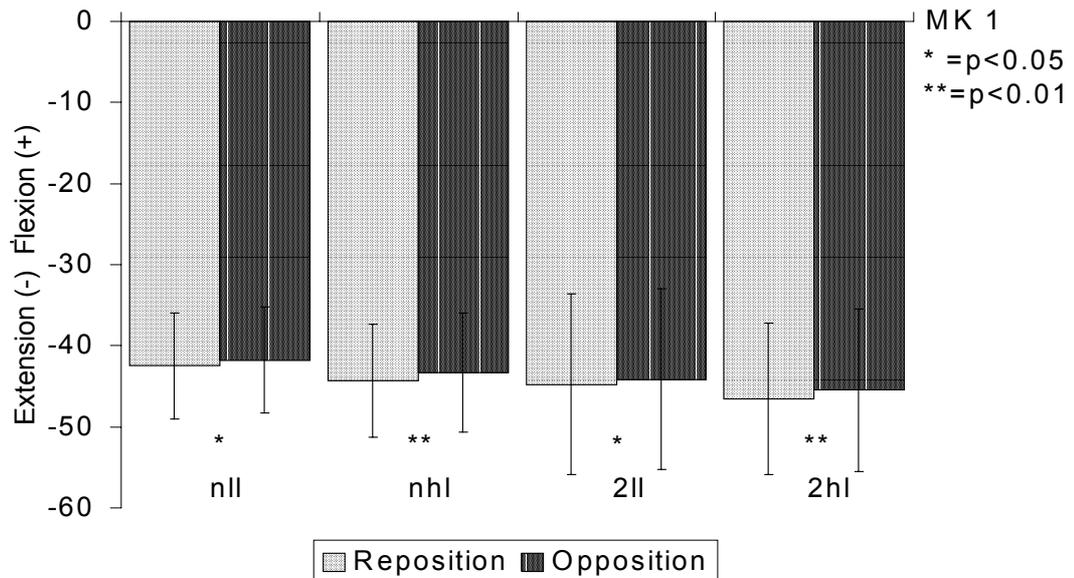


Abb. 4.4.3a: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum fixierten Radius in Extension des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 46, 49).

In maximaler Extension des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in ulnarer Deviation. Bei Abduktions - Adduktion des MK1 steht das Scaphoid jeweils bei Adduktion in stärkerer ulnarer Deviation als bei Abduktion.

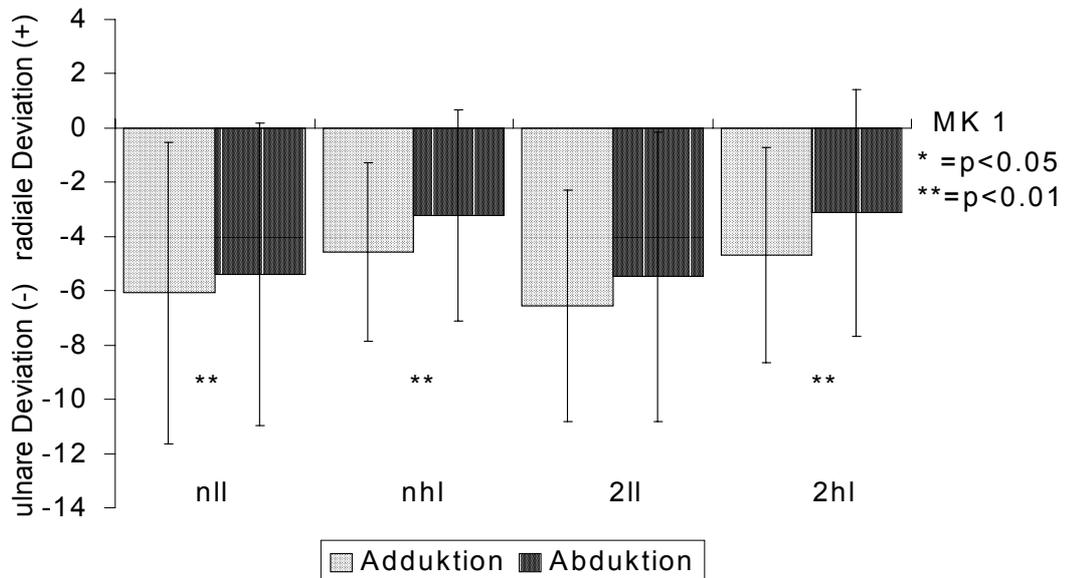


Abb.4.4.3b: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Radius in Extension des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 46, 50).

4.4.4 Maximale ulnare Deviation des Handgelenks

In maximaler ulnarer Deviation des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in Extension. Bei Reposition des MK1 steht das Scaphoid in stärkerer Extension als bei Opposition des MK1.

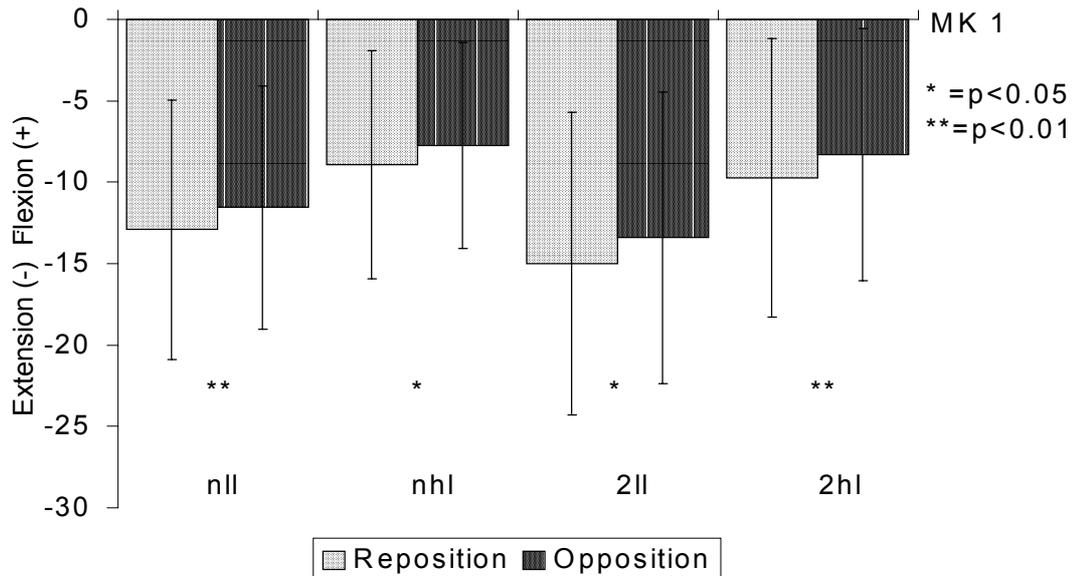


Abb. 4.4.4a: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum fixierten Radius in ulnarer Deviation des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 47, 49).

In maximaler ulnaren Deviation des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in ulnarer Deviation. Bei Abduktion - Adduktion des MC1 steht das Scaphoid jeweils bei Adduktion in stärkerer ulnarer Deviationsstellung als bei Abduktion.

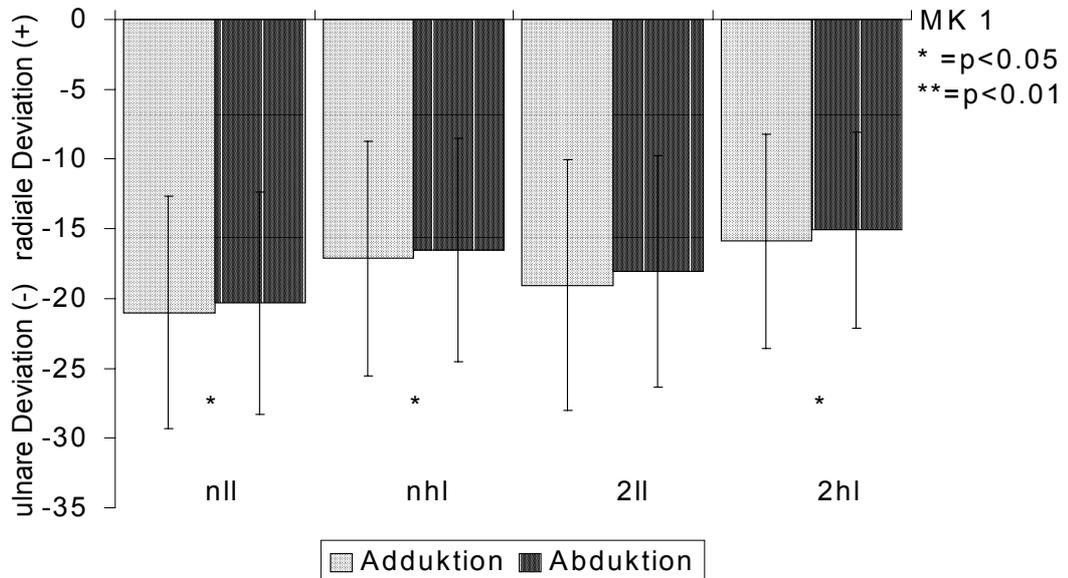


Abb.4.4.4b: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Radius in ulnarer Deviation des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hI), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hI) (Anhang Tab. 47, 50).

4.4.5 Maximale radiale Deviation des Handgelenks

In maximaler radialer Deviation des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in Flexion. Bei Opposition des MK1 steht das Scaphoid in stärkerer Flexion als bei Reposition des MK1.

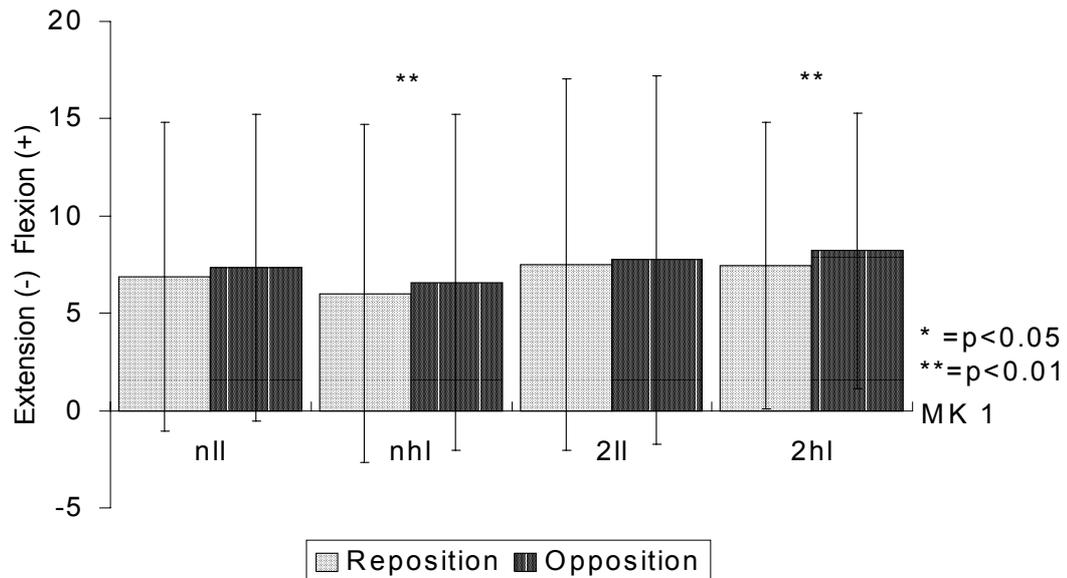


Abb. 4.4.5a: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der Extensions - Flexionsachse relativ zum fixierten Radius in radialer Deviation des Handgelenks bei Reposition und Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 48, 49).

In maximaler radialen Deviation des Handgelenks steht das Scaphoid im Vergleich mit dem Radius in radialer Deviation. Bei Abduktion - Adduktion des MK1 steht das Scaphoid jeweils bei Abduktion mehr in radialer Deviationsstellung als bei Adduktion.

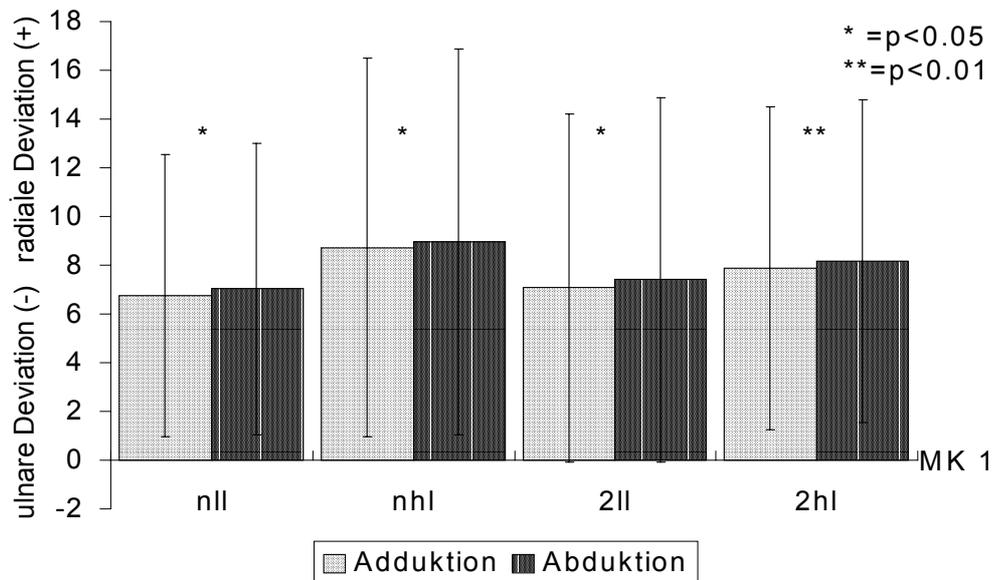


Abb.4.4.5b: Dargestellt ist die Position des Scaphoid auf der ulnaren-radialen Deviationsachse relativ zum Radius in radialer Deviation des Handgelenks bei Adduktion und Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad. Gezeigt werden die Experimente mit intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (n-II), intakten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (n-hl), durchtrennten STT-Ligamente und leichtem Muskelzug (2-II) und durchtrennten STT-Ligamente mit starkem Muskelzug (2-hl) (Anhang Tab. 48, 50).

5 Diskussion

5.1 Einführung

Untersuchungen zu Morphologie und Funktion der Hand, zur detaillierten Betrachtung von Knochenform, ligamentären Strukturen und Kinematik im Handskelett fanden schon im 19. Jahrhundert statt (Hencke 1859, Meyer 1866). Diese Untersuchungen gehen zurück auf Beobachtungen, die schon von Anatomen im 16. Jahrhundert und später gemacht wurden, wie z.B. Vesalius (1543) oder Weitbrecht (1742).

Nach Entdeckung der Röntgenstrahlen und Einsatz dieser zur kinematographischen Darstellung des Karpus, konnten auch klinische Fragestellungen gezielter untersucht werden. Der intensive Einsatz dieser Methode durch Anatome zu Anfang des 20. Jahrhunderts ermöglichte es die Kinematik des Handgelenks, der Handwurzelknochen und insbesondere der radialen Handseite mit dem Daumen als wichtigstes Element der menschlichen Hand zu beschreiben. So wurden das Reihen- und Säulenkonzept als funktionelle Einheit der menschlichen Hand beschrieben. Das Reihenkonzept beschreibt eine proximale Reihe, die aus Scaphoid, Lunatum und Triquetrum, und eine distale Reihe, die aus Trapezium, Trapezoideum, Kapitatum und Hamatum aufgebaut ist. Das Reihenkonzept kann als Modell des gleichsinnigen Bewegungsverhalten der zwei Karpalreihen bei Extension und Flexion der Hand gesehen werden (Kuhlmann 1985).

Bei radialen und ulnaren Deviationsbewegungen der Hand findet keine gleichsinnige Bewegung der beteiligten Karpalknochen statt. So findet bei radialer Deviation eine Flexion des Scaphoid einschließlich des ligamentär gekoppelten Lunatum statt (Kauer 1986). Bei ulnarer Deviation findet eine Extension des Scaphoid und Lunatum statt. In der ligamentär straff geführten distalen Reihe kommt es kaum zu einer Relativbewegung (Berger 1982). Um dieser komplexen Kinematik von Scaphoid und Lunatum Rechnung zu tragen wurde durch Navarro 1935 das Säulenkonzept postuliert, bei dem Scaphoid, Trapezium und Trapezoideum die radiale, Lunatum und Capitatum die zentrale und Triquetrum und Hamatum die ulnare Karpussäule bilden (Taleisnik 1985). Die radiale Karpussäule ist bei diesem Konzept primär verantwortlich für Deviations- bzw Abduktionsbewegungen und die zentrale Karpussäule primär verantwortlich für Extensions- und Flexionsbewegungen der Hand.

Eine wesentliche Aufgabe der Karpalknochen und des stabilisierenden Kapselbandapparates ist es einerseits eine möglichst große Bewegungsamplitude des Handgelenks gegenüber dem Unterarm und andererseits eine Kraftübertragung von der Hand auf den Unterarm über einen stabilen ossär und ligamentär geführten Karpus zu ermöglichen.

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen am Scaphoid wurden auf Grundlage des Säulenkonzepts, insbesondere der Kinematik der radialen Karpussäule, die im Daumensattel-(CMC)-gelenk und Daumen distal ihre Fortsetzung findet, durchgeführt.

Der Daumen in Verbindung mit der radialen Karpussäule ist das zentrale Funktionselement der menschlichen Hand. Nicht zuletzt die Oppositionsfähigkeit des Daumens, ermöglicht durch eine spezielle Morphologie des Daumensattelgelenks, führt zur der menschlichen Hand eigenen Greif- und Gebrauchsfähigkeit. Morphologische Veränderungen, ossäre und ligamentäre, (entzündlich-)degenerativer oder traumatischer Natur, führen häufig zu einer ausgeprägten Funktionseinschränkung der Hand. So führt z.B. die Rhizarthrose, die Arthrose des Daumensattelgelenks, im Verlauf zu einer schmerzbedingten Adduktionsschonhaltung des Daumens, Abduktion und Opposition sind je nach Stadium eingeschränkt oder bei Ausbildung einer Adduktionskontraktur durch Verkürzung der intrinsischen Thenarmuskulatur aufgehoben. In der Folge kommt es durch Veränderung der Statik, durch eine radiale Subluxation des Metakarpale 1, zu einer vermehrten ulnaren Belastung der metakarpalen Gelenkfläche und zu Läsionen des trapeziometakarpalen Bandapparates. Die Fehlbelastung im Daumensattelgelenks wird durch die, aus der Adduktionsfehlstellung resultierenden, veränderten muskulären Führung noch verstärkt. Insbesondere die veränderte Zugrichtung des Abduktor pollicis longus (APL), der mit Sehnenzügeln regelhaft auch am Trapezium inseriert, hat eine ätiopathogenetische Funktion bei der Entstehung und Verlauf einer Rhizarthrose. Im weiteren Verlauf wird auch das Scapho-Trapezio-Trapezoidale (STT)-gelenk und die STT-Ligamente in die degenerativen Prozesse mit einbezogen. Im Endstadium kommt es dann zu einer generalisierten Arthrose des Handgelenks mit Betonung der Gelenke der radialen Karpussäule (Carpometacarpal [CMC]-gelenk, Scapho-Trapezio-Trapezoidal[STT]-gelenk und Radio-Scaphoidal-[RS]-gelenk).

Die Aufgabe dieser experimentellen Studie war es, die Kinematik von Trapezium und Scaphoid und das Bewegungsverhalten zwischen diesen beiden Knochen, was der Kinematik im Scapho-Trapezio-Trapezoidal-(STT)-Gelenk entspricht, während der Zirkumduktion des Metakarpale 1 im Carpometacarpal-(CMC)-gelenk 1, zu untersuchen.

Die Beurteilung der Kinematik in dieser Arbeit basiert auf der biomechanischen Bewegungsanalyse, die eine Bewegung von Festkörpern in sechs Freiheitsgraden beschreibt. Kurz zusammengefasst ist ein Festkörper in der Biomechanik als ein System aus Massepunkten beschrieben bei dem die Lage zwischen allen beliebigen Paaren von Massepunkten zueinander sich während einer Bewegung nicht verändert (Goldstein 1970). Die Biomechanik eines Körpers, der sich während einer Bewegung nicht verformt. Dies ist auch für die hier untersuchten Handwurzelknochen anzunehmen. Zur Darstellung der räumlichen Lage eines Festkörpers werden drei Variablen benötigt. Für eine komplette kinematische Analyse benötigt man eine Vielzahl von Datenvariablen. Darunter sind die

Positionspunkte und –vektoren, lineare Geschwindigkeit und Beschleunigung des Massezentrums des Körpers, Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung. Um diese kinematischen Variablen zu beschreiben benötigt man eine Konvention im Sinne eines Koordinatensystems. Wenn man das Koordinatensystem betrachtet, das sich in einem Festkörper definieren läßt, kann das kinematische Verhalten dieses Körpers innerhalb eines Referenzkoordinatensystems beschrieben werden. Außerdem kann man, wenn man in zwei Körpern ein Koordinatensystem installiert, die relative Bewegung zwischen diesen beiden Körpern kalkulieren. Dies wird erreicht, indem man, wie auch in dieser Arbeit, jeweils einen Körper als fixiert betrachtet und sich den anderen Körper in dessen fixiertem Koordinatensystem bewegt vorstellt (An 1984, 1988). Alle diese Kriterien erfüllt die hier verwendete Magnetfeldtechnology (ISOTRACK-System).

Im folgenden soll zunächst die physiologische Kinematik des radialen Karpus bei Bewegung des Metakarpale 1 im Daumensattelgelenk und anschließend die Kinematik bei einer simulierten Bandinstabilität beurteilt werden. Verwendet wurde zur Erhebung der kinematischen Daten ein Magnetfeldmeßsystem (ISOTRACK der Firma Polhemus). Durchgeführt wurden die Untersuchungen im orthopädischen biomechanischen Labor der Mayo Clinic, Rochester, Minnesota, USA. Die Experimente erfolgten an 9 frischgefrorenen Händen von insgesamt 6 Körperspendern mit einem durchschnittlichen Spenderalter von 44 Jahren. In Vorversuchen wurden pathologische Veränderungen der untersuchten Handpräparate ausgeschlossen.

Es erfolgten vier unterschiedliche Experimente, die jeweils in den fünf Handgelenkpositionen Neutralposition, Extension, radiale Deviation, Flexion und ulnare Deviation durchgeführt wurden. So erfolgten die Experimente bei intakten STT-Ligamenten mit leichtem (Experiment n-II) und starkem Muskelzug (Experiment n-III), bei durchtrennten Ligamenten, was eine komplette STT-dissoziation simulieren sollte, mit leichtem (Experiment 2-II) sowie starkem Muskelzug (Experiment 2-III).

5.2 Kinematik des Trapezium bei Zirkumduktion des Daumens

Die Kinematik des Trapezium bei Zirkumduktion des Daumens wird anhand dieser experimentellen Studie mit Hilfe eines Magnetfeldmeßverfahrens und der dadurch ermöglichten kontinuierlichen Datenaufzeichnung erstmalig beschrieben.

Die im folgenden diskutierten Ergebnisse bezüglich der Kinematik des Trapezium bei Zirkumduktion des Daumens sind im Kapitel „Ergebnisse 4.1 und 4.3“ dargestellt. Hierbei ist das untersuchte Bewegungsverhalten des Trapezium eine Relativbewegung im Vergleich zum Scaphoid. Die Bewegung des Trapeziums gegenüber dem rechnerisch fixierten Scaphoid zeigt somit die Kinematik des STT-Gelenks, die gelenkige Verbindung zwischen Trapezium und Scaphoid, an.

5.2.1 Einfluß der Handgelenkstellung auf die Kinematik des STT-Gelenks

Zur Beurteilung der Kinematik des Trapeziums bei Zirkumduktion des Metakarpale 1 wurde zunächst betrachtet welchen Umfang die Relativbewegung des Trapeziums im Vergleich mit dem Scaphoid, also die Bewegung im Scapho-Trapezio-Trapeziodal-Gelenk (STT-Gelenk), in den verschiedenen Handgelenkpositionen hat. Hierbei konnte festgestellt werden, daß bei vorliegendem Versuchsaufbau einer geführten Zirkumduktion des Metakarpale 1, die Bewegungsausschläge des Trapezium nur wenige Grade betragen.

Als erste Untersuchung sollte festgestellt werden ob die Handgelenkposition, also die Stellung der Hand in Neutralposition, Extension, radiale Deviation, Flexion und ulnare Deviation eine Auswirkung auf den Bewegungsumfang im STT-gelenk hat.

Der Bewegungsumfang im STT-Gelenk ist bei Extension des Handgelenks größer als in Flexion, und der Bewegungsumfang ist bei ulnarer Deviation größer als bei radialer Deviation. Dies trifft bis auf zwei Ausnahmen zu. Bei intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (Experiment n-II) und maximaler Flexion des Handgelenks besteht bei Flexion-Extensionbewegungen des Trapeziums ein dezent größerer Bewegungsumfang als bei maximaler Extension des Handgelenks. Bei durchtrennten STT-Ligamenten und starkem Muskelzug (Experiment 2hI) und radialer Deviationsstellung im Handgelenk besteht bei radialer und ulnarer Bewegungsrichtung des Trapezium ein dezent größerer Bewegungsumfang als bei maximaler ulnarer Deviation des Handgelenks. Bei o.g. geringen Bewegungsausschlägen sind die Unterschiede in den verschiedenen Handgelenkpositionen und die korrespondierenden Bewegungsumfänge des Trapeziums nur in einzelnen Experimenten und Bewegungsrichtungen statistisch signifikant (siehe „Ergebnisse“). Man kann aber insgesamt eine klare Tendenz bezüglich der o.g. Aussage erkennen. Die Tatsache, daß in Flexions und radialer Deviationsstellung des Handgelenks eine geringerer Bewegungsumfang vorliegt als bei Extension und ulnarer Deviation liegt vermutlich an der der räumlichen Zusammendrängung des radialen Karpus in Flexion und radialer Deviation sowie des Muskelzugs der beteiligten Muskeln. Nach vorliegenden Ergebnissen kann also die Aussage getroffen werden, das eine Einstellung des Handgelenk in Flexion und radiale Deviation einen stabilisierenden bzw. anspannenden Effekt auf das STT-gelenk hat, während eine Einstellung des Handgelenk in Extension und ulnare Deviation eher einen destabilisierenden bzw. entspannenden Effekt ausübt.

5.2.2 Beeinflussung der Kinematik innerhalb des STT-Gelenks bei Muskelzug und intakten und durchtrennten STT-Ligamenten

Es wurde untersucht, welchen Effekt Muskelzug auf die Bewegung des Trapezium im STT-Gelenk in den jeweiligen Handgelenkpositionen hat. Untersucht wurde außerdem der Effekt,

der durch eine Durchtrennung der STT-Ligamente, was eine komplette STT-dissoziation simulieren sollte, auf die Kinematik des Trapeziums entsteht. Als Hypothese für den Effekt des Muskelzugs kann eine stabilisierende Wirkung bei verstärktem Muskelzug formuliert werden. Man sollte eine Reduktion des Bewegungsumfanges bei stärkerem Muskelzug erwarten. Desweiteren ist hypothetisch eine destabilisierende Wirkung durch Durchtrennung der STT-Ligamente zu vermuten. In diesem Fall sollte man eine Vermehrung des Bewegungsumfanges nach Durchtrennung der STT-Ligamente bzw. ein verändertes Bewegungsverhalten z.B. in einer anderen Grundposition vermuten (Jantea 1994).

Wenn man die Auswirkung eines erhöhten Muskelzugs auf den Bewegungsumfang des Trapezium untersucht, zeigt sich, daß die Unterschiede im Vergleich mit dem Bewegungsumfang bei normalen Muskelzug jeweils weniger als ein Grad betragen. Ein einheitlicher Effekt läßt sich nicht feststellen. Bei intakten Ligamenten und Flexionsstellung des Handgelenks kommt es zu einer Reduktion des Bewegungsumfanges des Trapezium, wenn man den Muskelzug erhöht. Bei intakten Ligamenten und Extensionsstellung des Handgelenks hingegen kommt es bei erhöhtem Muskelzug (Exp. n-hI) zu einem Anstieg des Bewegungsumfanges des Trapeziums gegenüber dem Bewegungsumfang bei leichtem Muskelzug (Exp. n-II). Bei Neutralstellung, ulnarer und radialer Deviationsstellung des Handgelenks läßt sich bei intakten Ligamenten kein einheitlicher Effekt feststellen. Bei durchtrennten Ligamenten läßt sich bis auf den Versuch bei radialer Deviationsstellung des Handgelenks, bei dem ein erhöhter Muskelzug zu einer Vergrößerung des Bewegungsumfanges führt, bei den anderen Handgelenkpositionen eine Reduktion des Bewegungsumfanges des Trapezium bei erhöhtem Muskelzug feststellen. Insofern läßt sich die Hypothese einer muskulären Stabilisierung des radialen Karpus, wie sie bei Handgelenkbewegungen in Extensions-Flexionsrichtung und radialer-ulnarer Deviationsrichtung beschrieben ist (Jantea 1994), hier nicht einheitlich bestätigen. Vielmehr scheint die destabilisierende Tendenz, wie sie bei Extensionsstellung des Handgelenks für das Trapezium, und damit für die Bewegung im STT-Gelenk, vorliegt, durch erhöhten Muskelzug bei intakten Ligamenten vergrößert zu werden, während die stabilisierende Tendenz einer Flexionsstellung des Handgelenks bei erhöhtem Muskelzug zu einer weiteren Reduktion (Stabilisierung) des Bewegungsumfanges des Trapeziums führt. Ausschlaggebend für die Kinematik im STT-Gelenk bei Zirkumduktion des Daumens und intakten Ligamenten scheint also vielmehr die Handgelenkposition zu sein, wobei durch Muskelzug die stabilisierende Wirkung einer Flexionsstellung verstärkt wird. Der destabilisierende Effekt, den eine Extensionsstellung auf das STT-Gelenk hat, wird durch Muskelzug noch verstärkt. Bei ulnarer und radialer Deviationsstellung des Handgelenks besteht für verstärkten Muskelzug kein einheitlicher Effekt.

Bei durchtrennten Ligamenten führt ein erhöhter Muskelzug, abgesehen von den Ergebnissen bei radialer Deviationsstellung des Handgelenks, zu einer Stabilisierung des Handgelenks.

Die Durchtrennung der STT-Ligamente bei leichtem Muskelzug (Exp. n-II verglichen mit Exp. 2-II) und starkem Muskelzug (Exp. n-III verglichen mit Exp. 2-III) verursacht bei Neutralstellung, Extensionsstellung, ulnarer und radialer Deviationsstellung des Handgelenks eine Vergrößerung des Bewegungsumfangs des Trapezium und führt somit zu einer Destabilisierung des STT-Gelenks. Als Ursache hierfür kann eine reduzierte ligamentäre Kopplung des Trapezium an das Scaphoid nach Durchtrennung der STT-Ligamente angenommen werden, so daß sich eine Daumenzirkumduktion vermehrt auf das Trapezium fortpflanzen kann. Bei Flexionsstellung kann keine einheitliche Tendenz festgestellt werden. Der Grund hierfür liegt vermutlich in der primär stabilisierenden Wirkung einer Handgelenkflexion, so daß eine Ligamentdurchtrennung einen geringeren Effekt ausübt. Als Indiz hierfür kann das Bewegungsverhalten des Trapezium in der komplementären Handgelenkstellung genannt werden. Bei Extensionsstellung des Handgelenks führt eine Durchtrennung der STT-Ligamente zu einer signifikanten Vergrößerung des Bewegungsumfangs des Trapezium, und somit zu einer Destabilisierung im STT-Gelenk.

5.2.3 Effekt einer Zirkumduktion des Daumens auf die Bewegung des Trapezium

Anhand der vorliegenden Meßergebnisse wurde untersucht, ob die Zirkumduktion des Metakarpale 1 auf das Trapezium nicht nur einen Effekt im Sinne einer meßbaren Bewegungsinduktion hat, sondern ob sich die Bewegung des Metakarpale 1 nach einem bestimmten Muster auf das Trapezium fortpflanzt.

Die vorliegenden Ergebnisse erlauben die folgenden Aussagen:

Die Bewegung des Metakarpale 1 pflanzt sich richtungsgleich auf das Trapezium fort. Bei Retroversions und Oppositionsbewegungen des Metakarpale 1 und somit des Daumens, findet eine gleichgerichtete Bewegung des Trapeziums statt, was einer Bewegung im STT-Gelenk entspricht. So entspricht eine Retroversion im Daumensattelgelenk einer Extension des Trapeziums im STT-Gelenk. Eine Opposition des Metakarpale 1 im Daumensattelgelenk entspricht einer Flexion des Trapezium im STT-Gelenk. Dies wird durch eine radial-ulnar verlaufende Retroversions-Oppositionsachse des Metakarpale 1 und eine ebenso radial-Ulnar verlaufende Extensions-Flexionsachse des Trapeziums beschrieben.

Bei Abduktion und Adduktion des Metakarpale 1 und somit des Daumens, findet eine gleichgerichtete Bewegung des Trapeziums statt, was einer Bewegung im STT-Gelenk entspricht. Eine Abduktion des Daumens beschreibt ein Abspreizen vom Zeigefinger, die Adduktion ein Heranführen des Daumens an den Zeigefinger. So entspricht eine Abduktion im Daumensattelgelenk einer radialen Deviation des Trapeziums im STT-Gelenk. Eine Adduktion des Metakarpale 1 im Daumensattelgelenk entspricht einer ulnaren Deviation des Trapezium im STT-Gelenk. Dies wird durch eine dorso-volar verlaufende Abduktions-

Adduktionsachse des Metakarpale 1 und eine ebenso dorso-volar verlaufende radiale-ulnare Deviationsachse des Trapeziums beschrieben.

5.3 Kinematik des Scaphoid bei Zirkumduktion des Daumens

Die Kinematik des Scaphoid bei Zirkumduktion des Daumens wird anhand dieser experimentellen Studie mit Hilfe eines Magnetfeldmeßverfahrens und der dadurch ermöglichten kontinuierlichen Datenaufzeichnung erstmalig beschrieben.

Die im folgenden diskutierten Ergebnisse bezüglich der Kinematik des Scaphoid bei Zirkumduktion des Daumens sind im Kapitel „Ergebnisse 4.2 und 4.4“ dargestellt. Hierbei ist das untersuchte Bewegungsverhalten des Scaphoid eine Relativbewegung im Vergleich zum Radius. Die Bewegung des Scaphoid gegenüber dem fixierten Radius zeigt somit die Kinematik des RS-Gelenks, die gelenkige Verbindung zwischen Scaphoid und Radius, an.

5.3.1 Einfluß der Handgelenkstellung auf die Kinematik des RS-Gelenks

Zur Beurteilung der Kinematik des Scaphoid bei Zirkumduktion des Metakarpale 1 wurde zunächst betrachtet, welchen Umfang die Relativbewegung des Scaphoid im Vergleich mit dem Radius, also die Bewegung im Radio-Scaphoidal-Gelenk (RS-Gelenk) in den verschiedenen Handgelenkpositionen hat. Hierbei konnte festgestellt werden, daß bei vorliegendem Versuchsaufbau einer geführten Zirkumduktion des Metakarpale 1, die Bewegungsausschläge des Scaphoid nur wenige Grade betragen.

Der Bewegungsumfang im RS-Gelenk ist bei Extension des Handgelenks größer als in Flexion, und der Bewegungsumfang bei ulnarer Deviation größer als bei radialer Deviation. Dies trifft bis auf zwei Ausnahmen zu. Bei intakten STT-Ligamenten und leichtem Muskelzug (Experiment n-II) und maximaler Flexion des Handgelenks besteht ein dezent größerer Bewegungsumfang des Scaphoid als bei Extension des Handgelenks. Dies ist der Fall bei Flexion-Extension und bei Supination-Pronation des Scaphoid im RS-gelenk. Bei o.g. geringen Bewegungsausschlägen sind die Unterschiede in den verschiedenen Handgelenkpositionen und die korrespondierenden Bewegungsumfänge des Trapeziums nur in einzelnen Experimenten und Bewegungsrichtungen statistisch signifikant (siehe „Ergebnisse“). Es läßt sich aber eine eindeutige Tendenz bezüglich der o.g. Aussage feststellen. Die Tatsache, daß in Flexionsstellung und radialer Deviationsstellung des Handgelenks eine geringerer Bewegungsumfang des Scaphoid im RS-Gelenk vorliegt als bei Extension und ulnarer Deviation liegt vermutlich an der räumlichen Zusammendrängung des radialen Karpus in Flexion und radialer Deviation sowie des Muskelzugs der beteiligten Muskeln. Nach vorliegenden Ergebnissen kann die Aussage getroffen werden, daß eine

Einstellung des Handgelenk in Flexion und radiale Deviation einen stabilisierenden bzw. anspannenden Effekt auf das Scaphoid in Relation zum Radius und dementsprechend für das RS-Gelenk hat, während eine Einstellung des Handgelenk in Extension und ulnare Deviation eher eine destabilisierenden bzw. entspannenden Effekt ausübt.

5.3.2 Beeinflussung der Kinematik innerhalb des RS-Gelenks bei Muskelzug und intakten und durchtrennten STT-Ligamenten

Außerdem wurde untersucht inwieweit Muskelzug einen Effekt auf die Bewegung des Scaphoid im RS-Gelenk in den jeweiligen Handgelenkpositionen ausübt, und der Effekt der durch eine Durchtrennung der STT-Ligamente, was einer kompletten STT-dissoziation entsprechen sollte, auf die Kinematik des Scaphoid ausübt. Als Hypothese für den Effekt des Muskelzugs kann eine stabilisierende Wirkung bei verstärktem Muskelzug angenommen werden. Man müßte also eine Reduktion des Bewegungsumfanges bei stärkerem Muskelzug erwarten. Desweiteren ist hypothetisch eine destabilisierende Wirkung durch Durchtrennung der STT-Ligamente zu vermuten. In diesem Fall müßte man eine Vermehrung des Bewegungsumfanges nach Durchtrennung der STT-Ligamente bzw. ein verändertes Bewegungsverhalten z.B. in einer anderen Grundposition vermuten (Jantea 1994).

Wenn man die Auswirkung eines erhöhten Muskelzugs auf den Bewegungsumfang des Scaphoid untersucht, zeigt sich, daß die Unterschiede im Vergleich mit dem Bewegungsumfang bei normalen Muskelzug jeweils weniger als ein Grad betragen. Ein einheitlicher Effekt läßt sich nicht feststellen. Bei intakten wie auch bei durchtrennten Ligamenten und Flexionsstellung sowie Neutralstellung des Handgelenks kommt es zu einer Reduktion des Bewegungsumfanges des Scaphoid, wenn man den Muskelzug erhöht. Bei Extensionsstellung des Handgelenks hingegen kommt es bei erhöhtem Muskelzug (Exp. n-hl, 2-hl) zu einem Anstieg des Bewegungsumfanges des Scaphoid gegenüber dem Bewegungsumfang bei leichtem Muskelzug (Exp. n-ll, 2-ll) bei intakten und bei durchtrennten Ligamenten. Bei ulnarer und radialer Deviationsstellung des Handgelenks läßt sich kein einheitlicher Effekt feststellen. Die Hypothese einer muskulären Stabilisierung des radialen Karpus, wie sie bei Handgelenkbewegungen in Extensions-Flexionsrichtung und radialer-ulnarer Deviationsrichtung beschrieben ist (Jantea 1994), läßt sich hier nicht einheitlich bestätigen. Ausschlaggebend für die Kinematik im RS-Gelenk bei Zirkumduktion des Daumens scheint vielmehr die Handgelenkposition zu sein, wobei die stabilisierend wirkende Flexionsstellung des Handgelenks durch Muskelzug in ihrer stabilisierenden Wirkung unterstützt wird. Die destabilisierend wirkende Extensionsstellung des Handgelenks wird durch erhöhten Muskelzug in der destabilisierenden Wirkung verstärkt.

Die Durchtrennung der STT-Ligamente hat bei leichtem Muskelzug (Exp. n-II verglichen mit Exp. 2-II) ebenso wie bei starkem Muskelzug (Exp. n-III verglichen mit Exp. 2-III) einen uneinheitlichen Effekt auf den Bewegungsumfang des Scaphoid und somit auf die Kinematik im RS-Gelenk. Zusammengefasst hat bei Zirkumduktion des Daumens der Zustand der STT-Ligamente keinen einheitlichen Effekt auf die Kinematik im RS-Gelenk, während hingegen die muskuläre Stabilisierung des Scaphoid einen wichtigeren Einfluß zu haben scheint. Ausschlaggebend für den Bewegungsumfang des Scaphoid in Relation zum Radius bei Zirkumduktion des Daumens ist jedoch die Position des Handgelenks.

5.3.3 Effekt einer Zirkumduktion des Daumens auf die Bewegung des Scaphoid

Anhand der vorliegenden Meßergebnisse wurde untersucht, ob die Zirkumduktion des Metakarpale 1 auf das Scaphoid nicht nur einen Effekt im Sinne einer meßbaren Bewegungsinduktion hat, sondern ob sich die Bewegung des Metakarpale 1 nach einem bestimmten Muster auf das Scaphoid fortpflanzt.

Die vorliegenden Ergebnisse erlauben die folgenden Aussagen:

Die Bewegung des Metakarpale 1 pflanzt sich richtungsgleich auf das Scaphoid fort. Bei Retroversions und Oppositionsbewegungen des Metakarpale 1 und somit des Daumens, findet eine gleichgerichtete Bewegung des Scaphoid statt, was einer Bewegung im RS-Gelenk entspricht. So entspricht eine Retroversion im Daumensattelgelenk einer Extension des Scaphoid im RS-Gelenk. Eine Opposition des Metakarpale 1 im Daumensattelgelenk entspricht einer Flexion des Scaphoid im RS-Gelenk. Dies wird durch eine radial-ulnar verlaufende Retroversions-Oppositionsachse des Metakarpale 1 und eine ebenso radial-ulnar verlaufende Extensions-Flexionsachse des Scaphoid beschrieben.

Bei Abduktion und Adduktion des Metakarpale 1 und somit des Daumens, findet eine gleichgerichtete Bewegung des Scaphoid statt, was einer Bewegung im RS-Gelenk entspricht. Eine Abduktion des Daumens beschreibt ein Abspreizen vom Zeigefinger, die Adduktion ein Heranführen des Daumens an den Zeigefinger. So entspricht eine Abduktion im Daumensattelgelenk einer radialen Deviation des Scaphoid im RS-Gelenk. Eine Adduktion des Metakarpale 1 im Daumensattelgelenk entspricht einer ulnaren Deviation des Trapezium im RS-Gelenk. Dies wird durch eine dorso-volar verlaufende Abduktions-Adduktionsachse des Metakarpale 1 und eine ebenso dorso-volar verlaufende radiale-ulnare Deviationsachse des Scaphoid beschrieben.

5.4 Fazit: Kinematik im Bereich des STT-Gelenks und des radialen Karpus bei Zirkumduktion des Daumens

Die meisten biomechanischen Experimente im Bereich der Hand basieren auf der Röntgenkinematographie, die in verschiedenen experimentellen Designs angewendet wurde

(Garcia-Elias 1990, Horii 1991, Ruby 1987, Smith 1989). Die Nachteile dieser Methode sind die Notwendigkeit, vier metallische Marker in jeden zu untersuchenden Knochen zu implantieren und die Tatsache, daß ein Bewegungsablauf für die Datenerhebung eines jeden Datenpunkts unterbrochen werden muß. Deshalb ist die Bewegungsanalyse mit Hilfe der Röntgenkinematographie eine Interpolierung von einzelnen statisch erhobenen Bewegungspunkten. Die Röntgenkinematographie ist eine exakte und intensiv erprobte Technik zur Untersuchung biomechanischer Untersuchungen von Bewegungsabläufen am menschlichen Skelett (Huiskes 1985, Shapiro 1978, Woltring 1985). Andere Techniken, wie die Ultraschalltopometrie (Andrews 1979, Youm 1979, 1980), und die Verwendung eines außen an die Extremität angebrachten Apparates zur Erhebung der kinematischen Daten die „linkage methode“ (Sommer 1980) sind weitaus seltener zur Erhebung kinematischer Daten verwendet worden. Fotografische-stereometrische Techniken, wie die in der Ganganalyse verwendeten Meßmethoden mit LED-(light-emitting-diodes)-Kinematographen sind für die Erhebung von kinematischen Daten von Gelenken der Hand nicht anwendbar, weil die auf der Haut befestigten Dioden durch Bewegung verschoben werden, und eine genaue Kalkulation der Gelenkdaten in der Tiefe noch nicht möglich ist. Die in dieser Arbeit verwendete Magnetfeldmeßmethode ermöglicht eine kontinuierliche Bewegungsdatenerhebung. Ein Bewegungsablauf muß nicht eigens zur Datenerhebung unterbrochen werden. Auch die Berechnung von Relativbewegungen zwischen den einzelnen Sensoren und damit zwischen den untersuchten Knochen benötigt im Vergleich mit den anderen o.g. Meßmethoden einen geringeren Rechenaufwand. Als Nachteil vor allem der ersten Generation dieser Magnetfeldmeßgeräte ist die Anfälligkeit gegen metallische Gegenstände in nächster Nähe, die eine Datenveränderung zur Folge hat. Dies war der Grund, weshalb im in dieser Arbeit verwendeten experimentellen Versuchsaufbau ganz auf metallische Komponenten verzichtet wurde. Nach Vorversuchen zur Anwendbarkeit der Meßmethode für biomechanisch-kinematische Experimente konnte in Studien zur Kinematik im Bereich der Hand belegt werden, daß diese Meßmethode zur Untersuchung und Darstellung der Kinematik an der Hand geeignet ist (An 1988, Imaeda 1993, 1994, Jantea 1994).

Der experimentelle Aufbau dieser Arbeit untersuchte die Auswirkung einer geführten Metakarpalzirkumduktion auf Trapezium und Scaphoid. Es wurde für alle untersuchten Hände der gleiche Bewegungsbogen für das Metakarpale 1 gewählt. Dies wurde durch ein Fiberglasstift erreicht, der im Metakarpale 1 befestigt war und die geführte Bewegung in einem Plexiglasring ermöglichte (Kap. Material und Methoden Abb 3.2.8, 3.2.9). Insofern ist die untersuchte Zirkumduktion nur ein Ausschnitt aus einer maximal möglichen Zirkumduktion des Metakarpale 1, und damit des Daumens. Aussagen über ein möglicherweise abweichendes Bewegungsverhalten bei größeren Bewegungskreisen des Daumens können deshalb nicht gemacht werden. Die Zirkumduktion wurde „künstlich“ durch Bewegung des Plexiglasstiftes im Plexiglasring durch den Untersucher erzeugt. Effekte der einzelnen Daumenmuskeln während dieser Bewegung konnten somit nicht untersucht werden. Imaeda untersuchte 1993 und 1994 die Kinematik einer Zirkumduktionsbewegung des Daumens im

Daumensattelgelenk bei intakten und durchtrennten CMC-Ligamenten, der Ligamente zwischen Metakarpale 1 und Trapezium. In seiner Studie wurde das Metakarpale „ungeführt“, durch abwechselnde Belastung der Daumenmuskulatur, in eine Zirkumduktionsbewegung gebracht, die einen größeren Kreis als in dieser Arbeit beschrieb, jeweils bei geringem und erhöhtem Muskelzug. Wenn man die beiden Designs miteinander vergleicht, fällt die „gezwungene, geführte“ des Metakarpale 1 in dieser Arbeit auf. Ob eine Vergrößerung des Zirkumduktionskreises und die Bewegung des Daumens durch abwechselnde Belastung zu einer anderen Beurteilung des Effektes, den eine Daumenzirkumduktion auf das STT-Gelenk hat, führt, kann nur durch ein verändertes Design untersucht werden. Da in dieser Arbeit zum einen untersucht wurde, ob eine Zirkumduktionsbewegung einen Effekt auf Trapezium hat, zum anderen der gewählte Zirkumduktionskreis dem Daumen eine ausreichende Funktion bei normalen Bewegungen ermöglicht, können auch bei dem hier gewählten Versuchsaufbau relevante Aussagen getroffen werden. Die Aussagen in dieser Arbeit betreffen aber nur einen Ausschnitt aus der Zirkumduktionsfähigkeit des Daumens, bei dem es sich jedoch um einen wesentlichen Ausschnitt aus der normalen Funktion des Daumens handelt.

Im folgenden sollen die o.g. Aussagen zur Kinematik des Trapezium und des Scaphoids, und somit der Kinematik des STT- und des RS-Gelenks bei Zirkumduktion des Daumens kritisch zusammengefasst werden:

In dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, daß sich eine Zirkumduktion des Daumens über Trapezium und Scaphoid, also über STT- und RS-Gelenk nach proximal fortpflanzt. Der Bewegungsumfang von Trapezium und Scaphoid in den einzelnen Handgelenkpositionen beträgt maximal wenige Grade, der Unterschied zwischen den einzelnen untersuchten Handgelenkpositionen beträgt dementsprechend selten mehr als ein Grad. Extension und ulnare Deviation des Handgelenks wirken „destabilisierend“, d.h. der Bewegungsumfang der durch die Daumenzirkumduktion induziert wird ist in diesen Positionen größer als in Flexion und radiale Deviation des Handgelenks, weshalb diese Handgelenkpositionen „stabilisierend“ wirken.

Es läßt sich nachweisen, daß die Zirkumduktion des Daumens sich gleichgerichtet auf Trapezium und Scaphoid fortpflanzt. Bei Reposition-Opposition, Abduktion-Adduktion des Daumens bewegen sich Trapezium und Scaphoid jeweils in die gleiche Richtung. Eine grafische Darstellung des gesamten Bewegungsablaufes war aus datentechnischen Gründen allerdings nicht sinnvoll. So konnte Woltring 1985 nachweisen, daß der Meßfehler sich umgekehrt proportional zum Umfang der gemessenen Rotation verhält. Das heißt, daß der Fehler umso größer ist, je näher die einzelnen Meßpunkte einer dynamischen Bewegungsdarstellung, was bei den hier gemessenen geringen Bewegungsausschlägen der Fall ist, beieinander liegen. Aus diesem Grunde war es bei den ohnehin schon geringen Bewegungsausschlägen nicht sinnvoll eine Aufspaltung in eine dynamische Bewegungsspur des untersuchten Knochens und deren grafische Darstellung durchzuführen, auch unter

Berücksichtigung vorhandener Filtermethoden. Aus diesem Grund wurden letztendlich aus dem gemessenen Bewegungsumfang von Trapezium und Scaphoid nur die Position Opposition und Reposition sowie Adduktion und Abduktion dargestellt und weiter untersucht.

Besonderes Augenmerk wurde in dieser Arbeit dem Einfluß von verändertem Muskelzug sowie die Beeinflussung der Kinematik von Trapezium und Scaphoid durch Durchtrennung der Ligamente geschenkt. Nach vorliegenden Ergebnissen kann die Aussage gemacht werden, daß eine einheitliche Aussage zur Wirkung eines erhöhten Muskelzugs bzw einer Durchtrennung der STT-Ligamente nicht getroffen werden kann. So ist für Muskelzug kein einheitlicher Effekt auf das Trapezium nachweisbar, während eine Durchtrennung der STT-Ligamente einen destabilisierenden Effekt hat. Dies ist vermutlich verursacht durch die verminderte ligamentäre Kopplung nach Ligamentdurchtrennung, so daß sich eine Metakarpalezirkumduktion verstärkt auf das Trapezium fortpflanzen kann. Die Kinematik des Scaphoids hingegen scheint mehr durch muskuläre Kräfte beeinflusst zu werden, während eine Durchtrennung der STT-Ligamente keinen einheitlichen Effekt hat. Interessanterweise führt ein verstärkter Muskelzug in Extension des Handgelenks, in einer also destabilisierenden Handgelenkposition, zu einer Vermehrung des Bewegungsumfangs, während ein verstärkter Muskelzug in Flexion des Handgelenks, in einer also stabilisierenden Handgelenkposition, zu einer Verminderung des Bewegungsumfanges des Scaphoid führt.

Die oben genannten kinematischen Verhältnisse im STT-Gelenk sind auch unter klinischen Aspekten zu berücksichtigen. Pathologische Veränderungen im Bereich des STT-Gelenks sind sowohl direkt traumatischen, chronisch posttraumatischen sowie degenerativ-arthrotisch-arthritischen Ursprungs. Unter den traumatischen Veränderungen findet sich die isolierte Dislokation des Trapezium teilweise kombiniert mit dem ersten Metakarpale (Brewood 1985, Goldberg 1981, Seimon 1972, Siegel 1969). Hierbei sind sowohl palmare und dorsale Dislokationen beschrieben worden (Ehara 1988, Holdsworth 1987, Sherlock 1987). Die gemeinsame Dislokation mit dem Metakarpale 1 ist von Garcia-Elias 1989 klassifiziert worden. Eine isolierte Dislokation setzt eine Ruptur der Scapho-trapezialen der trapezio-trapezoidalen Ligamente und der trapeziometakarpalen Ligamente voraus. Avaskuläre Nekrosen sind wegen der guten Blutversorgung im Gegensatz zum Scaphoid nicht zu erwarten (Szabo 1995). Als Behandlung dieser Verletzung sind geschlossene Reposition und perkutane K-Drahtspickung (Dunn 1972), offene Reposition und interne Stabilisierung (Brewood 1985, Goldberg 1981, Ehara 1988, Holdsworth 1987, Sherlock 1987), Arthrodesen (Brewood 1985) und Exstirpation des Trapezium (Goldberg 1981) beschrieben worden. Während für geschlossene Verletzungen die geschlossene Reposition und perkutane Spickung empfohlen wird, ist bei offenen Verletzungen die offene Reposition mit interner Stabilisierung durchzuführen. Eine Rekonstruktion der periartikulären und periösären Ligamente ist dabei wann immer möglich anzustreben (Idler 2001). Es folgt eine Gipsimmobilisation für 4-6 Wochen. Als Komplikationen sind Gelenkinstabilität,

Arthrofibrose, posttraumatische Athrose und in Einzelfällen Nervenschäden des thenaren Medianusanteils beschrieben worden (Siegel 1969, Seimon 1972).

Eine weitere Dislokationsverletzung der radialen Handseite ist die Dislokation des Scaphoid. Hierbei sind palmar radiale und dorsale Dislokationen berichtet worden (Antuna 1997, Amamilo 1985, Engkvist 1986, Inoue 1990, Maki 1982, Maki 1982, Takami 1992). Als Behandlungsmöglichkeiten wird die geschlossene Reposition mit und ohne perkutane K-Drahtspickung (Szabo 1995, Maki 1982), die offene Reposition mit oder ohne interne Stabilisierung (Gelbermann 1980, Antuna 1997, Engkvist 1986, Maki 1982) vorgeschlagen. Es sind gute Ergebnisse bei der geschlossenen Behandlung beschrieben, jedoch können scapholunäre Dissoziationen und Rotationsinstabilitäten verbleiben (Idler 2001). Szabo (1995) beschreibt Ligamentverletzungen, die ausgehend von einer Ruptur des Radio-Scapho-Lunären und Radio-Scapho-capitären Ligaments bis zur einer kompletten Zerstörung auch der Bänder am distalen Ende des Scaphoids reichen. Szabo empfiehlt als Grundbehandlung die geschlossene Reposition kombiniert mit einer arthroskopischen Inspektion der karpalen Ligamente. Je nach Grad der ligamentären Verletzungen wird eine geschlossene Reposition mit oder ohne perkutaner K-Drahtspickung mit arthroskopischer Versorgung des Bandschadens bzw. offene Reposition und Stabilisierung mit Versorgung des scapholunären Ligaments empfohlen. Als Komplikationen einer Dislokation des Scaphoid sind persistierende karpale Instabilitäten, posttraumatische Arthrose und selten auch die avaskuläre Nekrose beschrieben (Mc Namara 1992, Engkvist 1986, Szabo 1995, Stambough 1986, Milankow 1994).

Chronische karpale pathologische Veränderungen beinhalten die karpale Instabilität nach verzögert oder unzureichend behandelten bzw. nach übersehenen nicht behandelten karpalen Verletzungen, außerdem die primär arthrotischen und sekundär posttraumatisch bzw. arthritischen Veränderungen. Bei Instabilitäten gelten als Therapiekonzept die Weichteil rekonstruktiven und Stabilisierungseingriffe (Saffar 1999, Cohen 2001) als auch die limitierten karpalen Athrodesen (Watson 2001, Weinzweig 2001). Bei bereits arthrotisch veränderten Gelenken stehen die Resektionsarthroplastiken (Innis van 1983), Arthrodesen (Watson 1999 und 2001), und teilweise auch die Endoprothetik (Menon 2001) im Vordergrund.

In vielen Studien besteht der Konsens, daß bei der Notwendigkeit einer offenen Behandlung einer karpalen Verletzung nach vorhandenen Ligamenteinrissen zu schauen ist. Da die karpalen Ligamente intrakapsulär verlaufen bietet sich hierbei und auch bei chronischen Veränderungen die Arthroskopie und auch die Arthrografie an (Masquelet 1993, Szabo 1995, Schädel-Hopfner 2000 und 2001). Zu der Behandlung chronischer karpaler Instabilitäten gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Studien, wobei der Veränderung im Radio-Scapho-Lunärem Bandkomplex und der daraus resultierenden Scapholunären Dissoziation, auch bekannt als Rotationsinstabilität des Scaphoid (Brunelli 2001), das weitaus größte Augenmerk geschenkt wurde. Als Behandlungsmethoden werden das arthroskopische Debridement (Weiss 1997), Rekonstruktion und Stabilisierung mit Mitek-

knochenankern (Bickert 2000, Wilhelm 2001), durch direkte Naht (Dunn 2001), durch Verwendung von autologen Knochen-Ligament-Knochen-Transplantaten (Wolf 2001), die Kapsulodese (Bahm 2000, Blatt 2001) und die STT-arthrodese (Watson 1986 und 2001, Weinzig 2001) in der Literatur beschrieben.

Dem STT-Ligamentkomplex wird in der Literatur weitaus weniger Beachtung geschenkt. Masquelet 1993 berichtet über isolierte traumatische Rupturen des Scapho-trapezialen Bandapparats und empfiehlt die Rekonstruktion des zerstörten Bandapparats. Brunelli 2001 fand heraus, daß die Rotationsinstabilitäten des Scaphoid vermehrt durch Ruptur des STT-Ligamentkomplex und nicht wie sonst postuliert durch Ruptur des Scapholunären Bandkomplexes hervorgerufen wird. Er empfiehlt die Reposition des Scaphoid durch die Zügelung mit einem Teil der FCR-sehne. Watson und Weinzig merken in ihrem Kommentar zu der Brunelli Studie an, daß die Scapholunären Dissoziationen, die durch eine Ruptur des STT-Ligamentkomplexes verursacht werden weitaus seltener sind im Gegensatz zu den Scapholunären Dissoziationen, die durch Rupturen im Scapholunären Bandkomplex verursacht werden. Dennoch bleibt zu vermuten, daß dem STT-Ligamentkomplex mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Vielleicht sind gerade die Scapholunären Dissoziationen die nicht oder nicht alleine durch eine Ruptur im Scapholunären Bandkomplex verursacht wurden, diejenigen SL-dissoziationen, die von rekonstruktiven und zügelnden Maßnahmen alleine im SL-bereich nicht profitieren und deshalb zu schlechteren Ergebnissen führen. Ein weiteres Indiz für diese Einschätzung ist die Tatsache, daß als ein Behandlungskonzept bei SL-dissoziationen die STT-arthrodese gilt (Watson 1986), eine iatrogene nicht ligamentäre aber knöcherne Verbindung zwischen Scaphoid, Trapezium und Trapezoideum.

Die in dieser Studie ausgewerteten Ergebnisse zeigen, daß der STT-Ligament Komplex bei Zirkumduktion des Daumens einen stabilisierenden Effekt für das STT-Gelenk hat. Eine Durchtrennung führt bei Zirkumduktion des Daumens zu einer signifikanten Veränderung der Kinematik im STT-Gelenk. Es ist daher anzunehmen, daß die Wertigkeit dieses Ligamentkomplexes bedacht werden muß, und daß unter klinischen Gesichtspunkten diese Arbeit dazu führen sollte, auch isolierte STT-Ligamentverletzungen bzw. kombinierte Ligamentverletzungen unter Einbeziehung des STT-Ligament-Komplexes, im Rahmen von zukünftigen Therapiekonzepten mehr mit einzubeziehen, sei es unter dem Gesichtspunkt einer Ligamentnaht bzw. einer Ligamentrekonstruktion mit autologen Transplantatgeweben.

6 Zusammenfassung

Auf der radialen Seite der Hand befindet sich mit dem Daumen ein Greifinstrument, das in dieser Art einzigartig ist. Der den vier Langfingern gegenübergestellte Daumen, ermöglicht durch seine Fähigkeit zur Opposition der menschlichen Hand im Vergleich z.B. mit der Affenhand einen enormen Gewinn an Einsatzmöglichkeiten. Die Rolle des Daumenstrahls für die volle Funktion der menschlichen Hand zeigt sich bei traumatischen und degenerativen Läsionen der daumenseitigen Hand. So führen Verletzungen, wie z.B. die Scaphoidfraktur mit der Gefahr der Pseudarthrose, die scapholunäre Dissoziation, karpometakarpale Verletzungen des Daumenstrahls und Erkrankungen aus dem rheumatischen Formenkreis mit karpalen Instabilitäten letztendlich zu degenerativen Schädigungen der radialen Handseite und letztendlich zu Funktionsverlusten der gesamten Hand.

Zur experimentellen Untersuchung der Kinematik des Karpus sind in der Vergangenheit verschiedene Methoden verwendet worden. So wurde die Röntgenkinematografie, die mittels biplanarer Röntgenbilder und implantierten Metallmarkern eine Berechnung der karpalen Kinematik zulässt, intensiv verwendet. Als neueres Verfahren werden z.B. sogenannte „magnetic-tracking-devices“ verwendet. Diese ermöglichen mittels Befestigung von Sensoren an den zu untersuchenden Knochen, und Bewegung der Knochen respektive der Sensoren in einem durch eine Magnetfeldquelle erzeugtem Magnetfeld eine kontinuierliche Berechnung der kinematischen Parameter. Die Anwendbarkeit dieses Meßsystems zur Untersuchung der karpalen Kinematik wurde erstmals durch Wissenschaftler des Orthopedics Biomechanics Laboratory der Mayo Clinic erprobt und beschrieben.

In der bisherigen Literatur wird postuliert, daß sich die Bewegung des Daumens auf die radiale Karpussäule und somit auch auf das Scapho-Trapezio-Trapezoidale-(STT)-Gelenk überträgt, was als Indiz für die gehäuft auftretenden degenerativen Veränderungen im Bereich der radialen Hand gesehen werden kann. Bisher wurde in den meisten Arbeiten der Einfluß des Scapho-lunären Bandkomplexes auf die karpale Kinematik in der radialen Karpussäule, und eine Vielzahl von Behandlungsmöglichkeiten bei pathologischen Veränderung in diesem Handbereich beschrieben. Der STT-Ligamentkomplex spielt bei wissenschaftlichen Betrachtungen bislang nur eine untergeordnete Rolle.

In dieser experimentellen Arbeit wurde erstmalig der Einfluß untersucht, den die Daumenumwendbewegung, die Zirkumduktion, auf das STT-Gelenk hat. Untersucht wurde die Kinematik bei normalen Bandverhältnissen und nach experimenteller Durchtrennung der STT-Ligamente, jeweils bei leichtem und starkem Muskelzug. Zur Ermittlung der Bewegungsdaten wurde ein Magnetic Tracking System (ISOTRACK der Firma Polhemus) verwendet.

Folgende Schlußfolgerungen können durch diese Arbeit gemacht werden:

Der Bewegungsumfang im STT- und im RS-Gelenk ist abhängig von der Handgelenkposition. Bei Extension des Handgelenks ist der Bewegungsumfang größer als in Flexion, und bei ulnarer Deviation größer als bei radialer Deviation. Nach den vorliegenden Ergebnissen kann die Aussage getroffen werden, daß eine Einstellung des Handgelenks in Flexion und radiale Deviation einen stabilisierenden bzw. anspannenden Effekt auf das STT-gelenk und das RS-Gelenk hat, während eine Einstellung des Handgelenks in Extension und ulnare Deviation einen destabilisierenden bzw. entspannenden Effekt ausübt.

Zirkumduktion des Daumens induziert eine Bewegung im Scapho-Trapezio-Trapezoidal-(STT)-Gelenk und Radio-Scaphoidal-(RS)-Gelenk. Die Bewegungsrichtungen der Handwurzelknochen stimmen mit den Bewegungsrichtungen des ersten Mittelhandknochens und damit des Daumens überein. Somit besteht nicht nur eine Induktion, die zur einer zufälligen Bewegung führt, sondern zu einer, verglichen mit der Daumenposition, jeweils gleichgerichteten Bewegung.

Die Durchtrennung der STT-Ligamente führt zu einer Veränderung der Kinematik des Trapezium und somit des STT-Gelenks. Es kommt zu einer Destabilisierungstendenz des Trapezium. Als Ursache hierfür kann eine reduzierte ligamentäre Kopplung des Trapezium an das Scaphoid nach Durchtrennung der STT-Ligamente angenommen werden, so daß sich eine Daumenzirkumduktion vermehrt auf das Trapezium fortpflanzen kann.

Die Durchtrennung der STT-Ligamente führt nicht zu einer einheitlichen Veränderung der Kinematik des Scaphoid und somit der Bewegung im Radio-Scaphoidal Gelenk. Tendenziell scheint der Bewegungsumfang des Scaphoid, bei Zirkumduktion des Daumens, durch Durchtrennung der STT-Ligamente abzunehmen. Dies kann dadurch erklärt werden, daß die Übertragungsmöglichkeit einer Metakarpalebewegung nach proximal bei durchtrennten STT-Ligamenten im Sinne einer Entkopplung vom Trapezium gestört ist.

Die Veränderung des Muskelzugs hat auf die Kinematik im STT-Gelenk und RS-Gelenk keine einheitliche Wirkung, es kommt insgesamt nur zu minimalen Veränderungen des Bewegungsverhaltens. Ausschlaggebend für die Kinematik des STT- und RS-Gelenks bei Zirkumduktion des Daumens scheint vielmehr die Handgelenkposition zu sein, wobei die stabilisierend wirkende Flexionsstellung des Handgelenks durch Muskelzug in ihrer stabilisierenden Wirkung unterstützt wird. Die destabilisierend wirkende Extensionsstellung des Handgelenks wird durch erhöhten Muskelzug in der destabilisierenden Wirkung verstärkt.

Aufgrund der vorliegenden Arbeit kann gefolgert werden, daß, zumindest bei mittleren Zirkumduktionsbewegungen des Daumens, durch Daumenbewegung eine gleichgerichtete

Bewegungsinduktion auf das STT-Gelenk ausgeübt wird, wobei Ligamentläsionen eine Vergrößerung des Bewegungsumfangs im Sinne einer Destabilisierungstendenz verursachen. Diese Destabilisierungstendenz kann eine initiiierende Funktion bei degenerativen karpalen Veränderungen spielen und sollte somit bei konservativen und operativen Behandlungskonzepten berücksichtigt werden.

7 Anhang

7.1 Tabellen 1-18: Bewegungsumfang des Trapezium

	Neutral	Flexion	Extension	uln.Dev.	rad.Dev.
1l	0,74349	0,81206	0,63098	1,92143	0,39072
2l	1,42788	0,90869	1,2389	0,55439	1,09244
2r	1,38789	0,58534	2,53272	1,40005	1,17708
3r	2,25962	2,22185	0,79906	2,73505	0,45957
4l	0,54845	1,27264	0,4367	1,75978	0,69566
4r	1,38152	1,01009	0,5858	1,68828	0,37485
5l	0,52993	0,42397	0,73485	1,29132	0,32174
5r	0,54972	0,43478	0,89806	0,41053	0,21849
7r	1,48644	1,53964	0,87167	1,50236	0,55345

Tab.1

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	3,19785	1,83123	2,6818	3,2935	1,16268
2l	1,49285	1,26228	2,47494	0,68026	2,02722
2r	1,22841	0,79438	1,29123	0,48564	1,27791
3r	2,55489	3,32712	2,28853	2,92824	1,52085
4l	2,37556	1,37685	2,99221	3,35677	1,48476
4r	1,20948	1,21699	0,98081	1,44536	1,21779
5l	2,19442	0,85468	1,49736	1,51065	0,71814
5r	0,54529	0,66693	0,94713	0,25571	0,63951
7r	1,02482	1,26012	1,06269	1,01875	1,08624

Tab.2

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	3,04549	2,28021	1,6595	3,32358	1,403
2l	1,99259	1,02358	6,01619	0,73602	2,45787
2r	0,93778	1,33391	2,2047	0,8337	1,02296
3r	1,61202	1,87854	1,79475	2,83251	1,2526
4l	1,92228	1,28159	1,98686	3,56987	1,41743
4r	0,78466	1,01295	0,63078	0,71155	0,62256
5l	2,30464	1,17174	1,18145	1,70711	0,98658
5r	0,50326	0,77614	0,58859	0,27851	0,559
7r	0,46245	0,82652	0,67706	0,58214	0,53812

Tab.3

Tabellen 1-3: Intakte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (nll). Bewegungsumfang des Trapezium in Grad in der Flexions-/Extensions (Tab.1), ulnaren-radialen Deviations (Tab.2)- und der Pronations - Supinationsachse (Tab3).

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	1,57009	1,0841	1,24655	1,1187	1,65098
2l	0,61842	0,26905	2,51411	1,78994	1,21241
2r	0,82184	1,76351	1,58642	1,15518	0,50272
3r	2,22075	1,07591	0,61317	1,05962	1,21624
4l	0,65265	1,06865	1,68804	2,884	0,99756
4r	1,5532	1,5015	2,02514	0,6168	1,2272
5l	0,96702	0,28311	0,77505	0,42494	0,26561
5r	0,32818	0,48022	1,90705	0,39538	0,45569
7r	0,79997	0,6661	1,13652	0,74123	0,9379

Tab.4

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	5,35813	0,32008	3,45576	2,37744	1,00933
2l	1,05386	0,30837	3,8488	1,2927	1,21822
2r	0,67732	0,70071	0,85939	3,11083	0,73029
3r	2,83047	2,25912	1,4448	1,0236	2,45723
4l	1,94253	0,6907	3,95972	2,68065	0,61339
4r	1,9603	2,33558	2,24336	1,88163	2,26379
5l	1,06687	0,50775	0,86463	0,83947	1,01142
5r	0,37586	0,65759	2,0173	0,39218	0,82462
7r	1,36866	1,31961	1,39733	0,40497	1,24603

Tab.5

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	4,48659	2,4832	1,81665	4,17635	3,42952
2l	2,33105	0,32208	4,99049	1,95014	2,71567
2r	0,9614	0,80218	1,12517	2,56978	0,64164
3r	2,94205	2,09586	1,4345	1,35616	1,54647
4l	2,00375	0,78248	3,68149	4,59409	1,63242
4r	1,38402	2,3718	2,63827	1,3113	0,90858
5l	1,15876	0,44311	0,83609	1,4319	1,08661
5r	0,41567	0,91892	0,49751	0,4945	0,92876
7r	0,64873	0,80418	1,38376	0,61095	0,6433

Tab.6

Tabellen 3-6: Intakte STT-Ligamente und starker Muskelzug (nhl). Bewegungsumfang des Trapezium in Grad in der Flexions- / Extensions (Tab.4), ulnaren-radialen Deviations-(Tab.5) und der Pronations - Supinationsachse (Tab.6).

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,76526	0,62183	1,64968	1,07738	0,85279
2l	1,62072	0,33037	1,39383	2,65562	1,19558
2r	1,57111	0,93235	2,3946	2,49875	1,38234
3r	5,61665	2,40683	2,10532	3,9584	1,64396
4l	1,87295	0,60803	1,72145	4,13235	1,14231
4r	2,49162	3,28116	2,55222	1,88717	0,85707
5l	0,46131	0,52447	0,73242	1,01379	0,69586
5r	0,59951	0,4661	0,83648	1,44877	0,64147
7r	1,0394	0,99212	0,96867	1,16441	0,56718

Tab.7

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	3,26326	1,57862	5,81337	2,08238	0,4727
2l	1,48623	0,62927	2,7076	0,82292	3,10021
2r	1,10749	0,95697	2,15357	1,72832	1,14872
3r	4,98403	2,48781	4,25779	4,20817	3,51216
4l	5,93419	1,07183	6,6859	4,84336	1,24616
4r	2,96463	2,84439	2,87795	2,35212	1,24724
5l	0,73313	0,9339	1,5187	0,87786	1,06854
5r	0,51281	0,53773	0,97201	0,6127	1,0358
7r	0,7326	1,04546	0,84136	0,69259	1,19407

Tab.8

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	4,06638	1,58313	1,64682	1,57547	0,90677
2l	5,97725	0,81445	6,18443	1,87056	2,22305
2r	1,91953	1,13243	2,78986	2,06358	0,9045
3r	3,54139	1,81955	3,02654	4,26467	1,64812
4l	3,02324	0,95803	4,07425	5,96982	1,03391
4r	1,61276	0,96988	2,34439	1,05006	0,52181
5l	1,77645	0,63664	2,95041	0,67536	1,29708
5r	0,68359	0,46092	0,78523	0,80538	1,06004
7r	0,77666	0,62847	1,14597	0,65908	0,699

Tab. 9

Tabellen 7-9: Durchtrennte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (2ll). Bewegungsumfang des Trapezium in Grad in der Flexions- / Extensions (Tab.7), ulnaren-radialen Deviations- (Tab.8) und der Pronations - Supinationsachse (Tab.9).

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	2,80462	0,35195	0,65847	1,15203	2,18695
2l	0,99702	0,66873	1,31274	2,2372	1,39362
2r	1,45967	1,08057	1,18948	1,215	0,94909
3r	2,20061	2,05713	1,56816	1,2803	2,16245
4l	1,04752	0,87379	2,06134	2,8469	1,10181
4r	1,71094		1,55439	0,88923	0,72648
5l	0,55462	0,40379	0,60181	0,258	0,68097
5r	0,54877	0,5593	2,30115	0,71528	0,65621
7r	1,06018	0,40704	1,88213	1,00618	0,71615

Tab.10

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	3,94905	0,36933	2,94481	2,78927	3,24192
2l	1,86	1,02196	1,83166	1,52674	1,73406
2r	0,99298	0,91758	0,78189	0,64135	1,32174
3r	3,20623	3,0193	3,87772	3,68979	3,36758
4l	2,21787	0,87128	3,42706	2,52141	0,81053
4r	3,0855		2,50792	1,86784	2,14373
5l	0,70301	0,55186	1,16198	1,02172	1,32011
5r	0,50687	1,21702	2,11033	0,71277	1,05029
7r	1,1567	0,71366	1,7664	0,81946	1,64334

Tab.11

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	4,48821	1,00625	1,58776	3,21298	3,25443
2l	1,72047	0,46558	4,42461	2,04723	3,12242
2r	1,40756	0,65438	1,21709	0,74088	0,97
3r	2,8403	2,17476	2,50139	3,93164	2,32013
4l	2,36903	1,27714	3,97781	4,63395	1,80304
4r	1,32634		1,4669	1,57511	0,88721
5l	1,02606	0,71227	1,29105	2,16204	1,22438
5r	0,67313	1,10967	0,86755	0,60163	0,65476
7r	0,95655	0,70724	2,15354	1,44806	0,79809

Tab.12

Tabellen 10-12: Durchtrennte STT-Ligamente und starker Muskelzug (nhl). Bewegungsumfang des Trapezium in Grad in der Flexions- / Extensions (Tab.10), ulnaren-radialen Deviations-(Tab.11) und der Pronations - Supinationsachse (Tab.12).

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	1,15	0,59	1,06	0,6	1,78	1,58	1,38	0,75
Flex.	1,02	0,58	0,91	0,53	1,13	1,02	0,8	0,57
Ext.	0,97	0,63	1,5	0,61	1,59	0,67	1,46	0,59
uln.Dev.	1,47	0,7	1,13	0,79	2,2	1,2	1,29	0,79
rad.Dev.	0,59	0,34	0,94	0,45	1	0,37	1,17	0,62

Tab.13

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	1,76	0,86	1,85	1,51	2,41	2	1,96	1,23
Flex.	1,4	0,8	1,01	0,79	1,34	0,81	1,09	0,83
Ext.	1,8	0,81	2,23	1,24	3,09	2,09	2,27	1,02
uln.Dev.	1,66	1,22	1,56	1	2,02	1,56	1,73	1,07
rad.Dev.	1,24	0,42	1,26	0,66	1,56	1,02	1,85	0,91

Tab.14

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	1,51	0,89	1,81	1,29	2,6	1,72	1,87	1,2
Flex.	1,29	0,5	1,22	0,85	1	0,45	1,01	0,54
Ext.	1,86	1,67	2,04	1,47	2,77	1,64	2,17	1,26
uln.Dev.	1,62	1,29	2,06	1,47	2,1	1,83	2,26	1,4
rad.Dev.	1,14	0,6	1,5	0,97	1,14	0,52	1,67	1,01

Tab.15

Tabellen 13-15: Bewegungsumfang des Trapezium um die Flexions- / Extensions (Tab.13), ulnaren-radialen Deviations-(Tab.14) und der Pronations - Supinationsachse (Tab.15) in Grad. Zusammenfassung der Präparate (μ) und Standardabweichung (s) in Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnare (uln. Dev.) und radiale (rad. Dev.) Deviation des Handgelenks. Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (nll) / starken (nhl) Muskelzug und bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2ll) / starken (2hl) Muskelzug.

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	0,042	0,03	0,043	0,036	0,054	0,032	0,042	0,029
Flex.	0,039	0,027	0,032	0,017	0,036	0,022	0,03	0,013
Ext.	0,041	0,022	0,041	0,025	0,049	0,031	0,039	0,016
uln.Dev.	0,067	0,059	0,067	0,051	0,075	0,053	0,058	0,042
rad.Dev.	0,039	0,015	0,041	0,019	0,046	0,023	0,047	0,016

Tab. 16

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	0,12	0,07	0,14	0,1	0,2	0,12	0,15	0,1
Flex.	0,1	0,05	0,1	0,08	0,08	0,04	0,09	0,05
Ext.	0,13	0,1	0,15	0,1	0,22	0,12	0,17	0,09
uln.Dev.	0,13	0,09	0,14	0,1	0,14	0,11	0,16	0,09
rad.Dev.	0,08	0,04	0,12	0,08	0,09	0,05	0,13	0,08

Tab.17

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	0,14	0,07	0,15	0,12	0,19	0,14	0,16	0,09
Flex.	0,11	0,05	0,09	0,06	0,1	0,06	0,08	0,05
Ext.	0,15	0,07	0,17	0,09	0,24	0,17	0,17	0,07
uln.Dev.	0,13	0,1	0,14	0,1	0,16	0,15	0,16	0,1
rad.Dev.	0,1	0,02	0,11	0,05	0,12	0,07	0,15	0,08

Tab.18

Tabellen 16-18: Bewegungsumfang des Trapezium entlang der Flexions- / Extensions (Tab.16: ulnare-radiale Translation), ulnaren-radialen Deviations-(Tab.17: dorsale-volare Translation) und der Pronations - Supinationsachse (Tab.18: distale-proximale Translation) in mm. Zusammenfassung der Präparate (μ) und Standardabweichung (s) in Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnare (uln. Dev.) und radiale (rad. Dev.) Deviation des Handgelenks. Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (nll) / starken (nhl) Muskelzug und bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2ll) / starken (2hl) Muskelzug.

7.2 Tabellen 19-36: Bewegungsumfang des Scaphoid

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,432722	0,518627	0,554196	3,615672	0,135057
2l	3,532058	0,562904	1,709275	5,09983	2,091392
2r	3,504688	1,050869	3,189976	3,38012	1,654922
3r	3,28151	2,965363	0,323669	4,744317	0,682417
4l	1,401081	1,607002	1,03675	1,669052	1,900276
4r	1,200422	1,183613	0,504353	2,533182	0,398502
5l	1,223454	0,322308	1,216042	2,8568	0,309536
5r	0,976325	0,50383	1,059433	1,023533	0,618355
7r	1,197478	1,627811	0,628269	1,743214	0,680939

Tab.19

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,104002	0,496654	0,31957	0,538941	0,181553
2l	1,234799	0,850116	1,885177	2,969819	0,982523
2r	0,812212	1,398682	3,040683	0,746454	0,438923
3r	1,222098	0,852341	1,023259	1,181784	0,507952
4l	2,374173	1,464746	2,602057	3,474754	1,439432
4r	0,518604	0,400673	0,870357	0,41285	0,378752
5l	0,26454	0,654318	0,727348	0,443943	0,219481
5r	0,874832	0,365238	1,070712	0,296413	0,305209
7r	0,997387	1,428739	0,918084	0,486009	0,305054

Tab.20

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,55666	1,09342	0,21141	2,12448	0,91178
2l	2,43789	1,38141	2,1278	4,82761	4,18251
2r	2,77735	1,70744	2,22044	5,17391	3,51827
3r	3,94444	2,27701	1,33343	3,98774	1,41713
4l	2,69589	1,27172	2,59752	3,91684	3,29479
4r	0,99453	1,49146	0,67313	0,75773	1,04244
5l	0,72224	0,73163	0,43762	1,17079	0,40704
5r	1,6867	0,63745	0,32341	0,63791	0,40542
7r	0,87688	0,86938	1,00185	1,11218	0,98886

Tab.21

Tabellen 19-21: Intakte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (nll). Bewegungsumfang des Scaphoid in Grad in der Flexions-/Extensions (Tab.19), ulnaren-radialen Deviations Tab.20)- und der Pronations - Supinationsachse (Tab.21).

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	1,053334	0,481358	0,732094	1,565123	0,766094
2l	2,550308	0,846836	2,743515	3,505901	1,268205
2r	2,048461	0,541996	2,039276	1,843298	0,899846
3r	3,737737	0,917519	2,887668	4,364632	0,81877
4l	0,824043	1,084034	0,713974	2,334552	1,110951
4r	1,579716	1,021956	0,920688	2,655059	0,392043
5l	0,530494	0,194889	0,589401	0,858276	0,433668
5r	0,452461	0,361435	2,194691	0,983047	0,708947
7r	1,433956	0,908524	1,220289	1,618542	1,219509

Tab.22

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,202138	0,427078	0,706214	0,352749	0,329937
2l	0,318615	0,803241	3,417039	0,621622	0,271805
2r	0,273421	0,26614	1,897638	3,851881	0,400433
3r	1,710147	1,29859	3,178058	1,498108	0,770251
4l	2,375	0,834885	4,40297	4,316179	0,87079
4r	0,849695	1,288466	1,745357	1,057995	1,32982
5l	0,135889	0,222623	0,269704	0,168272	0,202067
5r	0,972443	0,377184	2,623126	0,57297	0,399164
7r	1,283479	1,56103	0,980247	0,605433	0,570777

Tab.23

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,84657	0,85175	0,59003	0,98178	1,84549
2l	1,71139	0,96088	1,30372	2,33387	1,68094
2r	1,4056	0,5705	2,4333	1,75165	1,27688
3r	2,3779	0,91259	2,82023	1,66017	1,49535
4l	2,69595	1,28977	4,31274	5,2306	1,50736
4r	1,68662	1,85512	0,96231	1,3434	1,23191
5l	0,35381	0,36393	0,29742	0,36433	0,25945
5r	0,43258	0,33217	1,22422	0,48042	0,30221
7r	0,62428	0,64118	0,81905	0,62327	1,0456

Tab.24

Tabellen 22-24: Intakte STT-Ligamente und starker Muskelzug (nhl). Bewegungsumfang des Scaphoid in Grad in der Flexions-/Extensions (Tab.22), ulnaren-radialen Deviations (Tab.23)- und der Pronations - Supinationsachse (Tab.24).

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	1,439504	0,511635	0,37056	1,233884	0,613229
2l	5,794953	0,179489	1,515275	8,170138	2,471345
2r	3,062742	0,933678	2,11055	4,584851	1,24022
3r	6,142111	1,723553	0,26844	5,387026	0,784057
4l	1,015194	1,143544	1,893158	1,229986	1,172628
4r	2,296272	2,610027	0,965847	3,680372	0,478028
5l	0,871168	0,535199	0,715263	0,865448	0,314136
5r	0,659332	0,515446	0,754745	1,481953	0,522631
7r	1,23723	1,174583	0,844969	1,607292	0,645407

Tab.25

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,236254	0,582044	0,648394	0,258163	0,47365
2l	1,463736	0,774785	1,142356	2,912823	0,388775
2r	1,010731	1,355369	1,995072	1,136745	0,499639
3r	1,345385	0,578188	0,507817	1,562671	0,643544
4l	5,186543	1,727801	6,564032	6,75547	1,52997
4r	0,984542	0,571205	1,051716	1,167707	0,411138
5l	0,469603	0,388112	0,464708	0,353178	0,225062
5r	0,9441	0,286108	0,842749	0,367413	0,586465
7r	1,21906	1,590687	1,048903	0,629686	0,682352

Tab.26

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	1,48525	1,36037	0,48355	0,9367	0,95409
2l	4,10126	0,88382	0,87343	5,92621	1,312
2r	3,21234	1,87396	1,72048	8,21624	3,32876
3r	3,46237	0,94953	0,73351	3,99598	1,60298
4l	3,89967	1,33076	7,38361	4,6079	2,01016
4r	1,88188	1,85352	0,71896	1,09758	0,95584
5l	0,41358	0,5799	0,18189	0,64921	0,21491
5r	1,08905	0,172	0,4762	0,69452	0,3963
7r	1,38886	0,47101	0,88193	0,9761	0,76437

Tab.27

Tabellen 25-27: Durchtrennte STT-Ligamente und leichter Muskelzug (2ll). Bewegungsumfang des Scaphoid in Grad in der Flexions-/Extensions (Tab.25), ulnaren-radialen Deviations Tab.26)- und der Pronations - Supinationsachse (Tab.27).

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,663298	0,706665	0,520996	1,930842	1,07269
2l	2,270927	0,634006	3,184234	4,002423	1,584966
2r	2,425319	0,598339	1,85027	2,031304	1,668815
3r	3,125747	1,315279	1,826622	6,227445	0,797469
4l	0,611964	1,178547	0,656708	3,153462	1,595048
4r	2,358581		1,423492	1,954302	0,429421
5l	0,618483	0,364658	0,583092	1,289962	0,599981
5r	0,331676	0,444538	2,687736	1,079738	0,714071
7r	1,778673	0,673962	2,329428	2,047163	1,088751

Tab.28

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,08147	0,675155	0,705079	0,695524	0,34648
2l	0,251697	0,540148	3,497518	0,608086	0,300117
2r	0,310423	0,742695	1,350975	0,313929	0,553265
3r	1,871975	1,461237	4,421689	2,619092	1,045309
4l	2,912398	1,469716	4,273502	4,22863	0,871903
4r	0,859995		1,517202	1,056441	0,55386
5l	0,196556	0,164197	0,304537	0,584267	0,227718
5r	1,127356	0,5864	3,586833	0,776752	0,496109
7r	1,207613	0,84677	2,003566	1,220762	0,802473

Tab.29

	Neutral	Flexion	Extension	Uln.Dev.	Rad.Dev.
1l	0,71117	1,23747	0,38989	1,58539	1,99065
2l	1,29933	0,91097	0,89566	1,61608	1,35352
2r	1,75392	1,13424	1,6005	1,15409	2,09657
3r	2,02468	1,48505	2,01035	2,7635	1,56851
4l	3,38437	1,64049	4,62266	4,96247	2,28616
4r	1,62166		0,76737	0,49757	1,04051
5l	0,44979	0,47239	0,24571	0,55764	0,47019
5r	0,38306	0,72748	0,89007	0,45455	0,49222
7r	0,88254	0,32015	1,16392	0,66024	0,7507

Tab.30

Tabellen 28-30: Durchtrennte STT-Ligamente und starker Muskelzug (2hl). Bewegungsumfang des Scaphoid in Grad in der Flexions-/Extensions (Tab.28), ulnaren-radialen Deviations (Tab.29)- und der Pronations - Supinationsachse (Tab.30).

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	1,86	1,22	1,58	1,06	2,5	2,1	1,58	1,03
Flex.	1,15	0,84	0,71	0,32	1,04	0,75	0,74	0,34
Ext.	1,14	0,88	1,56	0,91	1,05	0,65	1,67	0,96
uln.Dev.	2,96	1,39	2,19	1,16	3,14	2,51	2,64	1,62
rad.Dev.	0,94	0,74	0,85	0,31	0,92	0,66	1,06	0,47

Tab.31

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	0,93	0,67	0,9	0,77	1,43	1,46	0,98	0,94
Flex.	0,88	0,45	0,79	0,5	0,87	0,54	0,81	0,45
Ext.	1,38	0,92	2,14	1,38	1,59	1,92	2,41	1,56
uln.Dev.	1,17	1,2	1,45	1,55	1,68	2,08	1,34	1,27
rad.Dev.	0,53	0,42	0,57	0,36	0,6	0,37	0,58	0,28

Tab.32

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	1,85	1,17	1,35	0,85	2,33	1,35	1,39	0,95
Flex.	1,27	0,52	0,86	0,48	1,05	0,6	0,99	0,47
Ext.	1,21	0,9	1,64	1,3	1,49	2,25	1,4	1,33
uln.Dev.	2,63	1,84	1,64	1,5	3,01	2,79	1,58	1,47
rad.Dev.	1,8	1,45	1,18	0,56	1,28	0,95	1,34	0,69

Tab.33

Tabellen 31-33: Bewegungsumfang des Scaphoid um die Flexions- / Extensions (Tab.31), ulnaren-radialen Deviations-(Tab.32) und der Pronations - Supinationsachse (Tab.33) in Grad. Zusammenfassung der Präparate (μ) und Standardabweichung (s) in Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnare (uln. Dev.) und radiale (rad. Dev.) Deviation des Handgelenks. Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (nll) / starken (nhl) Muskelzug und bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2ll) / starken (2hl) Muskelzug.

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01
Flex.	0,03	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
Ext.	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03	0,02
uln.Dev.	0,05	0,07	0,07	0,09	0,06	0,1	0,05	0,07
rad.Dev.	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01

Tab.34

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	0,13	0,08	0,09	0,06	0,16	0,09	0,09	0,07
Flex.	0,1	0,03	0,07	0,03	0,08	0,04	0,08	0,04
Ext.	0,1	0,06	0,13	0,08	0,11	0,12	0,14	0,09
uln.Dev.	0,23	0,14	0,14	0,11	0,24	0,21	0,14	0,12
rad.Dev.	0,12	0,09	0,08	0,04	0,09	0,07	0,09	0,05

Tab.35

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Neutral	0,08	0,05	0,07	0,05	0,11	0,11	0,08	0,07
Flex.	0,07	0,04	0,05	0,05	0,06	0,04	0,05	0,04
Ext.	0,07	0,06	0,13	0,13	0,12	0,20	0,14	0,13
uln.Dev.	0,07	0,07	0,09	0,08	0,11	0,13	0,09	0,07
rad.Dev.	0,04	0,03	0,05	0,04	0,05	0,03	0,05	0,02

Tab.36

Tabellen 34-36: Bewegungsumfang des Scaphoid entlang der Flexions- / Extensions (Tab.34: ulnare-radiale Translation), ulnaren-radialen Deviations-(Tab.35: dorsale-volare Translation) und der Pronations - Supinationsachse (Tab.36: distale-proximale Translation) in mm. Zusammenfassung der Präparate (μ) und Standardabweichung (s) in Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnare (uln. Dev.) und radiale (rad. Dev.) Deviation des Handgelenks. Experimente bei intakten STT-Ligamenten und leichtem (nll) / starken (nhl) Muskelzug und bei durchtrennten STT-Ligamenten und leichtem (2ll) / starken (2hl) Muskelzug.

7.3 Tabellen 37-43: Trapezium und Metakarpale 1

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	-1,12	-0,68	-1,74	-0,37	0,02	0,32	-0,67	0,88
2l	0,76	-0,28	-0,32	-0,26	-0,59	-0,72	-0,74	-0,42
2r	-1,46	-0,47	-1,22	-0,52	-1,05	-0,71	-1,81	-0,62
3r	-0,03	-0,18	0,21	-0,34	2,23	-0,49	-0,16	-0,12
4l	0,37	0,52	0,27	0,85	-1,88	-0,51	-0,59	0,07
4r	0,38	-0,08	-0,85	-0,59	2,39	1,77	1	0,56
5l	-0,47	-0,53	-1,78	-1,07	-0,44	-0,53	-0,45	-0,24
5r	0,08	0,31	0,06	0,16	-0,14	-0,08	-0,07	0
7r	0,72	-0,26	0,55	-0,02	0,09	-0,58	0,78	0,15
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	-2,11	0,2	-3,08	1,85	-1,25	1,73	0,09	3,69
2l	-0,77	0,26	-0,02	0,53	0,12	0,68	-0,22	1,17
2r	-1,08	-0,13	-0,1	0,28	-0,09	0,12	-0,07	0,59
3r	-1,25	0,93	-2,25	0,38	-4,4	0,01	-2,47	0,39
4l	0,25	-1,49	-0,2	-0,29	2,16	-3,32	1,13	-0,82
4r	-0,88	0,18	-0,66	0,17	-1	0,76	-1,5	0,13
5l	-1,3	0,05	-0,09	0,49	-0,48	-0,16	-0,3	0,07
5r	-0,15	-0,22	0,08	0,08	0,74	0,98	0,43	0,14
7r	0,07	0,71	-0,51	0,27	0,15	0,32	-0,59	0,42

Tab. 37: Positionen des Trapezium relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Trapezium in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei Neutralstellung des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.47)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	16,18	16,13	14,67	14,17	15,17	15,06	16,03	16,39
2l	-1,85	-1,73	0,57	0,46	-4,69	-4,85	3,64	3,46
2r	0,18	0,53	0,19	1,87	0,52	1,23	1,49	2,48
3r	8,55	8,87	19,08	18,78	8,34	7,87	17,34	16,13
4l	-2,12	-1,55	-14,33	-13,92	-8,93	-8,87	-16,59	-16,11
4r	11,06	11,02	11,58	11,16	10,86	9,67	0	0
5l	-0,77	-0,72	1,64	1,54	-1,04	-1,16	5,37	5,43
5r	1,29	1,24	4,21	4,05	-1,34	-1,44	5,07	5,12
7r	0,57	0,05	-0,79	-1,29	-3,12	-3,78	-0,95	-0,98
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	-3,83	-2,76	-2,8	-2,87	-7,62	-6,8	4,67	5,06
2l	7,02	7,86	5,56	5,93	10,49	10,48	2,18	2,79
2r	4,86	5,05	4,89	5,07	6,23	6,43	3,45	3,58
3r	4,99	7,48	0,9	3,08	6,25	8,65	2,65	3,54
4l	-19,1	-19,8	-16,3	-16,21	-20,69	-21,37	-14,38	-14,75
4r	1,17	2,16	-0,17	0,14	1,02	2,33	0	0
5l	10,62	11,09	10,81	11,18	9,91	10,29	8,16	8,35
5r	9,26	9,7	4,9	4,72	10,67	10,82	4,01	5,06
7r	4,15	5,11	4,69	5,28	8,37	8,64	5,8	6,34

Tab. 38: Positionen des Trapezium relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Trapezium in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei Flexion des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s.Tab.47)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	-8,16	-8,05	-5,07	-5,62	-12,3	-11,28	-5,32	-4,95
2l	-11,99	-12,18	-5,32	-4,43	-16,17	-15,2	-6,65	-6,33
2r	-3,18	-1,25	-0,02	0,75	-6,09	-5,08	-2,65	-1,94
3r	-0,77	-0,66	9,81	9,51	-1,55	-0,68	8,72	8,93
4l	14,89	15,16	1,22	2,15	8,97	8,42	2,55	3,2
4r	-19,6	-19,45	-13,71	-12,34	-21,14	-19,84	-10,69	-10,25
5l	-15,18	-15,11	-7,31	-6,77	-15,99	-15,87	-7,66	-7,51
5r	-12,95	-12,33	-6,55	-6,21	-17,68	-17,47	-10,31	-8,66
7r	-25,5	-25,85	-18,57	-19,29	-26,17	-26,97	-15,43	-16,55
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	6,07	8,53	-2,55	0,32	0,2	5,07	3,97	6,6
2l	9,23	11,41	5,82	7,91	11,79	13,01	8,1	9,05
2r	0,81	1,65	0,75	1,18	1,88	2,28	0,67	1,28
3r	9,72	11,37	-3,36	-2,48	6,98	10,3	-4,72	-1,49
4l	-10,42	-12,44	0,19	-3,22	-3,74	-9,58	-0,33	-3,43
4r	8,52	9,2	3,71	4,93	4,77	6,72	2,18	3,92
5l	12,44	13,31	5,27	5,68	11,06	11,96	4,44	5,33
5r	9,25	0	5,43	0	9,98	0	7,79	0
7r	11,44	12,15	6,88	8,18	13,05	13,66	4,61	5,81

Tab. 39: Positionen des Trapezium relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Trapezium in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei Extension des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.47)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	13,99	13,24	16,43	17,09	17,19	17,58	15,5	16,17
2l	17,47	17,92	11,4	12,08	19,57	19,56	12,75	14,09
2r	6,75	7,76	8,86	9,15	8,81	10,72	8,18	8,94
3r	13,46	13,87	19,2	18,81	18,42	17,84	23,19	23,52
4l	-17,86	-16,84	-20,4	-18,15	-24,49	-23,45	-22,36	-20,88
4r	19,37	18,56	19,17	19,35	25,47	24,4	17,69	18,07
5l	16,03	15,71	13,51	13,66	16,57	16,54	15,77	15,83
5r	12,02	11,68	12,89	12,97	8,58	7,77	6,79	6,66
7r	9,4	8,89	9,86	9,3	8,3	9,95	10,53	10,21
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	-15,41	-12,43	-16,74	-15,13	-19,47	-17,7	-8,15	-5,79
2l	-14,53	-14,42	-12,3	-11,32	-14,12	-14,12	-16,2	-15,21
2r	-7,92	-7,75	-6,3	-6,14	-7,67	-7,5	-10,04	-9,7
3r	-12,55	-10,74	-10,75	-10,18	-15,73	-12,55	-14,38	-11,41
4l	11,8	9,03	11,71	11,05	12,23	9,04	11,76	10,83
4r	-8,95	-8,62	-7,47	-5,88	-11,98	-10,47	-7,12	-6,2
5l	-12,04	-11,18	-11,71	-11,18	-13,56	-12,87	-12,3	-12,15
5r	-9,87	-9,82	-11,74	-12,08	-15,19	-15,71	-15,75	-15,9
7r	-8,46	-8,16	-12,8	-12,75	-8,4	-7,91	-14,7	-14,08

Tab. 40: Positionen des Trapezium relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Trapezium in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei ulnarer Deviation des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.47)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	-6,91	-6,84	-7,27	-6,76	-7,04	-7,49	-7,82	-7,14
2l	-17,01	-17,9	-16,78	-16,04	-18,76	-19,36	-19,75	-18,99
2r	0,22	1,16	2,77	2,98	2,19	3,08	-1,27	-0,85
3r	-7,61	-7,72	-7,51	-7,51	-10,48	-9,97	-9,05	-8,59
4l	10,33	10,87	2,98	3,03	5,06	5,11	2,07	1,96
4r	-16,18	-16,05	-12,46	-11,84	-15,6	-15,25	-15,08	-14,94
5l	-16,72	-16,77	-17,76	-17,65	-17,09	-16,89	-15,92	-15,33
5r	-14,6	-14,6	-14,47	-14,52	-17,91	-17,98	-15,54	-15,38
7r	-23,91	-23,85	-21,54	-21,3	-25,44	-25,17	-16,39	-16,71
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	9,52	10,59	4,29	4,82	4,52	4,65	9,14	11,89
2l	18,6	20,25	16,4	17,45	17,04	18,96	20,98	22,1
2r	10,06	10,81	9,11	9,51	13,77	14,33	7,22	7,73
3r	16,06	17,33	8,03	10,11	14,4	17,76	7,7	10,65
4l	-21,14	-22,05	-22,06	-22,34	-24,43	-25,46	-18,61	-18,46
4r	19,06	19,9	13,33	14,11	17,92	17,84	12,79	14,71
5l	17,93	18,5	18,14	18,95	18,92	19,59	18,6	19,75
5r	16,31	16,59	13,99	14,7	17,58	18,53	17,67	18,44
7r	17,92	18,84	19,76	20,46	21,7	22,63	17,08	18,06

Tab. 41: Positionen des Trapezium relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Trapezium in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei radialer Deviation des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.47)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
Neutral μ	-0,08	-0,18	-0,54	-0,24	0,07	-0,17	-0,3	0,03
Neutral s	0,79	0,39	0,89	0,54	1,41	0,8	0,84	0,47
Extens. μ	-9,16	-8,86	-5,06	-4,7	-12,01	-11,55	-5,27	-4,9
Extens. s	11,83	12,07	8,29	8,34	10,8	10,8	7,33	7,52
Flexion μ	3,68	3,76	4,09	4,09	1,75	1,53	3,92	3,99
Flexion s	6,58	6,53	9,94	9,65	7,94	7,77	10,56	10,25
ul.Dev. μ	10,07	10,09	10,1	10,47	10,94	11,21	9,78	10,29
ul.Dev. s	11,18	10,74	12,03	11,36	14,51	14,02	13,06	12,76
ra.Dev. μ	-10,27	-10,19	-10,23	-9,96	-11,68	-11,55	-10,97	-10,66
ra.Dev. s	10,49	10,8	8,73	8,67	10,11	10,25	7,47	7,42

Tab. 42: Positionen des Trapezium relativ zum rechnerisch fixierten Scaphoid in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad bei Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnarer (uln.Dev.) und radialer (ra.Dev.) Deviation des Handgelenks. Zusammenfassung der verwendeten Präparate (μ) und Darstellung der Standardabweichung (s) in den Experimenten intakte STT-Ligamente + leichter (nll) bzw. starker (nhl) Muskelzug und durchtrennte STT-Ligamente + leichter (2ll) bzw. starker Muskelzug(2hl).

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
Neutral μ	-0,8	0,06	-0,76	0,42	-0,45	0,13	-0,39	0,64
Neutral s	0,75	0,69	1,13	0,59	1,79	1,41	1,06	1,26
Ext. μ	6,34	6,9	2,46	2,81	6,22	6,68	2,97	3,38
Ext. s	7,14	8,61	3,81	4,48	5,83	7,71	4,05	4,26
Flex. μ	2,13	2,88	1,39	1,81	2,74	3,27	2,07	2,49
Flex. s	9,04	9,46	7,7	7,8	10,55	10,81	6,91	7,19
ul.Dev. μ	-8,66	-8,23	-8,68	-8,18	-10,43	-9,98	-9,65	-8,84
ul.Dev. s	8,12	6,82	8,22	7,8	9,24	7,88	8,68	8,21
ra.Dev. μ	11,59	12,31	9	9,75	11,27	12,09	10,29	11,65
ra.Dev. s	12,77	13,37	12,68	13,02	14,23	14,96	11,95	12,22

Tab. 43: Positionen des Trapezium in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad bei Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnarer (uln.Dev.) und radialer (ra.Dev.) Deviation des Handgelenks. Zusammenfassung der verwendeten Präparate (μ) und Darstellung der Standardabweichung (s) in den Experimenten intakte STT-Ligamente + leichter (nll) bzw. starker (nhl) Muskelzug und durchtrennte STT-Ligamente + leichter (2ll) bzw. starker Muskelzug(2hl).

7.4 Tabellen 44-50: Scaphoid und Metakarpale 1

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	1,33	1,19	1,55	2,56	0,59	1,25	0,62	0,82
2l	-3,64	-1,01	-1	1,3	-2,14	1,05	-1,02	1,15
2r	-4,37	-0,93	-1,9	0,12	-2,44	0,4	-1,21	1,14
3r	-0,81	0,2	-1,56	0,43	-2,97	0,7	-1,08	0,33
4l	0,33	1,65	0,57	0,89	0,34	0,31	0,4	0,35
4r	-0,77	0,05	-0,62	0,77	-3,17	-1,99	-1,96	-0,31
5l	-0,32	-0,3	1,41	1,12	-0,93	-0,42	-0,49	-0,36
5r	-0,51	-0,51	-0,21	-0,13	-0,51	-0,6	-0,23	-0,3
7r	-1,77	-0,73	-1,15	-0,64	-0,5	0,58	-2,27	-1,51
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	0,38	0,4	0,35	0,39	0,05	0,03	0,07	0,05
2l	-0,77	0,01	-0,19	0,05	-0,55	0,43	-0,17	-0,04
2r	0,52	1	0,16	0,36	-1,09	-0,12	0,17	0,29
3r	-0,3	0,2	-0,66	0,2	-0,36	0,13	-0,64	0,09
4l	-0,54	1,33	-0,21	1,6	-1,7	3,14	-1,91	0,81
4r	0,22	0,11	0,71	1,07	-0,11	-0,39	0,19	0,95
5l	-0,4	-0,31	0,08	0,1	-0,29	-0,2	0,14	0,13
5r	0,45	0,88	-0,29	0,62	-0,48	0,07	-0,64	0,48
7r	-0,85	-0,03	-0,24	0,38	-0,27	0,66	-0,31	0,71

Tab. 44: Positionen des Scaphoid relativ zum fixierten Radius in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Scaphoid in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei Neutralstellung des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.51)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	46,02	46,15	45,17	45,37	56,06	56,26	49,44	49,47
2l	51,48	51,93	45,2	45,48	53,49	53,56	45,7	46
2r	51,34	52,1	51,17	51,69	51,87	52,71	49,57	50,11
3r	34,54	36,16	28,6	28,85	34,79	34,82	25,14	25,92
4l	49,26	50,52	46,52	46,63	51,36	51,96	50,01	49,78
4r	34,14	34,63	30,77	31,37	34,19	35,33	0	0
5l	43,14	43,28	37,53	37,52	34,67	34,65	37,16	37,18
5r	55,18	55,53	47,66	47,87	52,71	52,62	52,47	52,27
7r	53,33	54,3	60,11	60,05	64,45	65,18	58,05	58,04
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	-8,9	-8,69	-7,62	-7,33	-5,59	-5,6	-9,1	-8,7
2l	-9,22	-8,81	-7,47	-6,99	-10	-9,7	-6,1	-5,59
2r	-6,78	-5,9	-6,29	-6,07	-6,97	-6,01	-6,98	-6,28
3r	-7,18	-6,77	-6,88	-5,95	-6,62	-6,21	-5,51	-4,83
4l	-0,22	0,83	0,61	0,71	0,54	1,82	-0,96	-0,04
4r	-4,93	-4,94	-7,26	-7,09	-6,46	-6,65	0	0
5l	-6,55	-5,99	-10,12	-10	-7,55	-7,36	-11,13	-11,14
5r	-7,77	-7,8	-6,19	-6,22	-8,91	-8,73	-4,43	-4,04
7r	-0,24	0,52	-1,74	-0,66	1,47	2,06	-1,07	-0,72

Tab. 45: Positionen des Scaphoid relativ zum fixierten Radius in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Scaphoid in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei Flexion des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.51)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	-45,91	-45,93	-49,47	-48,94	-55,06	-55,05	-51,47	-51,21
2l	-36,05	-35,06	-35,75	-33,71	-33,55	-33,11	-37,62	-34,89
2r	-44,67	-41,82	-49,42	-47,61	-51,46	-49,6	-48,94	-47,28
3r	-36,78	-36,55	-40,79	-38,78	-39,82	-39,64	-47,13	-46,05
4l	-53,88	-53,19	-50,42	-50,03	-53,58	-52,38	-58,04	-58,05
4r	-42,05	-41,63	-43,5	-43,08	-44,19	-43,5	-46,06	-45,01
5l	-47,75	-47,4	-52,76	-52,64	-57,81	-57,97	-58,35	-58,28
5r	-42,21	-41,95	-44,3	-43,13	-43,47	-43,17	-42,26	-40,64
7r	-32,88	-32,37	-32,3	-31,56	-23,92	-23,16	-29,11	-28,05
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	-9,39	-9,1	-6,39	-5,82	-9,64	-9,37	-8,96	-8,33
2l	-5,21	-3,74	-3,35	-1,74	-5,65	-5,21	-4,61	-3,89
2r	-2,66	-1,31	-2,36	-0,78	-3,63	-2,6	-0,78	0,35
3r	-9,5	-9,17	-8,36	-7,31	-9,87	-9,62	-10,11	-8,7
4l	3,83	3,83	-1,43	2,33	-1,33	4,44	-0,87	2,85
4r	-15,2	-14,54	-8,85	-7,97	-15,05	-14,42	-10,11	-8,9
5l	-2,22	-1,62	-0,58	-0,49	-2,98	-2,67	-1,44	-1,33
5r	-4,64	-3,74	-1,95	0,15	-5,93	-5,25	-2,05	1,46
7r	-9,74	-9,21	-7,96	-7,32	-4,93	-4,66	-3,17	-1,65

Tab. 46: Positionen des Scaphoid relativ zum fixierten Radius in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Scaphoid in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei Extension des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.51)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	-16,34	-14,44	-12,36	-11,86	-13,05	-12,94	-13,58	-12
2l	-18,87	-17	-10,33	-7,37	-22,29	-20,48	-12,89	-10,68
2r	-9,25	-6,2	-3,39	-2,6	-13,94	-9,96	-6,67	-5,25
3r	-13,97	-12,28	-19,87	-16,91	-21,32	-19,32	-24,96	-21,02
4l	1,39	0,89	1,69	1,57	-3,09	-3,12	0,62	1,18
4r	-21,65	-20,27	-15,46	-13,58	-31	-28,15	-14,35	-13,22
5l	-22,91	-21,46	-12,85	-12,72	-19,29	-19,12	-13,35	-12,9
5r	-8,43	-7,58	-5,31	-4,87	-5,71	-5,22	2,64	3,31
7r	-6,19	-5,61	-2,35	-1,54	-5,38	-2,38	-4,99	-4,04
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	-11,21	-11,28	-4,02	-3,84	-5,97	-6,12	-4,62	-4,23
2l	-11,01	-9,32	-9,14	-8,66	-9,91	-7,1	-10,43	-9,92
2r	-24,49	-24,18	-23,94	-23,23	-24,46	-24,05	-16,36	-16,09
3r	-19,93	-19,39	-9,89	-9,26	-17,43	-17,12	-13,48	-12,31
4l	-37,59	-35,02	-29,56	-27,37	-36,48	-31,86	-31,79	-28,82
4r	-24,15	-23,85	-25,15	-24,63	-24,46	-24,11	-20,7	-20,26
5l	-17,69	-17,38	-16,02	-16,17	-16,22	-16,25	-13,81	-13,98
5r	-16,39	-16,15	-16,01	-15,55	-15,19	-14,95	-12,36	-11,67
7r	-26,58	-26,3	-20,41	-19,92	-21,34	-20,84	-19,48	-18,46

Tab. 47: Positionen des Scaphoid relativ zum fixierten Radius in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Scaphoid in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei ulnarer Deviation des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s. Tab.51)

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
1l	7,01	7,09	3,21	3,83	8,98	8,7	3,35	4,14
2l	15,05	16,38	13,38	14,62	15,99	17,24	15,12	16,55
2r	-6,67	-5,14	-9,05	-8,36	-8,4	-7,18	-4,03	-2,37
3r	1,64	1,98	5,02	5,43	4,66	4,73	5,77	6,06
4l	-1,27	-1,27	-4,58	-3,66	-4,48	-4,48	-2,76	-1,45
4r	8	7,74	7,03	7,16	6,61	6,35	11,49	11,77
5l	9,36	9,5	10,58	10,65	11,04	11,26	10,73	11,24
5r	10,17	10,56	9,64	10,15	10,35	10,49	16,3	16,79
7r	18,69	19,22	18,95	19,49	22,59	22,6	11,21	11,22
Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
MK1	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
1l	1,26	1,33	1,55	1,83	3,44	3,71	0,53	0,82
2l	2,41	2,66	2,18	2,25	2,89	3,13	3,14	3,18
2r	6,28	6,26	12,95	13,12	6,78	6,7	10,14	10,6
3r	5,68	6,16	4,23	4,8	4,19	4,71	3,76	4,45
4l	20,95	21,81	25,83	26,31	24,9	26,22	22,36	22,5
4r	4,3	4,62	2,71	2,4	2,43	2,46	6,05	6,15
5l	5,4	5,5	6,01	6,13	3,77	3,85	4,25	4,32
5r	5,41	5,64	11,53	11,88	4,71	5,21	13,06	13,52
7r	9,11	9,24	11,55	12,01	10,49	10,63	7,45	7,92

Tab. 48: Positionen des Scaphoid relativ zum fixierten Radius in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1). Positionen des Scaphoid in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 in Grad bei radialer Deviation des Handgelenks. Darstellung der verwendeten Präparate (1l-7r s.Tab.51).

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.	Repos.	Opp.
MK1								
Neutral μ	-1,17	-0,04	-0,32	0,71	-1,3	0,14	-0,8	0,15
Neutral s	1,82	0,93	1,25	0,93	1,41	1	0,98	0,86
Extens. μ	-42,46	-41,77	-44,3	-43,27	-44,76	-44,18	-46,55	-45,49
Extens. s	6,53	6,52	7	7,36	11,1	11,13	9,38	9,99
Flexion μ	46,49	47,18	43,64	43,87	48,18	48,57	45,94	46,1
Flexion s	7,79	7,69	9,91	9,83	10,94	10,97	10,29	10,06
ul.Dev. μ	-12,91	-11,55	-8,92	-7,76	-15,01	-13,41	-9,73	-8,29
ul.Dev. s	7,97	7,48	6,99	6,32	9,31	8,95	8,54	7,74
ra.Dev. μ	6,89	7,34	6,02	6,59	7,48	7,75	7,46	8,22
ra.Dev. s	7,92	7,88	8,69	8,65	9,54	9,45	7,36	7,08

Tab. 49: Positionen des Scaphoid relativ zum fixierten Radius in Extension(-) / Flexion(+) bei Reposition / Opposition des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad bei Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnarer (uln.Dev.) und radialer (ra.Dev.) Deviation des Handgelenks. Zusammenfassung der verwendeten Präparate (μ) und Darstellung der Standardabweichung (s) in den Experimenten intakte STT-Ligamente + leichter (nll) bzw. starker (nhl) Muskelzug und durchtrennte STT-Ligamente + leichter (2ll) bzw. starker Muskelzug(2hl).

Exp.	nll		nhl		2ll		2hl	
	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.	Add.	Abd.
MK1								
Neutral μ	-0,15	0,4	-0,03	0,53	-0,53	0,42	-0,34	0,39
Neutral s	0,54	0,55	0,41	0,5	0,54	1,07	0,67	0,37
Extens. μ	-6,08	-5,4	-4,58	-3,22	-6,56	-5,48	-4,68	-3,13
Extens. s	5,55	5,57	3,29	3,88	4,26	5,33	3,98	4,56
Flexion μ	-5,75	-5,28	-5,88	-5,51	-5,57	-5,15	-5,66	-5,17
Flexion s	3,38	3,62	3,28	3,38	3,96	4,23	3,55	3,72
ul.Dev. μ	-21,01	-20,32	-17,13	-16,51	-19,05	-18,04	-15,89	-15,08
ul.Dev. s	8,35	7,98	8,42	8,03	9	8,27	7,65	7,01
ra.Dev. μ	6,76	7,02	8,73	8,97	7,07	7,4	7,86	8,16
ra.Dev. s	5,78	5,98	7,78	7,91	7,13	7,47	6,63	6,63

Tab. 50: Positionen des Scaphoid in ulnarer Deviation(-) / radialer Deviation(+) bei Adduktion-/ Abduktion des Metakarpale 1 (MK 1) in Grad bei Neutralstellung (Neutral), Flexion (Flex.), Extension (Ext.), ulnarer (uln.Dev.) und radialer (ra.Dev.) Deviation des Handgelenks. Zusammenfassung der verwendeten Präparate (μ) und Darstellung der Standardabweichung (s) in den Experimenten intakte STT-Ligamente + leichter (nll) bzw. starker (nhl) Muskelzug und durchtrennte STT-Ligamente + leichter (2ll) bzw. starker Muskelzug(2hl).

<u>Spender Nr.</u>	<u>Alter</u>	<u>Geschlecht</u>	<u>rechte Hand</u>	<u>linke Hand</u>
1	45	weiblich		x=1l
2	33	weiblich	x=2r	x=2l
3	53	männlich	x=3r	
4	29	weiblich	x=4r	x=4l
5	56	männlich	x=5r	x=5l
7	62	männlich	x=7r	

Tab. 50: Verwendete Präparate mit Alter und Geschlecht des Spenders und Angabe der Spenderseite rechte Hand (r) oder/und linke Hand (l) mit einem Durchschnittsalter der Präparate von 44 Jahre (29-62 Jahre)

7.5 Liste der verwendeten Abkürzungen

Abb.	Abbildung
Abd.	Abduktion
Add.	Adduktion
Anh.	Anhang
AOL	anterior oblique ligament (anteriores schräges Band)
APL	Abductor pollicis longus
bzw.	beziehungweise
cm	Zentimeter
CMC	Carpo-Metacarpal
DRL	dorso-radial ligament (dorso-radiales Band)
ECU	Extensor carpi ulnaris
ERCB	Extensor carpi radialis brevis
ERCL	Extensor carpi radialis longus
EPB	Extensor pollicis brevis
EPL	Extensor pollicis longus
Exp.	Experiment
Ext.	Extension / Streckung des Handgelenks
EXT-DIGIT-COM	Extensores digitorum communis
FCR	Flexor carpi radialis
FCU	Flexor carpi ulnaris
ff.	folgende
Flex.	Flexion / Beugung des Handgelenks
FLEX-DIGIT-PROF	Flexores digitorum profundes
FLEX-DIGIT-SUPERF	Flexores digitorum superficiales
flex./ext.	Flexion-Extension von Trapezium relativ zum Scaphoid und Scaphoid relativ zum Radius
rad./uln.	radiale-ulnare Deviation von Trapezium relativ zum Scaphoid und Scaphoid relativ zum Radius
FPL	Flexor pollicis longus

Hz	Hertz
IML	intermetacarpal ligament (intermetakarpales Band)
inch	Zoll
Kap.	Kapitel
MK1	Metakarpale 1
mm	Millimeter
Neutral	Neutralstellung des Handgelenks
n-ll	normal-low-load 1,3kg Muskelzug und intakte Ligamente
n-hl	23,5kg Zug und intakte Ligamente
Opp.	Opposition
POL	posterior oblique ligament (posteriores schräges Band)
rad. Dev.	Radiale Deviation
Repos.	Reposition
RS	Radio-Scaphoidal
S	Standardabweichung
s.	siehe
sec	Sekunde(n)
SL	Scapho-Lunär
s.o.	siehe oben
STT	Scapho-Trapezio-Trapezoidal
sup./pron.	Supination-Pronation von Trapezium relativ zum Scaphoid und Scaphoid relativ zum Radius
Tab.	Tabelle
uln. Dev.	Ulnare Deviation
v.a.	vor allem
μ	Mittelwert
2-ll	1,3kg Zug und durchtrennte Ligamente
2-hl	23,5kg Zug und durchtrennte Ligamente

8 Literaturverzeichnis

Amamilo SC, Uppal R, Samuel AW, Isolated dislocation of the carpal scaphoid, J Hand Surg [Br] 10:385-388, 1985

An KN, Chao EYS, Kinematic analysis of human movement, Annals Biomed. Engin., 12: 585-597, 1984

An KN, Jacobsen MC, Berglund LJ and Chao EYS, Application of a magnetic tracking device to kinesiological studies. Jbiomech. Vol.21 No.7: 613-620 1988

Andrews JG and Youm Y, A biomechanical investigation of wrist kinematics. Jbiomech Vol.12, 83-93, 1979

Antuna SA, Antuna-Zapico JM. Open dislocation of the carpal scaphoid: a case report, J Hand Surg [Am] 22: 86-88, 1997

Bahm J, Saffar P, Duclos L, Sokolow C, Ligament repair and/or capsulodesis in scapholunate instability, Unfallchirurg, 103(7):545-551, 2000

Berger RA, Crowninshield RD, Flatt AE, The three- dimensional rotational behavior of the carpal bones, Clin Orthop. 167:303-310, 1982

Berger RA, Blair WF, Crowninshield RD, Flatt AE, The scapholunate ligament, J Hand Surg, 7:87-91, 1982

Bickert B, Sauerbier M, Germann G, Scapholunate ligament repair using the Mitek bone anchor, J Hand Surg, 25(2):188-192, 2000

Blatt G, Dorsal capsulodesis for rotatory subluxation of the scaphoid, The Wrist, Lippincott Williams & Wilkins, Chapter 55:819-827, 2001

Brewood AFM, Complete dislocation of the trapezium, Injury, 16:303-304, 1985

Brunelli GA, Brunelli GR, Rotary subluxation of the Scaphoid. Correction using the Flexor carpi radialis, The Wrist, Lippincott Williams & Wilkins, Chapter 64:879-884, 2001

Caffiniere de la JY, L'articulation trapezo-metacarpienne, approche biomecanique et appareil ligamentaire, Arch Anat. Path. 18:277-284, 1970

Cohen MS, Taleisnik J, Ligamentous repair for scapholunate Instability and Dissociation, The Wrist, Lippincott Williams & Wilkins, Chapter 29:491-499, 2001

Cooney WP, Lucca MJ, Chao EYS and Linscheid RL The kinesiology of the thumb trapeziometacarpal joint, JBJS 63-A, No.9: 1371-1381, Dec 1981

Daremborg Ch. Oeuvres anatomiques, physiologiques et medicales de Gallien. J.B. Bailliere, Paris 1854

Debrunner HU, Orthopädisches Diagnostikum, Thieme Verlag, 1987

Drewniany JJ, Palmer AK, Flatt AE, The scaphotrapezial ligament complex: and anatomic and biomechanical study, J Hand Surg [Am] 10:492-498, 1985

Dunn AW, Fractures and dislocations of the carpus. Surg Clin North Am , 52:1513-1538, 1972

Dunn MJ, Johnson C, Static scapholunate dissociation: a new reconstruction technique using a volar and dorsal approach in a cadaver model, J Hand Surg [Am], 26(4):749-754, 2001

Ehara S, El-Khoury GY, Blair WF, Scaphotrapezial dislocation, J Trauma, 28:1587-1589, 1988

Engkvist O, Ekenstam F, Closed dislocation of the scaphoid, Scand J Plast Reconstr Surg 20: 239-42, 1986

Garcia-Elias M, Cooney WP, An KN, Linscheid RL and Chao EYS, Wrist kinematics after limited intercarpal arthrodesis, J Hand Surg 14A: 791-9, 1989

Garcia-Elias M, Dobyns JH, Cooney WP, et al. Traumatic axial dislocations of the carpus. J Hand Surg [Am] 14:446-457, 1989

Goldberg , Amit S, Bahar A, et al., Complete dislocation of the trapezium, J Hand Surg [Am] 6:193-195, 1981

Goldstein H, The kinematics of rigid body motion, Addison-Wesley Comp. 1970

Guyot J, Atlas of human limb joints, Springer Verlag 1981

Hankin FM, Amadio PC, Wojtys EM and Braunstein EM Carpal instability with volar flexion of the proximal row associated with injury to the scaphotrapezial ligament: Report in two cases. J Hand Surg Vol.13B, No.3: 298-302, August 1988

Hencke W, Die Bewegungen der Handwurzel, Z. für rationelle Medizin, Zürich 7:27-41, 1859

Herzog KH, Schiewe R, Die anatomische Bedingtheit chronischer Handgelenksschäden, Z.Orthop, 97:311-321, 1963

Holdsworth BJ, Shackelford I, Fracture dislocation of the trapezio-scaphoid joint-the missing link?, J Hand Surg [Br] 12:40-42, 1987

Horii E, Garcia-Elias M, An KN, Bishop AT, Cooney WP, Linscheid RL and Chao EYS, A kinematic study of luno-triquetral dissociations. JoHS Vol.16A, No. 2, March 1991: 355-362

Huiskes R, Kremers A, De Lange A, Woltring HJ, Selvik G, van Rens TJG, Analytical stereophotogrammetric determination of three-dimensional knee-joint geometry, J Biomech. 18:559, 1985

Idler RS, Carpal Dislocations and Instability, The Wrist, Lippincott Williams & Wilkins Chapter 14:203-229, 2001

Imaeda T, An K N, Cooney W P and Linscheid R Anatomy of trapeziometacarpal ligaments. JoHS Vol.18A, No.2, March 1993 226-231

Imaeda T, Niebuhr G, Cooney W P, Linscheid R L and An K N Kinematics of the normal trapeziometacarpal joint. JBJS12: 197-204 1994

Imaeda T, Niebur G, an K N and Cooney W P Kinematics of the trapeziometacarpal joint after sectioning of ligaments. JoOrth.Res. 12: 205-210 1994

Innis van F, Thys R, Lebrun A, Hollaert G, Detournay M, Trapeziectomy in rhizarthrosis, Ann Chir Main, 2(4):365-367, 1983

Inoue G, Maeda N, Isolated dorsal dislocation of the scaphoid, J Hand Surg [Br], 15:368-369, 1990

Jantea C, Untersuchungen zur Biomechanik der radialen Karpusäule und ihre klinische Bedeutung, Habilitationsschrift der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 1992

Jantea C, An KN, Linscheid RL and Cooney WP The role of the scapho-trapezial-trapezoidal ligament complex (STT) on scaphoid kinematics. *Advances in the biomechanics of the hand and the wrist*, edit. by F Schuind et.all., Plenum press, New York, pp 345-361, 1994

Kapandji IA, Funktionelle Anatomie der Gelenke, Band 1: Obere Extremität, 3. Auflage, Hippokrates Verlag 1999, 1. Auflage 1984

Kapandji IA, Funktionelle Anatomie der Gelenke, Band 2: Untere Extremität, 3. Auflage, Hippokrates Verlag 1999, 1. Auflage 1984

Kauer JMG, The interdependence of carpal articulation chains. *Acta anat.* 88: 481-501, 1974

Kauer JMG, Functional anatomy of the wrist, *Clin.Orth.and Rel.Res.* No.149: 9-20, 1980

Koebke J, A biomechanical and morphological analysis of human hand joints, *Adv. Anat. Embryol.*80, Springer Verlag 1983

Koebke J, Fehrmann P, Mockenhaupt J, Zur Beanspruchung des normalen und des pathologischen Handgelenks, *Mikrochir.Plast. Chir.*, 21:127-133, 1989

Kuczynski K, Carpometacarpal joint of the human thumb, *J Anat.*, 118:119-126, 1974

Kuhlmann JN, Fahrner M, Kapandji IA, Tubiana R, Stability of the normal wrist, aus *Tubiana R: The Hand Vol. II*, Saunders , 1985

Kuur E, Boe AM, Scaphoid-Trapezoid subluxation. *J Hand Surg*; 11B: 3:434-4, 1986

Lange de A, A kinematical study of the human wrist joint, Thesis university of Nijmegen, 1987

Linscheid RL, Dobyns JH, Beabout JW, Bryan RS, Traumatic instability of the wrist. Diagnosis,classification and pathomechanics, *JBJS*, 54:1612-1632, 1972

Maki NJ, Chiunard RG, D'Ambrosia R, Isolated, complete radial dislocation of the scaphoid *JBJS [Am]* 64:615-16, 1982

Masquelet AC, Strube F and Nordin JY The isolated scapho-trapezio-trapezoid ligament injury. *J Hand Surg Vol.18B No.6:730-735*, Dec 1993

Mayfield JK, Johnson RP, Kilcoyne RF, The ligaments of the human wrist and their functional significance, *AnatRec.* 186:417-428, 1976

Mayfield JK, Johnson RP, Kilcoyne RF, Carpal dislocations: pathomechanics and progressive perilunar instability, *J Hand Surg*, 5:226-241, 1980

Mayfield JK, Mechanism of carpal injuries, *Clin Orthop*, 149:45-54, 1980

McNamara MG, Corley FG, Dislocation of the carpal scaphoid: an 8year follow-up, *J Hand Surg [Am]* 17:496-498, 1992

Menon J, Total Wrist arthroplasty, *The Wrist*, Lippincott Williams & Wilkins, Chapter 43:660-682, 2001

Meyer von H, Einige Worte über Beugung, Streckung, Supination und Pronation. *Archiv für Anat. Physiol. Und wissenschaftl. Med.Berlin* 670-676, 1866

Milankow M, Somer T, Jovanovic A, et al., Isolated dislocation of the carpal scaphoid, *J Trauma* 36:752-754, 1994

Murakami Y, Dislocation of the carpal scaphoid, *Hand*, 9:79-81, 1977

Nigst H. Zur Geschichte des Karpus und der karpalen Instabilitäten, *Handchir.Mikrochir.Plast.Chir.* 22:283-288, 1990

Palmer AK, Werner FW, Biomechanics of the distal radioulnar joint, *Clin. Orthop.*, 187:26-35, 1984

Pearcy MJ, Hindle RJ, New method for the non-invasive three-dimensional measurement of human back movement, *Clin. Biomech.* 4: 33-37, 1989

Pieron AP, The mechanism of the first carpometacarpal (CMC) joint, *Acta Orthop. Scand.Suppl.* 148, 1973

Ruby LK, An KN, Linscheid RL, Cooney WP, Chao EYS, The effect of scapholunate ligament section on scapholunate motion, *J Hands Surg.*12A:767, 1987

Ruby LK, Cooney WP, An KN, Linscheid RL and Chao EYS Relative motion of selected carpal bones: A kinematic analysis of the normal wrist. *J Hand Surg Vol.13A*, No.1: 1-10, Jan 1988

Saffar P, Sokolow C, Duclos L, Soft tissue stabilization in the management of chronic scapholunate instability without osteoarthritis. A 15-year series, *Acta Orthop Belg*, 65(4):424-433, 1999

Saraffian SK, Melamed JL, Goshgarian GM, Study of the wrist motion in extension and flexion, *Clin. Orthop*, 126: 153-159, 1977

Schädel-Hopfner M, Bohringer G, Gotzen L, Percutaneous osteosynthesis of scaphoid fracture with the Herbert-Whipple screw-technique and results, *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 32(4):271-276, 2000

Schädel-Hopfner M, Bohringer G, Junge A, Celik I, Gotzen L, Arthroscopic diagnosis of concomitant scapholunate ligament injuries in fractures of the distal radius, *Handchir Mikrochir Plast Chir*, 33(4):229-233, 2001

Seimon LP, Compound dislocation of a trapezium, *JBJS [Am]* 54:1297-1300, 1972

Selvik G, Roentgenstereogrammetric method for the study of the kinematics of the skeletal system, Thesis, University of Lund, Sweden, 1974

Sennwald G R, Zdrakovic V, Kern HP, Hilaire ACJ, Kinematics of the wrist and its ligaments. *J Hand Surg*;18B:805-14, 1993

Shapiro R Direct linear transformation method for the three-dimensional cinematography. *The Res.Quaterly* Vol.49, No.2: 197-205, 1978

Sherlock DA, Phil D, Traumatic dorsoradial dislocation of the trapezium, *J Hand Surg [Am]* 12:262-265, 1987

Siegel MW, Hertzberg H, Complete dislocation of the greater multangular (trapezium), *JBJS*, 51:769-772, 1969

Smith DK, An KN, Cooney WP, Linscheid RL and Chao EYS Effects of a scaphoid waist osteotomy on carpal kinematics. *JoOrth.Res.* 7: 590-598, 1989

Sommer HJ and Miller NR A technique for kinematic modeling of anatomical joints. *JoBiomech Eng.*, Vol.102: 311-317, Nov 1980

Stambough JL, Mandel RJ, Duda JR, Volar dislocation of the carpal scaphoid: case report and review of the literature, *Orthopedics*, 9:565-570, 1986

Szabo RM, Newland CC, Johnson PG, et al. Spectrum of injury and treatment options for isolated dislocations of the scaphoid. *JBJS [Am]* 77:608-615, 1995

Taleisnik J, The ligaments of the wrist, *J Hand Surg*, 1:110-118, 1976

Taleisnik J, *The Wrist*. Churchill Livingstone 1985

Thomas HO, Isolated dislocation of the carpal scaphoid, *Acta Orth Scand* 48:369-372, 1977

Takami H, Takahashi S, Ando M, Dislocation of the carpal scaphoid associated with median nerve compression, *J Trauma* 33:921-923, 1992

Vesalius A, *De humani corporis fabrica, Libri septem*, Basiliae, 1543, Ex. Officina I Oporini, Bruxelles, 1964

Watson HK, Ryu J, Akelman E, Limited triscaphoid intercarpal arthrodesis for rotatory subluxation of the scaphoid, *JBJS [Am]*, 68:345-349, 1986

Watson HK, Weinzweig J, Guidera P, et al., One thousand intracarpal arthrodeses, *J Hand Surg [Br]*, 24:320-330, 1999

Watson HK, Weinzweig J, Triscaphe Arthrodesis, *The Wrist*, Lippincott Williams & Wilkins, Chapter 73:932-938, 2001

Weinzweig J, Watson HK, Herbert TJ, et al., Congenital synchondrosis of the scapho-trapezio-trapezoid joint, *J Hand Surg [Am]*, 22:74-77, 1997

Weinzweig J, Watson HK, Limited Wrist Arthrodesis, *The Wrist*, Lippincott Williams & Wilkins, Chapter 32:521-543, 2001

Weiss AP, Sachar K, Glowacki KA, Arthroscopic debridement alone for intercarpal ligament tears, *J Hand Surg [Am]*, 22(2):344-349, 1997

Weitbrecht J. *Syndesmologia sive historia ligamentorum corporis humani*. Typographia Academiae Scientiarum, St. Petersburg 1742

Wilhelm K, Kettler M, Strassmeier M, Scapho-lunate ligament reconstruction with Mitek suture anchors, *Unfallchirurg*, 104(2):127-130, 2001

Wolf JM, Weiss AP, Bone-retinaculum-bone reconstruction of scapho-lunate ligament injuries, *Orthop Clin North Am*, 32(2):241-246, 2001

Woltring H J, Huiskes R and DeLange A, Veldpaus FE, Finite centroid and helical axis estimation from noisy landmark measurements in the study of human joint kinematics. Jbiomech Vol.18, No.5, 379-389, 1985

Youm Y, McMurtry RY, Flatt AE and Gillespie TE, Kinematics of the wrist. JBJS Vol.60-A, No.4: 423-431, 1978

Youm Y, Yoon YS Analytical Development in investigation of wrist kinematics. Jbiomech. Vol.12:613-21, 1979

Youm Y and Flatt A Kinematics of the wrist. Clin.Orth.and Rel.Res. No.149: 21-32, June, 1980

Zancolli E et al., Biomechanics of the trapeziometacarpal joint. Clin.Orth.and Rel.Res. No.220: 15-26, July,1987

9 Curriculum Vitae

Ich wurde am 13. April 1968 in Mönchengladbach / Nordrheinwestfalen geboren. Eingeschult wurde ich 1974 in die Grundschule an der Markfeldstraße in Mönchengladbach. Die Zeit von 1975–1978 besuchte ich die Künkelsgrundschule und von 1978-1980 das Max-Planck-Gymnasium in Schorndorf/Baden-Württemberg. Von 1980-1987 besuchte ich das Mathematisch-Naturwissenschaftliche Gymnasium in Mönchengladbach, an dem ich 1987 mit dem Abitur meine allgemeine Hochschulreife erhielt.

Von 1987-1988 absolvierte ich meinen Grundwehrdienst im Fallschirmjägerbataillon 273 in Iserlohn. Im Anschluß begann ich die Ausbildung zum Bankkaufmann bei der Deutschen Bank in Mönchengladbach und bestand 1990 die Prüfung zum Bankkaufmann.

Das Studium der Humanmedizin absolvierte ich vom Wintersemester 1990 bis zum Sommersemester 1997 an der Heinrich-Heine-Universität in Düsseldorf. Im Verlauf meines Medizinstudiums lernte ich die klinische Medizin im Rahmen von Famulaturen im Städtischen Krankenhaus Neuwerk Mönchengladbach (Orthopädie), im Franziskushospital Bielefeld (Gynäkologie), in der orthopädischen Klinik und Poliklinik der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf und im Rahmen meines 3½-monatigen Forschungsaufenthaltes im Orthopedics Biomechanics Laboratory und des Departments of Hand Surgery der Mayo Clinic, Minnesota, USA, kennen. Im praktischen Jahr absolvierte ich ein Tertial in der Inneren Medizin am Mount Sinai Hospital, New York City, New York, USA, das Tertial in der Chirurgie und mein Wahlfach Orthopädie jeweils im Universitätsklinikum der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Im Juni 1997 schloß ich mein Medizinstudium mit dem dritten Staatsexamen und der Note „sehr gut“, mit der Gesamtnote „gut“, ab. Außerdem bestand ich im Herbst 1996 das 2. amerikanische Staatsexamen (USMLE2), und im Herbst 1997 auch das 1. amerikanische Staatsexamen (USMLE1).

Ab November 1997 bis Mai 1999 arbeitete ich als Arzt im Praktikum in der Unfallchirurgischen Abteilung des Berufsgenossenschaftlichen Unfallkrankenhauses in Hamburg bei Prof. Dr. D. Wolter, und ab Juni 1999 bis Juli 2000 in der allgemeinen und unfallchirurgischen Abteilung in der St. Lukas Klinik in Solingen bei PD Dr. J. Wolter. Seit Juli 2000 arbeite ich als Assistenzarzt in der Auguste-Viktoria-Klinik, ein operativ-orthopädisches Fachkrankenhaus in Bad Oeynhausen bei Prof. Dr. F.W. Hagena.

Im Dezember 2001 beendete ich mit der Abschlußprüfung die Ausbildung zur Zusatzbezeichnung „Manuelle Medizin/Chirotherapie“ am Ärzteseminar Hamm-Boppard der FAC.

10 Danksagung

Ganz besonderen Dank gilt meinem Doktorvater PD Dr. Christian Jantea, für das Überlassen des Themas, sein Engagement, seine Geduld, sowie immerwährende Hilfestellungen und Beratung im Verlaufe der Arbeit.

Außerdem danke ich ganz besonders Prof. K.N. An, dem Leiter des Orthopädischen Biomechanischen Labors an der Mayo Clinic, Rochester, Minnesota, USA, für die Ermöglichung meines Forschungsaufenthaltes, und allen Mitarbeitern, die mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden haben. Ferner danke ich dem Lehrkörper der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf für meine Ausbildung.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mich während meiner Studienzeit und insbesondere bei der Durchführung meiner Auslandsaufenthalte unterstützt haben. Außerdem gilt auch meiner Frau Dr. med. Ute Sophia Gleichmann, die gerade im letzten Jahr der Erstellung dieser Dissertation viel Geduld und Motivation beigesteuert hat, großer Dank.