

Auswirkungen der Gelenkposition und einer Hyperlaxität auf die Gelenkkongruenz des Ellenbogens

Maximilian Hinz

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Medicine and Health der
Technischen Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Medizin (Dr. med.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: apl. Prof. Dr. Lutz Renders

Prüfende der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr. Sebastian Siebenlist
2. Priv.-Doz. Dr. Arne Buchholz

Die Dissertation wurde am 05.02.2024 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Medicine and Health am 08.05.2024
angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung.....	5
1.1 Das Stabilitätsmodell des Ellenbogengelenks.....	5
1.2 Die Stabilität des Ellenbogengelenks unter Belastung.....	6
1.3 Die knöcherne Kongruenz des Ellenbogengelenks.....	7
1.4 Stellenwert der Laxität	8
1.5 Ellenbogenluxation.....	9
1.5.1 <i>Epidemiologie</i>	9
1.5.2 <i>Pathomechanismus</i>	9
1.5.3 <i>Behandlung</i>	10
1.6 Posterolaterale Rotationsinstabilität des Ellenbogengelenks.....	17
1.7 Fragestellung der vorliegenden Studie	20
2 Material und Methoden	21
2.1 Probandenkollektiv.....	21
2.1.1 <i>Ein- und Ausschlusskriterien</i>	21
2.2 Bestimmung der Laxität	23
2.3 Magnetresonanztomografische Untersuchung.....	24
2.3.1 <i>Messung der Gelenkkongruenz</i>	24
2.4 Statistische Auswertung.....	29
3 Ergebnisse	30
3.1 Demographische Daten	30
3.1.1 <i>Vergleich der Kohorten in Abhängigkeit vom Geschlecht</i>	30
3.1.2 <i>Vergleich der Kohorten in Abhängigkeit von der Laxität</i>	30
3.2 Einfluss der Gelenkposition auf die Gelenkkongruenz	31
3.2.1 <i>Radiokapitellare Inkongruenz</i>	31
3.2.2 <i>Ulnohumerale Kongruenz</i>	32
3.3 Einfluss der Laxität auf die Gelenkkongruenz	35

Inhaltsverzeichnis

3.4	Reliabilität der MRT-Messungen	39
4	Diskussion	40
5	Schlussfolgerung und Ausblick	44
6	Zusammenfassung	45
7	Abstract	47
8	Literaturverzeichnis	49
9	Abbildungsverzeichnis	59
10	Tabellenverzeichnis	61
11	Danksagung	62

Abkürzungsverzeichnis

CEO – common extensor origin (dt. gemeinsamer Extensorenansatz)

CFO – common flexor origin (dt. gemeinsamer Flexorenansatz)

LCL – lateral collateral ligament (dt. laterales Kollateralband)

LCL-K – lateral collateral ligament complex (dt. lateraler Kollateralbandkomplex)

LUCL – lateral ulnar collateral ligament (dt. laterales ulnares kollaterales Ligament)

MCL – medial collateral ligament (dt. mediales Kollateralband)

MRT – Magnetresonanztomografie

PLRI – posterolaterale Rotationsinstabilität

1 Einleitung

1.1 Das Stabilitätsmodell des Ellenbogengelenks

Das Ellenbogengelenk wird sowohl durch statische als auch durch dynamische Strukturen stabilisiert. Die drei primären statischen Stabilisatoren des Ellenbogengelenks sind die ossäre ulnohumorale Artikulation, das mediale Kollateralband (MCL) und das laterale ulnare kollaterale Ligament (LUCL). Die sekundären statischen Stabilisatoren umfassen den Radiuskopf, den gemeinsamen Flexorenansatz (engl. common flexor origin [CFO]) und den gemeinsamen Extensorenansatz (engl. common extensor origin [CEO]) und die Gelenkkapsel (Abb. 1) (O'Driscoll et al., 2001).

Die Muskeln, die das Ellenbogengelenk überspannen, sind vor allem der M. anconeus, der M. triceps brachii und der M. brachialis. Sie üben Kompressionskräfte auf das Ellenbogengelenk aus und bilden die dynamischen Stabilisatoren (O'Driscoll et al., 2001).

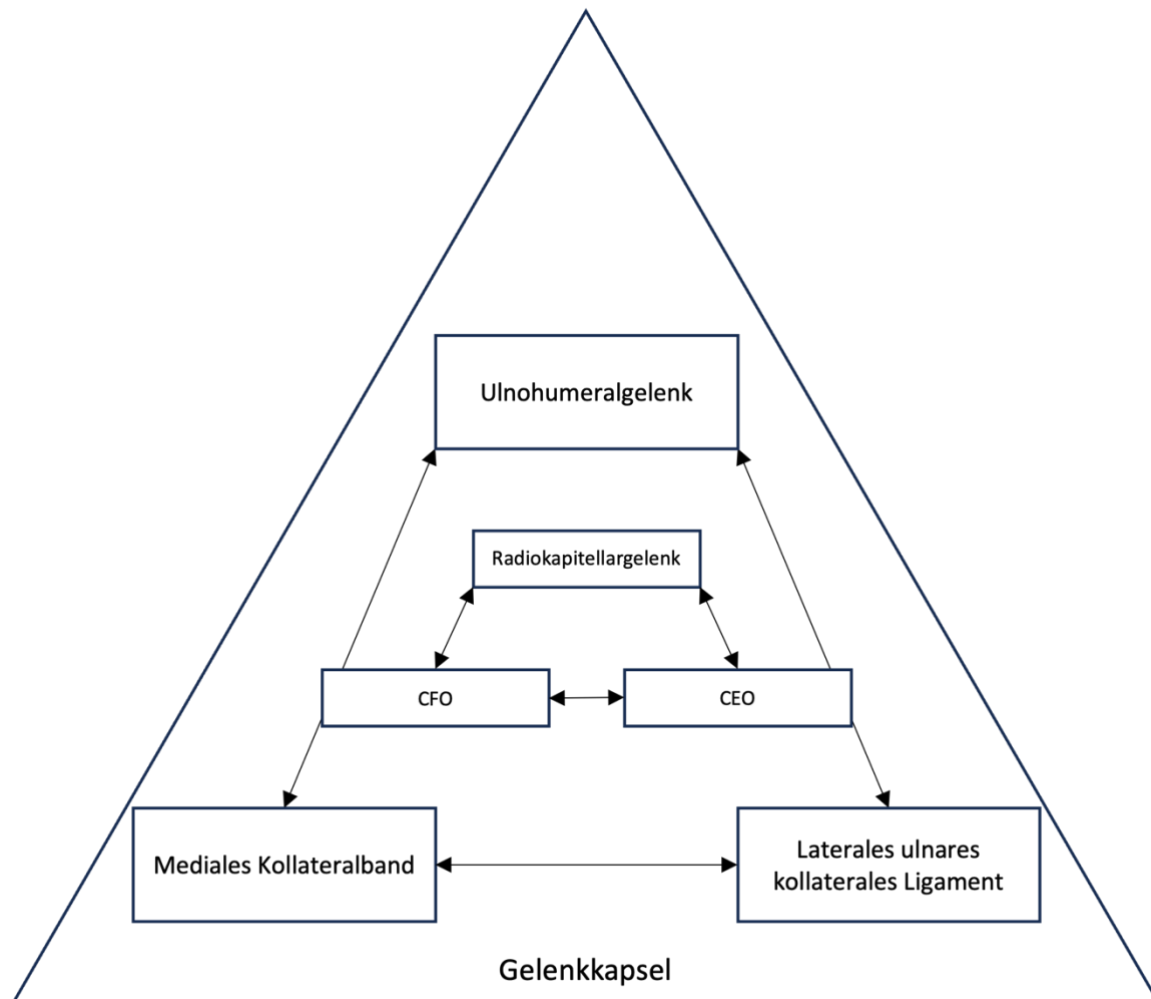


Abbildung 1: Primäre (außen) und sekundäre Stabilisatoren (innen) des Ellenbogengelenks.

Quelle: Modifiziert nach O'Driscoll (O'Driscoll et al., 2001).

1.2 Die Stabilität des Ellenbogengelenks unter Belastung

Die Valgusstabilität des Ellenbogengelenks wird in Extensionsstellung gleichermaßen durch das MCL (31 %), den vorderen Anteil der Gelenkkapsel (38 %) und die ulnohumorale Artikulation (31 %) gewährleistet, während in 90° Flexion die stabilisierende Wirkung der vorderen Gelenkkapsel auf das MCL übertragen wird (MCL: 54 %, Gelenkkapsel: 10 %, ulnohumorale Artikulation: 33 %). Die Varusstabilität wird in Streckstellung vor allem durch die ulnohumorale Artikulation (55 %), die vordere Gelenkkapsel (32 %) und nur zu einem geringen Anteil durch das LCL (14 %)

ermöglicht. In 90° Flexion leistet die ulnohumerale Artikulation einen noch größeren Anteil (ulnohumerale Artikulation: 75 %, Gelenkkapsel: 13 %, LCL: 9 %) (Morrey et al., 1983).

Eine pathologische Außenrotation des Unterarms, die in enger Verbindung mit der posterolateralen Rotationsinstabilität (PLRI) steht, wird in Streckstellung vor allem durch den lateralen Kollateralbandkomplex (LCL-K), der aus dem LCL, dem LUCL, dem Lig. anulare radii und vereinzelt auch dem akzessorischen LCL (Beckett et al., 2000) besteht, und die vordere Gelenkkapsel verhindert (Deutch et al., 2003). Bei flektiertem Ellenbogen hat die vordere Gelenkkapsel dagegen keine stabilisierende Funktion. Dabei wird das Auftreten einer pathologischen Außenrotation des Unterarms und damit auch einer PLRI vor allem durch den LCL-K verhindert (Deutch et al., 2003). Das LUCL hat eine besondere Funktion und schützt den Radiuskopf durch einen hängemattenähnlichen Effekt vor einer posterolateralen Rotationsbewegung (Hackl et al., 2016).

1.3 Die knöchernerne Kongruenz des Ellenbogengelenks

Obwohl es sich beim Ellenbogengelenk insgesamt um ein kongruentes Gelenk handelt, ändert sich die Kongruenz des Ellenbogens in Abhängigkeit von der Position. Beim Wechsel von der Supination in die Pronation kommt es zu einer Proximalisierung des Radiuskopfes. Dies führt zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche im Radiokapitellgelenk und damit auch zu einer Zunahme der knöchernen Gelenkkongruenz (Omori et al., 2016). Dabei kann die radiokapitellare Kongruenz durch eine axiale Belastung weiter zunehmen (Bian et al., 2021).

Auch die Kongruenz des proximalen Radioulnargelenks hängt wegen der ellipsoiden Form des Radiuskopfes von der Gelenkstellung ab, weshalb sie in Supination zunimmt (Kim et al., 2011; Omori et al., 2016; van Riet et al., 2003).

Eine bestehende ligamentäre Instabilität kann zu einer Abnahme der knöchernen Gelenkkongruenz in den entsprechenden Gelenkanteilen führen. Deshalb kann eine Gelenkkongruenz ein Hinweis auf das Vorliegen einer ligamentären Gelenkinstabilität sein (Hackl et al., 2015).

1.4 Stellenwert der Laxität

Eine generelle Hyperlaxität kann mit dem 1973 entwickelten Beighton Score festgestellt werden (Beighton et al., 1973). Dabei werden verschiedene Gelenke und u. a. auch die Ellenbogengelenke auf eine Überbeweglichkeit untersucht. Obwohl eine generelle Hyperlaxität keinen Krankheitswert haben muss, kann sie im Rahmen einer hereditären Bindegewebserkrankung (z. B. Ehlers-Danlos-Syndrom, Marfan-Syndrom) mit verheerenden Folgen für die Patienten verbunden sein (Carroll, 2023). Das Ausmaß der Laxität kann durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst werden, wie das Geschlecht, das Stadium des menstruellen Zyklus und eine Medikamenteneinnahme, etwa von Kontrazeptiva (Herzberg et al., 2017). An anderen Gelenken konnte bereits nachgewiesen werden, dass eine Hyperlaxität das Entstehen einer Gelenkinstabilität begünstigen kann (Herzberg et al., 2017; O'Driscoll & Evans, 1991; Ramesh et al., 2005; Uri et al., 2014). Über die Genese selbst hinaus konnte auch gezeigt werden, dass eine bestehende Hyperlaxität auch einen negativen Einfluss auf den konservativen und operativen Behandlungserfolg orthopädischer Krankheitsbilder haben kann (Balg et al., 2007; Boileau et al., 2006; Olds et al., 2015; Voos et al., 2010). Hinsichtlich des Ellenbogengelenks kann eine bestehende Hyperlaxität auch den Handlungsalgorithmus bei einer häufig nach einer Luxation auftretenden Ellenbogeninstabilität beeinflussen (Anakwenze et al., 2014; van Riet, 2017). Da neben der Hyperlaxität (Abb. 2) auch die Ellenbogeninstabilität vermutlich

zu einer Zunahme der Gelenkinkongruenz führen kann, ist eine verlässliche Differenzierung von entscheidender Bedeutung.

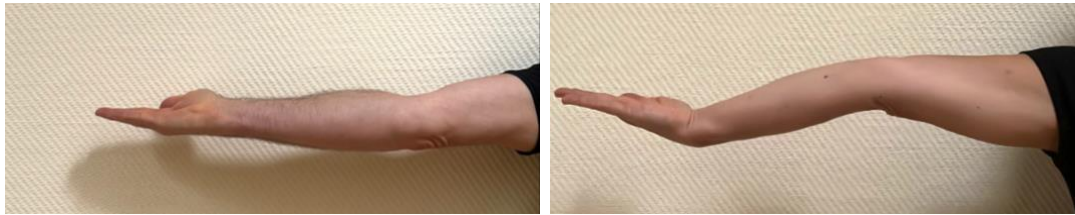


Abbildung 2: Normalbeweglicher Ellenbogen (links) mit physiologischer Extension und symptomfreier und hyperlaxer Ellenbogen (rechts) mit ausgeprägter Hyperextension.

Quelle: Eigene Darstellung.

1.5 Ellenbogenluxation

1.5.1 Epidemiologie

Ellenbogenluxationen treten mit einer Inzidenz von 5,21 pro 100.000 Personenjahre auf (Stoneback et al., 2012). Damit ist das Ellenbogengelenk das am zweithäufigsten von Luxationen betroffene große Gelenk (Kuhn et al., 2008). Am häufigsten treten Ellenbogenluxationen bei Adoleszenten auf (10- bis 19-Jährigen; 43,5 %). Bei den über 10-Jährigen treten fast die Hälfte aller Ellenbogenluxationen beim Sport auf und zwar bei männlichen Patienten vor allem während Ball- und Kampfsportarten und bei weiblichen Patientinnen vornehmlich beim Turnen und Rollschuhfahren (Stoneback et al., 2012).

1.5.2 Pathomechanismus

Die meisten Ellenbogenluxationen treten nach posterior oder posterolateral auf (Josefsson et al., 1986). Für den Verletzungsmechanismus dieser Luxationsrichtungen gibt es mehrere Theorien. Osborne und Cotterill (Osborne et al., 1966) und O'Driscoll et al. (O'Driscoll et al., 1991) nahmen an, dass ein Sturz auf den inkomplett oder komplett gestreckten Ellenbogen und ein danach auftretendes

Valgusmoment zu posterioren und posterolateralen Luxationen führen können (O'Driscoll et al., 1991; Osborne et al., 1966). Linscheid und Wheeler (Linscheid et al., 1965) und Schwab et al. (Schwab et al., 1980) hielten vor allem einen Sturz auf den hyperextendierten Ellenbogen und einen dadurch auftretenden Valgusstress für ursächlich für das Auftreten nach posterior oder posterolateral gerichteten Ellenbogenluxationen. Dass Ellenbogenluxationen verstärkt in einer strecknahen Position auftreten, konnte auch durch eine YouTube-Videoanalyse bestätigt werden (Schreiber et al., 2013).

Das Auftreten einer Ellenbogengelenksluxation kann durch anatomische Varianten begünstigt werden, wie etwa einer weit geöffneten Incisura trochlearis (Kilgus et al., 2022; Wadström et al., 1986).

1.5.3 Behandlung

Bei einer bestehenden Ellenbogenluxation präsentiert sich der Ellenbogen meistens deformiert; der Unterarm ist verkürzt und gebeugt und das Olekranon ist dabei prominent. Vor der Reposition sollte eine detaillierte Untersuchung der neurovaskulären Strukturen durchgeführt werden, um eine Verletzung dieser Strukturen ausschließen zu können. Für die Reposition wird der Unterarm supiniert, um ein Einhaken des Koronoids aufzulösen und die distale Bizepssehne zu entspannen. Für die eigentliche Reposition posteriorer Ellenbogenluxationen stehen dann mehrere Techniken zur Verfügung, die in Analgosedierung durchgeführt werden (Marinelli et al., 2021). Eine häufig angewandte Methode ist die Zug-Gegenzug-Technik, bei der der behandelnde Arzt am Unterarm zieht, während eine weitere Person Gegenzug am distalen Humerus ausübt. Der Zug am Unterarm sollte dabei langsam und dosiert ausgeübt werden, um die Muskelspannung und das Risiko für Verletzungen zu minimieren. Der behandelnde Arzt kann mit der freien Hand am

Olekranon manipulieren, um die Reposition zu unterstützen. In manchen Fällen ist auch eine leichte Beugung im Ellenbogengelenk nötig, um das Koronoid zu lösen und dadurch die Reposition zu ermöglichen (Gottlieb et al., 2018). Nach der Reposition sollten eine erneute Untersuchung der neurovaskulären Strukturen und eine Röntgenuntersuchung zur Beurteilung der Gelenkkongruenz durchgeführt werden (Gottlieb et al., 2018).

Bei der Röntgenbildgebung werden Ellenbogenluxationen in „einfach“ oder „komplex“ unterteilt. Während bei einfachen Ellenbogenluxationen ausschließlich Weichteilgewebe verletzt ist, liegen bei komplexen Ellenbogenluxationen zusätzlich Frakturen vor. Einfache Ellenbogenluxationen können konservativ therapiert werden können; bei komplexen Ellenbogenluxationen ist allerdings generell ein operatives Vorgehen indiziert (Hildebrand et al., 1999).

1.5.3.1 *Einfache Ellenbogenluxation*

1.5.3.1.1 Konservative Therapie

Früher wurde eine einfache Ellenbogenluxation im Rahmen einer konservativen Therapie mit einer Immobilisation des betroffenen Gelenkes in einem Gips für bis zu vier Wochen behandelt. Der Therapie steht eine frühe funktionelle Behandlung des Ellenbogengelenks gegenüber, bei der schon wenige Tage nach dem Trauma mit Bewegungsübungen begonnen wird (Hackl et al., 2015; Marinelli et al., 2021). Dabei sollten vor allem Überkopfbewegungen durchgeführt werden, da sie selbst bei Patienten mit MCL- und LCL-Verletzungen zu einer mit dem gesunden Ellenbogen vergleichbaren Kinematik führen und möglicherweise auch das Risiko für eine Ellenbogengelenksteife reduzieren können (Manocha et al., 2022; Marinelli et al., 2021). Für drei bis vier Wochen kann zur Schonung der Weichteile eine bewegliche Schiene getragen werden, die bei einem lateralseitigen Schaden in Pronation angelegt

und bei einem mediaseitigen Schaden in Supination angelegt wird (Armstrong et al., 2000; Dunning et al., 2001; Marinelli et al., 2021). Bei einer beidseitigen Verletzung wird die Schiene in neutraler Unterarmstellung angelegt (Marinelli et al., 2021).

Obwohl die Langzeitergebnisse bei diesen beiden Behandlungsoptionen vergleichbar sind, ist die frühe funktionelle Behandlung mit einer früheren Arbeitsrückkehr und einer geringeren Rate an Ellenbogengelenksteife verbunden, ohne dass instabilitätsassoziierte Komplikationen häufiger auftreten würden (Hackl et al., 2015; Rafai et al., 1999; Van Lieshout et al., 2020). Nicht zuletzt bietet die Frühmobilisation auch sozioökonomische Vorteile gegenüber der Gipsimmobilisation (Van Lieshout et al., 2020).

Dennoch sollte die Therapieentscheidung patientenindividuell getroffen werden. Patienten mit einer konservativ behandelten einfachen Ellenbogenluxation weisen zwar insgesamt eine gute subjektive Ellenbogenfunktion auf mit einem durchschnittlichen Disabilities of Arm, Shoulder and Hand Score von 6,7 und einem Oxford Elbow Score von 90,3. Dennoch leiden die meisten Patienten unter residuellen Ellenbogenschmerzen und/oder einer Ellenbogensteife und fast jeder Zehnte empfindet ein subjektives Instabilitätsgefühl (Anakwe et al., 2011). Das Ausmaß der Instabilität nach erfolgter Reposition bildet dabei einen wichtigen prognostischen Faktor für den Erfolg der konservativen Therapie einfacher Ellenbogenluxationen. Patienten mit geringer Instabilität (Gelenköffnung $< 10^\circ$ unter Bildwandlerkontrolle) haben eine signifikant bessere Ellenbogenfunktion und weisen nach erfolgter konservativer Therapie eine geringere Komplikationsrate auf als Patienten mit einer moderaten Gelenksinstabilität (Gelenköffnung $\geq 10^\circ$ unter Bildwandlerkontrolle). Deshalb sollte bei Patienten mit moderater oder hochgradiger Ellenbogeninstabilität ein primär operatives Vorgehen in Betracht gezogen werden (Schnetzke et al., 2015). Eine Reluxation nach konservativer Therapie ist häufig mit einem ausgeprägten

Weichteilschaden unter Beteiligung der Flexoren- und/oder Extensorsehnen (Abb. 3) verbunden, weshalb auch in solchen Fällen ein primär operatives Vorgehen



Abbildung 3: Intermediär gewichtete MRT-Aufnahme mit Verletzung der Flexoren- (roter Stern) und Extensorsehnen (gelber Stern) nach erfolgter Ellenbogenluxation.

Quelle: Eigene Darstellung.

erwogen werden sollte (Adolfsson et al., 2017).

1.5.3.2 Operative Therapie

Die operative Therapie der einfachen Ellenbogenluxation ist mit einer früheren Sportrückkehr und einer geringeren Rate einer hochgradigen subjektiven Ellenbogeninstabilität assoziiert, weshalb die primär operative Therapie insbesondere bei Patienten mit einem hohen funktionellen Anspruch indiziert ist (Geyer et al., 2023).

Wenn ein operatives Vorgehen geplant wurde, dann wird – ähnlich wie bei der Stabilitätstestung nach der Reposition (Gottlieb et al., 2018) – die Stabilität des Ellenbogengelenks auch in Narkose jeweils in voller Streckung und in 30° Flexion erneut überprüft (Watts, 2019).

Beim Vorliegen einer lateralen Gelenköffnung von $\geq 10^\circ$ unter Varusstress ist eine operative Refixation des lateralen LCL-Ks und CEOs indiziert (Abb. 4). Nach dem Anzeichnen der knöchernen Landmarken (Abb. 4A) wird eine ca.

5 cm lange Inzision vom Epicondylus lateralis ausgehend durchgeführt. Bei intakter Faszie wird sie im Verlauf des M.-anconeus-Intervalls inzidiert. Beim Vorliegen einer Ruptur im Bereich des CEOs kann der Zugang zum Ellenbogengelenk durch sie präpariert werden. Wenn der CEO intakt ist, dann kann der Kocher-Zugang (Intervall zwischen M. extensor carpi ulnaris und M. anconeus; Abb. 4B) verwendet werden, um dann die meistens humeralseitige Avulsion des LCL-Ks (Abb. 4C) darzustellen. Im Isometriezentrum des LCL-Ks (Abb. 4D) wird ein doppelt-beladener Nahtanker platziert (z. B. DX FiberTak[®], Arthrex Inc., Naples, USA; Abb. 4E) und dann über den LCL-K gerafft (Abb. 4F und 4G). Danach können die Fadenenden zur Refixation der Extensorensehnen verwendet werden (Abb. 4H). Zuletzt wird das Kocher-Intervall mit resorbierbaren Fäden verschlossen (z.B. VICRYL[™], Ethicon Inc., Raritan, USA; Abb. 4I) und die Haut wird vernäht (Watts, 2019).

Beim Vorliegen einer medialen Gelenköffnung von $\geq 10^\circ$ unter Valgusstress wird eine ähnliche Vorgehensweise für eine operative Refixation des medialen Kollateralbandkomplexes und CFOs verwendet (Abb. 5A-I) (Watts, 2019).

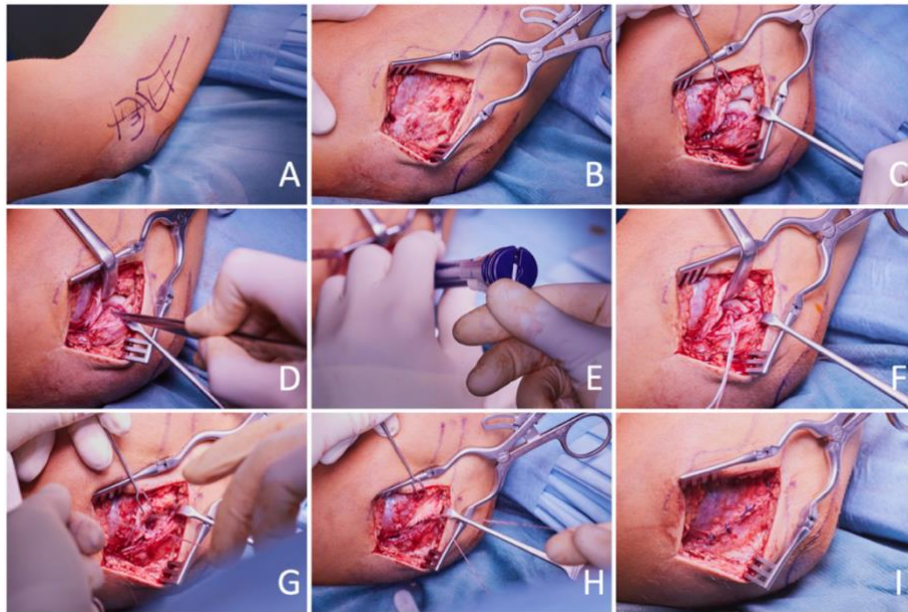


Abbildung 4: Operative Technik der Refixation des LCL-Ks und der Extensorsehnen.

Quelle: Eigene Darstellung.

A: Anzeichnen der anatomischen Landmarken und des Hautschnitts

B: Subkutane Präparation und Darstellung des Kocher-Intervalls zwischen dem M. extensor carpi ulnaris anterior und dem M. anconeus posterior

C: Darstellung des humeralseitig avulsionierten LCL-Ks

D: Identifikation des Isometriezentrums des LCL-Ks für das spätere Einbringen des Nahtankers.

E: Einbringen des mit Tape-faden beladenen All-Suture-Ankers (DX FiberTak®, Arthrex Inc., Naples, USA)

F und G: Armieren des LCL-Ks

H: Armieren der Extensorsehnen

I: Verschluss des Kocher-Intervalls mit resorbierbaren Fäden (VICRYL™, Ethicon Inc., Raritan, USA) und anschließend Hautnaht

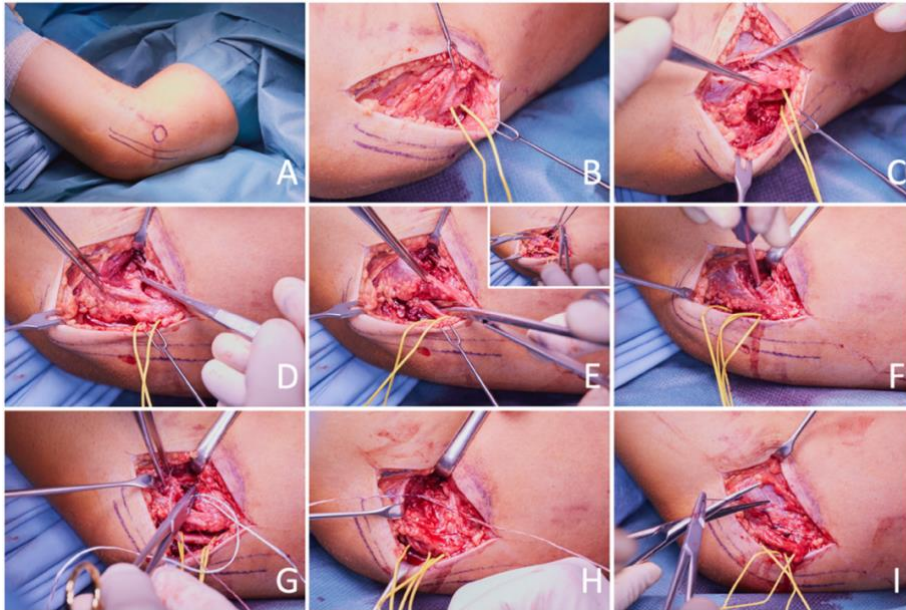


Abbildung 5: Operative Technik der Refixation des medialen Kollateralbandes und der Flexorensehnen.

Quelle: Eigene Darstellung.

A: Anzeichnen des Epicondylus medialis und des Verlaufs des N. ulnaris

B: Subkutane Präparation unter vorsichtiger Darstellung des N. ulnaris und Anschlingen des N. ulnaris mit einem Halteband (Vesseloops®, Medica Europe BV, Oss, Niederlande)

C: Darstellung der verletzten Faszie der Flexorensehnen

D: Stumpfe Präparation bis auf das humeralseitig avulsionierte mediale Kollateralband

E: Neurolyse des N. ulnaris und Anschlingen mit einem weiteren Halteband (Vesseloops™, Medica Europe BV, Oss, Niederlande)

F: Einbringen des mit Tape-faden beladenen All-Suture-Ankers (FiberTak®, Arthrex Inc., Naples, USA) in das Isometriezentrum des medialen Kollateralbandes

G und H: Armierung und Refixation des medialen Kollateralbandes und anschließend Refixation der Flexorensehnen mit den Tapeenden

I: Fasziennaht mit resorbierbaren Fäden (VICRYL™, Ethicon Inc., Raritan, USA) und anschließend Hautnaht

1.6 Posterolaterale Rotationsinstabilität des Ellenbogengelenks

Die PLRI wurde erstmals 1991 von Shawn W. O'Driscoll beschrieben. Bei der PLRI kommt es durch eine Laxität der ulnaren Anteile des LCLs (sog. laterales ulnares kollaterales Ligament [LUCL]) unter Belastung zu einer vorübergehenden Subluxation des Humeroulnargelenks mit einer damit verbundenen Subluxation des Humeroradialgelenks (O'Driscoll et al., 1991). Die PLRI kann sowohl durch einen Sturz auf den ausgestreckten Arm als auch sekundär durch eine laterale Epikondylopathie oder einen Cubitus varus verursacht werden (Eigenschink et al., 2023; Fares et al., 2022; Geyer et al., 2022; Kalainov et al., 2005; Kim et al., 2021; O'Driscoll, 2000).

Die Rekonstruktion des LUCLs bildet den Goldstandard der operativen Therapie und kann beispielsweise mit einem ipsilateralen Trizepssehnen- oder Palmaris-longus-Sehnengraft durchgeführt werden, wobei in der Literatur insgesamt zufriedenstellende Ergebnisse berichtet werden (Eigenschink et al., 2023; Fares et al., 2022; Geyer et al., 2022).

Trotz der unterschiedlichen verfügbaren klinischen Tests (Abb. 6) kann sich die Diagnosesicherung durch eine klinische Untersuchung beim wachen Patienten als schwierig erweisen (Regan et al., 2006). Die Sonografie bildet eine alternative Untersuchungsmodalität zur Feststellung einer Ellenbogeninstabilität beim wachen Patienten. Damit können asymptomatische von instabilen Ellenbogen unterschieden werden. Normalbewegliche Ellenbogen können aber nicht von hypermobilen Ellenbogen differenziert werden (Kirschbaum et al., 2021). Alternativ kann die Stabilitätstestung auch arthroskopisch durchgeführt werden, beispielsweise mit einem Wechselstab (Amarasooriya et al., 2020; Mullane et al., 2023; Plath et al., 2023). Die arthroskopische Stabilitätsprüfung mit einem Wechselstab weist dabei insgesamt die höchste Intra- und Interrater-Reliabilität auf. Bei der Wechselstabmethode wird ein Wechselstab im 90° gebeugten Ellenbogen operativ in den humeroulnaren und -

radialen Gelenkspalt eingeführt. Eine Gelenköffnung von > 6 mm ulnohumeral oder > 7 mm radiokapitellar ist dabei ein Hinweis auf eine (postero-)laterale Bandinsuffizienz (Plath et al., 2023). Diese Methode ist verglichen mit der klinischen Untersuchung und der Ultraschalluntersuchung allerdings mit einer deutlich höheren Invasivität verbunden.

Alternativ kann die Diagnosestellung auch mit der Magnetresonanztomografie (MRT) erfolgen (Hackl et al., 2015). Dabei sind auch verlässlich eine Diagnostik und ein Ausschluss von Sehnenverletzungen und Knorpelschäden möglich (Kohyama et al., 2018; Lynch et al., 2019). Das LUCL selbst kann nur in der Hälfte der Fälle sicher nachgewiesen werden und kann sich auch bei Ellenbogengesunden mit hoher Signalintensität darstellen, wodurch eine Ruptur suggeriert wird. Deshalb ist die MRT zur Beurteilung des LUCLs zum aktuellen Stand ungeeignet (Terada et al., 2004). Dennoch kann das Vorliegen einer PLRI, die, wie es vorher beschrieben wurde, auf eine Insuffizienz des LUCLs zurückzuführen ist, im MRT anhand der Gelenkkongruenz verlässlich nachgewiesen werden (Hackl et al., 2015; Kim et al., 2021). Dabei sind das Vorliegen einer radiokapitellaren Inkongruenz $> 1,2$ mm (Sensitivität: 67 %, Spezifität: 70 %) oder einer axialen ulnohumeralen Inkongruenz $> 0,7$ mm (Sensitivität: 63 %, Spezifität: 70 %) geeignete Kriterien für die Diagnosesicherung (Hackl et al., 2015). Da MRT-Untersuchungen sowohl in Pronation als auch in Supination durchgeführt werden (Pazahr et al., 2021; Sampath et al., 2013), in der Studie von Hackl et al. (Hackl et al., 2015) jedoch alle MRT-Untersuchungen in Supination durchgeführt wurden, ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse möglicherweise limitiert. Auch der Einfluss des Beugegrades und der Laxität auf die Gelenkkongruenz wurde bisher nicht ausreichend untersucht.



Abbildung 6: Auswahl von Tests zur klinischen Untersuchung des Ellenbogengelenks mit einem besonderen Fokus auf die Untersuchung einer PLRI.

Quelle: Eigene Darstellung.

A und B: Passive Ellenbogenflexion (A) und -extension (B)

C und D: Passive Pronation (C) und Supination (D)

E und F: Valgusstressstest in 0° (E), 15° und 30° Flexion (F) zur Beurteilung der medialen Bandstabilität

G und H: Varusstressstest in 0° (G), 15° und 30° Flexion (H) zur Beurteilung der lateralen Bandstabilität

I und J: Cozen's Test (I) und Maudsley's Test (J) zum Ausschluss einer lateralen Epikondylopathie (Cozen, 1962; Roles et al., 1972)

K bis P: Pinzettengriff (K), Chair Sign (L), Table Top Relocation Test vor (M) und nach Reposition des Radiusköpfchens mit dem Daumen des Untersuchers (N), Posterolateral Rotatory Drawer Test (O) und Pivot-Shift Sign (P) zum Ausschluss einer PLRI (Arvind et al., 2006; Camp et al., 2017; Hollinger et al., 2014; O'Driscoll et al., 1991; O'Driscoll et al., 2001; Regan et al., 2006)

1.7 Fragestellung der vorliegenden Studie

Die MRT bildet ein valides nicht-invasives Mittel zur Diagnostik einer PLRI. Dabei wird eine Messung der radiokapitellaren Inkongruenz und der ulnohumeralen Inkongruenz durchgeführt. In diesem Zusammenhang ist allerdings bisher noch unklar, welche magnetresonanztomografische Gelenkkongruenz als physiologisch zu werten ist und inwiefern die Gelenkkongruenz von der Position des Ellenbogens (Extension oder Flexion), der Unterarmposition (Supination oder Pronation) und der Laxität (normal oder hyperlax) abhängt.

Das Ziel der vorliegenden Studie bestand darin, den Einfluss der Ellenbogen- und Unterarmposition auf die Kongruenz des Ellenbogengelenkes bei normalen und hyperlaxen gesunden Probanden zu untersuchen. Dabei wurde angenommen, dass die radiokapitellare Kongruenz beim Wechsel von der Supination in die Pronation wegen einer Vorspannung der Extensorenmuskulatur und der durch die Proximalisierung des Radiuskopfes erhöhten knöchernen Formschlüssigkeit des Radiokapitellargelenks zunimmt. Außerdem wurde postuliert, dass das Ellenbogengelenk bei hyperlaxen Probanden in mehreren Positionen signifikant inkongruenter ist als bei normalen Probanden.

2 Material und Methoden

Die Studie wurde von der Ethikkommission der Technischen Universität München genehmigt (Projektnummer: 552/19 S-KH) und in Übereinstimmung mit der Deklaration von Helsinki durchgeführt.

2.1 Probandenkollektiv

Das Studienkollektiv bestand aus zwei Gruppen (*normal* und *hyperlax*) á 20 Probanden (jeweils rechter und linker Ellenbogen) ohne Ellenbogenbeschwerden, sodass insgesamt 80 Ellenbogen einbezogen werden konnten. In beiden Gruppen sollten jeweils 10 Männer und 10 Frauen eingeschlossen werden. Die Rekrutierung erfolgte unter den Angestellten des Klinikums rechts der Isar.

2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Folgende Kriterien waren Voraussetzung für die Teilnahme an der vorliegenden Studie:

Gruppe *Normal*:

- Kein Vorliegen einer generellen Hyperlaxität (Beighton Score < 5) (Beighton et al., 1973)
- Zwei gesunde Ellenbogen
- Mindestalter: 18 Jahre

Gruppe *Hyperlax*:

- Vorliegen einer generellen Hyperlaxität (Beighton Score ≥ 5) (Beighton et al., 1973)
- Zwei gesunde Ellenbogen
- Mindestalter: 18 Jahre

Von der Studie ausgeschlossen wurden Probanden, die mindestens eines der folgenden Kriterien erfüllten:

- Ellenbogenschmerzen in den letzten 6 Monaten
- Vorliegen einer chronischen Epikondylopathie oder eines Zustands nach einer behandlungsbedürftigen Epikondylopathie
- Voroperationen an Ellenbogen, Unterarm oder Handgelenk
- Erbliche Störung des Kollagenstoffwechsels (z. B. Ehlers-Danlos-Syndrom)
- Zustand nach relevanten Verletzungen des Ellenbogengelenks: Radiusköpfchenluxation als Kind, Ellenbogenluxation, Fraktur am Ellenbogen- oder Handgelenk, Instabilität, Gefäß- oder Nervenverletzungen
- Relevante Begleiterkrankungen: Erkrankungen aus dem rheumatischen Formenkreis, zervikale und periphere Neuropathien, maligne Tumorerkrankungen, Stoffwechselerkrankungen
- MRT-bezogene Ausschlusskriterien, wie z. B. Klaustrophobie

2.2 Bestimmung der Laxität

Die generelle Laxität wurde anhand des 1973 publizierten Beighton Scores evaluiert (Beighton et al., 1973). Dabei wurden verschiedene Gelenke untersucht und in Abhängigkeit von der Beweglichkeit wurden Punkte vergeben (1 Punkt bei Überbeweglichkeit, 0 Punkte bei nicht vorhandener Überbeweglichkeit). Die maximal erreichbare Punktzahl lag bei 9 Punkten (Tab. 1).

Tabelle 1: Berechnung des Beighton Scores

	Punktzahl
Dorsiflexion des V. Fingerendgelenkes > 90°	1 für jede positive Seite
Berühren der Flexoreenseite des Unterarmes mit dem Daumen	1 für jede positive Seite
Hyperextension des Ellenbogengelenkes > 10°	1 für jede positive Seite
Hyperextension des Kniegelenkes > 10°	1 für jede positive Seite
Berühren des Bodens mit den Handflächen aus dem Stehen bei gestreckten Knien	1
Gesamt	9

2.3 Magnetresonanztomografische Untersuchung

Die MRT-Untersuchungen erfolgten in Rückenlage nach dem folgenden Protokoll:

1. Ellenbogenextension und maximale Supination
2. Ellenbogenextension und maximale Pronation
3. 30° Ellenbogenflexion und maximale Pronation
4. 30° Ellenbogenflexion und maximale Supination

Für alle Positionen wurden dieselben Sequenzen (3D PD SPAIR – sagittale Akquisition) angefertigt. Die 30°-Ellenbogenflexionsposition wurde mit einem Goniometer vor jeder Messung überprüft und durch ein spezielles Lagerungskissen gesichert.

2.3.1 Messung der Gelenkkongruenz

Die Messung der Gelenkkongruenz erfolgte mit der von Hackl et al. publizierten Methode (Hackl et al., 2015). Dabei wurde die radiokapitellare Kongruenz in der Sagittalebene und die ulnohumerale Kongruenz in drei Ebenen (Sagittal-, Axial- und Coronarebene) mit der Auswertungssoftware Philips iSite PACS (Koninklijke Philips N.V., Amsterdam, Niederlande) gemessen, die eine multiplanare Rekonstruktion ermöglicht (Hackl et al., 2015).

Zur Rekonstruktion der axialen Schichtaufnahmen, die orthogonal zu den sagittalen und koronaren Aufnahmen verliefen, wurden die sagittalen und koronaren Schichtaufnahmen entlang der Humerusschaftachse ausgerichtet. Die koronaren Schichtaufnahmen wurden dann parallel zur Bewegungsachse des Humerus und die sagittalen Schichtaufnahmen wurden orthogonal zu den koronaren Schichtaufnahmen rekonstruiert (Hackl et al., 2015).

2.3.1.1 *Messung der radiokapitellaren Inkongruenz in der Sagittalebene*

Zur Messung der radiokapitellaren Kongruenz in der Sagittalebene wurde ein einzelnes MRT-Bild extrahiert, das das Zentrum des Radiuskopfes dargestellt hat. Danach wurde die Longitudinalachse des Radius, die durch den proximalen Radius und das Zentrum des Radiuskopfes verlief (blaue Linie, Abb. 7), und das Rotationszentrum des Capitulum humeri (grüner Kreis, Abb. 7) markiert. Der Abstand zwischen den beiden Landmarken bezeichnet die radiokapitellare Inkongruenz (gelbe Linie, Abb. 7) (Hackl et al., 2015). Dabei stehen positive Werte für eine Lage des Radiuskopfes posterior des Zentrums des Capitulum humeri und negative Werte stehen für eine Lage des Radiuskopfes anterior des Zentrums des Capitulum humeri.

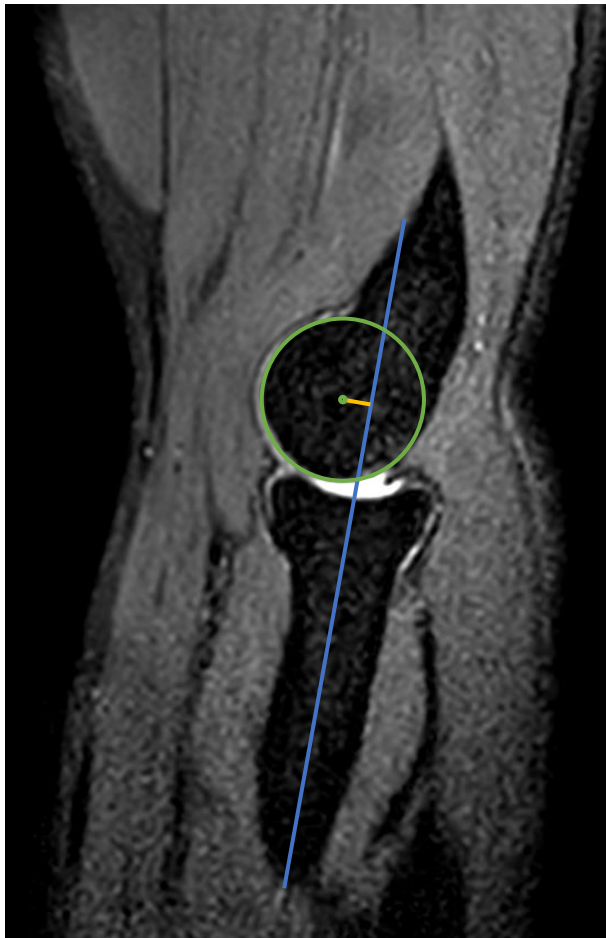


Abbildung 7: Messung der radiokapitellaren Inkongruenz.

Quelle: Eigene Darstellung.

2.3.1.2 *Messung der ulnohumeralen Inkongruenz*

2.3.1.2.1 In der Sagittalebene

Die ulnohumerale Kongruenz in der Sagittalebene wurde anhand einer MRT-Sequenz gemessen, die durch das Zentrum der Koronoidspitze verlief. Die Gelenkflächen des Olekranons (blauer Kreis, Abb. 8) und der Trochlea humeri (grüner Kreis, Abb. 8) wurden jeweils mit einem Kreis markiert. Danach wurden die Abstände zwischen den Kreisen auf der Höhe der Olekranonspitze und auf der Höhe der Koronoidspitze und mittig dazwischen gemessen (gelbe Linien, Abb. 8). Die Differenz zwischen dem größten und dem geringsten Abstand wurde als sagittale ulnohumerale Inkongruenz bezeichnet (Hackl et al., 2015).

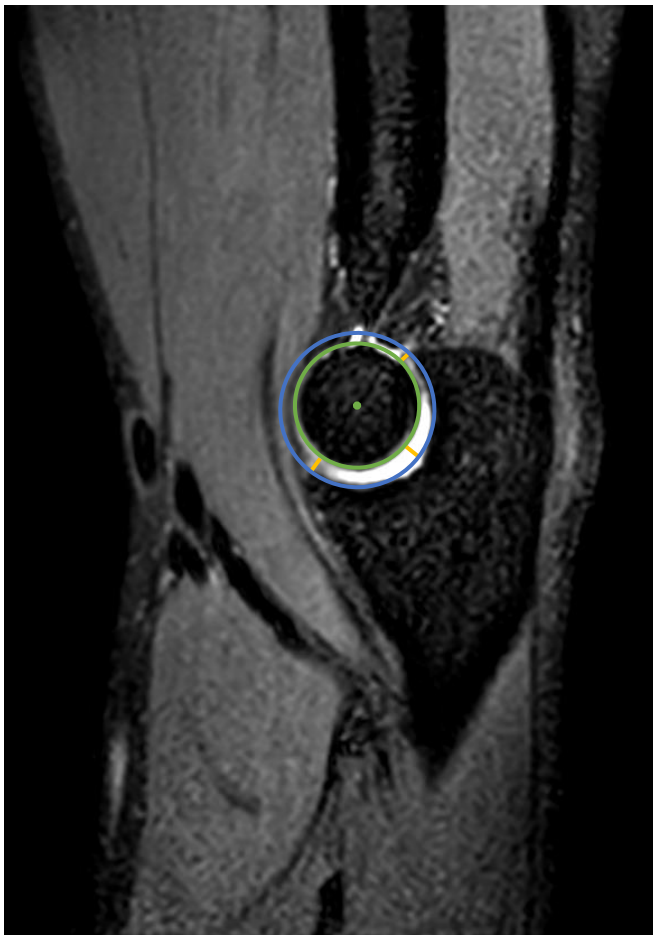


Abbildung 8: Messung der sagittalen ulnohumeralen Inkongruenz.

Quelle: Eigene Darstellung.

2.3.1.2.2 In der Koronarebene

Die Messung der ulnohumeralen Kongruenz in der Koronarebene erfolgte mit einem MRT-Bild im Rotationszentrum des distalen Humerus. Die Gelenkspaltweite wurde an der ulnaren und radialseitigen Begrenzung des Humeralgelenkes und an zwei Punkten in der Mitte gemessen (gelbe Linien, Abb. 9). Die Differenz zwischen dem größten und dem geringsten Abstand wurde als koronare ulnohumerale Inkongruenz bezeichnet (Hackl et al., 2015).

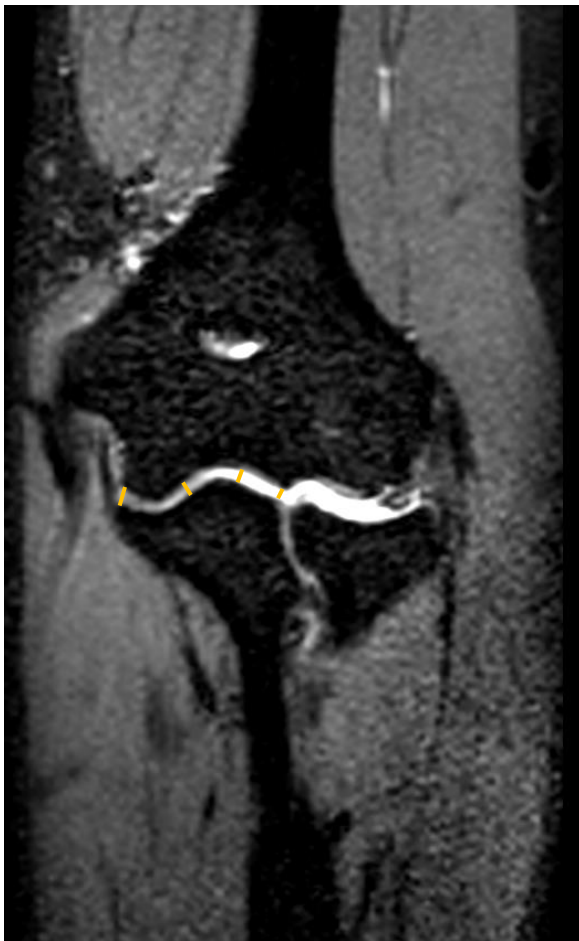


Abbildung 9: Messung der koronaren ulnohumeralen Inkongruenz.

Quelle: Eigene Darstellung.

2.3.1.2.3 In der Axialebene

In derselben Art und Weise wurde die axiale Inkongruenz anhand einer einzelnen axialen MRT-Sequenz gemessen, die durch die Bewegungsachse des distalen Humerus verlief (gelbe Linien, Abb. 10). Die Differenz zwischen dem größten und dem geringsten Abstand wurde als axiale ulnohumorale Inkongruenz bezeichnet (Hackl et al., 2015).

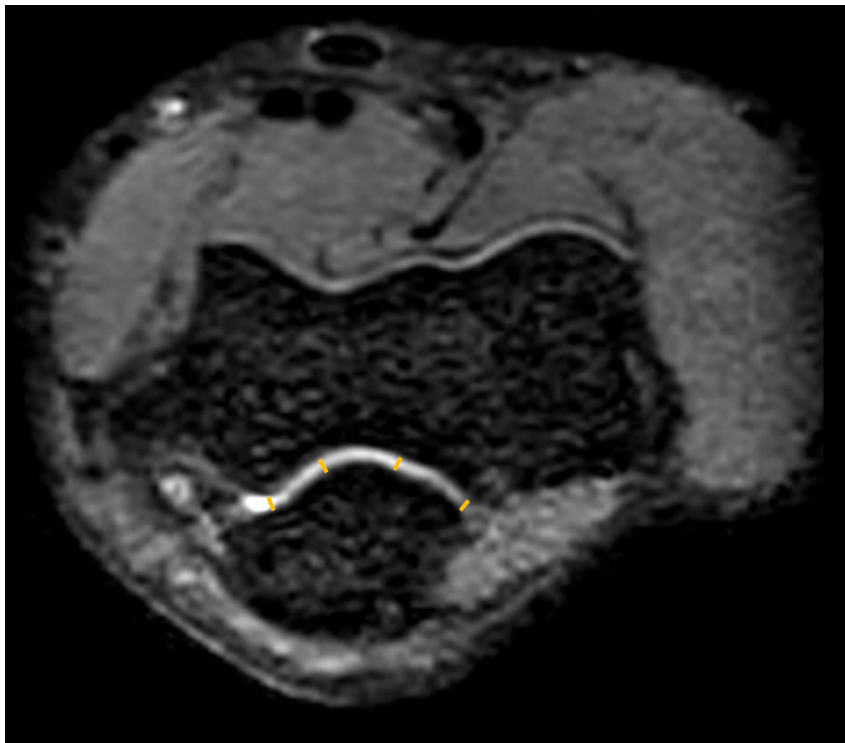


Abbildung 10: Messung der axialen ulnohumeralen Inkongruenz.

Quelle: Eigene Darstellung.

2.4 Statistische Auswertung

Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte mit SPSS 28.0 (IBM-SPSS, New York, USA). Nominale Variablen wurden dabei als Anzahl und korrespondierender Prozentwert dargestellt. Metrische Variablen wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft, die grafisch bestätigt wurde. Normalverteilte Daten wurden als Mittelwert \pm Standardabweichung dargestellt und nicht-normalverteilte wurden als Median dargestellt (25-75%iger Interquartilenabstand) dargestellt. Für den Gruppenvergleich metrischer Variablen wurde der *t*-Test (normalverteilte Daten) oder der Mann-Whitney-U-Test (nicht-normalverteilte Daten) verwendet. Eine statistische Signifikanz wurde bei einem *p*-Wert $< 0,05$ angenommen.

Zur Beurteilung der Intra- und Interrater-Reliabilität von zwei Ratern bei allen Gelenkkongruenzmessungen wurde jeweils der Intraklassenkorrelationskoeffizient (ICC) berechnet und nach Cicchetti (Cicchetti, 1994) interpretiert (Tab.3).

Tabelle 2: Interpretation des Intraklassenkorrelationskoeffizienten zur Beurteilung der Intra- und Interrater-Reliabilität

Intraklassenkorrelationskoeffizient	Interpretation
$< 0,4$	Schlechte Zuverlässigkeit
0,4–0,59	Moderate Zuverlässigkeit
0,6–0,74	Gute Zuverlässigkeit
$\geq 0,75$	Exzellente Zuverlässigkeit

3 Ergebnisse

3.1 Demographische Daten

Insgesamt wurden 40 Probanden in die Studie eingeschlossen, von denen jeweils 20 weiblich und 20 männlich waren. Das mediane Alter lag bei 29,0 Jahren (27,0-32,0 Jahre). Insgesamt wiesen die Probanden einen Beighton Score von 4,5 (0-7,75) auf. In der hyperlaxen Gruppe war der Beighton Score signifikant höher als in der normalen Gruppe (hyperlax: 7,5 [6,0-9,0], normal: 0 [0-2,0], $p < 0,001$).

3.1.1 Vergleich der Kohorten in Abhängigkeit vom Geschlecht

Zwischen den teilnehmenden Männern und Frauen zeigte sich kein signifikanter Unterschied beim Alter (Männer: 30,0 Jahre [28,0-32,0 Jahre], Frauen: 28,0 Jahre [24,25-34,25 Jahre], $p = .314$) und beim Beighton Score (Männer: 3,5 [0-7,75], Frauen: 4,5 [1,25-8,5], $p = 0,529$).

3.1.2 Vergleich der Kohorten in Abhängigkeit von der Laxität

Sowohl in der normalen als auch in der hyperlaxen Gruppe wurden jeweils 10 Männer und 10 Frauen eingeschlossen. Das Alter unterschied sich nicht signifikant zwischen den Gruppen (normal: 28,5 Jahre [27,0-31,0 Jahre], hyperlax: 31,0 Jahre [27,0-37,25 Jahre], $p = 0,5$).

3.2 Einfluss der Gelenkposition auf die Gelenkinkongruenz

3.2.1 Radiokapitellare Inkongruenz

Die radiokapitellare Kongruenz nahm sowohl bei Streckung als auch bei 30° Flexion in Pronationsstellung im Vergleich zur Supinationsstellung signifikant zu (Abb. 11). Dieses Ergebnis zeigte sich auch bei einer Änderung der Supination zur Pronation bei einer gleichzeitigen Änderung der Streck- in eine Beugeposition. Die Kongruenz änderte sich zwischen Extension und 30° Flexion bei gleichbleibender Unterarmposition nicht signifikant ($p > 0,05$).

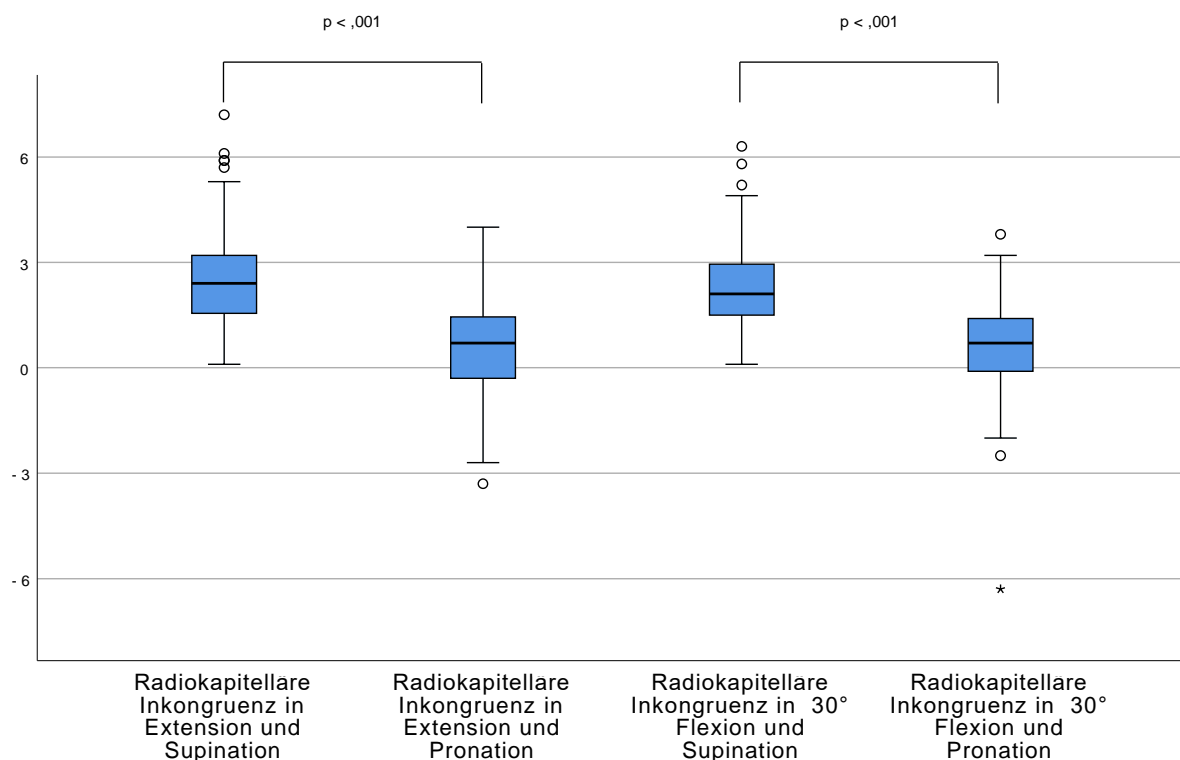


Abbildung 11: Box-Plots zur Darstellung der radiokapitellaren Inkongruenz (y-Achse, in mm) in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.

3.2.2 Ulnohumerale Kongruenz

3.2.2.1 In der Sagittalebene

Die ulnohumerale Gelenkkongruenz in der Sagittalebene änderte sich bei den verschiedenen Ellenbogengelenksstellungen und Unterarmpositionen nicht signifikant (Abb. 12).

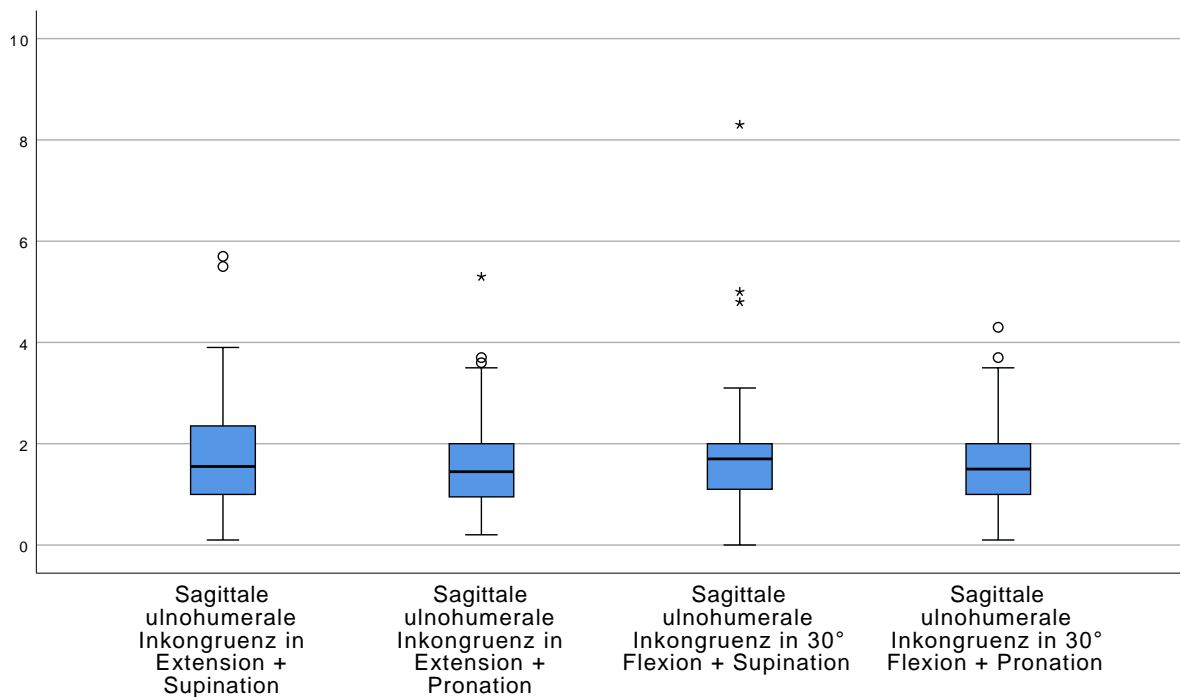


Abbildung 12: Box-Plots zur Darstellung der ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) in der Sagittalebene in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.

3.2.2.2 In der Koronarebene

Bei einer Änderung der Unterarmstellung von der Supination zur Pronation kam es zu einer signifikanten Zunahme der Gelenkkongruenz, was auch bei gleichzeitiger Beugung des Ellenbogens beobachtet werden konnte, aber nicht jedoch bei gleichzeitiger Streckung (Abb. 13).

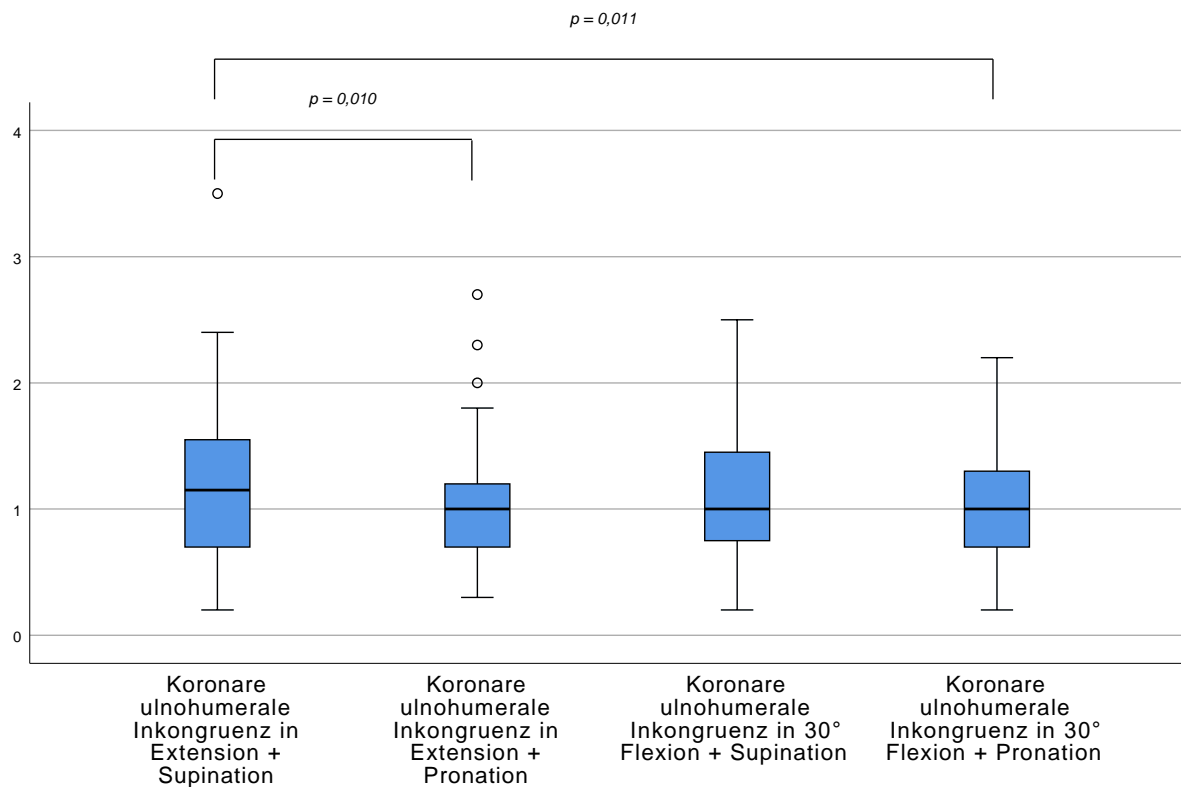


Abbildung 13: Box-Plots zur Darstellung der ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) in der Koronarebene in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.

3.2.2.3 In der Axialebene

Bei einer Änderung des Flexionsgrades des Ellenbogengelenks oder der Unterarmposition kam es zu keiner signifikanten der Änderung der Gelenkkongruenz in der Axialebene (Abb. 14).

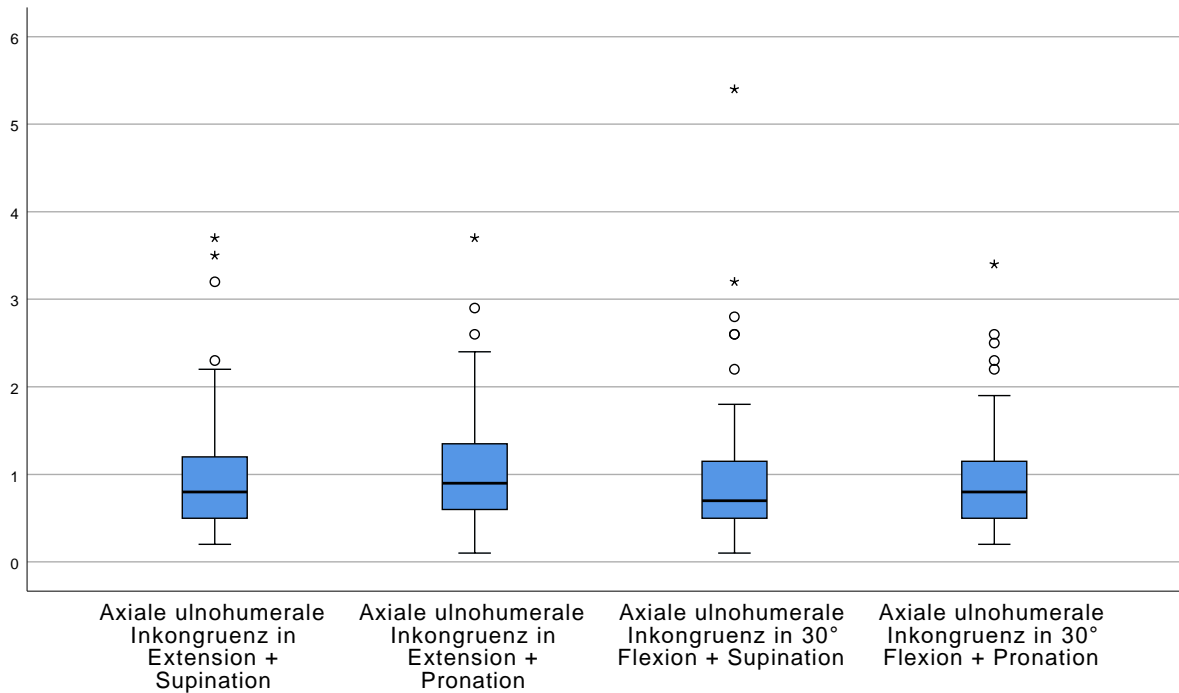


Abbildung 14: Box-Plots zur Darstellung der ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) in der Axialebene in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.

3.3 Einfluss der Laxität auf die Gelenkkongruenz

Beim Vergleich der Gelenkkongruenzen zwischen normalen und hyperlaxen Probanden (Abb. 15-18) zeigten sich signifikante Unterschiede bei der koronaren ulnohumeralen Inkongruenz in Extension und Supination, bei der radiokapitellaren und sagittalen ulnohumeralen Inkongruenz in 30° Flexion und Supination und bei der koronaren ulnohumeralen Inkongruenz in 30° Flexion und Pronation (Abb. 19). Nur bei einer kombinierten Extension im Ellenbogengelenk und Pronation im Unterarm gab es bei der Gelenkkongruenz keine signifikanten Unterschiede (Tab. 4).

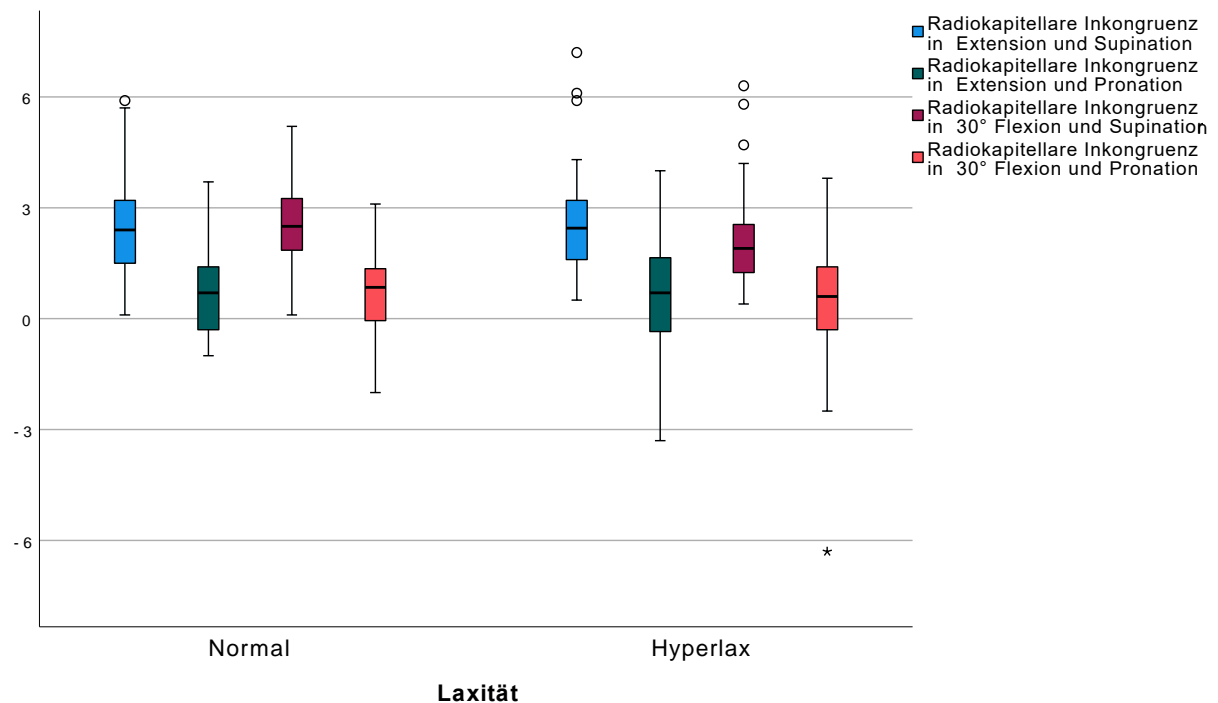


Abbildung 15: Vergleich der radiokapitellaren Inkongruenz (y-Achse, in mm) zwischen normalen und hyperlaxen Probanden.

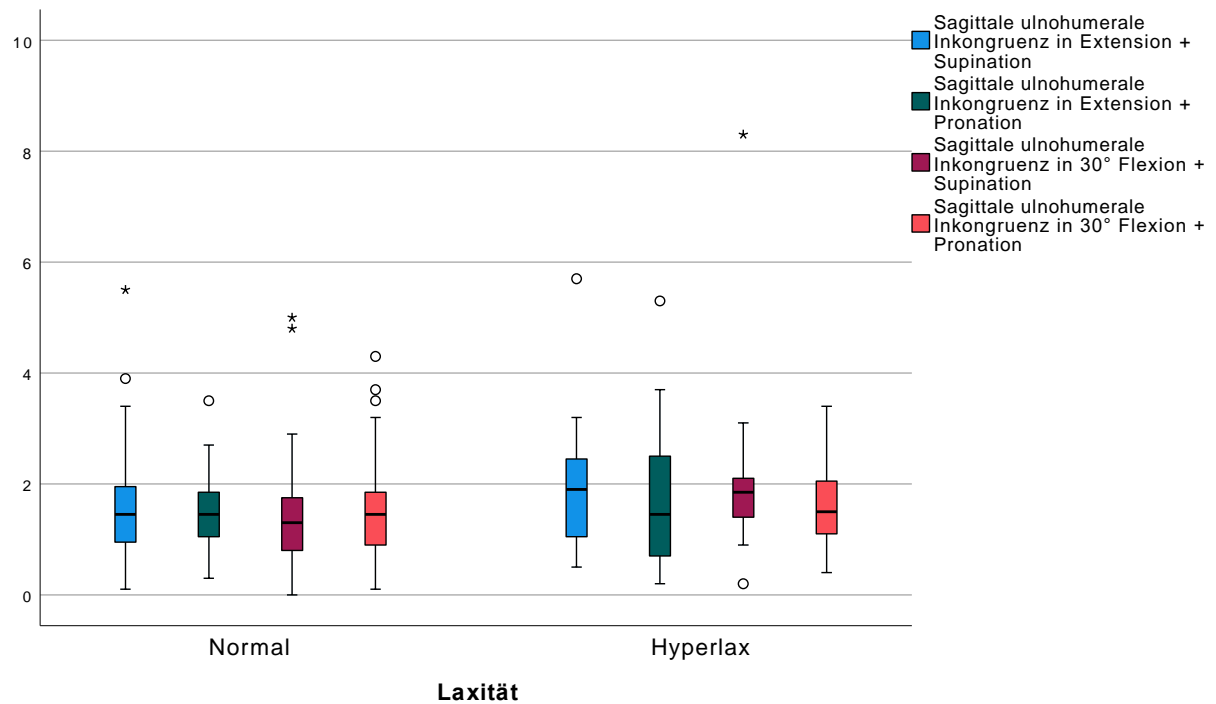


Abbildung 16: Vergleich der sagittalen ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) bei normalen und hyperlaxen Probanden.

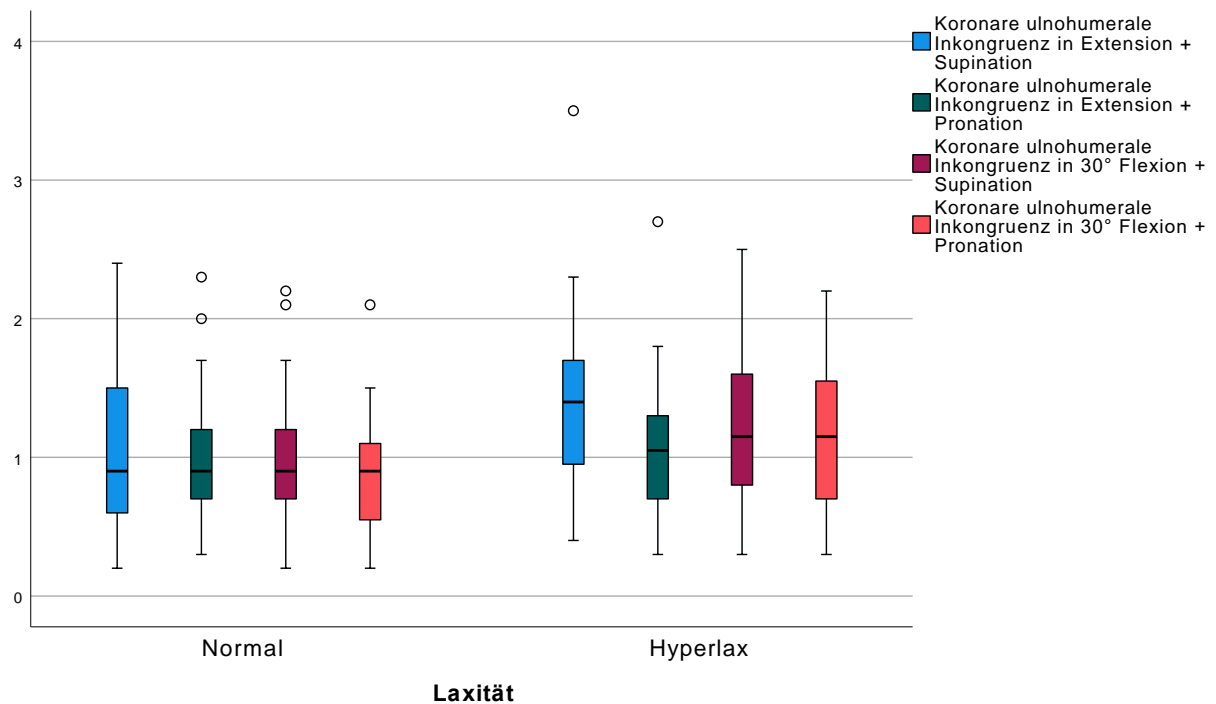


Abbildung 17: Vergleich der koronaren ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) bei normalen und hyperlaxen Probanden.

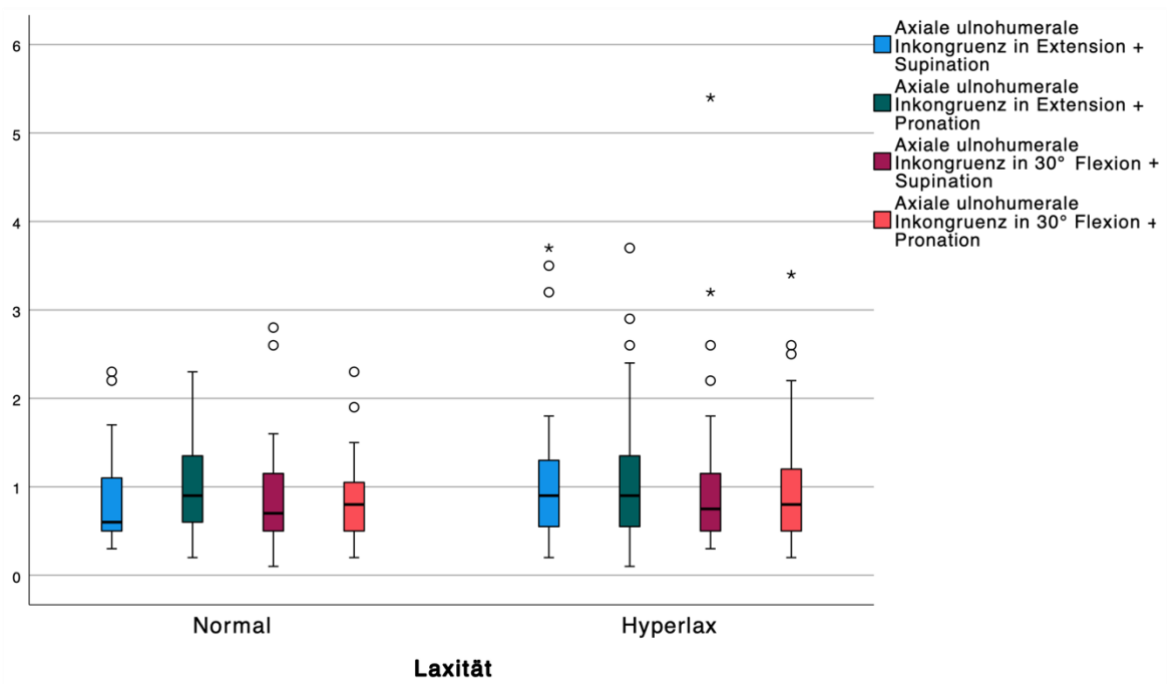


Abbildung 19: Vergleich der axialen ulnohumerale Inkongruenz (y-Achse, in mm) bei normalen und hyperlaxen Probanden.

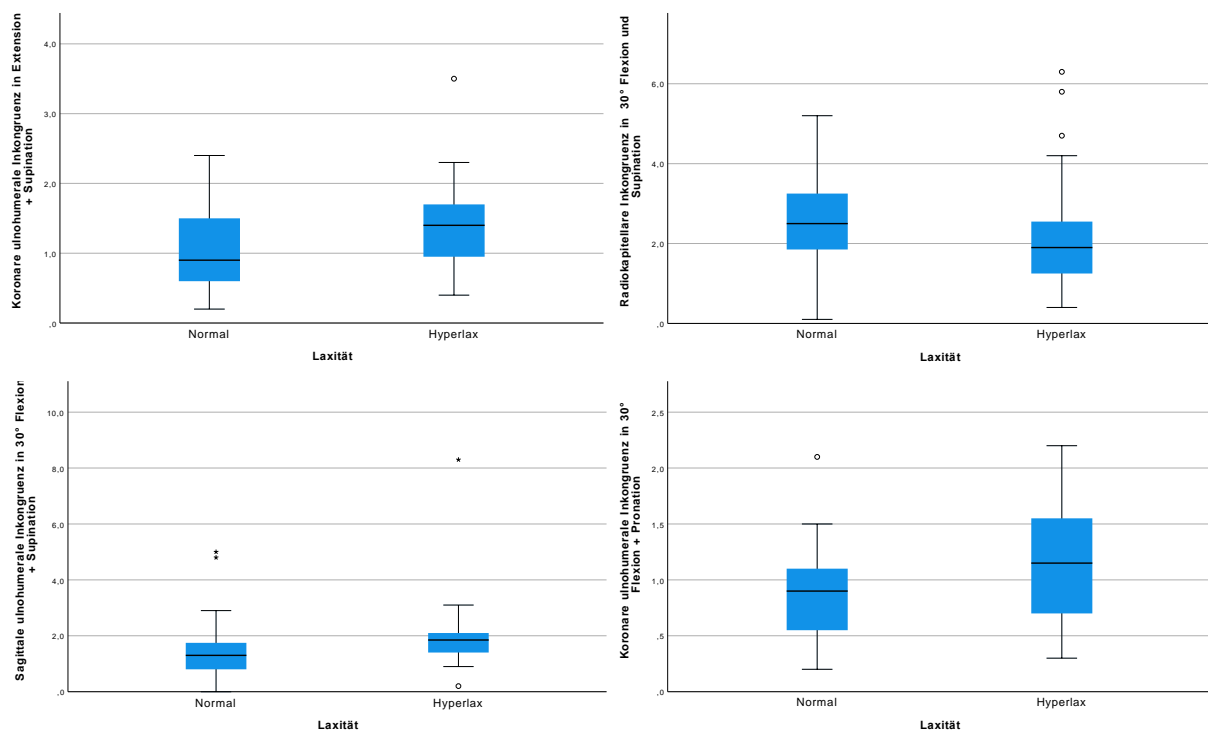


Abbildung 18: Darstellung der signifikanten Unterschiede bei der Gelenkinkongruenz (y-Achse, in mm) zwischen normalen und hyperlaxen Probanden.

Tabelle 3: Vergleich der Gelenkinkongruenz bei normalen vs. hyperlaxen Probanden in Abhängigkeit von der Gelenkposition

Gelenkstellung	Gelenkinkongruenz in mm		
	Normal	Hyperlax	p-Wert
Extension + Supination			
Sagittal, radiokapitellare Inkongruenz	2,4 (1,5-3,2)	2,5 (1,6-3,3)	0,973
Sagittal, ulnohumerale Inkongruenz	1,5 (0,9-2,0)	1,9 (1,0-2,5)	0,252
Koronar, ulnohumerale Inkongruenz	0,9 (0,6-1,5)	1,4 (0,9-1,7)	0,004
Axial, ulnohumerale Inkongruenz	0,6 (0,5-1,1)	0,9 (0,5-1,3)	0,222
Extension + Pronation			
Sagittal, radiokapitellare Inkongruenz	0,7 (0,3-1,4)	0,7 (0,4-1,7)	0,828
Sagittal, ulnohumerale Inkongruenz	1,5 (1,0-1,9)	1,5 (0,7-2,5)	0,637
Koronar, ulnohumerale Inkongruenz	0,9 (0,7-1,2)	1,1 (0,7-1,4)	0,445
Axial, ulnohumerale Inkongruenz	0,9 (0,6-1,4)	0,9 (0,5-1,4)	0,942
30° Flexion + Supination			
Sagittal, radiokapitellare Inkongruenz	2,5 (1,8-3,3)	1,9 (1,2-2,6)	0,039
Sagittal, ulnohumerale Inkongruenz	1,3 (0,8-1,8)	1,9 (1,4-2,1)	0,002
Koronar, ulnohumerale Inkongruenz	0,9 (0,7-1,2)	1,2 (0,8-1,6)	0,067
Axial, ulnohumerale Inkongruenz	0,7 (0,5-1,2)	0,8 (0,5-1,2)	0,950
30° Flexion + Pronation			
Sagittal, radiokapitellare Inkongruenz	0,9 (0,1-1,4)	0,6 (0,4-1,4)	0,464
Sagittal, ulnohumerale Inkongruenz	1,5 (0,9-1,9)	1,5 (1,1-2,1)	0,418
Koronar, ulnohumerale Inkongruenz	0,9 (0,5-1,1)	1,2 (0,7-1,6)	0,009
Axial, ulnohumerale Inkongruenz	0,8 (0,5-1,1)	0,8 (0,5-1,2)	0,502

Fettgeschriebene p-Werte sind statistisch signifikant.

3.4 Reliabilität der MRT-Messungen

Die Intrarater-Reliabilität war „exzellent“ (ICC = 0,788, 95%iges Konfidenzintervall: 0,788-0,818) und die Interrater-Reliabilität war „moderat“ (ICC = 0,433, 95%iges Konfidenzintervall: 0,326-0,519).

4 Diskussion

Die wichtigste Erkenntnis der vorliegenden Studie besteht darin, dass eine Korrelation zwischen der Gelenkposition und der radiokapitellaren und (koronaren) ulnohumeralen Gelenkkongruenz vorliegt. Im Gesamtkollektiv nahmen beide beim Wechsel von der Supination zur Pronation zu. Außerdem konnten bei der Gelenkkongruenz signifikante Unterschiede zwischen normalen und hyperlaxen Probanden bei drei der vier untersuchten Gelenkstellungen beobachtet werden. Im hyperlaxen Kollektiv zeigte sich bei diesen Positionen mit einer Ausnahme insgesamt eine stärkere Gelenkkongruenz. In Extension und Pronation war das Ellenbogengelenk bei normalen und hyperlaxen Probanden gleichermaßen kongruent. Bei den MRT-Untersuchungen in Supinationsstellung oder kombinierter Flexion und Pronation war eine verstärkte Gelenkkongruenz bei hyperlaxen Probanden physiologisch, was nicht mit einer PLRI verwechselt werden sollte.

Die Relevanz einer bestehenden Hyperlaxität wurde in den letzten Jahren zunehmend erfasst. In Studien zu Behandlungsergebnissen nach Knie- und Schulteroperationen konnte bereits gezeigt werden, dass das Vorliegen einer Hyperlaxität mit schlechteren postoperativen Ergebnissen verbunden ist (Ganokroj et al., 2023; Zsidai et al., 2023).

Da der Beighton Score zur Differenzierung zwischen normalen und hyperlaxen Probanden herangezogen werden kann (Beighton et al., 1973), hat die MRT-Untersuchung des Ellenbogengelenks zur Unterscheidung zwischen diesen Kohorten eine limitierte klinische Relevanz. Dennoch können mittels dieser Untersuchung in Zukunft Normwerte für normale und hyperlaxen Probanden generiert werden, um dadurch vor allem eine Unterscheidung zwischen hyperlaxen Probanden und Patienten mit PLRI zu ermöglichen, die sich in der klinischen Praxis aktuell oft als

schwierig erweist. Aktuell ist die Datenlage zur Differenzierung zwischen gesunden normalen und hyperlaxen Ellenbogen und Ellenbogen mit PLRI limitiert (Hackl et al., 2015; Kirschbaum et al., 2021; Plath et al., 2023). Kirschbaum et al. (Kirschbaum et al., 2021) untersuchten mit Ultraschall neben normalen gesunden Ellenbogen und instabilen Ellenbogen auch hyperlaxe gesunde Ellenbogen als eigene Entität. Dabei konnte zwar sowohl ein signifikanter Unterschied zwischen normalen und instabilen Ellenbogen zwischen hyperlaxen und instabilen Ellenbogen festgestellt werden, aber nicht zwischen normalen und hyperlaxen Ellenbogen. Die Interrater-Reliabilität war für die radialseitigen Messungen, die für die Diagnostik einer PLRI entscheidend sind, exzellent (ICC = 0,82) (Kirschbaum et al., 2021). Auch Plath et al. (Plath et al., 2023) nutzten neben der arthroskopischen Wechselstabmethode eine Ultraschalluntersuchung, um das Vorliegen einer PLRI bei Kadavern zu diagnostizieren. Während die arthroskopische Wechselstabmethode eine exzellente Intra- und Interrater-Reliabilität aufwies, ergab sich bei der Ultraschalluntersuchung in dieser Studie zwar eine gute Intrarater-Reliabilität, aber nur eine schlechte Interrater-Reliabilität (Plath et al., 2023). Dadurch erweist sich die Wechselstabmethode als ein exzellentes Mittel, um bei Patienten, die sich einer Ellenbogenoperation unterziehen, eine vorliegende PLRI zu diagnostizieren. Sie ist allerdings wegen ihrer Invasivität nur eingeschränkt durchführbar. Die MRT-Untersuchung bildet daher ein nicht-invasives und anwenderunabhängiges bildgebendes Verfahren dar. Dabei konnte bereits gezeigt werden, dass Patienten mit PLRI in der MRT eine signifikant ausgeprägtere radiokapitellare und axial humeroulnare Gelenkinkongruenz aufweisen, wenn die Untersuchung in Extension und Supination durchgeführt wird (Hackl et al., 2015). Die Autoren leiteten daraus ab, dass eine radiokapitellare Inkongruenz $\geq 1,2$ mm und eine ulnohumorale Inkongruenz (in der Axialebene) $\geq 0,7$ mm verlässliche Zeichen für das Vorliegen einer PLRI darstellen (Hackl et al., 2015). In der vorgestellten Studie lagen

die mediane radiokapitellare Inkongruenz und die mediane axiale ulnohumerale Inkongruenz in der hyperlaxen Gruppe über diesen Schwellenwerten, weshalb mit den Kriterien von Hackl et al. in einem Teil dieser Kohorte möglicherweise eine PLRI diagnostiziert werden könnte, die vermutlich nicht vorlag. Außerdem wurden alle MRT-Untersuchungen in der Studie von Hackl et al. (Hackl et al., 2015) in Extension und Supination durchgeführt, was mit einer limitierten Übertragbarkeit auf MRT-Untersuchungen verbunden ist, die nicht in Extension und Supination durchgeführt wurden.

In der aktuellen Studie konnten signifikante Unterschiede bei der Ellenbogengelenkkongruenz zwischen normalen und hyperlaxen Probanden in allen Positionen außer bei Extension und Pronation festgestellt werden. Dabei ist bereits bekannt, dass der Einfluss der periartikulären Muskulatur und der knöchernen Strukturen auf die Ellenbogengelenksstabilität stellungsabhängig ist (Karbach et al., 2017; Morrey et al., 1983; Pomianowski et al., 2001; Safran et al., 2005). Möglicherweise führen diese Strukturen dazu, dass das Vorliegen einer Hyperlaxität in Extensions- und Pronationsstellung keinen wesentlichen Einfluss auf die Gelenkkongruenz mehr haben. Daher könnten zukünftige Studien, in denen die MRT als Mittel für eine Diagnose einer PLRI untersucht werden könnte, die Gelenkkongruenz zwischen gesunden Ellenbogen und Ellenbogen mit PLRI in Extension und Pronation vergleichen, um zu ermitteln, ob sich diese Modalität für die Diagnostik eignet. Beim Vorliegen einer Hyperlaxität könnten dann vermutlich auch die aktuellen Studienergebnisse bestätigt werden.

Bei der Interpretation der Studienergebnisse sollten einige Limitationen berücksichtigt werden. Der Schwellenwert bezogen auf den Beighton Score von „5“ ist vermutlich zu gering, um die Ergebnisse auf alle Patienten mit genereller Hyperlaxität übertragen zu können. Da jedoch selbst bei einer geringen Hyperlaxität signifikante

Unterschiede auftraten, kann angenommen werden, dass dieser Effekt bei Probanden mit einer stärker ausgeprägten Laxität verstärkt wird. Außerdem ist die Übertragbarkeit der Studienergebnisse auf den klinischen Alltag limitiert, da die Interrater-Reliabilität nur moderat war und die Unterschiede z. T. im Bereich von 0,1 mm beobachtet wurden. Im klinischen Alltag geht es aber nicht primär darum, ob ein Patient eine normale Gelenkfestigkeit aufweist oder hyperlax ist, sondern darum, eine Hyperlaxität nicht mit einer vorliegenden PLRI zu verwechseln. Da eine Hyperlaxität als Einflussfaktor für die Gelenkkongruenz durch eine MRT-Untersuchung in Extension und Pronation aufgehoben werden kann, liegt es nahe, dass eine falsch-positive Diagnose einer PLRI bei einer Durchführung der MRT in Extension und Pronation vermieden werden kann.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Kongruenz des Ellenbogengelenkes hängt sowohl von der Gelenkposition als auch von der Laxität ab. Bei einer isolierten Betrachtung der Gelenkposition als Einflussfaktor auf die Gelenkkongruenz nehmen die radiokapitellare und die axiale ulnohumereale Kongruenz des Ellenbogengelenkes von der Supination in die Pronation zu. Bei Berücksichtigung der Laxität konnten signifikante Unterschiede bei der Gelenkkongruenz sowohl in Extension als auch in 30° Flexion und Supination und auch in 30° Flexion und Pronation beobachtet werden. In Supination oder kombinierter Flexion und Pronation kann eine verstärkte Inkongruenz bei hyperlaxen Probanden daher als physiologisch verstanden werden. Lediglich in Extension und Pronation konnten keine signifikanten Gruppenunterschiede festgestellt werden. Deshalb kann angenommen werden, dass die Laxität als Einflussfaktor auf die Gelenkkongruenz in Extension und Pronation vernachlässigt werden kann. Zukünftige Studien, in denen die MRT als Mittel zur Diagnose einer PLRI untersucht werden könnte, sollten die Gelenkkongruenz daher zwischen gesunden Ellenbogen und Ellenbogen mit PLRI in Extension und Pronation vergleichen. Denn dadurch könnte ermittelt werden, ob diese Modalität für die Diagnostik geeignet ist und damit eine Verwechslung einer bestehenden Hyperlaxität mit einer PLRI verhindert werden kann.

6 Zusammenfassung

Einleitung: Es konnte bereits gezeigt werden, dass Patienten mit einer posterolateralen Rotationsinstabilität (PLRI) des Ellenbogengelenkes in der Magnetresonanztomografie (MRT) im Vergleich zu Patienten ohne PLRI eine erhöhte Gelenkkongruenz aufweisen. Eine generelle Hyperlaxizität (Beighton Score ≥ 5) kann u. a. mit einer Hyperextension des Ellenbogengelenks verbunden sein. Der Einfluss der Gelenkposition und der Hyperlaxizität im Vergleich mit normalen Probanden (Beighton Score < 5) auf die Gelenkkongruenz war Gegenstand der vorliegenden Studie.

Methodik: Zwanzig normale (Beighton Score < 5) und 20 hyperlaxe Probanden (Beighton Score ≥ 5) ohne Ellenbogenbeschwerden wurden in 0° Flexion in Pro- und Supination und in 30° Flexion in Pro- und Supination nach einem standardisierten Protokoll durch MRT untersucht. In jeder Gelenkstellung wurden die sagittale radiokapitellare Gelenkkongruenz und die ulnohumere Gelenkkongruenz (in der Sagittal-, Koronar- und Axialebene) nach einem standardisierten Protokoll gemessen. Für alle Messwerte wurden jeweils die Intra- und Interrater-Reliabilität zwischen zwei Untersuchern ermittelt.

Ergebnisse: Im Gesamtkollektiv nahmen die sagittale radiokapitellare Kongruenz und die koronare ulnohumere Kongruenz von der Supination zur Pronation signifikant zu ($p < 0,05$). In drei der vier untersuchten Gelenkstellungen konnten signifikante Unterschiede bei der Gelenkkongruenz zwischen der normalen und hyperlaxen Gruppe festgestellt werden. Im hyperlaxen Kollektiv zeigte sich in diesen Positionen mit einer Ausnahme insgesamt eine stärkere Gelenkkongruenz. Nur in Extension und Pronation ergab sich kein signifikanter Gruppenunterschied. Die Intrarater-Reliabilität war dabei „exzellent“ und die Interrater-Reliabilität war „moderat“.

Schlussfolgerung: In Extensions- und Pronationsstellung ist das Ellenbogengelenk bei normalen und hyperlaxen Probanden gleichermaßen kongruent. Bei der Bewertung einer MRT-Untersuchung in Supinationsstellung oder bei kombinierter Flexion und Pronation ist eine stärkere Gelenkinkongruenz bei hyperlaxen Probanden physiologisch.

7 Abstract

Introduction: It has been previously shown that patients with posterolateral rotatory instability (PLRI) of the elbow exhibit a higher degree of elbow joint incongruence on (magnetic resonance imaging) MRI than patients without PLRI. General hyperlaxity (Beighton Score ≥ 5) may be associated with elbow joint hyperextension. The influence of the position of the elbow joint and hyperlaxity compared with normal subjects (Beighton Score < 5) on the congruence of the elbow joint was the subject of the present study.

Methods: Twenty normal (Beighton Score < 5) and 20 hyperlax (Beighton Score ≥ 5) subjects without any elbow complaints underwent bilateral elbow MRI in 0° of flexion in supination and pronation as well as in 30° of flexion in supination and pronation via a standardized protocol. Sagittal radiocapitellar joint incongruence and ulnohumeral joint incongruence (in the sagittal, coronar and axial plane) were measured using a standardized protocol. Intra- and interrater reliability were evaluated for all measurements.

Results: Sagittal radiocapitellar congruence as well as coronar ulnohumeral congruence was greater in pronation than in supination ($p < .05$). Significant differences between the normal and hyperlax subjects were present in three of the four joint positions evaluated. In these positions, the hyperlax group showed an increased joint incongruence with one exception. No significant difference was observed only in extension and pronation between normal and hyperlax subjects.. Intrarater reliability was "excellent" and interrater reliability was "moderate".

Conclusion: The congruence of the elbow joint is similar between normal and hyperlax subjects in extension and pronation. When evaluating MRI with the elbow in

supination or combined flexion and pronation, an increased joint incongruence is physiological in hyperlax subjects.

8 Literaturverzeichnis

- Adolfsson, L. E., Nestorson, J. O., & Scheer, J. H. (2017). Extensive soft tissue lesions in redislocated after simple elbow dislocations. *J Shoulder Elbow Surg*, 26(7), 1294-1297. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2017.02.019>
- Amarasooriya, M., & Phadnis, J. (2020). Arthroscopic Diagnosis of Posterolateral Rotatory Instability of the Elbow. *Arthrosc Tech*, 9(12), e1951-e1956. <https://doi.org/10.1016/j.eats.2020.08.035>
- Anakwe, R. E., Middleton, S. D., Jenkins, P. J., McQueen, M. M., & Court-Brown, C. M. (2011). Patient-reported outcomes after simple dislocation of the elbow. *J Bone Joint Surg Am*, 93(13), 1220-1226. <https://doi.org/10.2106/jbjs.J.00860>
- Anakwenze, O. A., Kwon, D., O'Donnell, E., Levine, W. N., & Ahmad, C. S. (2014). Surgical treatment of posterolateral rotatory instability of the elbow. *Arthroscopy*, 30(7), 866-871. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2014.02.029>
- Armstrong, A. D., Dunning, C. E., Faber, K. J., Duck, T. R., Johnson, J. A., & King, G. J. (2000). Rehabilitation of the medial collateral ligament-deficient elbow: an in vitro biomechanical study. *J Hand Surg Am*, 25(6), 1051-1057. <https://doi.org/10.1053/jhsu.2000.17819>
- Arvind, C. H., & Hargreaves, D. G. (2006). Table top relocation test--New clinical test for posterolateral rotatory instability of the elbow. *J Shoulder Elbow Surg*, 15(4), 500-501. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2005.11.014>
- Balg, F., & Boileau, P. (2007). The instability severity index score. A simple pre-operative score to select patients for arthroscopic or open shoulder stabilisation. *J Bone Joint Surg Br*, 89(11), 1470-1477. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.89b11.18962>

- Beckett, K. S., McConnell, P., Lagopoulos, M., & Newman, R. J. (2000). Variations in the normal anatomy of the collateral ligaments of the human elbow joint. *J Anat*, 197 Pt 3(Pt 3), 507-511. <https://doi.org/10.1046/j.1469-7580.2000.19730507.x>
- Beighton, P., Solomon, L., & Soskolne, C. L. (1973). Articular mobility in an African population. *Ann Rheum Dis*, 32(5), 413-418. <https://doi.org/10.1136/ard.32.5.413>
- Bian, H., Kim, H., Kholinne, E., Sun, Y., Kwak, J. M., & Tan, J. (2021). The contact area of the radiocapitellar joint under pronation and supination with axial load using a 3-dimensional computed tomography: an in vivo study. *J Shoulder Elbow Surg*, 30(6), 1238-1244. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.08.042>
- Boileau, P., Villalba, M., Héry, J. Y., Balg, F., Ahrens, P., & Neyton, L. (2006). Risk factors for recurrence of shoulder instability after arthroscopic Bankart repair. *J Bone Joint Surg Am*, 88(8), 1755-1763. <https://doi.org/10.2106/jbjs.E.00817>
- Camp, C. L., Smith, J., & O'Driscoll, S. W. (2017). Posterolateral Rotatory Instability of the Elbow: Part I. Mechanism of Injury and the Posterolateral Rotatory Drawer Test. *Arthrosc Tech*, 6(2), e401-e405. <https://doi.org/10.1016/j.eats.2016.10.016>
- Carroll, M. B. (2023). Hypermobility spectrum disorders: A review. *Rheumatol Immunol Res*, 4(2), 60-68. <https://doi.org/10.2478/rir-2023-0010>
- Cicchetti, D. V. (1994). Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychological Assessment*, 6(4), 284-290. <https://doi.org/10.1037/1040-3590.6.4.284>
- Cozen, L. (1962). The painful elbow. *Ind Med Surg*, 31, 369-371.
- Deutch, S. R., Olsen, B. S., Jensen, S. L., Tyrdal, S., & Sneppen, O. (2003). Ligamentous and capsular restraints to experimental posterior elbow joint

- dislocation. *Scand J Med Sci Sports*, 13(5), 311-316.
<https://doi.org/10.1034/j.1600-0838.2003.00323.x>
- Dunning, C. E., Zarzour, Z. D., Patterson, S. D., Johnson, J. A., & King, G. J. (2001). Muscle forces and pronation stabilize the lateral ligament deficient elbow. *Clin Orthop Relat Res*(388), 118-124. <https://doi.org/10.1097/00003086-200107000-00018>
- Eigenschink, M., Pauzenberger, L., Laky, B., Ostermann, R. C., Anderl, W., & Heuberer, P. R. (2023). Lateral ulnar collateral ligament reconstruction using an autologous triceps tendon graft for subclinical posterolateral rotatory instability in recalcitrant lateral epicondylitis. *J Shoulder Elbow Surg*, 32(6), 1262-1270. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2023.02.123>
- Fares, A., Kusnezov, N., & Dunn, J. C. (2022). Lateral Ulnar Collateral Ligament Reconstruction for Posterolateral Rotatory Instability of the Elbow: A Systematic Review. *Hand (N Y)*, 17(2), 373-379.
<https://doi.org/10.1177/1558944720917763>
- Ganokroj, P., Whalen, R. J., & Provencher, M. T. (2023). Editorial Commentary: Hyperlaxity Is a Common Factor in Failed Arthroscopic Bankart Repair. *Arthroscopy*, 39(4), 959-962. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2022.12.018>
- Geyer, S., Heine, C., Winkler, P. W., Lutz, P. M., Lenich, A., Scheiderer, B., Imhoff, A. B., & Siebenlist, S. (2022). LUCL reconstruction of the elbow: clinical midterm results based on the underlying pathogenesis. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 142(8), 1809-1816.
<https://doi.org/10.1007/s00402-021-03759-6>
- Geyer, S., Lacheta, L., Seilern Und Aspang, J., Willinger, L., Lutz, P. M., Lappen, S., Imhoff, A. B., & Siebenlist, S. (2023). Patient satisfaction, joint stability and return to sports following simple elbow dislocations: surgical versus non-

- surgical treatment. *Arch Orthop Trauma Surg*, 143(3), 1481-1489.
<https://doi.org/10.1007/s00402-022-04383-8>
- Gottlieb, M., & Schiebout, J. (2018). Elbow Dislocations in the Emergency Department: A Review of Reduction Techniques. *J Emerg Med*, 54(6), 849-854. <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2018.02.011>
- Hackl, M., Bercher, M., Wegmann, K., Müller, L. P., & Dargel, J. (2016). Functional anatomy of the lateral collateral ligament of the elbow. *Arch Orthop Trauma Surg*, 136(7), 1031-1037. <https://doi.org/10.1007/s00402-016-2479-8>
- Hackl, M., Beyer, F., Wegmann, K., Leschinger, T., Burkhart, K. J., & Müller, L. P. (2015). The treatment of simple elbow dislocation in adults. *Dtsch Arztebl Int*, 112(18), 311-319. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2015.0311>
- Hackl, M., Wegmann, K., Ries, C., Leschinger, T., Burkhart, K. J., & Müller, L. P. (2015). Reliability of Magnetic Resonance Imaging Signs of Posterolateral Rotatory Instability of the Elbow. *J Hand Surg Am*, 40(7), 1428-1433.
<https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2015.04.029>
- Herzberg, S. D., Motu'apuaka, M. L., Lambert, W., Fu, R., Brady, J., & Guise, J. M. (2017). The Effect of Menstrual Cycle and Contraceptives on ACL Injuries and Laxity: A Systematic Review and Meta-analysis. *Orthop J Sports Med*, 5(7), 2325967117718781. <https://doi.org/10.1177/2325967117718781>
- Hildebrand, K. A., Patterson, S. D., & King, G. J. (1999). Acute elbow dislocations: simple and complex. *Orthop Clin North Am*, 30(1), 63-79.
[https://doi.org/10.1016/s0030-5898\(05\)70061-4](https://doi.org/10.1016/s0030-5898(05)70061-4)
- Hollinger, B., Dehlinger, F., & Franke, S. (2014). Diagnostik und Therapie der ligamentären Ellenbogeninstabilitäten. *Obere Extremität*, 9(3), 147-155.
<https://doi.org/10.1007/s11678-014-0280-2>

- Josefsson, P. O., & Nilsson, B. E. (1986). Incidence of elbow dislocation. *Acta Orthop Scand*, 57(6), 537-538. <https://doi.org/10.3109/17453678609014788>
- Kalainov, D. M., & Cohen, M. S. (2005). Posterolateral rotatory instability of the elbow in association with lateral epicondylitis. A report of three cases. *J Bone Joint Surg Am*, 87(5), 1120-1125. <https://doi.org/10.2106/jbjs.D.02293>
- Karbach, L. E., & Elfar, J. (2017). Elbow Instability: Anatomy, Biomechanics, Diagnostic Maneuvers, and Testing. *J Hand Surg Am*, 42(2), 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2016.11.025>
- Kilgus, S., Eder, C., Siegert, P., Moroder, P., Zimmermann, E., & Thiele, K. (2022). The inter-individual anatomical variation of the trochlear notch as a predisposition for simple elbow dislocation. *Arch Orthop Trauma Surg*, 142(11), 3405-3413. <https://doi.org/10.1007/s00402-021-04284-2>
- Kim, H. J., Yi, J. H., Jung, J. W., Cho, D. W., van Riet, R., & Jeon, I. H. (2011). Influence of forearm rotation on proximal radioulnar joint congruency and translational motion using computed tomography and computer-aided design technologies. *J Hand Surg Am*, 36(5), 811-815. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2011.01.043>
- Kim, Y. S., Kim, S. T., Lee, K. H., Ahn, J. M., & Gong, H. S. (2021). Radiocapitellar incongruity of the radial head in magnetic resonance imaging correlates with pathologic changes of the lateral elbow stabilizers in lateral epicondylitis. *PLoS One*, 16(7), e0254037. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254037>
- Kirschbaum, S., Plachel, F., Kerschbaum, M., Gerhard, C., & Thiele, K. (2021). Does sonography allow an objective and reproducible distinction between stable, hypermobile, and unstable elbow joints? *J Shoulder Elbow Surg*, 30(5), 1142-1151. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2020.11.023>

- Kohyama, S., Ogawa, T., Mamizuka, N., Hara, Y., & Yamazaki, M. (2018). A Magnetic Resonance Imaging-Based Staging System for Osteochondritis Dissecans of the Elbow: A Validation Study Against the International Cartilage Repair Society Classification. *Orthop J Sports Med*, 6(9), 2325967118794620. <https://doi.org/10.1177/2325967118794620>
- Kuhn, M. A., & Ross, G. (2008). Acute elbow dislocations. *Orthop Clin North Am*, 39(2), 155-161, v. <https://doi.org/10.1016/j.ocl.2007.12.004>
- Linscheid, R. L., & Wheeler, D. K. (1965). Elbow dislocations. *Jama*, 194(11), 1171-1176.
- Lynch, J., Yu, C. C., Chen, C., & Muh, S. (2019). Magnetic resonance imaging versus ultrasound in diagnosis of distal biceps tendon avulsion. *Orthop Traumatol Surg Res*, 105(5), 861-866. <https://doi.org/10.1016/j.otsr.2019.01.021>
- Manocha, R. H. K., Banayan, S., Johnson, J. A., & King, G. J. W. (2022). Overhead arm positioning in the rehabilitation of elbow dislocations: An in vitro biomechanical study. *J Hand Ther*, 35(2), 245-253. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2022.01.008>
- Marinelli, A., Graves, B. R., Bain, G. I., & Pederzini, L. (2021). Treatment of elbow instability: state of the art. *J Isakos*, 6(2), 102-115. <https://doi.org/10.1136/jisakos-2019-000316>
- Morrey, B. F., & An, K. N. (1983). Articular and ligamentous contributions to the stability of the elbow joint. *Am J Sports Med*, 11(5), 315-319. <https://doi.org/10.1177/036354658301100506>
- Mullane, A. M., & Field, L. D. (2023). Arthroscopic Techniques to Recognize and Quantify Subtle Medial and Lateral Elbow Instability. *Arthroscopy Techniques*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eats.2023.04.029>

- O'Driscoll, S. W. (2000). Classification and evaluation of recurrent instability of the elbow. *Clin Orthop Relat Res*(370), 34-43. <https://doi.org/10.1097/00003086-200001000-00005>
- O'Driscoll, S. W., Bell, D. F., & Morrey, B. F. (1991). Posterolateral rotatory instability of the elbow. *J Bone Joint Surg Am*, 73(3), 440-446.
- O'Driscoll, S. W., & Evans, D. C. (1991). Contralateral shoulder instability following anterior repair. An epidemiological investigation. *J Bone Joint Surg Br*, 73(6), 941-946. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.73b6.1955441>
- O'Driscoll, S. W., Jupiter, J. B., King, G. J., Hotchkiss, R. N., & Morrey, B. F. (2001). The unstable elbow. *Instr Course Lect*, 50, 89-102.
- Olds, M., Ellis, R., Donaldson, K., Parmar, P., & Kersten, P. (2015). Risk factors which predispose first-time traumatic anterior shoulder dislocations to recurrent instability in adults: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med*, 49(14), 913-922. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-094342>
- Omori, S., Miyake, J., Oka, K., Tanaka, H., Yoshikawa, H., & Murase, T. (2016). In vivo three-dimensional elbow biomechanics during forearm rotation. *J Shoulder Elbow Surg*, 25(1), 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2015.07.002>
- Osborne, G., & Cotterill, P. (1966). Recurrent dislocation of the elbow. *J Bone Joint Surg Br*, 48(2), 340-346.
- Pazahr, S., Sutter, R., & Zubler, V. (2021). MRI of the Elbow: How to Do It. *Semin Musculoskelet Radiol*, 25(4), 538-545. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1729884>
- Plath, J., Otto, A., Förch, S., Siebenlist, S., Grosser, B., Mayr, E., Imhoff, A. B., & Lenich, A. (2023). Arthroscopic rod technique compared to stress ultrasound in the dynamic evaluation of lateral ligament instabilities of the elbow. *Archives*

of Orthopaedic and Trauma Surgery, 143(4), 2087-2093.

<https://doi.org/10.1007/s00402-022-04491-5>

Pomianowski, S., O'Driscoll, S. W., Neale, P. G., Park, M. J., Morrey, B. F., & An, K.

N. (2001). The effect of forearm rotation on laxity and stability of the elbow.

Clin Biomech (Bristol, Avon), 16(5), 401-407. <https://doi.org/10.1016/s0268->

[0033\(01\)00021-3](https://doi.org/10.1016/s0268-0033(01)00021-3)

Rafai, M., Largab, A., Cohen, D., & Trafteh, M. (1999). [Pure posterior luxation of the

elbow in adults: immobilization or early mobilization. A randomized

prospective study of 50 cases]. *Chir Main*, 18(4), 272-278. (Luxation

postérieure pure du coude chez l'adulte: immobilisation ou mobilisation

précoce. Etude prospective randomisée sur 50 cas.)

Ramesh, R., Von Arx, O., Azzopardi, T., & Schranz, P. J. (2005). The risk of anterior

cruciate ligament rupture with generalised joint laxity. *J Bone Joint Surg Br*,

87(6), 800-803. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.87b6.15833>

Regan, W., & Lapner, P. C. (2006). Prospective evaluation of two diagnostic

apprehension signs for posterolateral instability of the elbow. *J Shoulder*

Elbow Surg, 15(3), 344-346. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2005.03.009>

Roles, N. C., & Maudsley, R. H. (1972). Radial tunnel syndrome: resistant tennis

elbow as a nerve entrapment. *J Bone Joint Surg Br*, 54(3), 499-508.

Safran, M. R., & Baillargeon, D. (2005). Soft-tissue stabilizers of the elbow. *J*

Shoulder Elbow Surg, 14(1 Suppl S), 179s-185s.

<https://doi.org/10.1016/j.jse.2004.09.032>

Sampath, S. C., Sampath, S. C., & Bredella, M. A. (2013). Magnetic resonance

imaging of the elbow: a structured approach. *Sports Health*, 5(1), 34-49.

<https://doi.org/10.1177/1941738112467941>

- Schnetzke, M., Aytac, S., Studier-Fischer, S., Grützner, P. A., & Guehring, T. (2015). Initial joint stability affects the outcome after conservative treatment of simple elbow dislocations: a retrospective study. *J Orthop Surg Res*, *10*, 128. <https://doi.org/10.1186/s13018-015-0273-x>
- Schreiber, J. J., Warren, R. F., Hotchkiss, R. N., & Daluiski, A. (2013). An online video investigation into the mechanism of elbow dislocation. *J Hand Surg Am*, *38*(3), 488-494. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2012.12.017>
- Schwab, G. H., Bennett, J. B., Woods, G. W., & Tullos, H. S. (1980). Biomechanics of elbow instability: the role of the medial collateral ligament. *Clin Orthop Relat Res*(146), 42-52.
- Stoneback, J. W., Owens, B. D., Sykes, J., Athwal, G. S., Pointer, L., & Wolf, J. M. (2012). Incidence of elbow dislocations in the United States population. *J Bone Joint Surg Am*, *94*(3), 240-245. <https://doi.org/10.2106/jbjs.J.01663>
- Terada, N., Yamada, H., & Toyama, Y. (2004). The appearance of the lateral ulnar collateral ligament on magnetic resonance imaging. *J Shoulder Elbow Surg*, *13*(2), 214-216. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2003.12.013>
- Uri, O., Bampagiannis, K., Higgs, D., Falworth, M., Alexander, S., & Lambert, S. M. (2014). Clinical outcome after reconstruction for sternoclavicular joint instability using a sternocleidomastoid tendon graft. *J Bone Joint Surg Am*, *96*(5), 417-422. <https://doi.org/10.2106/jbjs.M.00681>
- Van Lieshout, E. M. M., Iordens, G. I. T., Polinder, S., Eygendaal, D., Verhofstad, M. H. J., Schep, N. W. L., & Den Hartog, D. (2020). Early mobilization versus plaster immobilization of simple elbow dislocations: a cost analysis of the FuncSiE multicenter randomized clinical trial. *Arch Orthop Trauma Surg*, *140*(7), 877-886. <https://doi.org/10.1007/s00402-019-03309-1>

- van Riet, R. P. (2017). Assessment and decision making in the unstable elbow: management of simple dislocations. *Shoulder Elbow*, 9(2), 136-143.
<https://doi.org/10.1177/1758573216686533>
- van Riet, R. P., Van Glabbeek, F., Neale, P. G., Bortier, H., An, K. N., & O'Driscoll, S. W. (2003). The noncircular shape of the radial head. *J Hand Surg Am*, 28(6), 972-978. [https://doi.org/10.1016/s0363-5023\(03\)00426-x](https://doi.org/10.1016/s0363-5023(03)00426-x)
- Voos, J. E., Livermore, R. W., Feeley, B. T., Altchek, D. W., Williams, R. J., Warren, R. F., Cordasco, F. A., & Allen, A. A. (2010). Prospective evaluation of arthroscopic bankart repairs for anterior instability. *Am J Sports Med*, 38(2), 302-307. <https://doi.org/10.1177/0363546509348049>
- Wadström, J., Kinast, C., & Pfeiffer, K. (1986). Anatomical variations of the semilunar notch in elbow dislocations. *Arch Orthop Trauma Surg* (1978), 105(5), 313-315. <https://doi.org/10.1007/bf00449933>
- Watts, A. C. (2019). Primary Ligament Repair for Acute Elbow Dislocation. *JBJS Essent Surg Tech*, 9(1), e8. <https://doi.org/10.2106/jbjs.St.16.00097>
- Zsidai, B., Piussi, R., Thomeé, R., Sundemo, D., Musahl, V., Samuelsson, K., & Senorski, E. H. (2023). Generalised joint hypermobility leads to increased odds of sustaining a second ACL injury within 12 months of return to sport after ACL reconstruction. *British Journal of Sports Medicine*, 57(15), 972-978.
<https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106183>

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Primäre (außen) und sekundäre Stabilisatoren (innen) des Ellenbogengelenks.....	6
Abbildung 2: Normalbeweglicher Ellenbogen (links) mit physiologischer Extension und symptomfreier und hyperlaxer Ellenbogen (rechts) mit ausgeprägter Hyperextension.	9
Abbildung 3: Intermediär gewichtete MRT-Aufnahme mit Verletzung der Flexoren- (roter Stern) und Extensorensehnen (gelber Stern) nach erfolgter Ellenbogenluxation.	13
Abbildung 4: Operative Technik der Refixation des LCL-Ks und der Extensorensehnen.	15
Abbildung 5: Operative Technik der Refixation des medialen Kollateralbandes und der Flexorensehnen.	16
Abbildung 6: Auswahl von Tests zur klinischen Untersuchung des Ellenbogengelenks mit einem besonderen Fokus auf die Untersuchung einer PLRI.	19
Abbildung 7: Messung der radiokapitellaren Inkongruenz.	25
Abbildung 8: Messung der sagittalen ulnohumeralen Inkongruenz.	26
Abbildung 9: Messung der koronaren ulnohumeralen Inkongruenz.	27
Abbildung 10: Messung der axialen ulnohumeralen Inkongruenz.	28
Abbildung 11: Box-Plots zur Darstellung der radiokapitellaren Inkongruenz (y-Achse, in mm) in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.	31
Abbildung 12: Box-Plots zur Darstellung der ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) in der Sagittalebene in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.	32

Abbildung 13: Box-Plots zur Darstellung der ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) in der Koronarebene in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.	33
Abbildung 14: Box-Plots zur Darstellung der ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) in der Axialebene in Abhängigkeit von der Gelenkposition im Gesamtkollektiv.	34
Abbildung 15: Vergleich der radiokapitellaren Inkongruenz (y-Achse, in mm) zwischen normalen und hyperlaxen Probanden.	35
Abbildung 16: Vergleich der sagittalen ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) bei normalen und hyperlaxen Probanden.	36
Abbildung 17: Vergleich der koronaren ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) bei normalen und hyperlaxen Probanden.	36
Abbildung 19: Darstellung der signifikanten Unterschiede bei der Gelenkinkongruenz (y-Achse, in mm) zwischen normalen und hyperlaxen Probanden.	37
Abbildung 18: Vergleich der axialen ulnohumeralen Inkongruenz (y-Achse, in mm) bei normalen und hyperlaxen Probanden.	37

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Berechnung des Beighton Scores.....	23
Tabelle 2: Interpretation des Intraklassenkorrelationskoeffizienten zur Beurteilung der Intra- und Interrater-Reliabilität.....	29
Tabelle 3: Vergleich der Gelenkinkongruenz bei normalen vs. hyperlaxen Probanden in Abhängigkeit von der Gelenkposition.....	38

11 Danksagung

„Es braucht ein Dorf, um ein Kind großzuziehen.“. Zahlreiche Personen haben mich beim Abschluss meiner Dissertation begleitet und unterstützt. An dieser Stelle möchte ich mich dafür bedanken.

Zunächst danke ich Herrn Prof. Dr. med. Sebastian Siebenlist für die Möglichkeit der Durchführung der vorliegenden Dissertation und für seine kontinuierliche Unterstützung bei der Dissertation und außerhalb.

Herrn Univ.-Prof. Andreas B. Imhoff danke ich für sein Vertrauen in mich und für das stetige Mentoring, das auch nach seiner klinischen Tätigkeit in München noch weiter erfolgt.

Herrn PD Dr. Benedikt Schwaiger und Herrn PD Dr. Jan Neumann danke ich für die radiologische Betreuung und Beratung des vorliegenden Projekts.

Frau PD Dr. Stephanie Geyer und Herrn Pavel Kadantsev möchte ich für ihre großartige Unterstützung bei der Fertigstellung der vorliegenden Dissertation danken.

Ein besonderer Dank gebührt Herrn PD Dr. med. Arne Buchholz für die Betreuung meiner Dissertation.

Auch den teilnehmenden Probanden und allen Kollegen und Kolleginnen der Sektion Sportorthopädie der Technischen Universität München möchte ich danken.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei meiner Familie und dabei insbesondere meinen Eltern, Großeltern und Dr. med. Sören Rudolph dafür bedanken, dass Sie mir meine Ausbildung ermöglicht und stets den Rücken freigehalten haben. Von ganzem Herzen möchte ich mich auch bei meiner Ehefrau Lotus Hinz bedanken, die mich stets motiviert und moralisch unterstützt hat.