

Aus der Klinik für Unfall- und Handchirurgie

der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Die Beweglichkeit des Handgelenkes während des Führens eines Kraftfahrzeuges

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Sabrina Pfau

2019

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

gez.:

Dekan: Prof. Dr. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. Sebastian Gehrman

Zweitgutachter: PD Dr. med. Christoph Schleich M. Sc.

Meiner Familie gewidmet

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Latz, D., Pfau, S., Koukos, C., Jungbluth, P., Jansing G., Schiffner, E., Seiler, L., Windolf., J., Gehrman, S.. Doctor, when can I drive – Die Beweglichkeit des Handgelenks beim Autofahren, Obere Extremität, Dezember 2017, Volume 12, Issue 4, Seiten 234-241

Zusammenfassung

Die Beweglichkeit des Handgelenkes während des Führens eines Kraftfahrzeuges

Einleitung und Ziel der Arbeit:

Verletzungen und insbesondere Frakturen der oberen Extremität gehören zu den häufigsten Erkrankungen des Menschen. Daraus können Bewegungseinschränkungen, insbesondere im Bereich des Handgelenkes resultieren, welche sich auf die Fahrsicherheit von Patienten auswirken. Da für das Führen eines Kraftfahrzeuges eine bisher nicht hinreichend charakterisierte Gelenkbeweglichkeit notwendig ist, ist eine Beurteilung bezüglich der Fahrtauglichkeit von Patienten bisher nicht möglich. Ziel der Arbeit ist es, das Bewegungsausmaß des gesunden Handgelenkes während des Führens eines Kraftfahrzeuges zu ermitteln.

Material und Methodik:

An 20 gesunden Probanden wurde eine Bewegungsanalyse mittels Elektrogoniometern durchgeführt. Hierbei wurde das maximale Bewegungsausmaß der einzelnen Hauptbewegungsachsen während der Zirkumduktion des Handgelenkes ermittelt und mit dem erreichten Bewegungsausmaß des Handgelenkes während des Führens eines Kraftfahrzeuges verglichen. Hierzu wurden die Fläche des Bewegungsraumes und das Bewegungsmuster während der Fahrt analysiert.

Ergebnis:

Eine einfaktorielle ANOVA ergab im Vergleich der Daten aller Bewegungsrichtungen gegenüber der Fläche des Bewegungsraumes eine signifikant kleinere Fläche des Bewegungsraumes während der Fahrt (Zirkumduktion vs. Fahrt: $13013,83 \pm 3426,11$ vs. $9378,28 \pm 1865,49$ Quadratgrad).

Schlussfolgerung:

Während des Führen eines Kraftfahrzeuges wird das maximale aktive Bewegungsausmaß vollständig genutzt, es ist aber davon auszugehen, dass nicht alle möglichen Bewegungsrichtungen genutzt werden. Zusätzlich gibt es Hinweise, dass bestimmte Handgelenkpositionen regelmäßiger und auch über das aktive Bewegungsausmaß hinaus zu finden sind.

Summary

Verifying the mobility of the wrist while driving a motor vehicle

Introduction and objective:

One of the most common diseases of the humans are injuries to the upper limb. Restrictions of motion, especially to the wrist can have effects on the safety to drive. The needed mobility of the wrist while driving a motor vehicle is not yet identified, so actually it is not possible to evaluate the capability to drive. The purpose is to analyze wrist motion while driving a car.

Material and methods:

A multidirectional motion analysis of the wrist was performed by 20 healthy participants. An electrogoniometer system was used to measure continuous wrist angles. Prior to the driving experiment, maximum circumduction of the wrists defined the maximum range of motion and were then compared to wrist motion while driving a motor vehicle. All data of the movement directions and the area of range of movement were evaluated in addition with two statistical tests (ANOVA, Kolmogorov-Smirnov-test).

Results:

In comparison it is shown that a significant smaller area while driving a motor vehicle than while the circumduction is used (area enclosed by the circumduction motion vs. the area of the convex hull during driving: $13013,83 \pm 3426,11$ vs. $9378,28 \pm 1865,49$ square degrees). In addition to this it is shown that the maximal range of movement is used while the dorsal extension of the wrist ($-67,99 \pm 11,84$ degrees).

Conclusion:

While driving a motor vehicle, participants used nearly all possible wrist motion, but we assume, that not all of these wrist positions are necessary for the safety to drive. Some positions of the wrist are used more frequently than other.

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeine Deutsche Automobil-Club, S. 22
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen, S. 14
BGH	Bundesgerichtshof, S. 13
DTM	dart throwing motion, S. 28
EX	Extension, S. 31
FE	Flexion/Extension, S. 28
FL	Flexion, S. 31
I/O-Interface	Input/Output-Interface, S. 16
RAB	Radialabduktion, S. 31
ROM	range of motion, S. 28
RUD	Radial-/Ulnarabduktion, S. 28
StGB	Strafgesetzbuch, S. 13
UAB	Ulnarabduktion, S. 31
UK	United Kingdom, S. 16

Abbildungsverzeichnis

Die Rechte der folgenden Abbildungen liegen beim Autor.

Abb. 1: Verminderte Fahrtauglichkeit durch Ruhigstellung der Hand- und Fingergelenke.....	2
Abb. 2: Schematische Darstellung eines Elektrogoniometers vom Typ Twin Axis SG 65 der Firma Biometrics Ltd.....	3
Abb. 3: Schematische Darstellung eines Datenerfassungsgerätes vom Typ DataLOG MWX8 der Fa. Biometrics Ltd.....	4
Abb. 4: Schematische Darstellung der Analysesoftware.....	5
Abb. 5: Benutzeroberfläche (graphical user interface, gui) des MatLab [®] -Programms.....	6
Abb. 6: Elektrogoniometer am Probanden von lateral und oben.....	8
Abb. 7: Bewegungen des Handgelenks	8
Abb. 8: Schematische Darstellung der 280m langen serpentinartigen Teststrecke.....	9
Abb. 9: Skizze der Bewegungskurve während der Zirkumduktion	14
Abb. 10: Bewegungsfläche bei der Fahrt von Proband O	16
Abb. 11: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband A.....	17
Abb. 12: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Radiant) von Proband A.....	17
Abb. 13: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband B.....	18
Abb. 14: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband B.....	18
Abb. 15: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband C.....	19
Abb. 16: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband C.....	19
Abb. 17: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband D.....	20
Abb. 18: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband D.....	20
Abb. 19: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband E.....	21
Abb. 20: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband E.....	21
Abb. 21: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband F.....	22
Abb. 22: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband F.....	22
Abb. 23: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband H.....	23
Abb. 24: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband H.....	23
Abb. 25: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband I.....	24
Abb. 26: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband I.....	24
Abb. 27: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband J.....	25
Abb. 28: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband J.....	25
Abb. 29: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband K.....	26
Abb. 30: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband K.....	26
Abb. 31: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband L.....	27
Abb. 32: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband L.....	27
Abb. 33: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband N.....	28
Abb. 34: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband N.....	28
Abb. 35: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband O.....	29
Abb. 36: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband O.....	29

Abb. 37: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband P.....	30
Abb. 38: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband P.....	30
Abb. 39: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband Q.....	31
Abb. 40: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband Q.....	31
Abb. 41: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband S.....	32
Abb. 42: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband S.....	32
Abb. 43: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband T.....	33
Abb. 44: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband T.....	33

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Summary	II
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Inhaltsverzeichnis.....	VI
1 Einleitung.....	1
1.2 Ziele der Arbeit	2
2 Material und Methoden.....	3
2.1 Ethikkommission.....	3
2.2 Bewegungsanalysesystem	3
2.3 Analysesoftware	4
2.4 MatLab [®] -Programm	5
2.5 Fragebogen	6
2.6 Ausschlusskriterien.....	6
2.7 Probandenkollektiv	7
2.8 Versuchsdurchführung.....	7
2.9 Fehleranalyse	10
3 Ergebnisse	11
3.1 Mittelwerte und Standardabweichung aller Bewegungsrichtungen bei der Zirkumduktion und bei der Fahrt.....	11
3.2 Mittelwerte und Standardabweichung der Fläche des Bewegungsraumes bei der Zirkumduktion und bei der Fahrt.....	12
3.3 Statistische Auswertung	13
3.3.1 Statistische Auswertung der Daten aller Bewegungsrichtungen.....	13
3.3.2 Statistische Auswertung der Daten der Fläche des Bewegungsraumes ..	13
3.4 Die Bewegungskurven während der Zirkumduktion	13
3.5 Die Bewegungskurve während der Fahrt	14
3.6 Abweichungen der Hypothese aufgeteilt nach Bewegungsrichtungen.....	14
3.7 Übersicht aller Bewegungsrichtungen und Bewegungsgraphen aller Probanden im Einzelnen	16
3.7.1 Proband A	17
3.7.2 Proband B	18

3.7.3 Proband C	19
3.7.4 Proband D	20
3.7.5 Proband E	21
3.7.6 Proband F	22
3.7.7 Proband H	23
3.7.8 Proband I	24
3.7.9 Proband J	25
3.7.10 Proband K	26
3.7.11 Proband L	27
3.7.12 Proband N	28
3.7.13 Proband O	29
3.7.14 Proband P	30
3.7.15 Proband Q	31
3.7.16 Proband S	32
3.7.17 Proband T	33
4. Diskussion	34
4.1 Bisherige Analysen des Ausmaßes der Handgelenksbeweglichkeit	34
4.2 Das Elektrogoniometer zur Messung von Bewegungsausmaßen	35
4.3 Alternative Bewegungsanalysesysteme	36
4.4 Analyse des Bewegungsausmaß	37
4.5 Analyse der Fläche des Bewegungsraumes	38
4.6 Limitation der Studie	38
4.7 Bisherige Fahrexperimente	39
4.8 Ausblick	40
Literaturverzeichnis	42
Danksagung	47

1 Einleitung

Verletzungen im Bereich der oberen Extremitäten gehören zu den häufigsten des Menschen. Hierbei sind gerade jüngere Patienten betroffen, die beim Führen eines Kfz auf eine unbeeinträchtigte Handgelenkfunktion angewiesen sind. Die distale Radiusfraktur nach Stürzen z.B. steht dabei an erster Stelle der Verletzungen, die die Handgelenkfunktion massiv stören (Koo, Tan et al. 2013) mit einer sehr hohen Inzidenz von bis zu 751 auf 100.000 Fällen (Diamantopoulos, Rohde et al. 2012). Aber auch für ältere Menschen sind Einschränkungen der Handgelenkbeweglichkeit und die daraus resultierenden Funktionseinbußen ein Grund für den Verlust der Fahrtauglichkeit. Dies hat für Patienten mit Handgelenkerkrankungen gravierende sozioökonomische Folgen (Rod Fleury, Favrat et al. 2012).

Regelhaft wird der Arzt mit der Fragestellung konfrontiert, ob und bis wann eine verletzungsbedingte Fahruntauglichkeit vorliegt. Der Verantwortungsbereich liegt zwar in der Regel beim Kraftfahrzeugführer, jedoch sind behandelnde Ärzte verpflichtet, bei offensichtlichem Verlust der Fahrtauglichkeit den Patienten hierüber zu informieren (Urteil des BGH, 08.04.2003, Az.: VI ZR 265/02, NJW 2003, 2309). In §315c Abs. 1 des StGB, welches sich mit der Gefährdung des Straßenverkehrs beschäftigt, ist beschrieben, dass Freiheitsstrafen von bis zu fünf Jahren oder Geldstrafen an diejenigen Personen verhängen werden, welche unter anderem aufgrund körperlicher oder geistiger Mängel nicht in der Lage sind ein Kfz sicher zu führen (Strafgesetzbuch).

Bisher existieren aber keine Studien, ob nach chirurgischen Eingriffen, Frakturen oder anderen immobilisierenden Erkrankungen an den Handgelenken das Führen eines Kfz möglich ist. Es ist den behandelnden Ärzten kaum möglich, verlässliche Aussagen bezüglich der Fahrtauglichkeit des Patienten auch bei höhergradigen Bewegungseinschränkungen zu treffen. Vor allem fehlen Angaben in Bezug auf das dafür notwendige Bewegungsausmaß zur Fahrzeugsteuerung. Bei anderen Aktivitäten des täglichen Lebens wurden bereits biomechanische Untersuchungen über das notwendige Bewegungsausmaß des Handgelenks durchgeführt (Palmer, Werner et al. 1985, Safaee-Rad, Shwedyk et al. 1990).

Durch diese Unklarheiten kommt es häufig dazu, dass Fahrer trotz Gipsverbänden am Straßenverkehr teilnehmen und somit eine Gefahr für diesen darstellen (Kalamaras, Rando et al. 2006)(Von Arx, Langdown et al. 2004).

Versicherungen berufen sich auf die Entscheidung des behandelnden Arztes, ob eine Fahrtauglichkeit besteht (Von Arx, Langdown et al. 2004, Gandhi, Freitas et al. 2014).

Regelmäßig werden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahreignung herausgegeben, welche dem Begutachter als einheitliches Hilfsmittel dienen sollen (Straßenwesen 2014). Diese befassen sich neben internistischen, neurologischen und psychiatrischen Grunderkrankungen jedoch noch nicht mit Bewegungseinschränkungen, welche zum Ausschluss der Fahrtauglichkeit führen können. So bezeichnet die Fahrsicherheit die situationsbezogene- und zeitbezogene Fähigkeit zum Führen eines Fahrzeugs. Dagegen abzugrenzen ist die Definition der Fahreignung. Diese besagt, dass unter anderem diejenigen Personen geeignet sind ein Kfz zu führen, die die notwendigen geistigen und körperlichen Anforderungen erfüllen (Madea 2012). Eine detaillierte Beschreibung, vor allem der körperlichen der Anforderungen, ist nicht vorhanden, so dass letztlich unklar bleibt, welche körperlichen Eigenschaften zum Führen eines Kraftfahrzeugs eigentlich erfüllt sein müssen. Exakte Angaben über das notwendige Bewegungsausmaß verschiedener Gelenke, welches zum Fahren eines Kfz notwendig ist, sind nicht aufgeführt.

1.2 Ziele der Arbeit

Ziel dieser experimentellen Studie ist es, durch Messung der Beweglichkeit des Handgelenks das Bewegungsausmaß zu erhalten, welches zum Führen eines PKW verwendet wird. Dadurch könnte eine experimentelle Basis für Empfehlungen über die Fahrtauglichkeit bzgl. der Handgelenkbeweglichkeit entstehen.



Abb. 1: Verminderte Fahrtauglichkeit durch Ruhigstellung der Hand- und Fingergelenke.

2 Material und Methoden

2.1 Ethikkommission

Durch die Ethikkommission der medizinischen Fakultät der Heinrich Heine Universität Düsseldorf wurde die Studie mit der Studiennummer 3362 geprüft.

2.2 Bewegungsanalysesystem

Zur Messung der Handgelenkbeweglichkeit wurden biaxiale Elektrogoniometer eines Bewegungsanalysesystems der Firma Biometrics Ltd. UK verwendet. Dieses ist dafür konzipiert, kontinuierliche Winkelmessungen in beiden Hauptachsen (Extension/Flexion, Radial-/Ulnarabduktion) hochpräzise durchzuführen. Die Rohdaten der Winkelmessung wurden über ein I/O-Interface an einen Computer weitergeleitet, an dem die dazu passende Software die Signale des Messgerätes in Winkelgrade umwandelte. Das verwendete Elektrogoniometer gehört zur Serie Twin Axis Goniometer vom Typ SG 65.

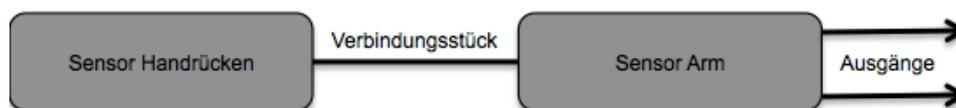


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Elektrogoniometers vom Typ Twin Axis SG 65 der Firma Biometrics Ltd.

Dadurch, dass es über zwei separate Ausgänge verfügt ist es in der Lage sowohl die Flexion und Extension, als auch die Radial- und Ulnarabduktion gleichzeitig zu messen. Der Hersteller garantiert hier eine Messgenauigkeit von $\pm 2^\circ$ bei einem Bewegungsumfang von $\pm 90^\circ$. Das Gerät besteht aus zwei leichten Sensorteilen, einem Verbindungsstück und zwei Signalausgängen. Der vordere Sensorteil, welcher am Arm platziert wird, misst 55×18 mm, der Sensor, der am Handrücken platziert wird, misst 54×20 mm. Das Kabel welches die beiden Sensoren miteinander verbindet misst in Neutralstellung 30 mm und kann bis auf 65 mm gedehnt werden. Das Gewicht des gesamten Elektrogoniometers beträgt 22 g. Die Dimensionen des gesamten Messgerätes wurden vom Hersteller denen des menschlichen Handgelenks angepasst, so dass eine uneingeschränkte Handgelenkbeweglichkeit ermöglicht wird. Die an die Ausgänge angeschlossenen Kabel hatten eine Länge von

1m, um genügend Bewegungsspielraum zu gewährleisten. Zwischen einer Außentemperatur von 10°C und 40 °C wird vom Hersteller die optimale Messsicherheit gewährleistet. Verändert sich die Temperatur kann es zu einer Messungenauigkeit von 0,15 Winkelgrad pro Grad Celsius kommen. Der angegebene Temperaturbereich wurde bei den Experimenten zu keiner Zeit verlassen. Die beiden Ausgänge der Elektrogoniometer wurden mit einem I/O-Interface vom Typ DataLOG MWX8 verbunden.

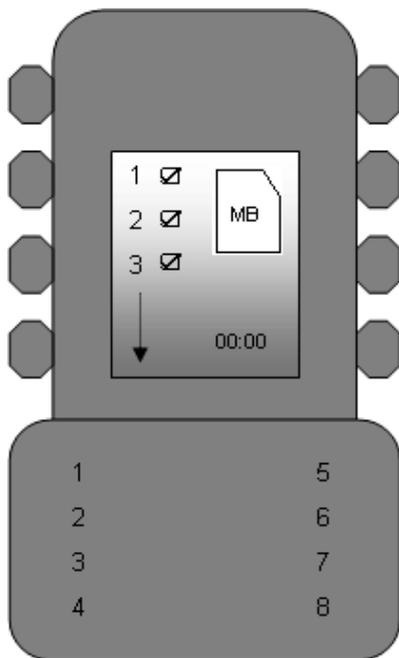


Abb. 3: Schematische Darstellung eines Datenerfassungsgerätes vom Typ DataLOG MWX8 der Fa. Biometrics Ltd.

Dieses Gerät wiegt 129g und ist 104 × 62 × 22 mm groß. Es ist batteriebetrieben und verfügt über acht analoge Kanäle an die verschiedene Goniometer angeschlossen werden können. Außerdem beinhaltet es einen *Bluetooth*-Adapter, welcher die kabellose Übertragung an das mobile Computersystem ermöglicht. Durch die kabellose Bauweise können Handgelenke untersucht werden, ohne dass Kabel störend auf die Fahrer einwirken.

2.3 Analysesoftware

Die Analyse-Software Datalog (Biometrics, Ltd.) ist dafür konzipiert, die gemessenen Winkeldaten linear zur Zeitachse darzustellen. Zum einen speichert die Software die gemessenen Höchst-, Mindestwerte und bietet eine tabellarische Übersicht. Zum anderen werden die gemessenen Werte in einem Koordinatensystem aufgetragen, wobei die X-Achse die Zeit abbildet, die Y-Achse den gemessenen Winkel. Dies

ermöglicht eine einfache grafische Darstellung, ist jedoch an sich für eine Auswertung der Daten nicht geeignet. Die weitere Bearbeitung der Daten wurde dann durch das speziell konzipierte Computerprogramm in der Programmumgebung MatLab[®], welches in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Mathematik entwickelt wurde, vorgenommen.

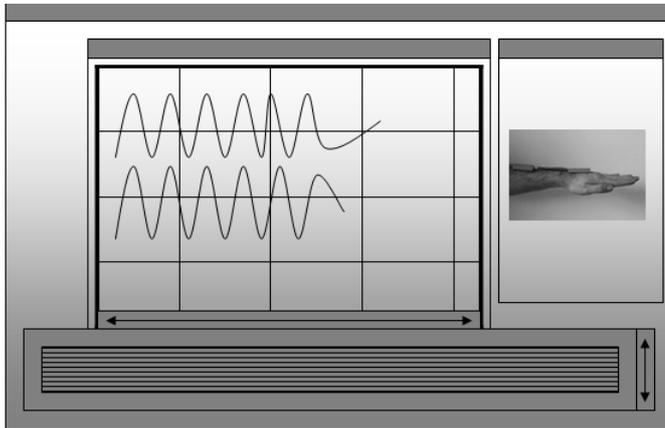


Abb. 4: Schematische Darstellung der Analysesoftware.

2.4 MatLab[®]-Programm

MatLab[®] ist eine universelle Programmierumgebung, die es ermöglicht skriptartige Programmcodes z.B. zur Datenerfassung und -weiterverarbeitung zu erzeugen. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Mathematik der Universität Düsseldorf wurde speziell für diese Studie ein MatLab[®]-Programm entwickelt, das ermöglicht, die Analyse der zuvor gespeicherten Winkeldaten auszuwerten und graphisch darzustellen. Damit können aus den berechneten Winkeldaten sogenannte Bewegungshüllen erstellt werden, welche weitere Berechnungen erlauben. Die Bewegungs- bzw. Zirkumduktionshüllen beinhalten eine Fläche, welche den gemessenen Daten entspricht. Die Bewegungs- bzw. Zirkumduktionshüllen setzen sich aus den gemessenen Winkelgraden, welche während der Bewegung entstehen, zusammen. Aus den Punktwolken wird die äußere Hülle mit Hilfe eines speziellen Algorithmus berechnet, der im hiesigen Institut für Angewandte Mathematik unter Leitung von Professor Schaedle entwickelt wurde. Auf der Ordinate und der Abszisse sind die vier Hauptbewegungsrichtungen aufgetragen. Zusätzlich ist die Hauptbewegungsachse, die sogenannte *dart-throwing-motion*-Achse dargestellt. Entlang dieser Achse findet der überwiegende Teil der Bewegungen statt (Moritomo, Apergis et al. 2007). Schließlich wurden farbgestützte Grafiken in 2D und 3D

programmiert, welche so die Analyse der meist verwendeten Bewegungsbereiche darstellt.

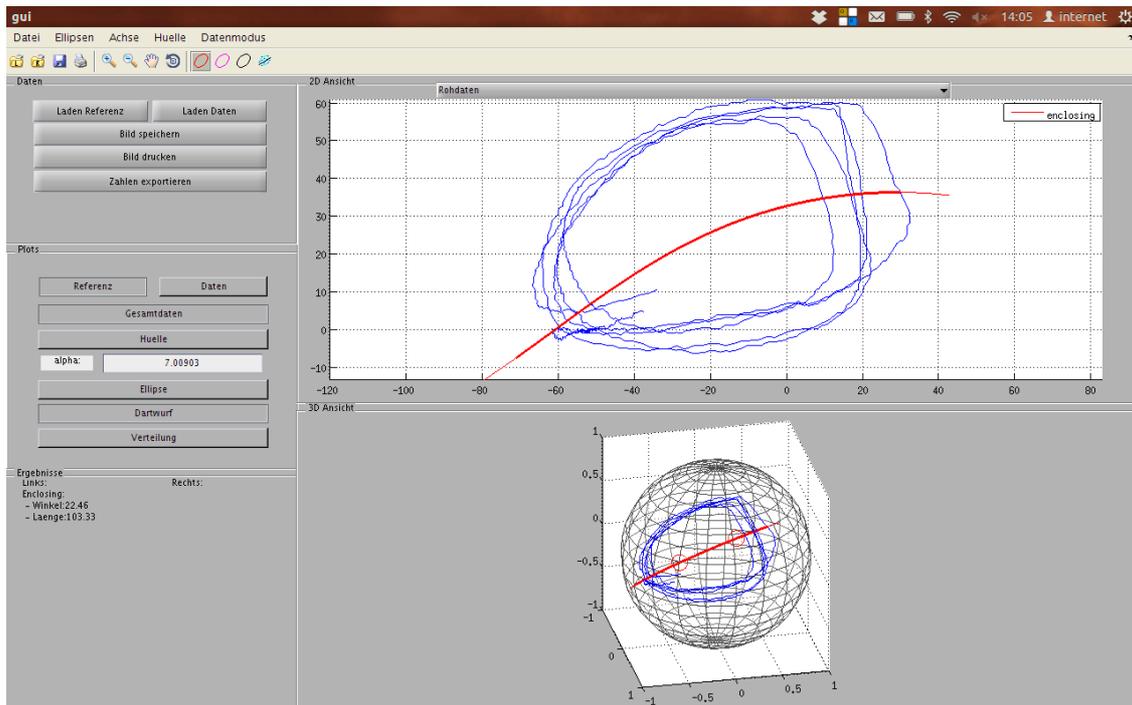


Abb. 5: Benutzeroberfläche (graphical user interface, gui) des MatLab[®]-Programms. Die entstandenen Daten können in der Benutzeroberfläche zur besseren Visualisierung weiter graphisch verarbeitet werden.

2.5 Fragebogen

Zunächst wurden die Probanden aufgefordert vor jeder Testfahrt einen standardisierten Fragebogen auszufüllen. Damit wurde die körperliche Gesundheit der Probanden überprüft und etwaige Ausschlusskriterien erkannt. Außerdem wurde eine schriftliche Einwilligungserklärung ausgehändigt. Die Probanden bestätigten mit ihrer Unterschrift, dass sie über den Inhalt und Ablauf der geplanten Versuche aufgeklärt wurden und diesen verstanden haben. Außerdem wurde das Alter, die Körperlänge und das Körpergewicht erfragt und ob es sich bei dem Probanden um einen Rechts- oder Linkshänder handelte.

2.6 Ausschlusskriterien

Damit eine Verfälschung der Messwerte verhindert werden konnte, wurden verschiedene Ausschlusskriterien definiert. Im Rahmen dessen ist natürlich als erstes Kriterium das Nichtvorhandensein eines Führerscheins der Führerscheinklasse B und eines eigenen Fahrzeugs zu nennen. Dies beinhaltet somit auch die Minderjährigkeit. Um eine gewisse Fahrroutine gewährleisten zu

können wurden Probanden mit einer Fahrleistung von unter 5000km pro Jahr ebenfalls ausgeschlossen. Muskuloskelettale oder systemische Erkrankungen, vor allem der oberen Extremität, die mit Schmerzen oder Bewegungseinschränkungen der Arme einhergehen, zum Beispiel eine Gichtarthropathie, rheumatoide Arthritiden, Handgelenksarthrosen, sowie Erkrankungen des zentralen oder peripheren Nervensystems führten ebenfalls zum Ausschluss aus der Studie. Des Weiteren waren Schwangerschaft und eine fehlende Einwilligungsfähigkeit, zum Beispiel durch psychiatrische Erkrankungen oder chronischen Drogen- oder Alkoholabusus weitere Ausschlusskriterien. Akute Erkrankungen oder Grunderkrankungen mit erheblicher Funktionseinschränkung vor allem der oberen Extremität führten ebenso zum Ausschluss, ebenso wie das Vorhandensein von Gipsschienen oder Verbänden.

2.7 Probandenkollektiv

n	20	Tab. 1: Nach Prüfung der oben genannten Ein- bzw. Ausschlusskriterien mittels eines standardisierten Fragebogens ergab sich das oben dargestellte Probandenkollektiv, welches als Grundlage dieser klinischen Studie diente.
Geschlecht	Weiblich 7 Männlich 13	
Alter	26,8 ± 3,1 Lebensjahre (19-33 LJ.)	

2.8 Versuchsdurchführung

Nun wurde das Goniometer an den rechten Unterarm des Probanden angelegt und fixiert. Dabei lag der vordere Sensor dorsal über dem tastbaren Os metacarpale III. Der hintere Sensor mit seinen beiden Ausgängen und das Verbindungsstück wurden entlang einer geraden Linie geführt und am Unterarm fixiert.

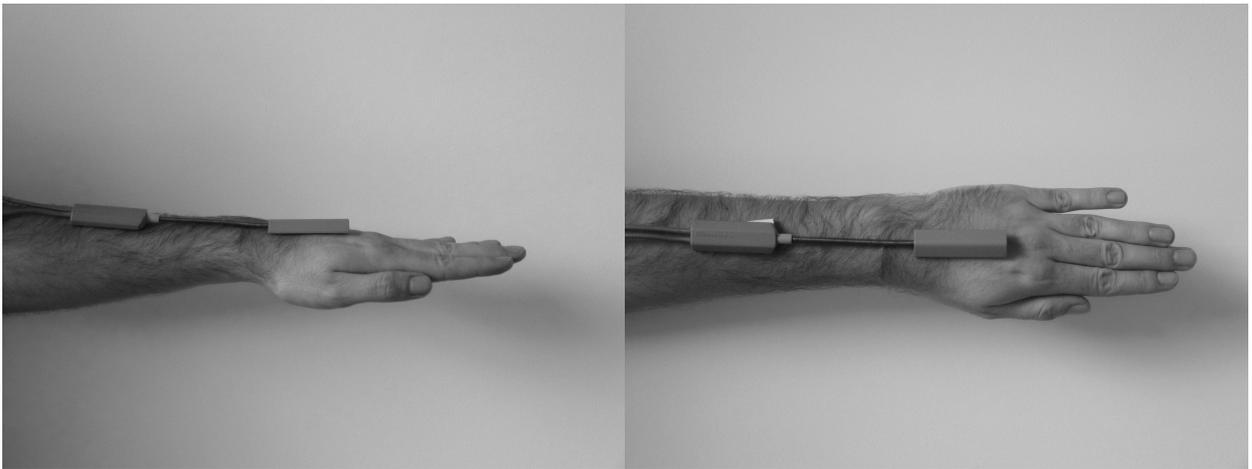


Abb. 6: Elektrogoniometer am Probanden von lateral und oben.

Es wurde stets darauf geachtet, dass sowohl die Sensoren als auch das Verbindungsstück nicht unter Spannung standen. Nach Anlage des Goniometers wurden die Probanden zunächst gebeten mindestens fünf Zirkumduktionsbewegungen mit dem Handgelenk durchzuführen und dabei ihr maximal mögliches Bewegungsausmaß zu erreichen.

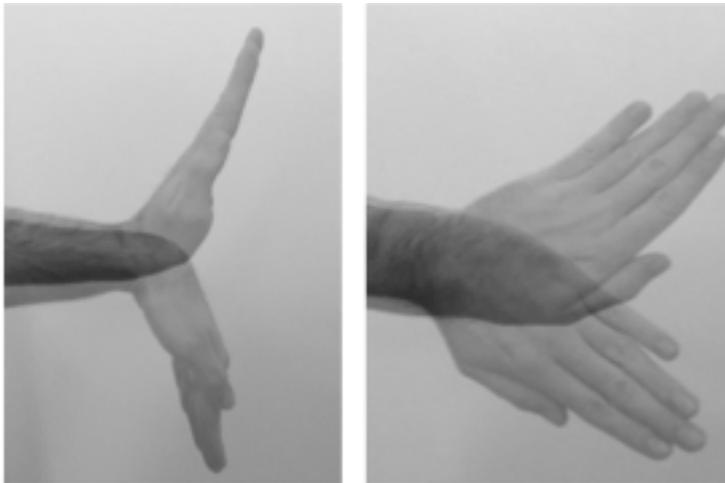


Abb. 7: Bewegungen des Handgelenks: Extension und Flexion (links) und Radial- und Ulnarabduktion (rechts).

Diese Zirkumduktionsbewegungen fanden sowohl mit als auch gegen den Uhrzeigersinn statt. Zum einen wurde darauf geachtet, dass die Probanden ihr maximal mögliches Bewegungsausmaß erreichen. Zum anderen lag ein besonderes Augenmerk darauf, dass sich der Unterarm gegenüber dem Handgelenk in fixierter Position befand und die Bewegungen langsam und ausschließlich mit dem

Handgelenk durchgeführt wurden. Im Anschluss an die Zirkumduktionsbewegungen wurde der Proband gebeten, sich in seinem eigenen Kfz zu platzieren. Damit eine einheitliche und korrekte Sitzposition gewährleistet werden konnte, wurde diese bei jedem Probanden sorgfältig überprüft. Empfehlungen für eine korrekte Sitzposition werden vom ADAC herausgegeben. Abweichung von dieser standardisierten Sitzposition wurde dann vor der Testfahrt korrigiert (ADAC 2015). Dann erfolgte die Messung der Beweglichkeit des Handgelenkes beim Führen eines Kfz. Dafür wurde der Proband dann aufgefordert eine definierte Strecke mehrfach zu befahren. Die Fahrtgeschwindigkeit war stets gering, so dass 20km/h nicht überschritten wurden. Die Teststrecke beinhaltet mehrere Komponenten. Sie besteht aus mehreren Geraden, sowie Rechts- und Linkskurven von 180°, damit das maximale Bewegungsausmaß ermittelt werden kann. Nach dem Startpunkt befahren die Probanden zunächst eine Gerade von 50m, um anschließend Serpentinaugen mit Links- und Rechtskurven von 180° zu befahren mit dazwischenliegenden Geraden von 50 m zu befahren (siehe Abb. 8). Diese Abfolge von Serpentinaugen wurde während der Testfahrt zweimal wiederholt.

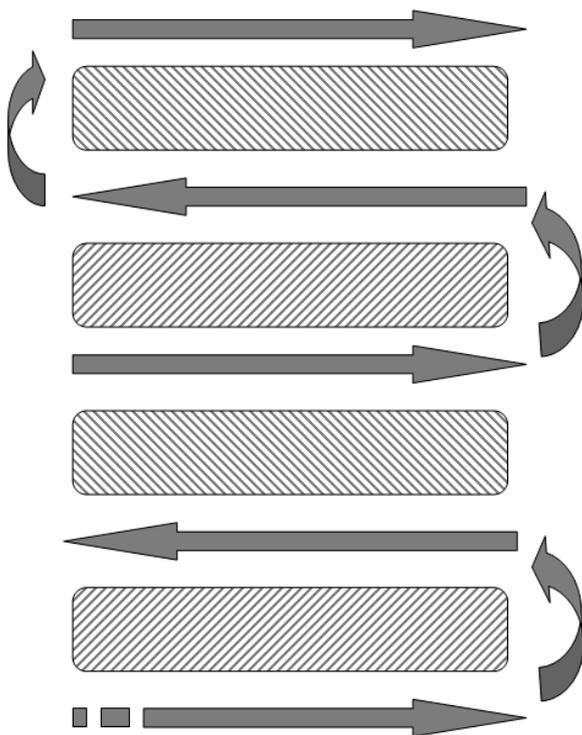


Abb. 8: Schematische Darstellung der 280m langen serpentinaugenartigen Teststrecke.

Während der gesamten Fahrt wurden kontinuierlich Bewegungsdaten des Handgelenks aufgezeichnet und an ein mobiles Computersystem übertragen. Im Anschluss wurden die Messdaten mit Hilfe der beschriebenen Analyseprogramme, sowie der Programme Excel ® und SPSS25 ® statistisch ausgewertet. Zum einen wurden die Mittelwerte und die Standardabweichung der Hauptbewegungsachsen (Extension/Flexion, Radial-/Ulnarabduktion) bestimmt. Zum anderen wurde aus den Einzelwerten, welche bei der Bewegung entstehen, eine sogenannte Fläche des Bewegungsraumes erstellt.

Mit Hilfe des Kolmogorov-Amirnov-Anpassungstests wurde überprüft, ob eine Normalverteilung vorliegt. Ergänzend wurden die Daten, welche bei der Zirkumduktion und bei der Fahrt entstanden, mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) auf systematische Unterschiede untersucht.

2.9 Fehleranalyse

Auf jedem der oben genannten Bearbeitungsschritte der Rohdaten, einschließlich der Gewinnung der Rohdaten und Aufnahme der Daten konnten Fehler auftreten.

Bevor die Datensätze in die Ergebnisauswertung mit einbezogen werden konnten, wurden diese anhand verschiedener Gesichtspunkte überprüft, um Fehler in der späteren Datenanalyse zu vermeiden. Durch mangelhafte Fixation der Sensoren, zum Beispiel bei unvollständiger Befestigung an Hand oder Unterarm, wurden nicht plausible Winkel gemessen. Dies wurde während der Fahrt kontinuierlich visuell überprüft und bei Sensorablösung das Experiment unterbrochen. Eine weitere Fehlerquelle war das Anschlagen und sogar Abreißen der Sensoren am Lenkkranz. Nur die Datensätze, bei denen die vollständige Fixation der Messsensoren gewährleistet war, ergaben plausible Werte und wurden dementsprechend mit in die Weiterverarbeitung einbezogen. Ein weiterer Grund zur erneuten Datenaufnahme war der fehlerhafte Zeitpunkt zu Beginn der Datenaufnahme. Dies war zum einen ein verzögerter Beginn der Datenaufzeichnung mit Aufnahme eines unvollständigen Datensatzes. Zum anderen kam es zu Fehlern bei einem verfrühten Beginn der Aufzeichnung der Daten oder einem vorzeitigen Abbruch der Aufnahme. Diese Daten wurden verworfen. Des Weiteren führte eine fehlerhafte Kalibrierung der Goniometer zu inkorrekten Nullpunkten. Aufgrund defekter Goniometer mussten fehlerhafte Datensätze von drei Probanden aus der weiteren Analyse ausgeschlossen werden.

3 Ergebnisse

Das Ziel der Studie war es, das von gesunden Probanden verwendete Bewegungsausmaß des Handgelenkes zu ermitteln, welches zum Führen eines Kfz notwendig ist. Dafür musste zunächst identifiziert werden welche Bewegungen des Handgelenkes beim Führen eines Kfz ausgeführt wurden. Anhand dieser Bewegungsumfänge ergab sich dann ein maximaler Bewegungsraum im Bereich der Flexion und der Extension sowie der Radial- und Ulnarabduktion. Eine der Arbeitshypothesen war, dass das Bewegungsausmaß des rechten Handgelenkes beim Führen eines Kfz geringer ist als das maximal erreichte Bewegungsausmaß.

3.1 Mittelwerte und Standardabweichung aller Bewegungsrichtungen bei der Zirkumduktion und bei der Fahrt

Es wurden bei 20 Probanden die Mittelwerte und Standardabweichungen bei der Zirkumduktion, also maximal erreichter aktiver Beweglichkeit des rechten Handgelenkes und bei Fahrt im Kfz gemessen. In Tab. 2 sind die Mittelwerte und Standardabweichung der gemessenen Winkel in den verschiedenen Bewegungsrichtungen dargestellt.

Bewegungsrichtungen	Mittelwerte ± Standardabweichung (in Grad) bei der Zirkumduktion	Mittelwerte ± Standardabweichung (in Grad) bei der Fahrt
Extension	-67,99 ± 11,84	-72,98 ± 16,09
Flexion	56,01 ± 17,46	46,58 ± 12,32
Radialabduktion	-27,45 ± 10,08	-22,58 ± 9,67
Ulnarabduktion	46,61 ± 10,00	48,82 ± 12,94

Tab. 2: Mittelwerte und Standardabweichung aller Bewegungsrichtungen bei der Zirkumduktion und der Fahrt.

Bei der Zirkumduktion zeigt sich im Bereich der Radial- und Ulnarabduktion mit $46,61 \pm 10,00$ Grad bei der Ulnarabduktion das größte erreichte Bewegungsausmaß.

Im Bereich der Extension- und Flexionsbewegung wird bei der Extension das größte Bewegungsausmaß mit $-67,99 \pm 11,84$ Grad erreicht.

Auch bei der Fahrt erkennt man, dass das größte Bewegungsausmaß bei der Radial- und Ulnarabduktion bei Ulnarabduktion mit $48,82 \pm 12,94$ Grad und bei der Extensions-/Flexionsbewegung im Bereich der Extension mit $-72,98 \pm 16,09$ Grad liegt.

Vergleicht man die Mittelwerte beider Tabellen, ist zu erkennen, dass keine pauschalen Aussagen möglich sind: Die gemessenen Werte während der Zirkumduktion sind nicht insgesamt alle kleiner oder größer als die gemessenen Werte bei der Fahrt. Das maximale Bewegungsausmaß wurde bei der Extensionsbewegung sowohl während der Zirkumduktion, als auch bei der Fahrt erreicht, das minimale während der Radialabduktion.

3.2 Mittelwerte und Standardabweichung der Fläche des Bewegungsraumes bei der Zirkumduktion und bei der Fahrt

Ergänzend ist hier die Fläche des Bewegungsraumes aufgeführt. Sie entsteht aus den einzelnen Werten aller Bewegungsrichtungen und wird automatisch aus der berechneten Zirkumduktionshülle bei aktiver Handgelenkzirkumduktion und der Hülle bei Fahrt gewonnen. Hier zeigt sich, dass die Fläche des Bewegungsraumes während der Zirkumduktion deutlich größer ist als während der Fahrt (Tab. 3).

	Mittelwerte \pm Standardabweichung (in Quadratgrad) bei der Zirkumduktion	Mittelwerte \pm Standardabweichung (in Quadratgrad) bei der Fahrt
Fläche des Bewegungsraumes	13013,83 \pm 3426,11	9378,28 \pm 1865,49

Tab. 3: Mittelwerte und Standardabweichung der Fläche des Bewegungsraumes bei der Zirkumduktion und bei der Fahrt.

Die Hypothese, dass das ermittelte Bewegungsausmaß während der Fahrt geringer als während der aktiven Zirkumduktion ausfallen würde, konnte somit bestätigt werden.

3.3 Statistische Auswertung

Nach Anwendung des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests und der einfaktoriellen ANOVA wurden die ermittelten Daten weiter analysiert.

3.3.1 Statistische Auswertung der Daten aller Bewegungsrichtungen

Eine Normalverteilung konnte mittels Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest nachgewiesen werden ($Z > 0,44$, $p > 0,22$).

Ergänzend konnte die einfaktorielle ANOVA keinen signifikanten Haupteffekt nachweisen (Zirkumduktion vs. Fahrt: Ulnarabduktion $F(1,32) = 0,69$, $p = 0,41$, Radialabduktion $F(1,32) = 2,02$, $p = 0,17$, Flexion $F(1,32) = 3,11$, $p = 0,09$, Extension $F(1,32) = 1,00$, $p = 0,33$).

3.3.2 Statistische Auswertung der Daten der Fläche des Bewegungsraumes

Auch hier konnte mittels des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests eine Normalverteilung nachgewiesen werden ($Z > 0,44$, $p = 0,93$).

Durch die einfaktorielle ANOVA zeigte sich hier jedoch eine signifikant kleinere Fläche des Bewegungsraumes während der Fahrt im Vergleich zur Zirkumduktion (Zirkumduktion vs. Fahrt: $F(1,32) = 15,64$, $p = 0,00$).

3.4 Die Bewegungskurven während der Zirkumduktion

Die ermittelten Bewegungskurven während der Zirkumduktion waren nach automatischer Berechnung der Bewegungshülle der Form eines nierenförmigen Keils ähnlich.

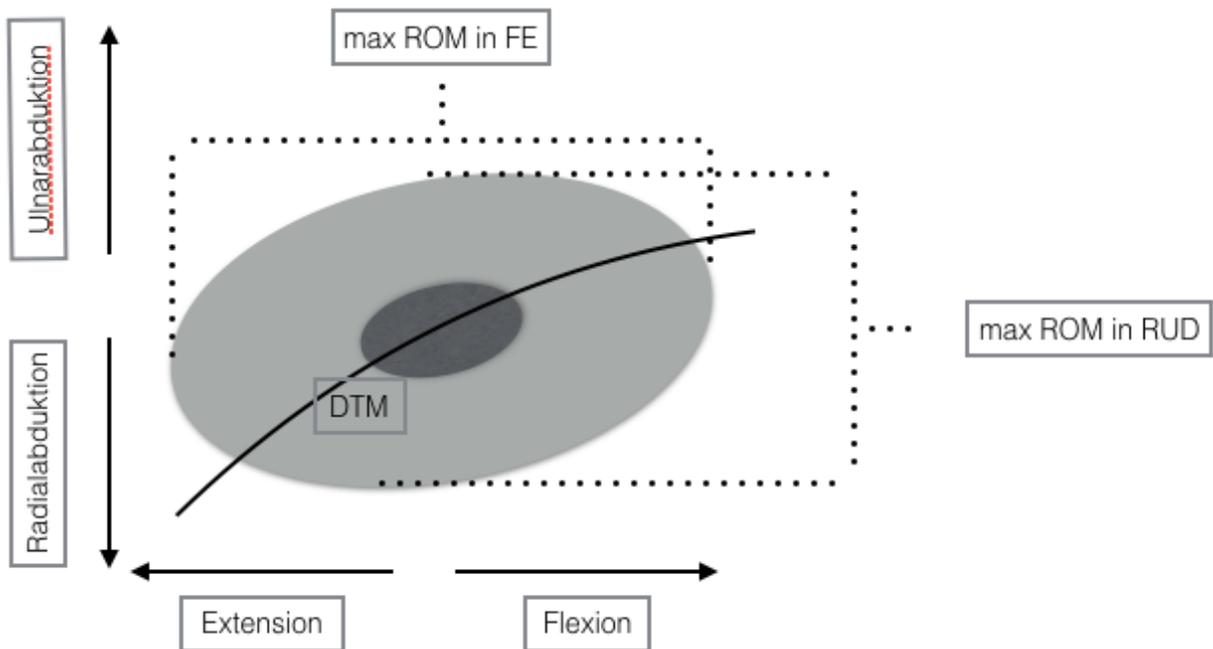


Abb. 9: Skizze der Bewegungskurve während der Zirkumduktion, max: maximal, ROM: *range of motion* (Bewegungsraum), FE: Flexion/Extension, RUD: Radial-/Ulnarabduktion, DTM: *dart throwing motion* (Hauptbewegungsachse).

Der dunkel markierte Bereich skizziert die Hypothese, dass das Bewegungsausmaß während der Fahrt geringer ist, als das maximal erreichte Bewegungsausmaß.

3.5 Die Bewegungskurve während der Fahrt

Nach der Auswertung der Daten mittels Excel® erfolgte die weitere Bearbeitung mittels des Matlab®-Programms. Hiermit wurde für jeden Probanden die Bewegungskurve während der Zirkumduktion dargestellt. Sie spiegelt das maximale Bewegungsausmaß wieder, welches während der aktiven Bewegung entsteht. Um die Daten besser zu visualisieren wurde zum anderen für jeden Probanden die Bewegungskurve während der Fahrt in Form einer farbgestützten Heatmap erstellt. Hier sind farblich unterteilt die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der einzelnen Bewegungsrichtungen dargestellt. In roter Farbe zeigt sich die häufigste und in dunkelblau die geringste Aufenthaltswahrscheinlichkeit. Außerdem zeigte die Achse der „Dart Throwing Motion“ (DTM) eine auffällige Schräge, die der von Vorarbeiten ähnelte (Gehrmann, Kaufmann et al. 2008).

3.6 Abweichungen der Hypothese aufgeteilt nach Bewegungsrichtungen

Die Ergebnisse wurden sowohl im Bereich Fahrt und Zirkumduktion als auch im Bereich der einzelnen Bewegungsrichtungen analysiert. Es zeigten sich auch von der Hypothese abweichende Konstellationen, zum Beispiel ein bei der Fahrt größeres

Bewegungsausmaß einer Bewegungsrichtung als bei der Zirkumduktion. Geht man davon aus, dass während der Zirkumduktion das maximal mögliche Bewegungsausmaß eines Probanden, also 100% erreicht wird, ergibt sich für die Fahrt die folgende Tabelle:

Extension	107,28%
Flexion	83,16%
Ulnarabduktion	104,74%
Radialabduktion	82,25%

Tab. 4: Prozentuale Übersicht des benötigten Bewegungsausmaßes bei der Fahrt.

Analysiert man diese Daten weiter, ergibt sich bei den folgenden Probanden in den verschiedenen Bewegungsrichtungen Abweichungen von der Hypothese. Bis fünf Grad Abweichung wurde innerhalb der Grenzen der Toleranz der Messgenauigkeit interpretiert.

Bewegungsrichtung	Probanden	Gesamtanzahl
Extension	B, H, K, L, O, S	6
Flexion	I	1
Radialabduktion	J, N, O	3
Ulnarabduktion	F, I, O, Q, S	5
Fläche des Bewegungsraumes	O, P	2

Tab. 5: Übersicht der Probanden, sowie der Gesamtanzahl über die Abweichungen von der Hypothese.

Die meisten Abweichungen ergaben sich demnach bei der Extension und bei der Ulnarabduktion. Die Extension und die Ulnarabduktion entstehen bei der Lenkbewegung nach rechts.

Bei der Analyse des Probanden O kommt eine größere Fläche bei der Fahrt, als bei der Zirkumduktion zur Darstellung. Die Ursache hierfür ist im Programm zu finden. Man erkennt, dass etwa ein Viertel der gesamten Fläche durch eine einzige kreisartige Ausgleichsbewegung zustande kommt. Der Proband hat diese Bewegung

nur einmalig ausgeführt. Das Programm berechnet dann die Hülle derart, so dass eine größere Fläche, als eigentlich zu erwarten wäre, entsteht.

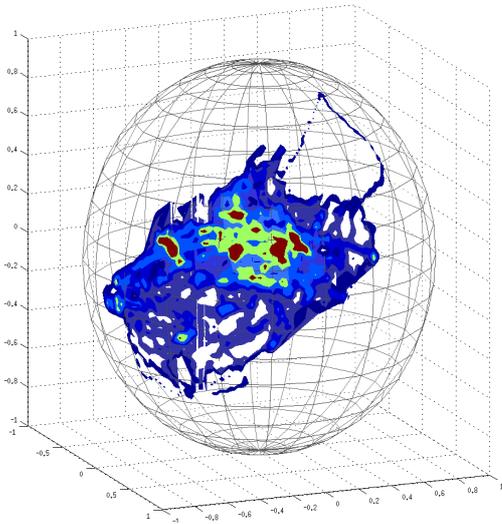


Abb. 10: Bewegungsfläche bei der Fahrt von Proband O

Vermutlich kam dies durch eine Umgreifbewegung beim Lenkvorgang nach rechts zustande. Hierbei wird das Handgelenk passiv sowohl in die Extension, als auch in die Ulnarabduktion überstreckt.

3.7 Übersicht aller Bewegungsrichtungen und Bewegungsgraphen aller Probanden im Einzelnen

3.7.1 Proband A

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-67,99	67,23	-21,69	44,82	13230,9
Fahrt	-68,49	56,16	<i>-14,71</i>	45,72	8228,3

Tab. 6: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden A im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

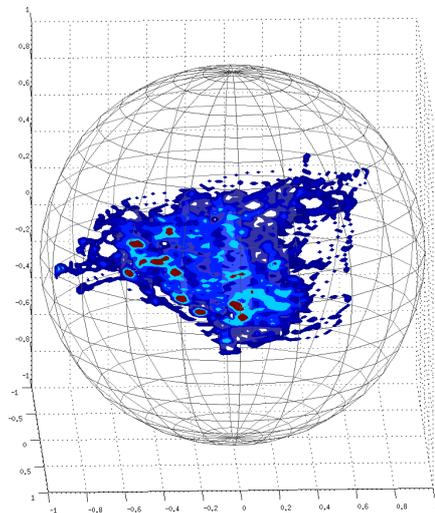


Abb. 11: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband A.

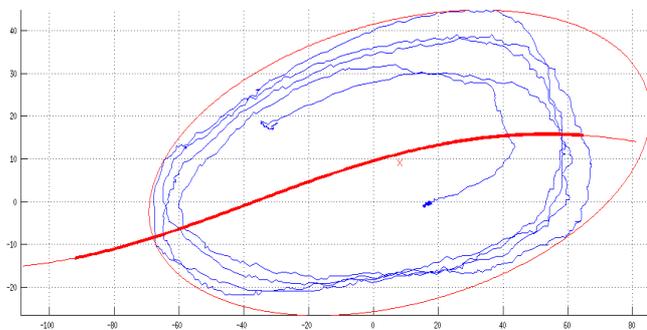


Abb. 12: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Radiant) von Proband A.

3.7.2 Proband B

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-60,93	73,66	-22,45	42,66	13908,2
Fahrt	-83,88	57,78	-17,23	41,53	10083,1

Tab. 7: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden B im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

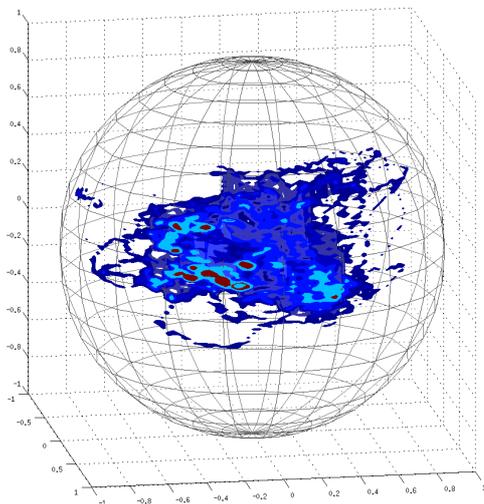


Abb. 13: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband B.

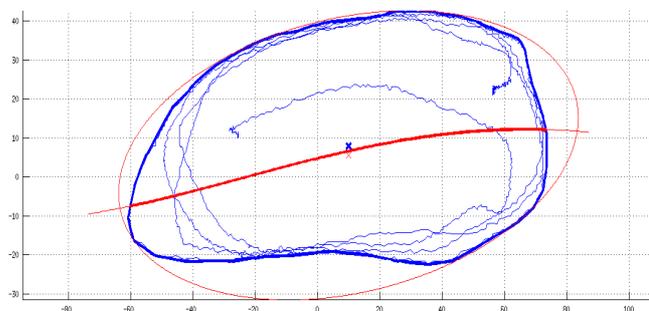


Abb. 14: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband B.

3.7.3 Proband C

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-61,69	74,92	-21,55	45,85	14211,6
Fahrt	-52,02	46,21	<i>-12,15</i>	45,94	8079,14

Tab. 8: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden C im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

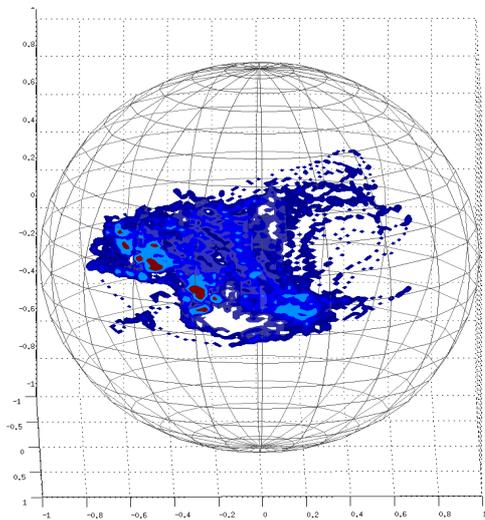


Abb. 15: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband C.

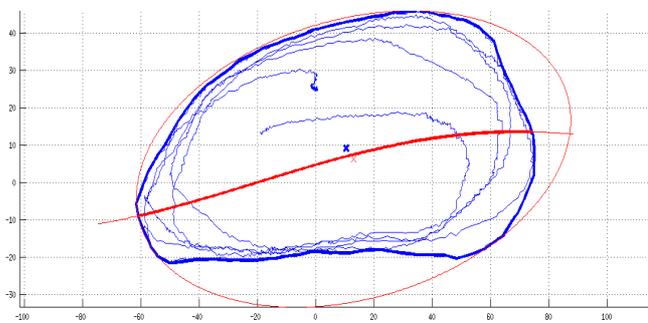


Abb. 16: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband C.

3.7.4 Proband D

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-71,28	76,95	-26,28	45,85	16021,7
Fahrt	-54,40	50,49	-11,29	44,19	6820,18

Tab. 9: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden D im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

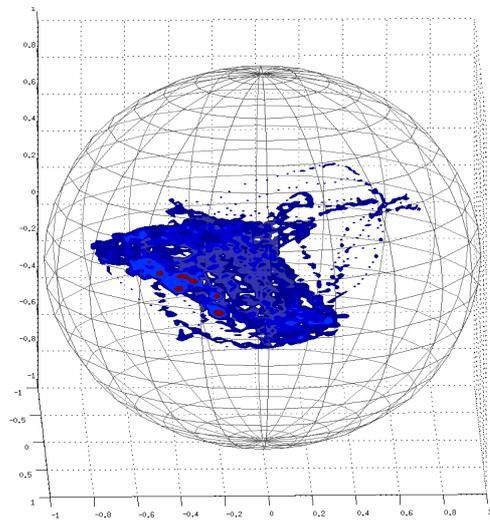


Abb. 17: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband D.

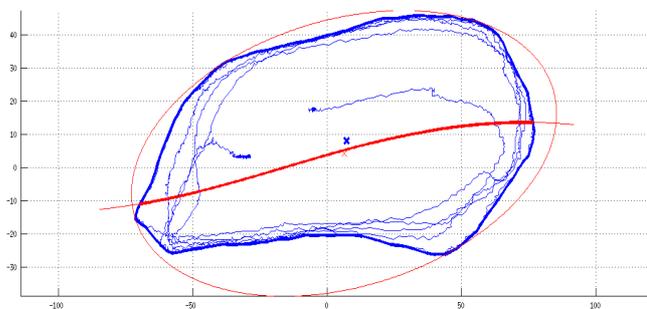


Abb. 18: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband D.

3.7.5 Proband E

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-60,16	66,73	-21,69	45,72	13348,5
Fahrt	-57,55	49,36	<i>-20,70</i>	49,00	88886,4

Tab. 10: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden E im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

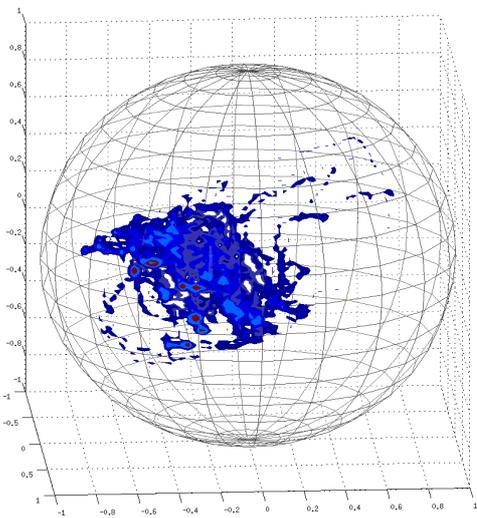


Abb. 19: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband E.

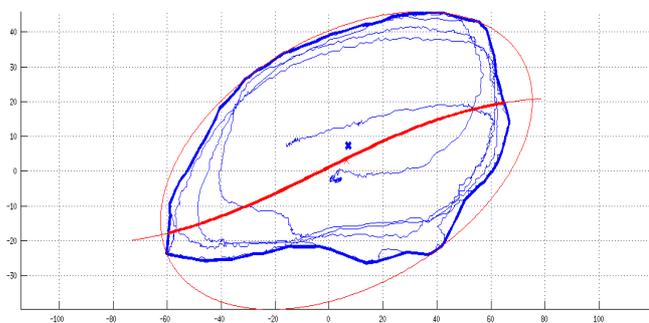


Abb. 20: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband E.

3.7.6 Proband F

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-59,17	66,73	-20,92	44,05	12036,6
Fahrt	-52,38	62,32	-10,75	49,27	7557,59

Tab. 11: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden F im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

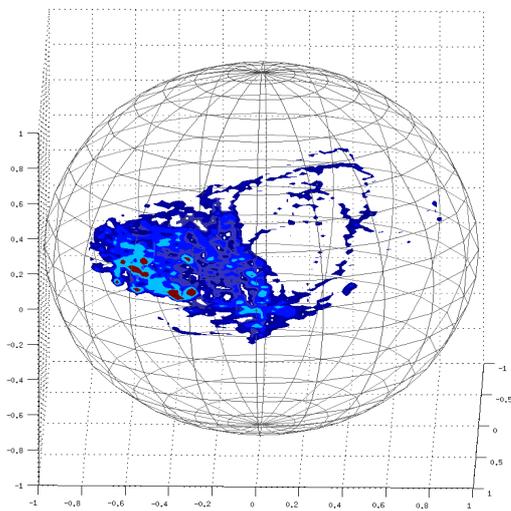


Abb. 21: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband F.

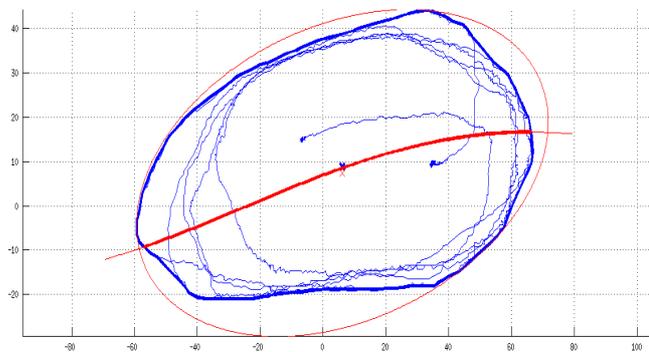


Abb. 22: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband F.

3.7.7 Proband H

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-50,49	50,13	-24,61	53,95	10829
Fahrt	-60,07	38,02	-24,61	56,11	6925,74

Tab. 12: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden H im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

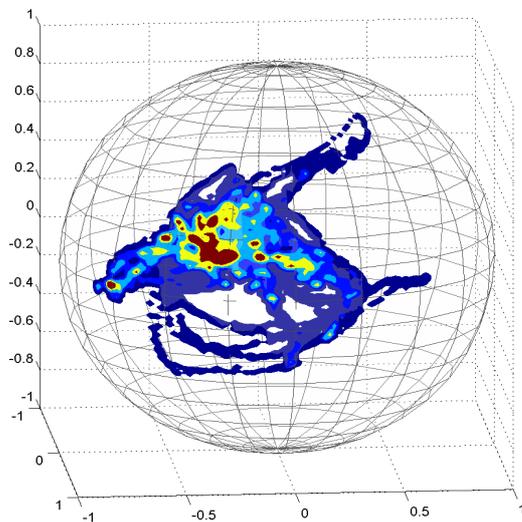


Abb. 23: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband H.

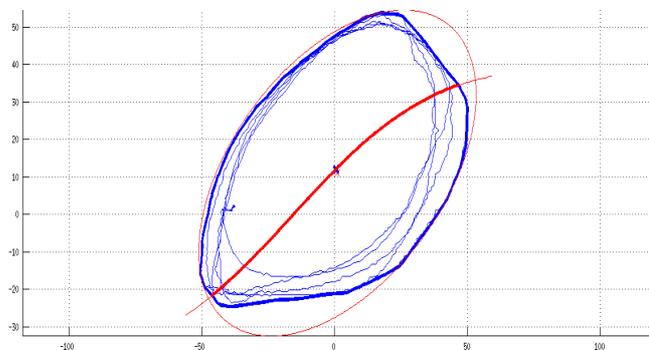


Abb. 24: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband H.

3.7.8 Proband I

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-84,37	43,06	-31,23	31,59	12985,9
Fahrt	-77,44	56,38	-28,8	36,67	10108,2

Tab. 13: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden I im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

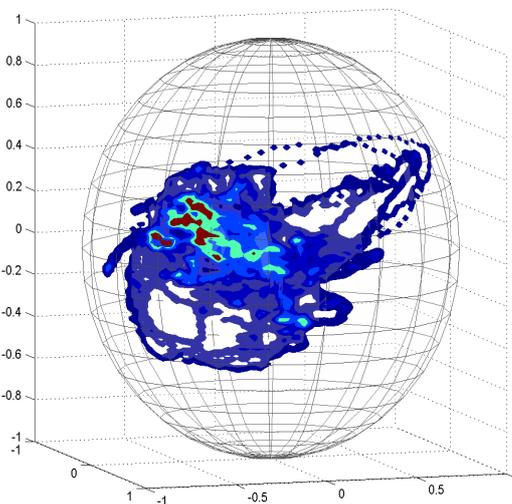


Abb. 25: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband I.

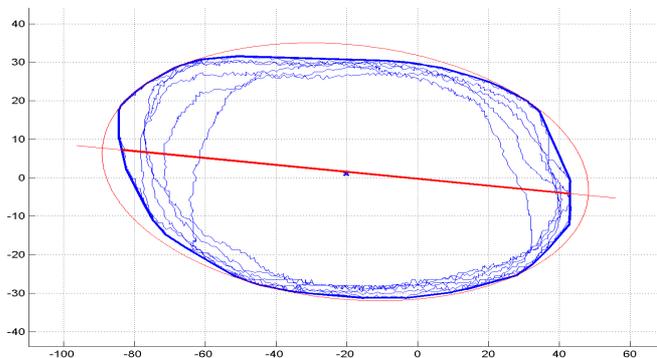


Abb. 26: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband I.

3.7.9 Proband J

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-103,41	50,85	<i>-27,18</i>	57,78	19664
Fahrt	<i>-102,37</i>	51,61	-39,10	35,91	12936,9

Tab. 14: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden J im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

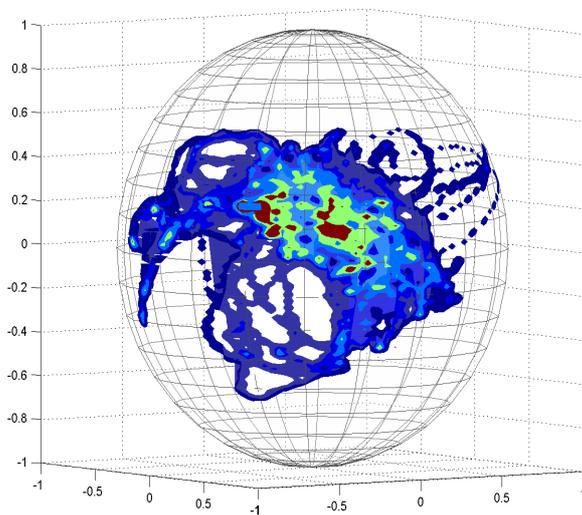


Abb. 27: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband J.

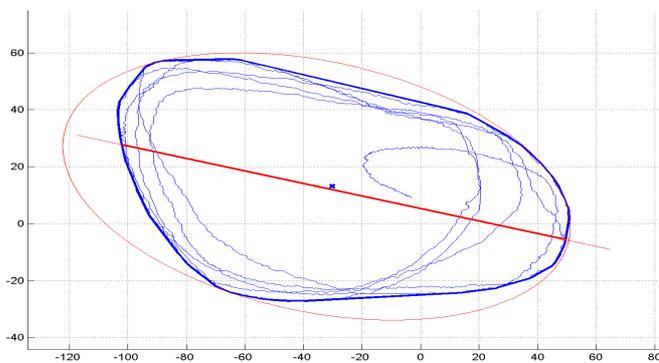


Abb. 28: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband J.

3.7.10 Proband K

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-71,4	31,86	-45,31	26,41	8395,97
Fahrt	-88,92	25,06	-38,07	28,57	7498,2

Tab. 15: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden K im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

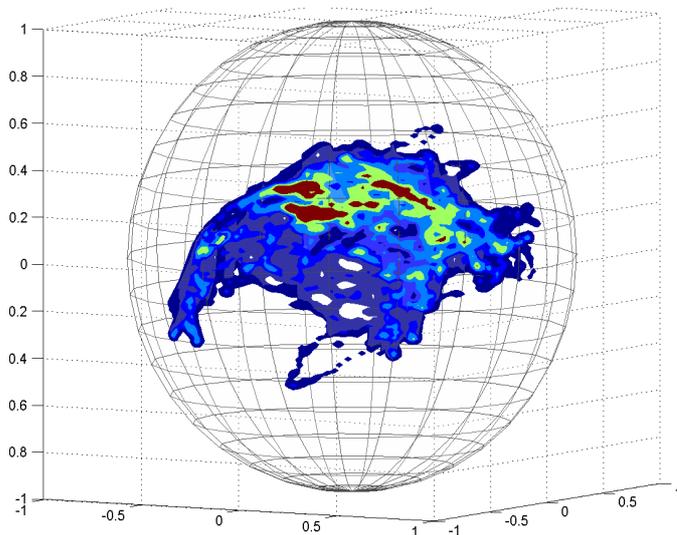


Abb. 29: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband K.

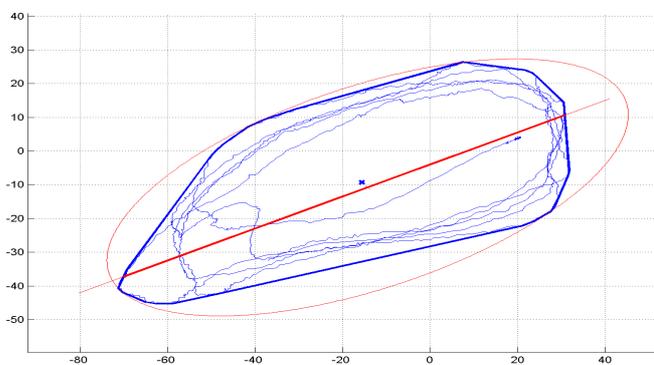


Abb. 30: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband K.

3.7.11 Proband L

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-69,88	73,66	-44,19	49,41	16172,3
Fahrt	-95,22	64,84	-34,38	35,55	10663,3

Tab. 16: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden L im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

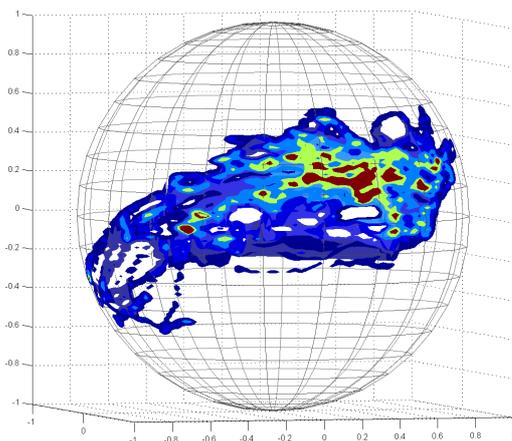


Abb. 31: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband L.

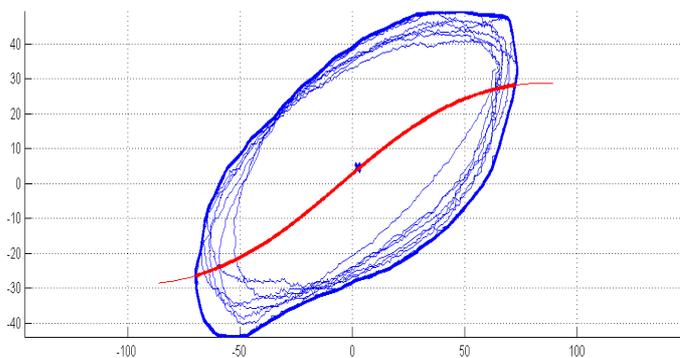


Abb. 32: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband L.

3.7.12 Proband N

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-67,09	32,22	-6,21	60,93	10251,5
Fahrt	-65,11	30,06	-11,29	58,54	9378,9

Tab. 17: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden N im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

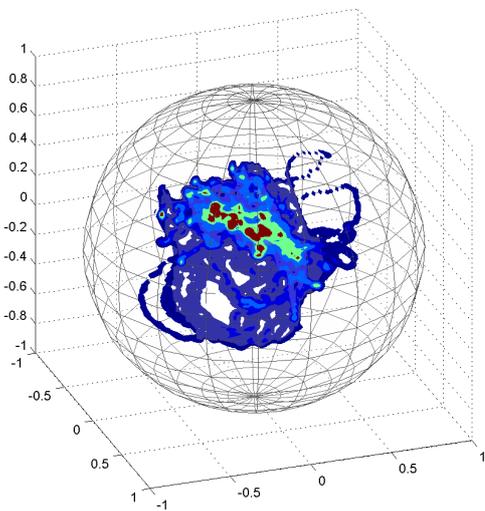


Abb. 33: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband N.

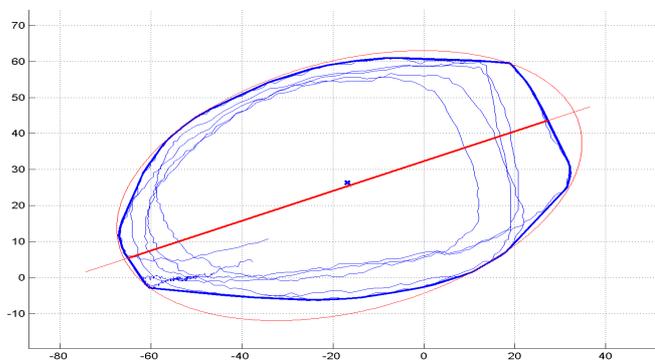


Abb. 34: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband N.

3.7.13 Proband O

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-68,49	36,13	-20,92	39,73	9183,2
Fahrt	-83,11	35,37	-33,12	64,75	11551,9

Tab. 18: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden O im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

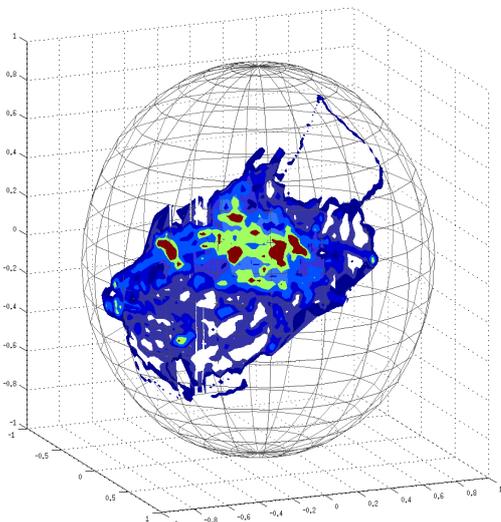


Abb. 35: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband O.

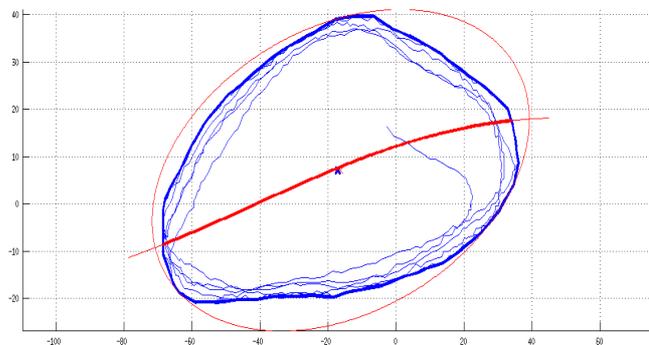


Abb. 36: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband O.

3.7.14 Proband P

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-67,63	26,41	<i>-18,9</i>	34,29	6867,71
Fahrt	<i>-66,87</i>	29,34	-27,4	48,73	8962,99

Tab. 19: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden P im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

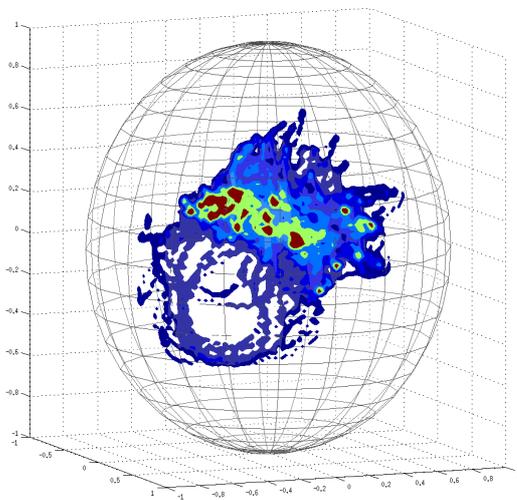


Abb. 37: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband P.

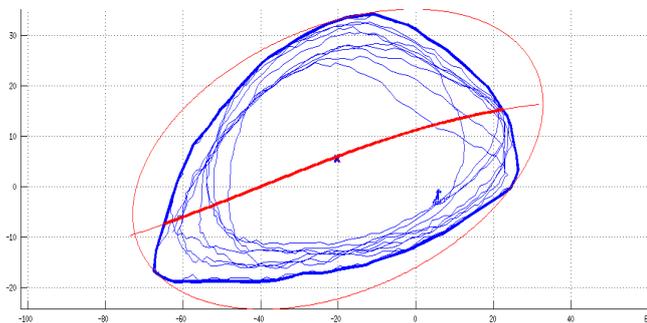


Abb. 38: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband P.

3.7.15 Proband Q

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-54,9	39,15	-28,03	61,69	10831,9
Fahrt	-63,09	34,74	-23,49	67,68	8340,77

Tab. 20: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden Q im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

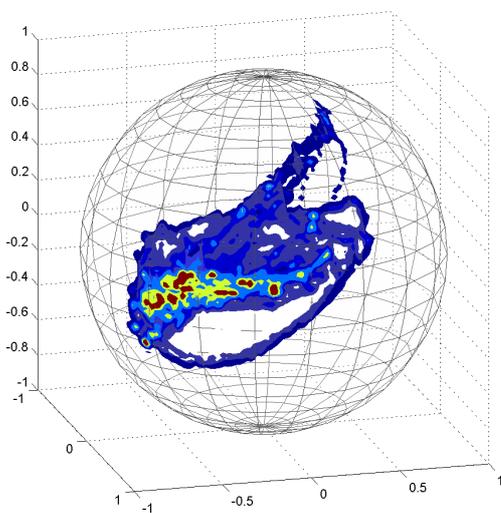


Abb. 39: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband Q.

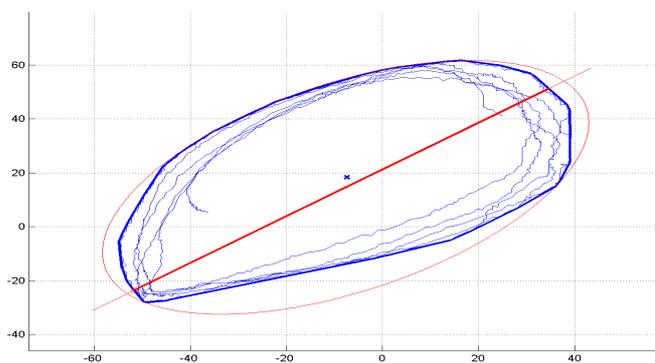


Abb. 40: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband Q.

3.7.16 Proband S

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-60,43	73,3	-44,82	43,15	13855,2
Fahrt	-99,63	62,19	-10,39	81,0	13180,9

Tab. 21: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden S im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

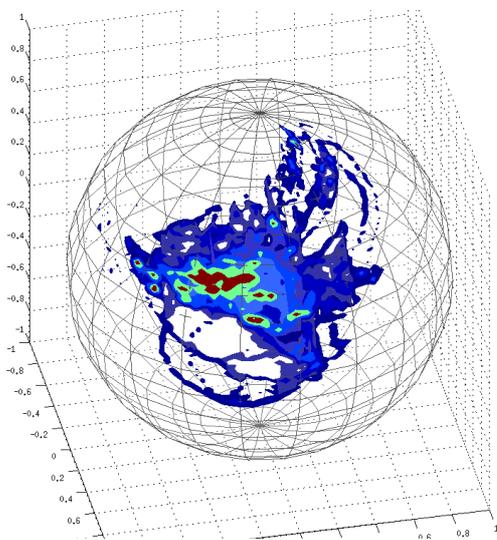


Abb. 41: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband S.

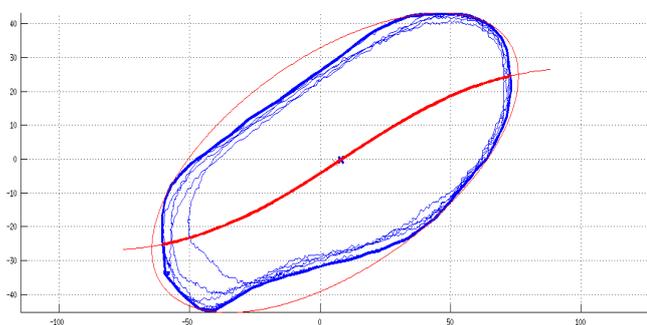


Abb. 42: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband S.

3.7.17 Proband T

	EX	FL	RAB	UAB	Fläche
Zirkumduktion	-76,45	69,12	-37,44	61,06	19440,9
Fahrt	-70,02	41,94	-26,28	57,64	10228,2

Tab. 22: Alle Bewegungsrichtungen des Probanden T im Vergleich Zirkumduktion und Fahrt
 EX: Extension, FL: Flexion, RAB: Radialabduktion, UAB: Ulnarabduktion, (jeweils in Grad),
 Kennzeichnung der maximalen Werte mit **schwarz unterlegten** Zahlen und der minimalen
 Werte in *kursiven* Zahlen, Fläche: Fläche des Bewegungsraumes (in Quadratgrad).

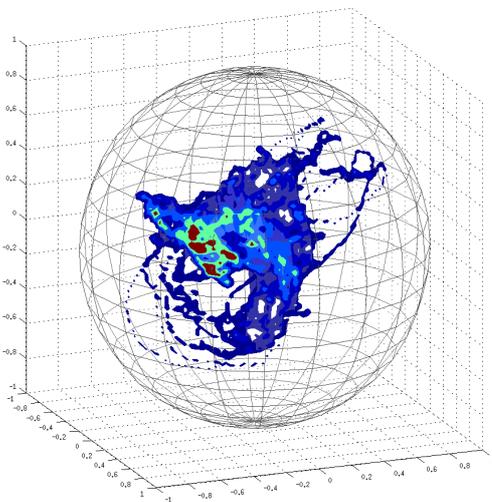


Abb. 43: Bewegungskurve Fahrt (in Radiant) von Proband T.

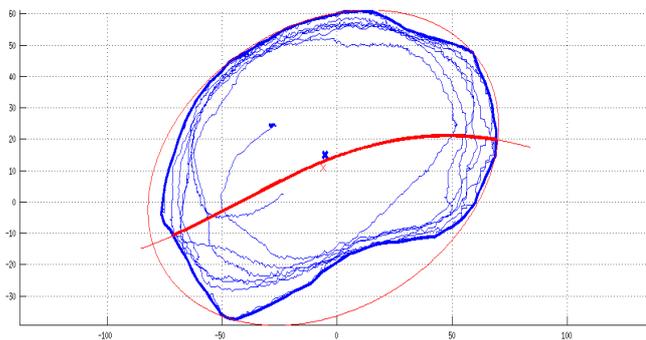


Abb. 44: Bewegungskurve Zirkumduktion (in Grad) von Proband T.

4. Diskussion

Zusammenfassend konnte in unserer Studie ermittelt werden, dass beim Führen eines Kfz insgesamt ein hohes Bewegungsausmaß des Handgelenkes erforderlich ist. In den Hauptbewegungsachsen konnte zwar kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden, es zeigte sich jedoch eine signifikant kleinere Fläche des Bewegungsraumes am Handgelenk während des Führens eines Kfz.

4.1 Bisherige Analysen des Ausmaßes der Handgelenksbeweglichkeit

Bereits in der Vergangenheit beschäftigten sich verschiedenste Studien mit dem Thema, wie das Ausmaß der Handgelenksbeweglichkeit ermittelt werden kann. Unter anderem wurden Leichenarme in speziell konzipierte Vorrichtungen eingespannt und das Bewegungsausmaß mittels Röntgenstrahlung gemessen (Youm, McMurthy et al. 1978). Mit den Jahren wurden dann andere bildgebende, allerdings zum Teil ebenfalls invasive Verfahren verwendet, so dass z.B. Messungen von Gelenkbewegungen, auch des Handgelenkes mittels Röntgenstrahlung (Andrews and Youm 1979) und später auch in dreidimensionaler Darstellung mittels Computertomographie (Crisco, McGovern et al. 1999) durchgeführt wurden.

Weiterhin etablierten sich weniger invasive Messverfahren. Leonard et al. entwickelten Methoden zur Bestimmung des Bewegungsausmaßes des Handgelenkes, u.a. durch elektromagnetische Systeme (Leonard, Sirkett et al. 2005). Auch die Elektrogoniometrie wird ebenfalls seit Jahren als Verfahren zur Bestimmung von Gelenkbewegungsräumen genutzt (Salvia, Woestyn et al. 2000).

Bezugnehmend auf die Bewegung bei Benutzung eines Kfz wurde eine Analyse der Bewegungen, welche zum *Ein- und Aussteigen* notwendig sind, durchgeführt, nicht aber während der Fahrt im Kfz. Auch beim Ein- und Aussteigen zeigte sich eine große Individualität in den Abläufen, die auch in der vorliegenden Arbeit anhand der Bewegungsgraphen zu erkennen ist. Darüber hinaus konnten zwei Hauptbewegungsstrategien während des Aussteigevorgangs ermittelt werden. Bei einem Teil begann der Vorgang des Aussteigens unter zu Hilfenahme des linken Beines, welches als erstes aus dem Auto gebracht wurde. Es folgten dann der Aufstehvorgang und das rechte Bein. Bei dem anderen Teil der Probanden wurden zunächst beide Beine aus dem Auto gebracht und dann folgte der Aufstehvorgang. Der überwiegende Anteil nutzte allerdings die Strategie, bei der zuerst das linke Bein

aus dem Kfz gebracht wird. Ältere Probanden nutzten eher die Strategie, bei der zunächst beide Beine aus dem Kfz gebracht wurden (Chateauroux and Wang 2010)

4.2 Das Elektrogoniometer zur Messung von Bewegungsausmaßen

Zur Durchführung der vorliegenden Studie wurden biaxiale Elektrogoniometer verwendet. Das Elektrogoniometer hat sich durch verschiedene Studien als eine nützliche Methode zur Ermittlung von Gelenkbewegungen herausgestellt.

Überwiegend beschäftigten sich diese Studien mit den Aktivitäten des täglichen Lebens. Während des Essens mit einer Gabel, einem Löffel und während des Trinkvorganges aus einer Henkeltasse wurde das Bewegungsausmaß der vier Hauptbewegungen des Handgelenks ermittelt (Safae-Rad, Shwedyk et al. 1990). Unter zu Hilfenahme des sogenannten „Sollerman hand function test (SHFT)“ wurden Probanden in einer weiteren Studie gebeten, gewisse Aufgaben mit dem Handgelenk und der Hand auszuführen, um Bewegungen entstehen zu lassen, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit bei den Aktivitäten des täglichen Lebens genutzt werden. Zum Beispiel wurde der Bewegungsablauf ermittelt, welcher zur Öffnung einer Türe mithilfe einer Türklinke, zum Verschließen eines Gefäßes mit dem dazu passenden Deckel oder die Anwendung eines Schraubenziehers, nötig ist. Aufgeteilt nach den verschiedenen Bewegungsabläufen wurde hier gezeigt, dass in weiten Teilen die Aktivitäten des täglichen Lebens mit einem geringeren als dem maximal möglichen Bewegungsausmaß des Handgelenks durchgeführt werden konnten (Dauncey, Singh et al. 2017). In einer weiteren Studie wurde das Bewegungsausmaß insbesondere bei der Extension und Flexion des Handgelenkes gemessen. Dafür mussten die Probanden die Hand zum Beispiel an verschiedene Stellen des Körpers führen, wie es zum Beispiel bei der Körperpflege notwendig ist. Ergänzend wurde das Bewegungsausmaß bei der Nahrungsaufnahme, bei der Verwendung eines Telefons oder beim Lesen gemessen (Brumfield and Champoux 1984).

Das Elektrogoniometer ist leicht, tragbar und kann standortunabhängig batteriebetrieben werden. So kann es im klinischen Alltag sowohl an vorgegebenen Studienorten, zum Beispiel am Patientenbett, als auch während der Abfolge von großflächigen Bewegungen, zum Beispiel während physiotherapeutischer Maßnahmen nahezu überall genutzt werden (Foltran, Silva et al. 2013). Jedoch

können gerade in den einzelnen Schritten der Versuchsdurchführung Fehlerquellen entstehen (Buchholz and Wellman 1997).

In der vorliegenden Studie war zu Beginn der Versuche eine Fixation der Elemente des Elektrogoniometers am Probanden nötig. Dies sollte nach den genannten Vorgaben erfolgen, denn eine abweichende Fixation des Elektrogoniometers führt dazu, dass fehlerhafte Messungen durch z.B. Kabelbrüche, Fehler bei der Kalibrierung oder unvollständige Übertragung entstehen.

Allerdings ist die Elektrogoniometrie im Vergleich zu bildgebenden Verfahren im Vorteil, bei denen zwar Gelenkstellungen sehr präzise gemessen werden, aber nicht derart mobil einsetzbar sind. Die Anwendung der Goniometrie ist ortsunabhängig von Versuchseinrichtungen, eine drahtlose Übertragung der Daten über einen USB-Anschluss ist möglich. Ein weiterer Vorteil der Elektrogoniometrie ist, dass es sich um eine nicht invasive Messmethode handelt und sie keine ionisierende Strahlung benötigt.

4.3 Alternative Bewegungsanalysesysteme

Eine Alternative gegenüber Elektrogoniometern sind elektromagnetische und optoelektronische 3-D-Bewegungsanalysesysteme, z.B. der Firma Vicon Motion Systems Ltd. UK ®. Hierbei handelt es sich um ein optisches 3D-Bewegungsanalysesystem. Es ist in der Lage, komplexe und dynamische Bewegungen zu analysieren. Über separat auf der Haut des menschlichen Körpers angebrachte Markierungen werden mittels Infrarotkameras Positionsänderungen erfasst und letztlich über ein Computerprogramm Bewegungsabläufe rekonstruiert (Yang, Sanno et al. 2012). So können Gelenkwinkelabläufe zum Teil genauer erfasst werden als mit Elektrogoniometern, jedoch den gleichen Einschränkungen folgend, was die unsichere Befestigung von lichtreflektiven Markern an der Hautoberfläche betrifft. Die Bewegungsanalysesysteme arbeiten zwar mit einer Genauigkeit von unter 1 mm Ortsauflösung (Vicon ®). Vor allem bei schnellen Bewegungsabläufen bieten diese kabellosen Systeme Vorteile. Allerdings ist hier eine ausreichende Beleuchtung aller reflektiven Marker notwendig, die bei der Durchführung der vorliegenden Studie eine eingeschränkte Sicht des Fahrers beim Lenken bedeutet hätte. Das ausleuchtende Licht in der Fahrgastzelle würde zudem die Fahrsicherheit reduzieren. Mit dieser Art der optischen Bewegungsanalyse wurden bereits komplexe Bewegungsabläufe erfasst, z.B. bei verschiedenen Sportarten (Nissen, Westwell et al. 2007).

Eine weitere Alternative zur Erfassung komplexer Bewegungen ist die Anwendung elektromagnetischer Trackingverfahren, z.B. „*Flock of birds*“ der Firma Ascension Technology Corp ®. Anhand eines Magnetfeldes werden hier ebenfalls über Sensoren Positionen ermittelt. Da es sich um ein magnetisches Messverfahren handelt, kann es zu erheblichen Störungen durch metallische Gegenstände im Kfz kommen. Außerdem kann das Magnetfeld ebenfalls durch nicht beeinflussbare natürliche Phänomene, wie die ferromagnetische Strahlung oder metallische Bestandteile des Bodens beeinflusst werden (Meskers, Fraterman et al. 1999). Da ein Kraftfahrzeug überwiegend aus metallischen Komponenten besteht, wurde dieses Verfahren bei Konzeption der Studie abgelehnt.

4.4 Analyse des Bewegungsausmaß

Aufgrund der durch die Anatomie vorgegebenen Gelenkmechanik finden die Bewegungen des Handgelenkes an zwei Achsen statt. An der einen Achse finden die Dorsalextension sowie die Palmarflexion statt. Die physiologischen Bewegungsausmaße hängen maßgeblich von verschiedenen Faktoren, u.a. der Position der Finger (Gehrmann, Kaufmann et al. 2008) oder dem Alter des Menschen ab, so dass diese individuell stark variieren (Smahel and Klimova 2005). Einheitliche Angaben finden sich in der Literatur nicht (Ryu, Cooney et al. 1991, Gehrmann, Windolf et al. 2008).

Gerade durch diese Individualitäten innerhalb der Studie können Fehler entstehen. Die Probandengröße variiert je nach Proband, so dass durch die unterschiedlichen Körpermaße unterschiedliche Daten ermittelt werden, da das Bewegungsausmaß auch von der jeweiligen Körpergröße und Proportionierung eines Probanden abhängt. Auch die individuell vorbestehende Fähigkeit der Gelenkbewegung ist selbst bei gesunden Probanden unterschiedlich, unter anderem durch sportliche Aktivitäten oder Dehnungsmaßnahmen. Vergleicht man die Mittelwerte der verschiedenen Bewegungsrichtungen bei der Zirkumduktion und bei der Fahrt, ist zu erkennen, dass keine pauschale Angabe möglich ist auf absolute Werte. Die gemessenen Werte während der Zirkumduktion sind auch nicht alle insgesamt kleiner oder größer als die Werte, die während der Fahrt erzielt wurden. Vergleicht man die Werte jedoch mit den Ausmaßen der physiologischen Handgelenksbeweglichkeit ist zu erkennen, dass der überwiegende Anteil innerhalb dieser Bewegungsausmaße oder sogar oberhalb liegt (Palmer, Werner et al. 1985, Ryu, Cooney et al. 1991).

Das maximale Bewegungsausmaß während der Zirkumduktion und der Fahrt wurde bei der Extensionsbewegung, das minimale bei der Radialabduktion erreicht. Während der Fahrt sind bei der Extension und bei der Ulnarabduktion zum überwiegenden Teil größere Werte als bei der Zirkumduktion entstanden. Auffallend hingegen ist die hohe Ausschöpfung der individuell möglichen Beweglichkeit in den Hauptbewegungsrichtungen.

4.5 Analyse der Fläche des Bewegungsraumes

Analysiert man jedoch die Fläche des Bewegungsraumes, welche aus den einzelnen Werten alle Bewegungsrichtungen entsteht erkennt man, dass die Fläche des Bewegungsraumes während der Zirkumduktion deutlich größer ist, als während der Fahrt. Eine der Hypothesen war, dass das ermittelte Bewegungsausmaß während der Fahrt geringer ausfallen würde, als während der Zirkumduktion.

Aufgeteilt nach den einzelnen Bewegungsrichtungen erkennt man bei der Fahrt die größte Abweichung oberhalb der physiologischen Ausmaße im Bereich der Ulnarabduktion. Aber auch bei der Flexion zeigt sich eine Abweichung, allerdings unterhalb der vorbeschriebenen physiologischen Werte. Dies zeigt, dass bei der Fahrt ein deutlich geringeres Bewegungsausmaß im Vergleich zur Zirkumduktion im Bereich der Flexion genutzt wurde. Außerdem demonstriert es auch die unterschiedliche Wertigkeit der Bewegungsfläche, die vom Handgelenk beim Führen eines Pkws überhaupt genutzt wird.

4.6 Limitation der Studie

Die Stichprobengröße ist aufgrund des sehr hohen technischen Aufwands nicht geeignet, repräsentative Aussagen über Fahrtauglichkeit in Abhängigkeit der Handgelenkbewegungen zu erteilen. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass unsere Studie überwiegend an jungen Probanden durchgeführt wurde. Um ein repräsentatives Ergebnis zu erzielen müsste die Studie erweitert werden und eine Aufteilung nach Altersgruppen erfolgen.

Unsere Teststrecke bestand zum überwiegenden Anteil aus 180°-Wendungen. Der Aufbau wurde so gewählt, damit Probanden möglichst viele Lenkbewegungen und somit Maximalstellungen des Handgelenkes erzielen. Möglicherweise kann man davon ausgehen, dass insgesamt weniger Beweglichkeit notwendig ist, wenn andere Fahrstrecken analysiert werden. Als Ergänzung des Studienaufbaus sollte zukünftig eine realitätsnähere Fahrstrecke gewählt werden.

Außerdem betrug die Dauer unseres Fahrexperimentes nur wenige Minuten. Bei einer Versuchsdurchführung mit längerer Dauer könnten ggf. noch weitere Häufigkeiten der Maximalstellungen des Handgelenkes ermittelt werden.

Da nur das rechte Handgelenk gemessen wurde, ist es sinnvoll, in nachfolgenden Studien beide Handgelenke in ihrem Bewegungsausmaß zu messen, um hier Seitenunterschiede aufzudecken. Es müsste auch in den folgenden Auswertungen berücksichtigt werden, ob ein Proband Rechts- oder Linkshänder ist.

Zuletzt muss berücksichtigt werden, dass jeder Proband über einen individuellen Fahrstil verfügt. Obwohl Empfehlungen vorliegen, ist bereits die Positionierung der Hände bei Lenkbewegungen am Lenkrad bei jedem Probanden unterschiedlich.

4.7 Bisherige Fahrexperimente

In der Literatur finden sich zahlreiche Bewegungsanalysen, welche mit den verschiedensten Methoden erstellt wurden. Bewegungsanalysen während der Bedienung eines Kfz finden sich in der Literatur jedoch nicht. Der überwiegende Anteil der Bewegungsanalysen beschäftigt sich mit den Aktivitäten des täglichen Lebens, z.B. der Führung der Hand bzw. des Arms bei der Nahrungsaufnahme (van Andel, Wolterbeek et al. 2008).

In einer optoelektronischen Bewegungsanalyse wurde beispielsweise der Bewegungsablauf, welcher bis zum Erreichen der endgültigen Sitzposition im Kfz notwendig ist, ermittelt (Robert, Causse et al. 2014). Aussagen zu Bewegungen während des Fahrens wurden hier nicht getroffen.

In einer anderen optoelektronischen Bewegungsanalyse wurde ähnlich zur vorliegenden Versuchsdurchführung die Fixation der Sensoren entlang des Unterarms in bestimmten Positionen durchgeführt. Auch hier wurde allerdings nur das Ausmaß der Handgelenkbeweglichkeit ermittelt. Es konnte aber gezeigt werden, dass die Position des Handgelenkes das Ausmaß der Beweglichkeit des Handgelenkes beeinflusst (Marshall, Mozrall et al. 1999).

Ergänzend dazu ergaben auch andere Untersuchungen, dass die Ruhigstellung des Handgelenkes durch Stütz- oder Gipsverbände nach Frakturen die Handgelenkbeweglichkeit einschränkt und so die Benutzung eines Kfz beeinflusst. In einer dreiteiligen Studie wurde zum einen eine Befragung an Patienten, welche mit einem Gips der obere Extremität versorgt waren durchgeführt. Die Fragen zielten insbesondere darauf ab, ob die Patientin annahmen, dass es legal ist mit einer ruhiggestellten obere Extremität ein Kfz zu führen. Ergänzend wurden auch

allgemeine Fragen gestellt, z.B. wie lange die Patienten bereits mit einem Gips versorgt waren. Im zweiten Teil wurde in Anwesenheit eines Fahrlehrers eine vorgegebene Teststrecke von Patienten befahren. Dabei wurden verschiedene Methoden der Ruhigstellung gewählt, etwa eine Ruhigstellung des Ober- oder des Unterarms. Die Fahrsituation wurde realitätsnah gewählt und entsprach einem alltäglichen Szenario auf offener Straße. Zuletzt wurde eine Rückschau bereits veröffentlichter Berichte und Diskussionen erstellt. Hier lag der Fokus darauf, ob durch Versicherungen und Polizei bereits juristische Aspekte thematisiert wurden, welche sich mit dem Thema der Fahreignung mit ruhiggestellter oberer Extremität befasst. Zusammenfassend konnte im zweiten Teil der Studie ermittelt werden, dass ein sicheres Fahren mit jeglicher Ruhigstellung der oberen Extremität nicht gewährleistet ist. Insbesondere Lenkbewegungen würden nicht adäquat durchgeführt (Kalamaras, Rando et al. 2006).

Speziell mit dem Thema der Fahrtauglichkeit beschäftigte sich eine Studie, in der Probanden mit einem Gipsverband der oberen Extremität eine vorgegebene Strecke mit potentiellen Gefahrenquellen in einem Kfz befahren mussten. Der Schwerpunkt hier lag allerdings nicht auf einer Bewegungsanalyse, sondern darauf, ob eine gewisse Reaktionsfähigkeit besteht. Zwanzig gesunde Probanden mussten einen geschlossenen, vorher definierten, u.a. mit Kegeln markierten Parkour befahren. Die Schwierigkeit bestand darin, dass in vorgegebener Reihenfolge, die obere Extremität mit verschiedenen Gipsarten ruhiggestellt wurde. Während des Parkours mussten dann Manöver wie zum Beispiel Einparken, rückwärts Fahren, Bremsen, verschiedene Lenkbewegungen oder Rangieren auf begrenztem Raum absolviert werden. Gemessen wurden dann u.a. die Dauer und die Anzahl der berührten Kegel. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass sie die Fahrtzeiten der Probanden ohne Ruhigstellung signifikant von denen mit Ruhigstellung unterschieden. Außerdem konnte eine steigende Anzahl von Berührungen der Verkehrskegel festgestellt werden, welche allerdings nicht statistisch signifikant ausfiel (Jones, Barrow et al. 2017).

4.8 Ausblick

Die Erkenntnis, dass die exakte Bewegungsanalyse des Handgelenkes notwendig ist, um nach Verletzungen unter anderem Unfallchirurgen oder Orthopäden die Möglichkeit eines Behandlungsplans oder Hilfen zur Entscheidungsfindung zu erstellen, besteht schon über einen gewissen Zeitraum. Bis heute gibt es aber keine

konkreten Leitlinien (Li, Kuxhaus et al. 2005) oder Entscheidungshilfen dazu (Stevenson, Peterson et al. 2013).

Sicherlich wäre es aber sehr hilfreich sowohl für Patienten als auch für Ärzte, wenn gewisse Ansätze oder Hilfestellungen zur Entscheidungsfindung entwickelt werden könnten (Sandvall and Friedrich 2015).

In der Mehrheit der Fälle sprechen die behandelnden Ärzte ein grundsätzliches Fahrverbot, insbesondere für Patienten mit Gips- und Stützverbänden an der oberen Extremität, aus (Edwards, Oliver et al. 2009). Dies liegt mit unter daran, dass Entscheidungen auch juristische Konsequenzen für den Arzt, der eine Fahrtauglichkeit nicht anzweifelt und es dem Patienten mitteilt, haben können (Giddins and Hammerton 1996).

Letztlich könnte die Entscheidung dem Patienten auch selbst überlassen werden, wann er sich selbst als fahrtauglich einschätzt. Dann kann die Teilnahme am Straßenverkehr auch unter bestimmten Bedingungen erfolgen, zum Beispiel unter Anwesenheit einer weiteren Person, welche im Notfall in der Lage ist das Fahrzeug zu führen (Nunez and Giddins 2004).

In verschiedenen Studien wurde versucht zu ermitteln, ob die Patienten in der Lage sind, die eigene Fahrtauglichkeit adäquat einzuschätzen. Zum Beispiel wurde ein fotogestützter Fragebogen entwickelt, anhand dessen sowohl Probanden, als auch die Polizei entscheiden mussten, mit welchem der angegebenen Stütz- und Gipsverbände der oberen Extremität eine Fahrtauglichkeit besteht. Hier konnte zumindest eine große Übereinstimmung zwischen den Probanden und der Polizei gezeigt werden, mit welchem der Stütz- und Gipsverbände man nicht fahrtauglich ist (Hobman and Southern 2004). Allerdings haben andere Untersuchungen gezeigt, dass Patienten mitunter nicht ausreichend in der Lage sind, ihre eigene Fahrtauglichkeit adäquat einzuschätzen (Verster and Roth 2012).

Das Ziel dieser experimentellen Studie war es durch die Messung der Beweglichkeit des Handgelenkes das Bewegungsausmaß zu erhalten, welches zum Führen eines Pkws verwendet wird. Daraus kann möglicherweise unter Zuhilfenahme weiterführender Studien behandelnden Ärzten eine Grundlage geschaffen werden, an der die Fahrtauglichkeit eines Patienten eingeschätzt werden kann.

Literaturverzeichnis

ADAC, A. D. A.-C. e. V. R. (2015). Fahrzeuginsassen richtig sichern.

Andrews, J. G. and Y. Youm (1979). "A biomechanical investigation of wrist kinematics." J Biomech **12**(1): 83-93.

Brumfield, R. H. and J. A. Champoux (1984). "A biomechanical study of normal functional wrist motion." Clin Orthop Relat Res(187): 23-25.

Buchholz, B. and H. Wellman (1997). "Practical operation of a biaxial goniometer at the wrist joint." Hum Factors **39**(1): 119-129.

Chateauroux, E. and X. Wang (2010). "Car egress analysis of younger and older drivers for motion simulation." Appl Ergon **42**(1): 169-177.

Crisco, J. J., R. D. McGovern and S. W. Wolfe (1999). "Noninvasive technique for measuring in vivo three-dimensional carpal bone kinematics." J Orthop Res **17**(1): 96-100.

Dauncey, T., H. P. Singh and J. J. Dias (2017). "Electrogoniometer measurement and directional analysis of wrist angles and movements during the Sollerman hand function test." J Hand Ther **30**(3): 328-336.

Diamantopoulos, A. P., G. Rohde, I. Johnsrud, I. M. Skoie, M. Hochberg and G. Haugeberg (2012). "The epidemiology of low- and high-energy distal radius fracture in middle-aged and elderly men and women in Southern Norway." PLoS One **7**(8): e43367.

Edwards, M. R., M. C. Oliver and N. C. Hatrick (2009). "Driving with a forearm plaster cast: patients' perspective." Emerg Med J **26**(6): 405-406.

Foltran, F. A., L. C. Silva, T. O. Sato and H. J. Coury (2013). "Wrist electrogoniometry: are current mathematical correction procedures effective in reducing crosstalk in functional assessment?" Braz J Phys Ther **17**(1): 32-40.

Gandhi, M. J., D. Freitas, M. Lewis, L. Bolton, S. Bhasin, D. Leonard and A. Marsh (2014). "Who should answer the question: "Can I drive with this plaster cast?"". Surgeon **12**(1): 26-31.

Gehrmann, S. V., R. A. Kaufmann and Z. M. Li (2008). "Wrist circumduction reduced by finger constraints." J Hand Surg Am **33**(8): 1287-1292.

Gehrmann, S. V., J. Windolf and R. A. Kaufmann (2008). "Distal radius fracture management in elderly patients: a literature review." J Hand Surg Am **33**(3): 421-429.

Giddins, G. E. and A. Hammerton (1996). "'Doctor, when can I drive?': a medical and legal view of the implications of advice on driving after injury or operation." Injury **27**(7): 495-497.

Hobman, J. W. and S. J. Southern (2004). "Upper limb splints and the right to drive-- who decides?" Br J Plast Surg **57**(4): 354-357.

Jones, E. M., A. E. Barrow, N. J. Skordas, D. P. Green and M. S. Cho (2017). "The effects of below-elbow immobilization on driving performance." Injury **48**(2): 327-331.

Kalamaras, M. A., A. Rando and D. G. Pitchford (2006). "Driving plastered: who does it, is it safe and what to tell patients." ANZ J Surg **76**(6): 439-441.

Koo, K. O., D. M. Tan and A. K. Chong (2013). "Distal radius fractures: an epidemiological review." Orthop Surg **5**(3): 209-213.

Leonard, L., D. Sirkett, G. Mullineux, G. E. Giddins and A. W. Miles (2005). "Development of an in-vivo method of wrist joint motion analysis." Clin Biomech (Bristol, Avon) **20**(2): 166-171.

Li, Z. M., L. Kuxhaus, J. A. Fisk and T. H. Christophel (2005). "Coupling between wrist flexion-extension and radial-ulnar deviation." Clin Biomech (Bristol, Avon) **20**(2): 177-183.

Madea, B. (2012). "Verkehrsmedizin - Fahreignung, Fahrsicherheit, Unfallrekonstruktion." Deutscher Ärzteverlag.

Marshall, M. M., J. R. Mozrall and J. E. Shealy (1999). "The effects of complex wrist and forearm posture on wrist range of motion." Hum Factors **41**(2): 205-213.

Meskers, C. G., H. Fraterman, F. C. van der Helm, H. M. Vermeulen and P. M. Rozing (1999). "Calibration of the "Flock of Birds" electromagnetic tracking device and its application in shoulder motion studies." J Biomech **32**(6): 629-633.

Moritomo, H., E. P. Apergis, G. Herzberg, F. W. Werner, S. W. Wolfe and M. Garcia-Elias (2007). "2007 IFSSH committee report of wrist biomechanics committee: biomechanics of the so-called dart-throwing motion of the wrist." J Hand Surg Am **32**(9): 1447-1453.

Nissen, C. W., M. Westwell, S. Ounpuu, M. Patel, J. P. Tate, K. Pierz, J. P. Burns and J. Bicos (2007). "Adolescent baseball pitching technique: a detailed three-dimensional biomechanical analysis." Med Sci Sports Exerc **39**(8): 1347-1357.

Nunez, V. A. and G. E. Giddins (2004). "'Doctor, when can I drive?': an update on the medico-legal aspects of driving following an injury or operation." Injury **35**(9): 888-890.

Palmer, A. K., F. W. Werner, D. Murphy and R. Glisson (1985). "Functional wrist motion: a biomechanical study." J Hand Surg Am **10**(1): 39-46.

Robert, T., J. Causse, L. Denninger and X. Wang (2014). "A 3D analysis of the joint torques developed during driver's ingress-egress motion." Ergonomics **57**(7): 1008-1020.

Rod Fleury, T., B. Favrat, W. Belaieff and P. Hoffmeyer (2012). "Resuming motor vehicle driving following orthopaedic surgery or limb trauma." Swiss Med Wkly **142**: w13716.

Ryu, J. Y., W. P. Cooney, 3rd, L. J. Askew, K. N. An and E. Y. Chao (1991). "Functional ranges of motion of the wrist joint." J Hand Surg Am **16**(3): 409-419.

Safae-Rad, R., E. Shwedyk, A. O. Quanbury and J. E. Cooper (1990). "Normal functional range of motion of upper limb joints during performance of three feeding activities." Arch Phys Med Rehabil **71**(7): 505-509.

Salvia, P., L. Woestyn, J. H. David, V. Feipel, S. Van, S. Jan, P. Klein and M. Rooze (2000). "Analysis of helical axes, pivot and envelope in active wrist circumduction." Clin Biomech (Bristol, Avon) **15**(2): 103-111.

Sandvall, B. K. and J. B. Friedrich (2015). "Driving with upper extremity immobilization: a comprehensive review." J Hand Surg Am **40**(5): 1042-1047.

Smahel, Z. and A. Klimova (2005). "The effect of age and exercise on wrist mobility." Acta Chir Plast **47**(3): 92-97.

Stevenson, H. L., N. Peterson, C. Talbot, S. Dalal, A. C. Watts and I. A. Trail (2013). "An objective assessment of safety to drive in an upper limb cast." J Hand Surg Eur Vol **38**(3): 321-324.

Strafgesetzbuch "§ 315c Gefährdung des Straßenverkehr."

Straßenwesen, B. f. (2014). "Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahreignung." from https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrssicherheit/Fachthemen/BLL/Begutachtungsleitlinien.pdf?__blob=publicationFile&v=17. Zugriff zuletzt 03.12.2018

van Andel, C. J., N. Wolterbeek, C. A. Doorenbosch, D. H. Veeger and J. Harlaar (2008). "Complete 3D kinematics of upper extremity functional tasks." Gait Posture **27**(1): 120-127.

Verster, J. C. and T. Roth (2012). "Drivers can poorly predict their own driving impairment: a comparison between measurements of subjective and objective driving quality." Psychopharmacology (Berl) **219**(3): 775-781.

Von Arx, O. A., A. J. Langdown, R. A. Brooks and D. A. Woods (2004). "Driving whilst plastered: is it safe, is it legal? A survey of advice to patients given by orthopaedic surgeons, insurance companies and the police." Injury **35**(9): 883-887.

Yang, P. F., M. Sanno, G. P. Bruggemann and J. Rittweger (2012). "Evaluation of the performance of a motion capture system for small displacement recording and a discussion for its application potential in bone deformation in vivo measurements." Proc Inst Mech Eng H **226**(11): 838-847.

Youm, Y., R. Y. McMurthy, A. E. Flatt and T. E. Gillespie (1978). "Kinematics of the wrist. I. An experimental study of radial-ulnar deviation and flexion-extension." J Bone Joint Surg Am **60**(4): 423-431.

Danksagung

Zunächst danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr. Windolf für die Ermöglichung der Arbeit.

Ich danke von ganzem Herzen meinem unermüdlichen Betreuer Prof. Dr. S. Gehrman, der mir stets zu allen Tages- und Nachtzeiten zur Seite stand. Und dies mittlerweile in allen Lebenslagen.

Für die Korrektur des Manuskriptes und mehrfache, nicht selbstverständliche Hilfe auch in seiner Freizeit danke ich Dr. D. Latz.

Ebenso danke ich allen die mir bei der Fertigstellung der Arbeit geholfen haben, insbesondere meinen Probanden, ohne die die Arbeit ebenfalls nicht möglich gewesen wäre.

Zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich in allem ein Leben lang unterstützt und bestärkt haben und ohne die eine derartige Arbeit ohnehin nicht möglich gewesen wäre.

