
Aus dem Universitätsklinikum Düsseldorf
Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie

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

Doctor, when can I drive?
Systematische Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der
Orthopädie und Unfallchirurgie

Kumulative Habilitationsschrift
zur Erlangung der Venia Legendi
für das Fach Orthopädie und Unfallchirurgie
an der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Dr. med. David Latz
Düsseldorf, 2020

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Meiner Frau
Dr. med. Barbara Latz

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	3
Übersicht der beitragenden Originalarbeiten.....	4
Zusammenfassung	5
Einleitung.....	6
Mobilität.....	6
Stellenwert der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Rehabilitation orthopädisch und unfallchirurgischer Patienten	7
Grundlagen zur Begutachtung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie	9
Etablierung evidenzbasierter Parameter zur Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie.....	11
Biomechanische Messmethoden	13
Elektrogoniometrie zur Bestimmung des Bewegungsumfangs während des Führens eines Kraftfahrzeugs.....	15
Eigene Studien und Ergebnisse.....	17
1. Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei Erkrankungen des Bewegungs- und Stützapparates. Ein systematisches Review	17
2. Doctor, when can I drive? Die Beweglichkeit des Handgelenks beim Autofahren	17
3. Doctor, when can I drive? – Range of motion of the knee while driving a car	18
4. Doctor, when can I drive? – the range of elbow motion while driving a car.....	18
5. Doctor, when can I drive? – range of functional ankle motion during driving.....	19
Diskussion.....	20
Versuchsaufbau und Methodik	20
Entwicklung einer Methodik zur evidenzbasierten und systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie	23
Schlussfolgerung	27
Ausblick	29

Literaturverzeichnis	30
Abbildungsverzeichnis.....	38
Danksagung	39
Eidesstattliche Erklärung	41
Anlagen:.....	42
Beitragende Originalarbeiten	42
Lebenslauf.....	78

Abkürzungsverzeichnis

IV:	Individualverkehr
Pkw:	Personenkraftwagen
BMVI:	Bundesministerium für Verkehr und digitaler Infrastruktur
MIV:	Motorisierter Individualverkehr
BASt:	Bundesanstalt für Straßenwesen
EEG:	Elektroenzephalografie
FeV:	Fahrerlaubnis-Verordnung
ADAC:	Allgemeiner Deutscher Automobil-Clubs e.V.
STST:	Sit-to-stand-test

Übersicht der beitragenden Originalarbeiten

Latz D, Schiffner E, Schneppendahl J, Thalmann BH, Jungbluth P, Grassmann J et al. Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei Erkrankungen des Bewegungs- und Stützapparates. Ein systematisches Review [Evaluation of driving fitness in patients with musculoskeletal disorders : A systematic review]. Unfallchirurg 2019; 122: 697-705, DOI: 10.1007/s00113-018-0571-y

Latz D, Pfau S, Koukos C, Jungbluth P, Jansing G, Schiffner E et al. Doctor, when can I drive. Obere Extremität 2017; 12: 234-241, DOI: 10.1007/s11678-017-0426-0

Latz D, Schiffner E, Schneppendahl J, Klein K, Oezel L, Seiler LF et al. Doctor, when can I drive? - Range of motion of the knee while driving a car. Knee 2019; 26: 33-39, DOI: 10.1016/j.knee.2018.11.005

Latz D, Schiffner E, Schneppendahl J, Hilsmann F, Seiler LF, Jungbluth P et al. Doctor, when can I drive?-the range of elbow motion while driving a car. J Shoulder Elbow Surg 2019; 28: 1139-1145, DOI: 10.1016/j.jse.2018.11.053

Latz D, Schiffner E, Schneppendahl J, Grassmann JP, Jungbluth P, Kaufmann RA et al. Doctor, when can I drive? - Range of functional ankle motion during driving. Foot and ankle surgery : official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons 2020, DOI: 10.1016/j.fas.2019.12.006

Zusammenfassung

Die Nutzung eines Personenkraftwagens (Pkw) ist elementarer Bestandteil der persönlichen Mobilität in unserer Gesellschaft. Da viele Menschen sowohl privat, als auch beruflich auf ihren Pkw angewiesen sind, hat der Verlust der Fahreignung oder Fahrtauglichkeit oftmals einen maßgeblichen sozioökonomischen Einfluss. Insbesondere Bewegungseinschränkungen, als Folge von orthopädischen Erkrankungen oder Verletzungen, können die Ausführung essentieller Fahrmanöver so stark beeinträchtigen, dass eine sichere Teilnahme am Straßenverkehr nicht mehr gewährleistet werden kann. Obwohl im klinischen Alltag die Frage „Herr Doktor, wann darf ich wieder Autofahren?“ häufig gestellt wird, existiert bisher keine systematische Aufarbeitung, welche dem behandelnden Orthopäden und Unfallchirurgen als Entscheidungshilfe im klinischen Alltag dienen könnte. Da bei der Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit die Sicherheit im Straßenverkehr und Unfallprävention über sozioökonomischen Aspekten steht, wird der behandelnde Arzt im Zweifel immer eine Fahruntauglichkeit attestieren und somit eine möglicherweise vermeidbare unnötige Einschränkung der persönlichen Mobilität verursachen.

In den vorliegenden Arbeiten wurde erstmalig eine Methodik zur systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie anhand von evidenzbasierten, gelenkspezifischen Referenzwerten entwickelt. Mithilfe von Elektrogoniometern wurde gemessen, in welchem Bewegungsumfang gesunde Probanden einzelne Gelenke nutzen, während sie spezifische Fahrmanöver mit einem Pkw fahren. Die in den vorliegenden Arbeiten gemessenen gelenkspezifischen Bewegungsumfänge können von behandelnden Ärzten bei der Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit im klinischen Alltag genutzt werden. Basierend auf den vorliegenden Referenzwerten stellt die konventionelle Goniometrie somit eine wichtige Ergänzung bei der einheitlichen, transparenten und reproduzierbaren klinischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit im Fachgebiet der Orthopädie und Unfallchirurgie dar.

Einleitung

Mobilität

Mobilität ist ein Grundbedürfnis des Menschen und stellt die Grundlage für ein gesundes und selbstbestimmtes Leben dar. Der Individualverkehr (IV) ermöglicht es, durch die Nutzung von Pkw, Motorrädern, Booten oder Flugzeugen, über die Grenzen der Biologie hinaus mobil zu sein.

Die Deutschen sind ein mobiles Volk. Laut einer Statistik vom Bundesministerium für Verkehr und digitaler Infrastruktur (BMVI) wurden im Jahr 2017 täglich 3,214 Milliarden km von den Deutschen zurückgelegt²⁷. Trotz politischer Bemühung zu Gunsten öffentlicher Verkehrsmittel bleibt in Deutschland im Jahr 2017 weiterhin der motorisierte Individualverkehr (MIV) und insbesondere der Pkw, mit einem Anteil zu drei Vierteln an allen Personenkilometern, das dominierende Fortbewegungsmittel^{26,27}. Insbesondere in ländlichen Regionen stellt der Pkw das wichtigste Fortbewegungsmittel (90% der Haushalte haben einen Pkw) dar²⁷. Darüber hinaus gibt es in Deutschland mehr Pkw als Haushalte (1,1 Pkw pro Haushalt), was die Rolle des Pkw und des Individualverkehrs zusätzlich betont²⁷.

Die Erhaltung und Wiederherstellung von Bewegung und persönlicher Mobilität ist die Kernaufgabe der Orthopädie und Unfallchirurgie. Die Beurteilung der Fahrtauglichkeit und Wiederherstellung eines Patienten zur sicheren Teilnahme am Individualverkehr stellt unter orthopädischen und unfallchirurgischen Gesichtspunkten die Wiederherstellung der „Mobilität zur erweiterten Individualmobilität“ dar. Die in den vorliegenden Arbeiten entwickelte Methodik zur systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit im Fachgebiet der Orthopädie und Unfallchirurgie ist eine wichtige Ergänzung in der transparenten Versorgung und Beurteilung von Patienten mit muskuloskelettalen Erkrankungen.

Stellenwert der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Rehabilitation orthopädisch und unfallchirurgischer Patienten

Die berufliche Rehabilitation von Unfallverletzten und Patienten mit Erkrankungen des Muskel-Skelettsystems hat einen maßgeblichen sozioökonomischen Stellenwert in der Bundesrepublik Deutschland erlangt³⁴.

Seit Jahren ist der höchste Anteil der Arbeitsunfähigkeitszeiten in Deutschland akuten und chronischen Erkrankungen des Bewegungs- und Halteapparates geschuldet⁴¹. Das Bundesgesundheitsministerium gibt jährlich statistische Auswertungen der Arbeitsunfähigkeiten in Fälle und Tage nach Alters- und Krankheitsartengruppen heraus, welche auf den Datenbanken der gesetzlichen Krankenversicherungen basieren¹⁷. Auf Platz Nr. 1 der häufigsten Ursachen für Arbeitsunfähigkeit 2017 ist die Kategorie *XIX. Verletzungen, Vergiftungen und bestimmte andere Folgen äußerer Ursachen* mit 514.155.445 Arbeitsunfähigkeitstagen, gefolgt von der Kategorie *XIII. Krankheiten des Muskel-Skelett-Systems und des Bindegewebes* mit 132.690.974 Arbeitsunfähigkeitstagen. Somit stellen unfallchirurgische (Nr. 1) und orthopädische (Nr. 2) Krankheitsbilder die statistisch häufigste Ursache für eine Arbeitsunfähigkeit dar. Erst mit großem Abstand folgt Nr. 3 *V. Psychische Verhaltensstörungen* mit 92.383.020 Arbeitsunfähigkeitstagen.

In unserer Gesellschaft sind viele Menschen privat und insbesondere beruflich auf ihren Pkw und somit auf ihre Fahrtauglichkeit angewiesen²⁷. In Deutschland sind 38 Prozent aller Personenkilometer auf eine berufsbedingte Wegstrecke zurückzuführen und der Pkw-Anteil ist bei diesen dienstlichen Wegen mit zwei Dritteln besonders hoch^{27,47}. Neben Berufskraftfahrern kann daher eine nicht unbeträchtliche Dunkelziffer an Arbeitsunfähigkeitstagen durch orthopädische und unfallchirurgische Krankheitsbilder basierend auf einer Fahrtauglichkeit angenommen werden. Die Fahrtauglichkeit hat somit direkten als auch indirekten sozioökonomischen Einfluss. Im Rehabilitations-Management wird daher die Fahreignung und Fahrtauglichkeit, als mögliche *conditio sine qua non* und Nadelöhr zur Teilhabe am Arbeitsleben in alter Tätigkeit, stets mit einkalkuliert³⁴.

In der Sportorthopädie und im Leistungssport werden in der Rehabilitation Therapieverfahren häufig unter dem Begriff "*return to sport*" verglichen, um nicht nur eine möglichst rasche strukturelle Heilung des Gewebes, sondern eine vollständige, sichere, und den Ansprüchen entsprechende funktionelle Wiederherstellung zu erreichen⁴⁴. Um den Zeitpunkt der wieder zu erwartenden Fahreignung und Fahrtauglichkeit nach muskuloskelettalen Erkrankungen und Verletzungen besser definieren zu können sollte, in Analogie zum Begriff "*return to sport*", in der Rehabilitation orthopädischer und unfallchirurgischer Patienten der Begriff „*return to driving*“ genutzt werden. Es sollte jedoch vorausgesetzt werden, dass die Prävention von Unfällen und die Sicherheit im Straßenverkehr oberste Priorität hat^{42,43}.

Grundlagen zur Begutachtung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie

In Deutschland ist nach §2 Abs. 4 StVG die Fahreignung definiert als: „Geeignet zum Führen von Kraftfahrzeugen ist, wer die notwendigen körperlichen und geistigen Anforderungen erfüllt und nicht erheblich oder nicht wiederholt gegen verkehrsrechtliche Vorschriften oder gegen Strafgesetze verstoßen hat...“. Diese Fahreignung muss definitionsgemäß von der Fahrtauglichkeit abgegrenzt werden. Fahrtauglichkeit beschreibt eine situationsbezogene und momentane, somit zumeist temporäre Fähigkeit, ein Fahrzeug ordnungsgemäß zu führen. Fahruntauglich kann somit eine an sich fahrgerechte Person durch äußere Umstände sein (Alkohol-, Medikamenteneinfluss, schmerzhafte Bewegungseinschränkungen durch Verletzungen des Bewegungsapparates, etc.).

Zur Beurteilung der Fahreignung gibt die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Auftrag des BMVI Leitlinien in fachspezifischen Arbeitsgruppen heraus, welche den jeweiligen Fachdisziplinen als Entscheidungshilfe dienen. Aus dem Formenkreis der neurologischen Krankheitsbilder steht beispielsweise im Kapitel 3.9.6 *Epileptische Anfälle und Epilepsien (Stand 24. Mai 2018)*: "Nach einem unprovokierten erstmaligen Anfall kann die Kraftfahreignung nach einer anfallsfrei gebliebenen Beobachtungszeit von 6 Monaten wieder bejaht werden, wenn die fachneurologische Abklärung (inkl. EEG und Bildgebung) keine Hinweise auf ein grundsätzlich erhöhtes Anfallsrisiko im Sinne einer beginnenden Epilepsie ergeben hat..."¹⁸. Aus dem Formenkreis der kardiologischen Krankheitsbilder steht analog im Kapitel 3.4.4 *Koronare Herzkrankheit (Stand 24. Mai 2018)*: "Nach komplikationslosem Verlauf (LV-Ejektionsfraktion > 35 %) ist die Fahreignung nach Entlassung aus der Klinik gegeben..."¹⁸. Aus dem Formenkreis der orthopädischen und unfallchirurgischen Krankheitsbilder fehlen solche Angaben in den Leitlinien völlig. So steht lediglich im Kapitel 3.3 *Bewegungsbehinderungen (Stand 24. Mai 2018)*: "...Nach FeV werden die medizinisch-psychologischen Untersuchungen in der Begutachtungsstelle für Fahreignung (§ 66 FeV), früher amtlich anerkannte Medizinisch-Psychologische Untersuchungsstelle, durchgeführt..."¹⁸.

Obwohl Verletzungen und Erkrankungen des Bewegungsapparates die häufigste Ursache einer Arbeitsunfähigkeit¹⁷ und eine häufige Ursache einer erloschenen Fahreignung und Fahruntauglichkeit darstellen, gibt es bisher keine systematische Aufarbeitung, welche dem behandelnden Orthopäden und Unfallchirurgen als Entscheidungshilfe zur Verfügung stehen würde. Im Zweifelsfall wird der behandelnde Arzt zu früh eine Fahruntauglichkeit attestieren und somit eine vermeidbare unnötige Einschränkung der persönlichen Mobilität verursachen, da in der Güterabwägung die Sicherheit des Straßenverkehrs und die Prävention von Unfällen^{42,43} über sozioökonomischen Aspekten steht. Selbst bei Vorliegen der häufigsten Verletzungen (z.B. distale Radiusfrakturen) besteht gemäß der aktuellen Leitliniengrundsätze die einzige Alternative in einer kostenintensiven und individuellen Begutachtung, welche im Rahmen einer Fahreignungstestung initiiert werden kann. Die aktuellen Leitlinien werden somit den Bedürfnissen nach einer effizienten Beurteilung der Fahrtauglichkeit im orthopädischen und unfallchirurgischen Alltag nicht gerecht.

Zur besseren und im Alltag umsetzbaren Beurteilung der Vielzahl an Krankheitsbildern in der Orthopädie und Unfallchirurgie sollte ein evidenzbasierter und systematischer Ansatz, nach denen einheitlich und reproduzierbar beurteilt werden kann, gewählt werden.

Etablierung evidenzbasierter Parameter zur Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie

Im Gegensatz zu den überarbeiteten Kapiteln der Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahreignung aus beispielsweise den Fachgebieten der Neurologie oder Kardiologie existiert im Fachgebiet der Orthopädie und Unfallchirurgie noch keine verbindliche Systematik. Diese Tatsache ist der Komplexität des Bewegungsapparates und der engen Beziehung zwischen motorischer Kontrolle und dem Kraftfahrzeug geschuldet. Auch wenn es beispielsweise gleichartige Frakturmorphologien im *loco typico* am distalen Radius gibt⁵⁴, so kann die Ausprägung der später vorliegenden Symptome von völliger funktioneller Unbeeinträchtigung bis hin zu erheblichen, dauerhaften funktionellen Einschränkungen des Handgelenks reichen. Durch diese hohe Varianz des Behandlungsergebnis bei gleicher Verletzungsentität erscheint es somit nicht zielführend, Krankheitsentitäten aus dem Gebiet der Orthopädie und Unfallchirurgie sowie postoperative Zustände aufzulisten und daran die "return to drive" Zeit abzuschätzen, wie es in einer Vielzahl vorausgehender Studien durchgeführt wurde^{1,19,37,45,55,57,61,62}. Für den behandelnden Orthopäden und Unfallchirurgen zählen der funktionelle Ist-Zustand und die einfache Beurteilung, ob sich die gemessenen Parameter mit experimentell gemessenen Werten, bei denen eine Fahrtauglichkeit hochwahrscheinlich anzunehmen ist, decken.

Im berufsgenossenschaftlichen Gutachterwesen werden Arbeitsunfälle basierend auf Begutachtungsempfehlungen, welche ihren Fokus auf eine erlittene Funktionseinschränkung (Bewegungsumfang einzelner Gelenke) setzen, beurteilt, um eine qualifizierte medizinische und sachgerechte Entschädigung zu gewährleisten^{2,25}. Dieses Vorgehen hat sich bewährt, da der kleinste gemeinsame Nenner aus der Vielzahl der orthopädischen und unfallchirurgischen Krankheits- und Verletzungsentitäten die Beurteilung des funktionellen Ist-Zustandes ist, welcher sich vereinfacht aus den gelenkbezogenen Parametern a) Bewegungsumfang und b) Kraft zusammensetzt. Punkt a) Bewegungsumfang ist jedoch im Gegensatz zu b) Kraft in Zeiten von Fahrassistenten und Servolenkungen, welche in nahezu allen neuen Kraftfahrzeugen verbaut sind, bezüglich der Fahrtauglichkeit als maßgebliche Variable anzusehen. Sollten dem

behandelnden Orthopäden oder Unfallchirurgen Defizite von a) oder b) auffallen, sollte ein weiterer Parameter c) Kompensationsmechanismen der angrenzenden Gelenke überprüft werden. Diesem vereinfachten Modell geht voraus, dass neurologische Koordinationsdefizite oder eine Schmerzsymptomatik zuvor ausgeschlossen wurden.

Um in Zukunft eine systematische und für alle Beteiligten transparente Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit zu ermöglichen, ist die Etablierung einer Systematik notwendig. Die vorliegenden Arbeiten haben sich zunächst auf den wichtigsten Parameter a) Bewegungsumfang in Analogie zum sogenannten "*functional arc*", welcher den Bewegungsumfang des Ellenbogens für die meisten Aktivitäten des täglichen Lebens beschreibt³⁸, konzentriert. Hierbei soll zunächst geklärt werden, in welchem Bewegungsumfang gesunde Probanden einzelne Gelenke nutzen während sie ein Kraftfahrzeug im öffentlichen Straßenverkehr führen oder während speziell ausgewählte Manöver gefahren werden. Die ausgewählten Strecken und Manöver wurden in Rücksprache mit Trainern des Allgemeinen Deutschen Automobil-Clubs e.V. (ADAC) erstellt und entsprechen denen, die bei einer Fahrprüfung zur Erlangung der Fahrerlaubnis genutzt werden. Somit sollte ein realitätsnahes Abbild der Fahreignung gegeben sein. Die in vorausgehenden Studien oft praktizierte Testung mittels Fahrsimulatoren und Auswertung anhand von Bremsreaktionszeiten und Bremskraft^{1,19,37,45,55,57,61,62} sind genauer betrachtet ein gegenüber der Fahrprüfung deutlich schärferes Verfahren und somit Selektionskriterium, welches von einem gesunden Fahrerlaubnisbewerber bisher nicht verlangt wird.

In den vorliegenden Arbeiten soll der Bewegungsumfang von gesunden Probanden bestimmt werden. Durch die Bestimmung dieses Bewegungsumfangs sollte es im klinischen Alltag in Zukunft möglich sein, mit Hilfe von konventionellen Goniometern eine bessere Orientierung bezüglich Fahreignung und Fahrtauglichkeit zu erhalten und dem Patienten verzichtbare zeit- und kostenintensive Begutachtungen zu ersparen.

Biomechanische Messmethoden

Zur Etablierung einer systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie soll zunächst geklärt werden, in welchem Bewegungsumfang gesunde Probanden einzelne Gelenke nutzen, während sie ein Kraftfahrzeug führen.

Zur experimentellen Erfassung des Bewegungsumfangs einzelner Gelenke während des Führens eines Kraftfahrzeuges bieten sich folgende Versuchsaufbau-Optionen an: 1. Die Messungen erfolgen an Probanden, die sich in einem stationären Fahrsimulator unter hochstandardisierten jedoch computergestützten und simulierten Bedingungen befinden^{35,48,53}. 2. Die Messungen erfolgen an Probanden, die sich in einem Pkw auf einem standardisierten Testgelände unter realistischen Bedingungen befinden. Für ein realitätsnahes Abbild der Fahrweise eines gesunden Probanden wurde in den vorliegenden Experimenten Probanden während des Führens eines Kraftfahrzeuges sowohl auf Stadtstraßen, Landstraßen, Autobahnen sowie auf einem Fahrtstgelände beobachtet.

Für die Bewegungsanalyse haben sich in den letzten Jahren Bewegungsanalysesysteme bestehend aus Inertialsensoren, Kamerasystemen oder speziellen Elektrogoniometern etabliert⁶⁵. Jedes dieser Systeme weist spezifische Vor- und Nachteile auf^{5,20}.

Der Einsatz von inertialen Messeinheiten erlaubt mit Hilfe von Gyroskopen, Akzelerometern und Magnetometern eine räumlich-zeitliche Bewegungsanalyse durchzuführen. Durch die Größe der Sensoren ist es darüber hinaus möglich auch außerhalb von Bewegungsanalyzelaboren Messungen durchzuführen (z.B. Xsens, Firma Xsens Technologies B.V., Niederlande, RehaGait Analyzer Pro, Firma Hasomed GmbH, Deutschland). Auf Basis der gemessenen Beschleunigung (Akzelerometer) und der Winkelgeschwindigkeit (Gyroskope) ist es möglich Bewegungsgeschwindigkeit, Beschleunigung und Winkelveränderungen einzelner Gelenke zu analysieren.

Video-Bewegungsanalyse-Systeme (z.B. Vicon Cameras, Firma Vicon Motion Systems Ltd., United Kingdoms) arbeiten mit Hilfe von Kameras und Sensoren, welche in diesem Kontext Marker genannt werden. Die Daten der verschiedenen Kameras werden verrechnet und so die dreidimensionale Position der Marker ermittelt. Hochwertige Video-Bewegungs-Analyse-Systeme sind in der Regel fest in einem Bewegungslabor installiert und optimal kalibriert. Somit würde sich die Bewegungsanalyse in einem fest installierten Simulator anbieten.

Ausschlaggebend für den klinischen Nutzen ist, dass die gemessenen Werte im klinischen Alltag mit einfachen Mitteln reproduzierbar sind oder eine signifikante Korrelation zu Werten von im klinischen Alltag zur Verfügung stehenden Messinstrumenten haben. Im orthopädischen und unfallchirurgischen Alltag ist dies das kostengünstige und in der Regel flächendeckend verfügbare konventionelle Goniometer.

Elektrogoniometrie zur Bestimmung des Bewegungsumfangs während des Führens eines Kraftfahrzeugs

In den vorliegenden Arbeiten wurde zur Bestimmung der Bewegungsumfänge der einzelnen Gelenke, welche beim Führen eines Kraftfahrzeugs genutzt werden, ein Bewegungsanalysesystem der Firma Biometrics (Twin Axis Goniometer Typ SG 65 und SG 110A und Single Axis Torsionmeter type Q 150, Firma Biometrics Ltd. UK) genutzt. Elektrogoniometer ermöglichen die kontinuierliche Winkelmessung des jeweiligen Gelenks in zwei Hauptachsen auf der Grundlage von Spannungsänderungen entlang der Länge eines Drahtes zwischen zwei Endblöcken. Die Endblöcke sind so konstruiert, dass nur Winkeländerungen und keine linearen Bewegungen gemessen werden (**Abbildung 1a**). Die verwendeten Torsionmeter messen die Pronation / Supination basierend auf der relativen axialen Drehung zwischen den zwei Endblöcken (**Abbildung 1b**). Im Gegensatz zu den Goniometern bleibt bei den Torsionmetern die Winkelmessung konstant, wenn der Draht verbogen wird.

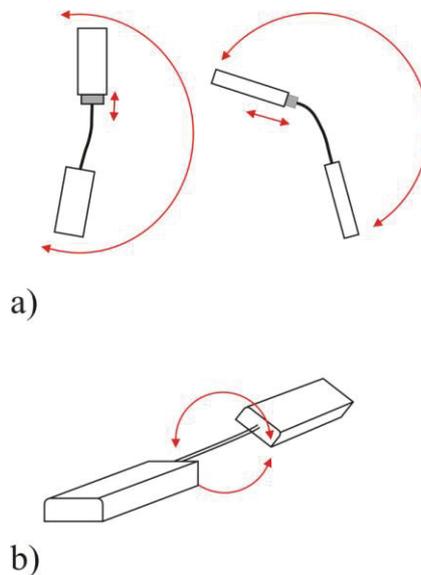


Abbildung 1 a) Messweise der biaxialen Elektrogoniometer (Twin Axis Goniometer Typ SG 65 und SG 110A, Firma Biometrics Ltd. UK) von oben und von der Seite. b) Messweise der Elektrotorsionmeter (Single Axis Torsionmeter type Q 150, Firma Biometrics Ltd. UK). Modifiziert mit freundlicher Genehmigung von Biometrics Ltd³.

Je nach Versuchsaufbau wurde den Probanden, vor Fahrtritt, in standardisierte Weise Elektrogoniometer an die Hand-, Ellenbogen-, Hüft-, Knie- und Sprunggelenke angelegt (**Abbildung 2**). Während der Versuchsdurchführung wurden die Winkelmessungen der Goniometer und Torsiometer kontinuierlich an ein mobiles Computersystem übertragen, in der Software Datalog (Biometrics, Ltd. UK) visualisiert und durch den Versuchsleiter ständig überprüft.



Abbildung 2 Studienteilnehmer mit angelegten Elektrogoniometern am rechten und linken Handgelenk und Ellenbogen während des Führens eines Kraftfahrzeugs auf dem Testgelände des ADAC. Um eine Bewegungseinschränkung zu simulieren wurde in diesem Versuchsaufbau zusätzlich eine Hartrahmenorthese am rechten Ellenbogen angelegt. Mit freundlicher Genehmigung des Probanden (Eigene Darstellung).

Im Gegensatz zu den zuvor dargestellten Messmethoden bietet die Elektrogoniometrie den Vorteil, dass die mit ihr gemessenen Werte im klinischen Alltag mithilfe von konventionellen Goniometern kostengünstig nachgemessen werden können und in nahezu jeder Praxis zur Verfügung stehen.

Eigene Studien und Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Arbeiten ist die erstmalige Entwicklung einer Methodik zur systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie anhand von gelenkspezifischen Referenzwerten²⁸⁻³². Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeiten wurden für die strukturierte Überarbeitung der Begutachtungsleitlinien der BAST in den Jahren 2018, 2019 und 2020 genutzt. Anhand der überarbeiteten Leitlinien können behandelnde Ärzte Bewegungseinschränkungen und die Auswirkung auf die Fahrtauglichkeit besser einschätzen.

1. Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei Erkrankungen des Bewegungs- und Stützapparates. Ein systematisches Review

Im Rahmen eines systematischen Reviews erfolgte eine Analyse der aktuellen Studienlage sowie bereits vorhandener Handlungsorientierungen bei der Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit nach orthopädischen und unfallchirurgischen Erkrankungen. Bisher existieren keine einheitlichen Empfehlungen oder eine systematische Beurteilung auf derer Orthopäden und Unfallchirurgen eine Fahrtauglichkeit beurteilen können. Insbesondere für die obere Extremität stellen sich klare Empfehlungen als schwierig dar, da im Gegensatz zur unteren Extremität, kaum einheitliche und im klinischen Alltag verwertbare Tests zur Prüfung der Fahrtauglichkeit existieren³².

2. Doctor, when can I drive? Die Beweglichkeit des Handgelenks beim Autofahren

Mit Hilfe von Elektrogoniometern wurde an 20 gesunden Probanden eine 3D-Bewegungsanalyse am rechten Handgelenk während des Führens eines Kraftfahrzeugs auf einer standardisierten Strecke durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass das maximale aktive Bewegungsausmaß in den Hauptbewegungsachsen eines gesunden Handgelenks beim Führen eines Kfz vollständig genutzt wird. Ferner konnte gezeigt

werden, dass bestimmte Extrempositionen regelmäßig zu finden sind und besonders die Extension und Ulnarabduktion signifikant häufiger und über das aktive Bewegungsausmaß hinaus beim Führen eines Kraftfahrzeugs genutzt werden²⁸.

3. Doctor, when can I drive? – Range of motion of the knee while driving a car

An 20 gesunden Probanden wurde mit Hilfe von Elektrogoniometern das Bewegungsausmaß der Kniegelenke (Flexion / Extension) beim Führen eines Kraftfahrzeugs auf Stadtstraßen, Landstraßen und der Autobahn gemessen. Für die rechte Seite konnte ein Bewegungsumfang von 40 bis 80° Flexion, für die linke Seite von 20 bis 85° Flexion beobachtet werden. Darüber hinaus konnte eine signifikant höhere Flexion und ein signifikant größeres Bewegungsausmaß im linken Kniegelenke festgestellt werden, was auf die Nutzung der Kupplung zurückgeführt wurde³¹.

4. Doctor, when can I drive? – the range of elbow motion while driving a car

Mittels Elektrogoniometern und Torsiometern wurde an 20 gesunden Probanden das Bewegungsausmaß der Ellenbogen (Flexion / Extension, Pronation / Supination) während des Führen eines Kraftfahrzeugs auf Stadtstraßen, Landstraßen und auf der Autobahn bestimmt. Die Studie ergab einen funktionellen Bogen des Ellenbogens mit I. Extension / Flexion: Rechts: 0-5-105°; Links: 0-20-95° und II. Pronation / Supination: Rechts: 45-0-35°, Links: 45-0-40° beim Führen eines Kraftfahrzeugs. Der gemessene Bewegungsumfang beim Autofahren fällt im Vergleich zum sogenannten "functional arc", welcher bei Aktivitäten des täglichen Lebens mit einer Extension / Flexion von 0-30-130° und einer Pronation / Supination von 50-0-50° genutzt wird, geringer aus³⁰.

5. Doctor, when can I drive? – range of functional ankle motion during driving

Das Bewegungsausmaß der Sprunggelenke (Plantarflexion / Dorsalextension, Pronation / Supination) wurde mit Hilfe von Elektrogoniometern und Torsiometern gemessen, während eine standardisierte Strecke auf dem ADAC Gelände mit fünf unterschiedlichen Fahrmanövern (I. Fahrzeugbeschleunigung und Gangwechsel, II. Plötzliches Ausweichen, III. Wendemanöver, IV. Akutes Wendemanöver, V. Fahrzeugbeschleunigung und Notfallbremsmanöver) insgesamt 30-mal gefahren wurde. Die Studie ergab ein Bewegungsausmaß von: Rechts: 13 ± 9 / $22 \pm 7^\circ$ Plantarflexion / Dorsalextension mit $15 \pm 7^\circ$ Supination und minimaler Pronation; Links 19 ± 10 / $17 \pm 10^\circ$ Plantarflexion / Dorsalextension mit $15 \pm 7^\circ$ Supination und ebenfalls minimaler Pronation. Die signifikant höhere Extension rechts wurde auf den Wechsel zwischen Gas und Bremspedal zurückgeführt und beschreibt die Notwendigkeit einer freien Extension zum Führen eines Kraftfahrzeugs. Die signifikant höhere Flexion und das signifikant größere Bewegungsausmaß des linken Sprunggelenks kann auf die Nutzung der Kupplung zurückgeführt werden²⁹.

Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeiten war vornehmlich die Etablierung einer Methodik, die es behandelnden Orthopäden und Unfallchirurgen ermöglicht, Bewegungseinschränkungen und die Auswirkung auf die Fahreignung und Fahrtauglichkeit besser und für alle Beteiligten transparenter einschätzen zu können.

Versuchsaufbau und Methodik

Nach Analyse der bisherigen Studien und Referenzwerte³² erfolgten die Messungen an gesunden Probanden während des Führens eines Kraftfahrzeugs sowohl auf Stadtstraßen, Landstraßen, Autobahnen^{28,30,31} sowie auf einem Fahrtstgelände mit standardisierten Manövern²⁹. Die Elektrogoniometrie stellt in diesem Versuchsaufbau eine optimale Lösung dar, um Winkelmessungen einzelner Gelenke während des Führens eines Pkw zu messen. Konkurrierende Verfahren, wie die Messung mittels inertialen Messeinheiten oder optischen Trackingsystemen, bieten im Vergleich zur Elektrogoniometrie signifikante Nachteile. Bei inertialen Messeinheiten müssen Akzelerometer und Gyroskope während den Messungen in einem sich bewegenden Objekt (in diesem Fall Fahrer eines Pkw) mit Neutralsensoren gegengerechnet werden, damit nur die Relativbewegungen des Fahrers gemessen werden. Das Vorhandensein ferromagnetischer Materialien oder anderer magnetischer Quellen, wie sie im Pkw vorliegen, führt zudem zu einer starken Beeinträchtigung der Sensorgenauigkeit^{59,64}. Diese Artefakt-Risiken zeigen, dass inertielle Messeinheiten für die Messung der Gelenkbewegungen beim Autofahren nur bedingt geeignet sind. Als weitere Alternative bieten sich optische Trackingsysteme an⁴⁶. Bei passiven optischen Trackingsystemen zeigt sich jedoch die Problematik der Markerverdeckung mit nachfolgendem Tracking Verlust^{16,20}. Während eines Fahrversuches ist dieses Problem jedoch zu erwarten, da es durch Verdeckung der Beine unter dem Armaturenbrett sowie der Arme durch das Lenkrad zwangsläufig zu einer Verdeckungen der Marker während der Fahrt kommt⁵⁶. Optische Trackingsysteme sind außerdem gegenüber spiegelnden und reflektierenden Oberflächen, wie sie im Pkw in der Regel verbaut sind, Artefakt anfällig. Zur

Minimierung der zuvor genannten Problematik sind Video-Bewegungs-Analyse-Systeme daher in der Regel fest in einem Bewegungslabor installiert und auf die vorliegenden Bedingungen kalibriert. Somit würde sich die Bewegungsanalyse mittels optischen Tracking Systemen eher in einem fest installierten und optimal kalibrierten Fahrsimulator anbieten. Dementsprechend wurde in einer vorausgehenden Studie der Bewegungsumfang der oberen Extremität während einer Fahrsimulation mittels Trackingsystem gemessen⁴⁶. Kritisch ist in diesem Kontext jedoch, ob die gemessenen Werte von Rawal und Kollegen im klinischen Alltag, zum Beispiel mittels konventionellen Goniometern, nachgemessen und verwertet werden können.

Zusammenfassend gibt es bisher keine Studien, welche den Bewegungsumfang der Gelenke beim Führen eines realen Pkw mittels Elektrogoniometrie untersucht haben.

Die Publikationen 2.-4.^{28,30,31} stellen eine quantitative Analyse des Bewegungsumfangs des Handgelenks, Ellenbogens und des Kniegelenks während des Führens eines Pkw durch gesunde Probanden dar. Unter normalen Bedingungen wird somit, in der Summe aller Handlungen, der gemessene Bewegungsumfang des jeweiligen Gelenks genutzt. Auf dieser Basis können jedoch keine Aussagen zur Qualität der getroffenen Bewegungen und Handlungen getroffen werden. Möglicherweise gewährleisten insbesondere seltene Bewegungen, welche ein paar Prozent aller gemessenen Bewegungen ausmachen, in Gefahrensituationen (zum Beispiel das kraftvolle Treten der Bremse und der Kupplung bei einer Gefahrenbremsung oder das ruckartige Lenken bei einem Ausweichmanöver) die sichere Teilnahme am Straßenverkehr. Um dem behandelnden Arzt dennoch eine medicolegal sichere Beurteilung der Patienten zu bieten wurden alle gemessenen Bewegungsumfänge in die Systematik übernommen und somit ein sehr konservatives Abbild der notwendigen Bewegungsumfänge erstellt. Demzufolge wird, basierend auf diesen Bewegungsumfängen, im Zweifel eine Fahruntauglichkeit bzw. weitere Begutachtung zu früh als zu spät ausgesprochen.

In der 5. Publikation²⁹ wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass in den Publikationen 2.-4.^{28,30,31} eine vornehmlich quantitative Analyse der Bewegungsumfänge erfolgt ist. Mit Hilfe des ADAC wurde daher der Bewegungsumfang der Gelenke während spezieller Fahrmanöver (Ausweichmanöver, Gefahrenbremsung, Slalom, Gangschaltung etc.) isoliert ausgewertet. Die auf dem

ADAC Testgelände gefahrenen Strecken beinhalten hierbei alle aktuell notwendigen Manöver aus den Fahrprüfungen zur Erlangung der Fahreignung nach §17 der Fahrerlaubnis-Verordnung (FeV). Somit besteht ein realitätsnahes Abbild der aktuell üblich geforderten praktischen Tests und damit einhergehend sollte ein reelles Abbild der notwendigen Bewegungsumfänge für die Fahreignung und Fahrtauglichkeit gegeben sein. Darüber hinaus eröffnet die isolierte Untersuchung und Auswertung spezieller Fahrmanöver die Möglichkeit einer besseren forensischen Unfallrekonstruktion. Sollte zum Beispiel ein missglücktes Ausweichmanöver zu einem Folgeschweren Unfall geführt haben, wäre es interessant zu wissen, ob der Fahrer vom Bewegungsumfang eines Gelenkes überhaupt in der Lage gewesen wäre, ein derartiges Manöver sicher auszuführen.

Entwicklung einer Methodik zur evidenzbasierten und systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit in der Orthopädie und Unfallchirurgie

Die Grenze, ab wann eine Fahreignung oder Fahrtauglichkeit bei orthopädischen und unfallchirurgischen Patienten nicht mehr gewährleistet werden kann, ist schwierig zu definieren. Viele vorausgehende Studien nutzen Fahrsimulatoren und beurteilen die Fahrtauglichkeit mit Hilfe von spezifischer Parametern wie die Bremsreaktionszeit oder Bremskraft^{6-12,21,23,24,45,50,51,55,58,62}. Solche Parameter bieten jedoch immer nur bedingte Interpretation über isolierte Teilaspekte. Interessanterweise gibt es bisher auch keine Studien, die eine Korrelation zwischen der Bremsreaktionszeit oder Bremskraft und einem erhöhten Unfallrisiko zeigen könnten. Darüber hinaus wird zum Beispiel die Bremskraft in der bisherigen Fahrprüfung nach §17 nicht abgefragt und würde somit ein Selektionskriterium darstellen, welches von Fahrerlaubnisbewerbern bisher nicht verlangt wird. Die Beurteilung der Fahrtauglichkeit über die Bremsreaktionszeit und Bremskraft lässt sich zudem im klinischen Alltag nicht individuell am Patienten überprüfen. Ob ein Patient, beispielweise vier Wochen nach Implantation einer Hüft-Totalendoprothese, eine normwertige Bremskraft und Bremsreaktionszeit aufweist und wieder am Straßenverkehr teilnehmen darf, kann anhand dieser Studien nur abgeschätzt werden. Dem individuellen Krankheits- und Genesungsverlauf, welcher in der Orthopädie und Unfallchirurgie signifikant unterschiedlich ausfallen kann, wird in diesem Fall nicht Rechnung getragen^{39,63}. In den aktuellen Studien fehlt, bei der Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit, somit eine wichtige Verbindung zwischen funktionellem Ist-Zustand und der zu erwartenden Fähigkeit ein PKW sicher im Straßenverkehr zu führen (**Abbildung 3**).

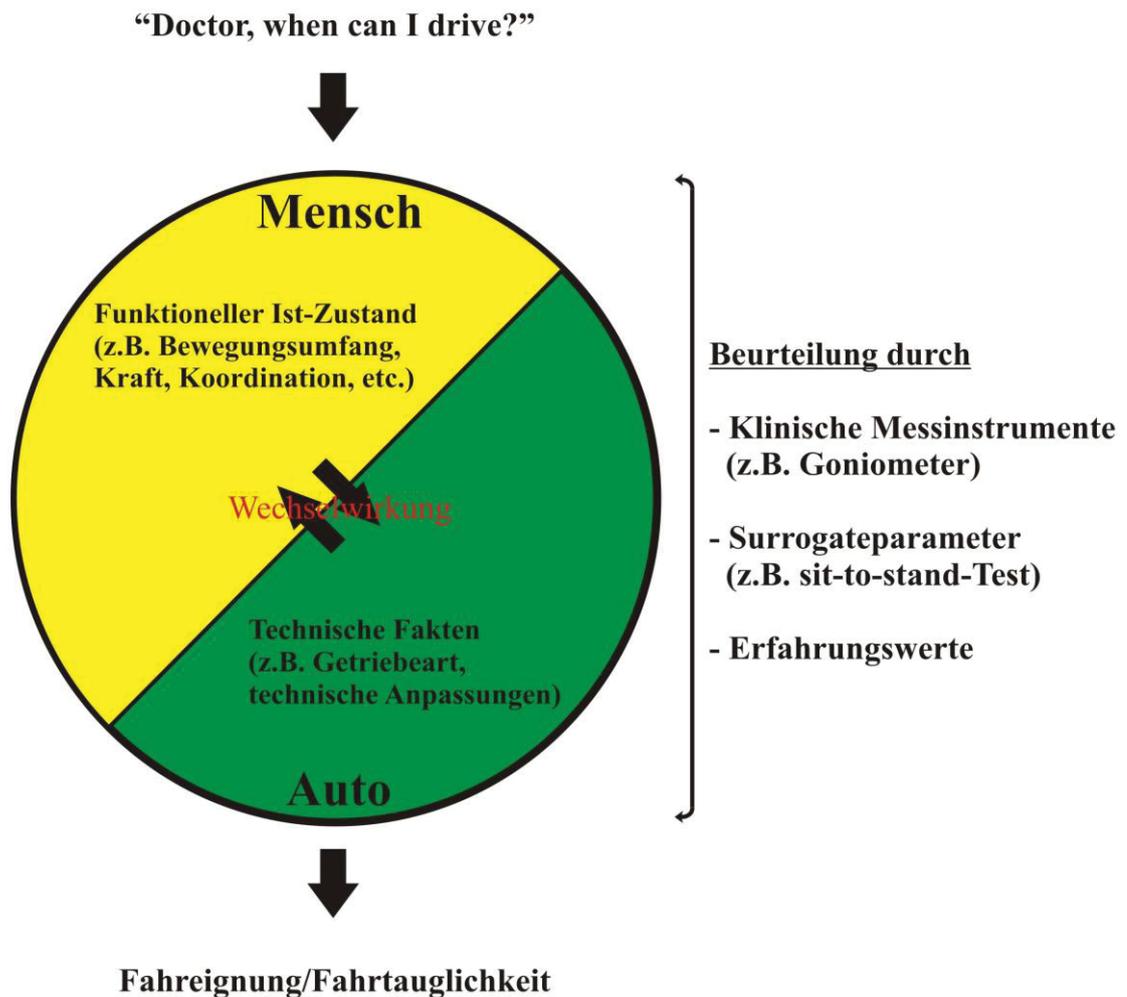


Abbildung 3 Flussdiagramm zur Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit (Eigene Darstellung).

Um den funktionellen Ist-Zustand eines Patienten im Hinblick auf die Fahreignung und Fahrtauglichkeit interpretieren zu können, müssen jedoch zuerst experimentell gemessene Referenzwerte der einzelnen Gelenke (Bewegungsumfang, Kraft, Koordination etc.) existieren. In den vorliegenden Arbeiten wurde daher der Bewegungsumfang der einzelnen Gelenke während des Führens eines Pkw von gesunden Probanden bestimmt. Durch die Bestimmung dieses „gesunden“ Bewegungsumfangs sollte es im klinischen Alltag in Zukunft möglich sein, Patienten mit Bewegungseinschränkungen einzelner Gelenke mit Hilfe von konventionellen Goniometern eine Orientierung bezüglich Fahreignung und Fahrtauglichkeit zu geben.

Basierend auf diesen Bewegungsumfängen kann in Zukunft eine erweiterte systematische Beurteilung etabliert werden. In **Abbildung 4** wird diese erweiterte systematische Beurteilung des Bewegungsumfangs am Ellenbogen beispielhaft dargestellt.

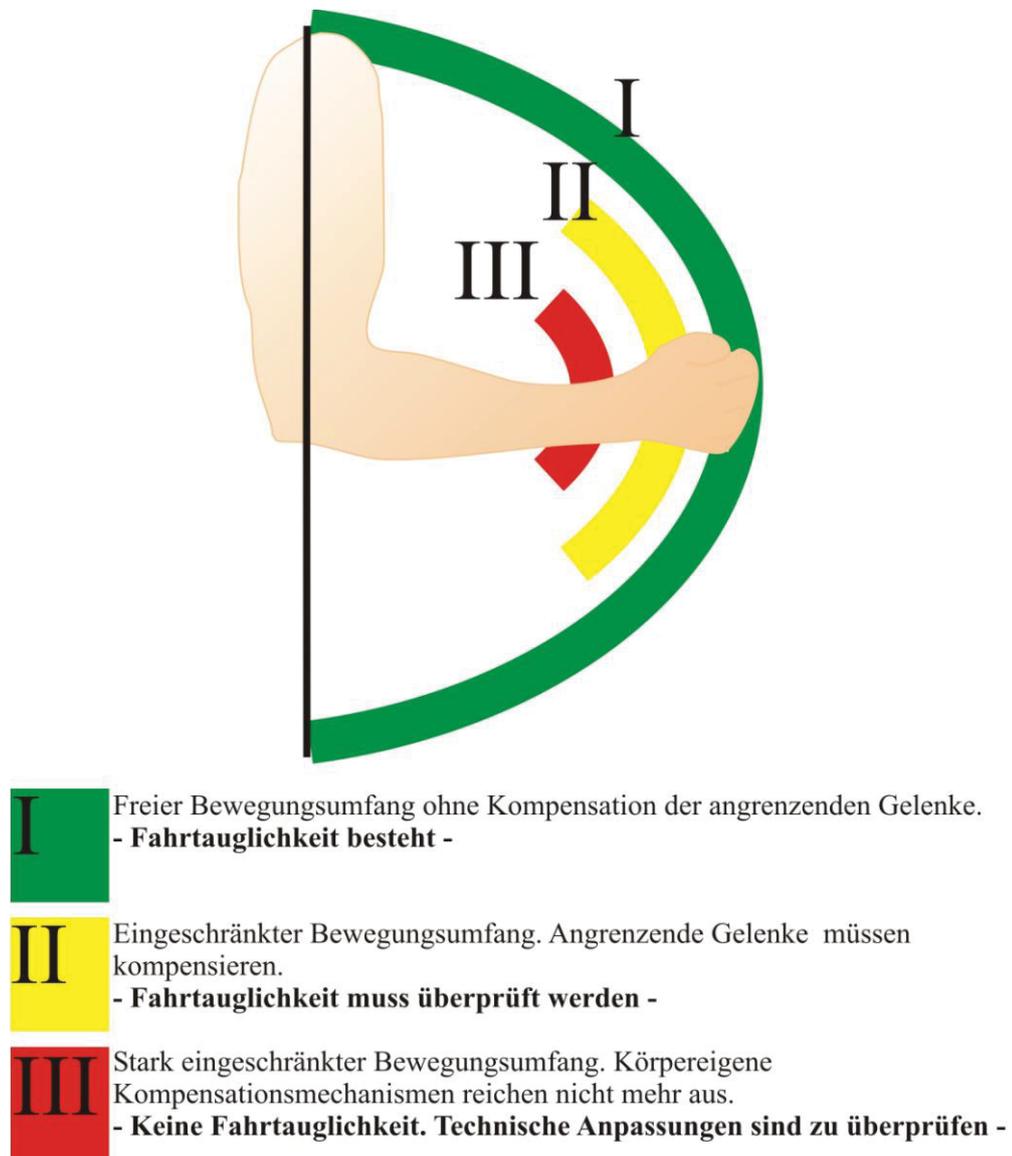


Abbildung 4 Schematische Illustration einer systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrttauglichkeit am Beispiel des Ellenbogens (Eigene Darstellung).

In den vorliegenden Arbeiten wurde der Bewegungsumfang von gesunden Probanden während des Führens eines Pkw (**Abbildung 4, I = grüner Bereich**) bestimmt. Die obere als auch untere Extremität kann vereinfacht als kinematische Kette bestehend aus Hand-, Ellenbogen- und Schultergelenk bzw. Sprung-, Knie- und Hüftgelenk angesehen werden^{33,60}. Es ist bekannt, dass bei Bewegungseinschränkung eines Gelenks zunächst eine Kompensation der kinematischen Kette über die angrenzenden Gelenke erfolgt¹⁴. Sollte ein Patient einen geringeren Bewegungsumfang als den in den vorliegenden Arbeiten gemessenen vorweisen, so ist zu testen, ob diese Einschränkung noch durch die angrenzenden Gelenke kompensiert werden kann (**Abbildung 4, II = gelber Bereich**). Der gelbe Bewegungsumfang II) ist derjenige, bei dem ein Kraftfahrzeug noch geführt werden kann, jedoch bereits Kompensationsmechanismen der angrenzenden Gelenke angenommen werden müssen, um dies zu ermöglichen. Patienten weichen somit in dieser kompensierten Fahrweise von ihren üblichen und eingprägten Bewegungsmustern ab. Bei diesen Patienten sollte der behandelnde Arzt einen besonderen Fokus auf die angrenzenden Gelenke legen. Sind diese auch in ihrer Bewegung eingeschränkt, sollte eine individuelle Begutachtung und Fahrprüfung erfolgen, da bisher noch keine evidenzbasierten Grenzwerte diesbezüglich vorliegen.

Der rot markierte Bereich (**Abbildung 4, III = roter Bereich**) ist der Bereich, in dem auch die körpereigenen Kompensationsmechanismen ausgereizt sind und nach Begutachtung der technischen Möglichkeiten (zum Beispiel Einbau eines Lenkradknaufs) maximal eine bedingte Fahreignung ausgesprochen werden kann. Bedingte Fahreignung bedeutet nach §2 Abs. 4 StVG: "...Ist der Bewerber auf Grund körperlicher oder geistiger Mängel nur bedingt zum Führen von Kraftfahrzeugen geeignet, so erteilt die Fahrerlaubnisbehörde die Fahrerlaubnis mit Beschränkungen oder unter Auflagen, wenn dadurch das sichere Führen von Kraftfahrzeugen gewährleistet ist."¹⁵. Dies setzt jedoch eine für den Patienten kostenintensive und individuelle Begutachtung durch den Arzt sowie durch einen Mitarbeiter des TÜV voraus.

Schlussfolgerung

In den vorliegenden Arbeiten wurde erstmalig die Methodik zur systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit im Fachgebiet der Orthopädie und Unfallchirurgie entwickelt.

Durch die in den vorliegenden Arbeiten gemessenen gelenkspezifischen Bewegungsumfänge kann eine direkte Messung des funktionellen Ist-Zustandes mit Hilfe von konventionellen Goniometern im klinischen Alltag erfolgen. Ergänzend hierzu können in Zukunft Surrogatparameter für den klinischen Alltag erarbeitet werden. Mittels Surrogatparameter können die vom Patienten zu erwartende Einschränkungen beim Autofahren, in Folge einer muskuloskelettalen Erkrankung, deutlich einfacher und schneller abgeschätzt werden. Interessanterweise findet sich in der Literatur bisher lediglich der sogenannte sit-to-stand-test (STST), welcher eine signifikante negative Korrelation zur Bremsreaktionszeit aufweist. Im STST muss der Patient so häufig wie möglich innerhalb von einer Minute zwischen sitzender und stehender Position wechseln^{13,40}. Abweichungen zum Standard können dann aus einer altersjustierten Tabelle abgelesen werden⁴. Einen exakten Grenzwert bezüglich Fahrtauglichkeit gibt es jedoch auch hier nicht.

Neben der direkten Messung mittels Goniometern wären für den klinischen Alltag eine schnelle Einschätzung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit mit einfachen klinischen Tests und Fragen wünschenswert. Für die obere Extremität bietet sich ein Vergleich der gemessenen Bewegungsumfänge beim Führen eines Pkw mit alltäglichen Handlungen (Haare Kämmen, Zähne putzen, Schuhe zubinden, etc.) an. Hierdurch kann ein Inventar an Surrogat-Handlungen erstellt werden. Aus vorausgehenden Studien ist bekannt, dass zum Binden der Schuhe eine Flexion von ca. 27° und für einen Schürzengriff von ca. 100° im Ellenbogen notwendig sind⁵². Sollten Patienten beides nicht oder nur mit Einschränkungen demonstrieren können, sollte vom Führen eines Pkw, zumindest in Hinblick auf die Beweglichkeit des Ellenbogens, abgeraten werden und im Zweifel eine individuelle Begutachtung und Fahrtestung erfolgen (Bewegungsumfang des Ellenbogens beim Autofahren: Extension / Flexion: Rechts: 0-5-105°; Links: 0-20-95°)³⁰. Für das kämmen der Haare wird in der Literatur eine Flexion im Handgelenk

von ca. 40° und für das Öffnen einer Flasche eine Extension von ca. 40° angegeben⁴⁹. Sollten Patienten Beschwerden diesbezüglich äußern, sollten Sie darüber aufgeklärt werden, dass das sichere Führen eines Pkw im Straßenverkehr beeinträchtigt sein könnte (Bewegungsumfang des rechten Handgelenks beim Autofahren: Flexion: $46,6 \pm 12,7^\circ$, Extension: $73,0 \pm 16,6^\circ$)²⁸.

Durch die zuvor genannten orientierenden klinischen Tests und Fragen („Sind Sie in der Lage die Schuhe zu binden? Können Sie sich selbstständig kämmen? Ist ein Schürzen und Nackengriff möglich?“) kann somit eine erste grobe Abschätzung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit erfolgen.

Ausblick

Die Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit bedeutet vor allem die Beurteilung der Wechselwirkung zwischen Mensch und Maschine (**Abbildung 3**). Die stetige Weiterentwicklung von Fahrassistenzsystemen in modernen Autos führt jedoch dazu, dass sich die Schnittstelle zwischen Mensch und Fahrzeug im stetigen Wandel befindet³⁶. Die Nutzung eines Autos bedeutet die Ausführung einer finiten Anzahl an definierbaren Handlungen, in diesem Fall an der Schnittstelle und Wechselwirkung von Mensch und Auto. Am Beispiel eines modernen Parkassistenzsystems mit multiplen Kameras und Sensoren wird ersichtlich, dass zum Beispiel auch bei Bewegungseinschränkungen der Halswirbelsäule nahezu ein Rundumblick um das eigene Auto weiterhin möglich ist und in der Regel problemlos eingeparkt werden kann. Dieser raschen technischen Entwicklung muss auch bei der Weiterentwicklung der systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit im Fachgebiet der Orthopädie und Unfallchirurgie in Zukunft Rechnung getragen werden. Somit sind auch die Grenzbereiche, wie sie in den vorliegenden Arbeiten entwickelt wurden (I, II, III, **Abbildung 4**), immer in Hinblick auf neu entwickelte Fahrassistenzsysteme zu bewerten und ggf. neu zu definieren.

Die Sicherheit von Fahrassistenzsystemen und damit zusammenhängende medicolegale Aspekte im Falle eines Unfalls werden jedoch kontrovers diskutiert²². Auch wenn durch ein Assistenzsystem ein muskuloskelettales Defizit gut kompensierbar erscheint, bedeutet dies nicht, dass eine sichere Teilnahme am Straßenverkehr und insbesondere das sichere Ausführen eines Gefahrenmanövers möglich sind. In den vorliegenden Arbeiten wurden daher Basismanöver und substantielle Gefahrenmanöver und damit zusammenhängend grundlegende Handlungen an der Schnittstelle Mensch und Auto beim Führen eines Autos untersucht. Hierdurch werden die gemessenen Bewegungsumfänge auch in Zukunft als Basisreferenz ihre Bedeutung haben.

Die maximale Form der angesprochenen Assistenzsysteme ist das autonome Fahren. Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft autonome Fahrzeuge aktiv an unserem Straßenverkehr teilnehmen werden³⁶. In wie fern sich die Wechselwirkung zwischen Mensch und Auto verändert, kann jedoch nur abgeschätzt werden und bleibt abzuwarten.

Literaturverzeichnis

1. **A., vdVC; J., TJ; A., JRP; M., R:** When is it safe to resume driving after total hip and total knee arthroplasty? *The Bone & Joint Journal*. **99-B**: 566-576. 10.1302/0301-620x.99b5.bjj-2016-1064.r1
2. **Auhuber, T; Reimertz, C; Müller, W-D; Hoffmann, R:** Neuausrichtung der Heilverfahren der Gesetzlichen Unfallversicherung. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*. **10**: 51-69.
3. **Biometrics:** GONIOMETER AND TORSIOMETER OPERATING MANUAL. <http://www.biometricsltd.com>, Biometrics Ltd, **2019**:
4. **Bohannon, RW:** Sit-to-Stand Test for Measuring Performance of Lower Extremity Muscles. *Perceptual and Motor Skills*. **80**: 163-166. 10.2466/pms.1995.80.1.163
5. **Cuesta-Vargas, AI; Galán-Mercant, A; Williams, JM:** The use of inertial sensors system for human motion analysis. *Physical Therapy Reviews*. **15**: 462-473. 10.1179/1743288x11y.00000000006
6. **Dalury, DF; Chapman, DM:** Right TKR Patients Treated with Enhanced Pain and Rehabilitation Protocols Can Drive at 2 Weeks. *The Journal of Knee Surgery*.
7. **Dalury, DF; Tucker, KK; Kelley, TC:** When Can I Drive?: Brake Response Times After Contemporary Total Knee Arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research®*. **469**: 82-86. 10.1007/s11999-010-1507-1
8. **Dammerer, D; Braitto, M; Biedermann, R, et al.:** Effect of surgical shoes on brake response time after first metatarsal osteotomy—a prospective cohort study. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. **11**: 14. 10.1186/s13018-016-0350-9

-
9. **Dammerer, D; Giesinger, JM; Biedermann, R, et al.:** Effect of Knee Brace Type on Braking Response Time During Automobile Driving. *Arthroscopy*. **31**: 404-409. 10.1016/j.arthro.2014.09.003
10. **Dammerer, D; Waidmann, C; Haid, C, et al.:** The effect of ankle brace type on braking response time—A randomised study. *Injury*. **46**: 2278-2282. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.07.038>
11. **Dammerer, D; Waidmann, C; Huber, DG, et al.:** Effect of hip braces on brake response time: Repeated measures designed study. *Prosthetics and Orthotics International*. **41**: 373-378. 10.1177/0309364616640925
12. **DiSilvestro, KJ; Santoro, AJ; Tjoumakaris, FP; Levicoff, EA; Freedman, KB:** When Can I Drive After Orthopaedic Surgery? A Systematic Review. *Clinical Orthopaedics and Related Research®*. **474**: 2557-2570. 10.1007/s11999-016-5007-9
13. **Egol, KA; Sheikhzadeh, A; Koval, KJ:** Braking Function After Complex Lower Extremity Trauma. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*. **65**: 1435-1438. 10.1097/TA.0b013e31811eaab8
14. **Fradet, L; Liefhold, B; Rettig, O, et al.:** Proposition of a protocol to evaluate upper-extremity functional deficits and compensation mechanisms: application to elbow contracture. *Journal of Orthopaedic Science*. **20**: 321-330. 10.1007/s00776-014-0679-z
15. **Fries, W; Wilkes, F; Lössl, H:** Orthopädisch-traumatologische Krankheitsbilder. In: *Fahreignung bei Krankheit, Verletzung, Alter, Medikamenten, Alkohol und Drogen Ein Leitfaden für Betroffene, Ärzte, Psychologen, Rechtsanwälte, Behörden*. München, Wien, New York, Zuckschwerdt-Verlag, 109-120.
16. **Gehrmann, S; Tang, J; Kaufmann, RA, et al.:** Variability of precision pinch movements caused by carpal tunnel syndrome. *The Journal of hand surgery*. **33**: 1069-1075. 10.1016/j.jhsa.2008.02.030

-
17. **Gesundheit, Bf:** Arbeitsunfähigkeit:Fälle und Tage nach Alters- und Krankheitsartengruppen 2017. Ergebnisse der Krankheitsartenstatistik der gesetzlichen Krankenversicherung.
18. **Graemann, N; Albrecht, M:** Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahrereignung. Stand: 24. Mai 2018. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen Mensch und Sicherheit Heft M 115.
19. **Hartman, J; Thornley, P; Oreskovich, S, et al.:** Braking Time Following Total Knee Arthroplasty: A Systematic Review. *The Journal of Arthroplasty*. **33**: 284-290.e281. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2017.08.012>
20. **Hermsdörfer, J:** Bewegungsmessung zur Analyse von Handfunktionen: Vorschlag einer standardisierten Untersuchung, BoD–Books on Demand, 2002.
21. **Hernandez, VH; Ong, A; Orozco, F; Madden, AM; Post, Z:** When Is It Safe for Patients to Drive after Right Total Hip Arthroplasty? *The Journal of Arthroplasty*. **30**: 627-630. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2014.11.015>
22. **Hevelke, A; Nida-Rümelin, J:** Responsibility for Crashes of Autonomous Vehicles: An Ethical Analysis. *Science and Engineering Ethics*. **21**: 619-630. [10.1007/s11948-014-9565-5](https://doi.org/10.1007/s11948-014-9565-5)
23. **Jordan, M; Hofmann, U-K; Rondak, I, et al.:** Brake Response Time Is Significantly Impaired After Total Knee Arthroplasty: Investigation of Performing an Emergency Stop While Driving a Car. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*. **94**: 665-676. [10.1097/phm.0000000000000342](https://doi.org/10.1097/phm.0000000000000342)
24. **Jordan, M; Hofmann, UK; Grünwald, J, et al.:** Influence of Left- and Right-Side Total Hip Arthroplasty on the Ability to Perform an Emergency Stop While Driving a Car. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. **95**: 1702-1709. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.03.009>

-
25. **Konrads, C; Plumhoff, P:** Neutral-0-Methode. Klinische Tests und Untersuchung in Orthopädie und Unfallchirurgie. Springer, 175-181.
26. **Kraftfahrbundesamt:** Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019. KBA,
27. **Kuhnimhof, T; Nobis, C:** Mobilität in Deutschland– MiD: Ergebnisbericht.
28. **Latz, D; Pfau, S; Koukos, C, et al.:** Doctor, when can I drive. Obere Extremität. **12:** 234-241. 10.1007/s11678-017-0426-0
29. **Latz, D; Schiffner, E; Schneppendahl, J, et al.:** Doctor, when can I drive? - Range of functional ankle motion during driving. Foot and ankle surgery : official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons. 10.1016/j.fas.2019.12.006
30. **Latz, D; Schiffner, E; Schneppendahl, J, et al.:** Doctor, when can I drive?-the range of elbow motion while driving a car. J Shoulder Elbow Surg. **28:** 1139-1145. 10.1016/j.jse.2018.11.053
31. **Latz, D; Schiffner, E; Schneppendahl, J, et al.:** Doctor, when can I drive? - Range of motion of the knee while driving a car. The Knee. **26:** 33-39. 10.1016/j.knee.2018.11.005
32. **Latz, D; Schiffner, E; Schneppendahl, J, et al.:** [Evaluation of driving fitness in patients with musculoskeletal disorders : A systematic review]. Unfallchirurg. **122:** 697-705. 10.1007/s00113-018-0571-y
33. **Lebleu, J; Mahaudens, P; Pitance, L, et al.:** Effects of ankle dorsiflexion limitation on lower limb kinematic patterns during a forward step-down test: A reliability and comparative study. Journal of back and musculoskeletal rehabilitation. **31:** 1085-1096. 10.3233/BMR-171063

-
34. **Lugeder, A; Berkenbrink, A; Zeichen, J:** Reha-Management in der gesetzlichen Unfallversicherung. *Der Unfallchirurg*. **116:** 271-276. 10.1007/s00113-011-2149-9
35. **Mansour, D; Mansour, KG; Kenny, BW; Attia, J; Meads, B:** Driving with a Short Arm Cast in a Simulator. *Journal of Orthopaedic Surgery*. **23:** 327-330. 10.1177/230949901502300314
36. **Maurer, M; Gerdes, JC; Lenz, B; Winner, H:** Autonomous driving. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg. **10:** 978-973.
37. **McDonald, E; Shakked, R; Daniel, J, et al.:** Driving After Hallux Valgus Surgery. *Foot & Ankle International*. **38:** 982-986. 10.1177/1071100717711926
38. **Morrey, B; Askew, L; Chao, E:** A biomechanical study of normal functional elbow motion. *J Bone Joint Surg Am*. **63:** 872-877.
39. **Müller, M:** Der Einfluss unterschiedlicher Zugangswege in der primären Hüftendoprothetik auf die Hüftmuskulatur: funktionelle Auswirkungen und bildmorphologische Analysen.
40. **Nguyen, T; Hau, R; Bartlett, J:** Driving reaction time before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*. **8:** 226-230. 10.1007/s001670000115
41. **Ohlendorf, D; Klingelhöfer, D; Groneberg, DA; Spallek, M:** Fit für den Beruf? *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*. **67:** 118-122. 10.1007/s40664-016-0163-z
42. **Organization, WH:** Decade of Action for Road Safety, 2011–2020: Saving millions of lives. WHO Geneva, Switzerland;.
43. **Organization, WH:** Global status report on road safety 2015, World Health Organization, 2015.

-
44. **Paterno, MV; Rauh, M; Thomas, S; Hewett, TE; Schmitt, L:** Current Return to Sport Criteria after ACL Reconstruction Fail to Identify Increased Risk of Second ACL Injury in Young Athletes. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*. **6**: 2325967118S2325900060. 10.1177/2325967118s00060
45. **Qurashi, S; Chinnappa, J; Lord, SJ, et al.:** Driving After Microinvasive Total Hip Arthroplasty. *The Journal of Arthroplasty*. **32**: 1525-1529. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2016.11.052>
46. **Rawal, A; Chehata, A; Horberry, T, et al.:** Defining the upper extremity range of motion for safe automobile driving. *Clinical Biomechanics*. **54**: 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.03.009>
47. **Reutter, O; Koska, T; Schäfer-Sparenberg, C; Reutter, U:** Betriebliche Mobilität im Quartier gemeinsam verbessern: Erkenntnisse für die Praxis aus dem Projekt BMM HOCH DREI.
48. **Ruel, AV; Lee, Y-y; Boles, J, et al.:** A Novel Assessment of Braking Reaction Time Following THA Using a New Fully Interactive Driving Simulator. *HSS Journal* ®. **11**: 143-147. 10.1007/s11420-015-9437-9
49. **Ryu, JY; Cooney, WP, 3rd; Askew, LJ; An, KN; Chao, EY:** Functional ranges of motion of the wrist joint. *The Journal of hand surgery*. **16**: 409-419. 10.1016/0363-5023(91)90006-w
50. **Sansosti, LE; Greene, T; Hasenstein, T; Berger, M; Meyr, AJ:** U.S. State Driving Regulations Relevant to Foot and Ankle Surgeons. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. **56**: 522-542. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2017.01.022>
51. **Sansosti, LE; Rocha, ZM; Lawrence, MW; Meyr, AJ:** Effect of Variable Lower Extremity Immobilization Devices on Emergency Brake Response Driving Outcomes. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. **55**: 999-1002. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2016.05.010>

-
52. **Sardelli, M; Tashjian, RZ; MacWilliams, BA:** Functional elbow range of motion for contemporary tasks. *J Bone Joint Surg Am.* **93:** 471-477. 10.2106/JBJS.I.01633
53. **Schreier, DR; Banks, C; Mathis, J:** Driving simulators in the clinical assessment of fitness to drive in sleepy individuals: A systematic review. *Sleep medicine reviews.* **38:** 86-100. 10.1016/j.smrv.2017.04.004
54. **Seibert, FJ; Peicha, G; Grechenig, W, et al.:** Radiusfraktur loco typico. *Arthroskopie.* **11:** 259-270. 10.1007/s001420050049
55. **Sittapairoj, T; Anthony, CA; Rungprai, C, et al.:** Brake Reaction Time After Ankle and Subtalar Arthroscopy. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery.* **33:** 2231-2237. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.08.245>
56. **Steger, DID:** Motion Capture mit optisch-magnetischem Trackingsystem in VR-Applikationen.
57. **Stinton, SB; Edgar, DW; Moloney, NA; Refshauge, K; Pappas, E:** When can I drive? Return to driving following a wrist fracture: A critical review. *Hand Therapy.* **20:** 95-101. 10.1177/1758998315597013
58. **Talusan, PG; Miller, CP; Save, AV; Reach, JS:** Driving Reaction Times in Patients With Foot and Ankle Pathology Before and After Image-Guided Injection:Pain Relief Without Improved Function. *Foot & Ankle Specialist.* **8:** 107-111. 10.1177/1938640014548420
59. **Tognetti, A; Lorussi, F; Carbonaro, N; de Rossi, D:** Wearable Goniometer and Accelerometer Sensory Fusion for Knee Joint Angle Measurement in Daily Life. *Sensors (Basel).* **15:** 28435-28455. 10.3390/s151128435
60. **van Andel, CJ; Wolterbeek, N; Doorenbosch, CAM; Veeger, D; Harlaar, J:** Complete 3D kinematics of upper extremity functional tasks. *Gait & Posture.* **27:** 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.03.002>

-
61. **Vera, AM; Beauchman, N; McCulloch, PC, et al.:** Brake Reaction Time After Hip Arthroscopy for Femoroacetabular Impingement and Labral Tear. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. **33**: 971-976. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.11.020>
62. **Wasserman, BR; Singh, BC; Kaplan, DJ, et al.:** Braking Reaction Time After Right-Knee Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Comparison of 3 Grafts. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery*. **33**: 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.05.043>
63. **Westby, MD; Brittain, A; Backman, CL:** Expert consensus on best practices for post-acute rehabilitation after total hip and knee arthroplasty: a Canada and United States Delphi Study. *Arthritis care & research*. **66**: 411-423.
64. **Zhang, JT; Novak, AC; Brouwer, B; Li, Q:** Concurrent validation of Xsens MVN measurement of lower limb joint angular kinematics. *Physiological measurement*. **34**: N63-69. [10.1088/0967-3334/34/8/N63](https://doi.org/10.1088/0967-3334/34/8/N63)
65. **Zhou, H; Hu, H:** Human motion tracking for rehabilitation—A survey. *Biomedical Signal Processing and Control*. **3**: 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2007.09.001>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:

a) Messweise der biaxialen Elektrogoniometer (Twin Axis Goniometer Typ SG 65 und SG 110A, Firma Biometrics Ltd. UK) von oben und von der Seite. b) Messweise der Elektrotorsiometer (Single Axis Torsiometer type Q 150, Firma Biometrics Ltd. UK). Modifiziert mit freundlicher Genehmigung von Biometrics Ltd.

Abbildung 2:

Studienteilnehmer mit angelegten Elektrogoniometern am rechten und linken Handgelenk und Ellenbogen während des Führens eines Kraftfahrzeugs auf dem Testgelände des ADAC. Um eine Bewegungseinschränkung zu simulieren wurde in diesem Versuchsaufbau zusätzlich eine Hartrahmenorthese am rechten Ellenbogen angelegt. Mit freundlicher Genehmigung des Probanden (Eigene Darstellung).

Abbildung 3:

Flussdiagramm zur Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit (Eigene Darstellung).

Abbildung 4:

Schematische Illustration einer systematischen Beurteilung der Fahreignung und Fahrtauglichkeit am Beispiel des Ellenbogens (Eigene Darstellung).

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, ohne deren unermüdliche Unterstützung die vorliegenden Arbeiten nicht umsetzbar gewesen wären.

Zunächst möchte ich mich bei Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf bedanken, dass ich die Möglichkeit bekommen habe im Fachgebiet der Orthopädie und Unfallchirurgie wissenschaftlich tätig sein zu können. Ohne die intensive Unterstützung im klinischen Alltag und ohne die Bereitstellung der notwendigen wissenschaftlichen Ressourcen wäre das vorliegende Projekt nicht realisierbar gewesen.

Ein großer Dank gilt meinem Kollegen und Freund Prof. Dr. med. Sebastian Viktor Gehrman, der mir als Mentor in jeglichen klinischen wie auch wissenschaftlichen Fragen immer zur Seite stand. Ihm verdanke ich, dass ich eigenständig wissenschaftlich tätig sein kann. Er hat mir bei jeglichen Fragen, angefangen von Versuchsplanungen, Durchführungen und Erstellung von Beiträgen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften stets ein offenes Ohr geschenkt und geholfen. Herr Prof. Dr. med. Sebastian Viktor Gehrman hat maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeiten beigetragen.

Ein weiterer großer Dank gilt meinem Kollegen und Freund Dr. med. Erik Schiffner. Gemeinsam sind wir in den letzten Jahren klinisch wie auch wissenschaftlich durch Höhen und Tiefen gegangen. Die Kraft und Ausdauer für ein derartiges Projekt kann man nur gemeinsam entwickeln.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr. med. Pascal Jungbluth bedanken, da er mich bis zum Schluss in diesem Projekt unterstützt und begleitet hat.

Meiner Frau, Dr. med. Barbara Latz, gilt ein ganz besonderer Dank. Ohne Sie hätte ich den wissenschaftlichen Weg nach der Promotion nicht weiter verfolgt. Ohne Ihre aufbauende und liebevolle Art würden die vorliegenden Arbeiten nicht in dieser Form vorliegen.

Ich danke meinen Eltern, Karin und Martin Latz, die sich seit Kindertagen für mich einsetzen und mich auch jetzt in meinen Entscheidungen stets unterstützen und bestärken.

Ich danke allen Kolleginnen und Kollegen aus der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie für die aufgeschlossene und angenehme Zusammenarbeit.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Dr. med. David Latz, geboren am 18.02.1987 in Merzenich, an Eides statt, dass:

- Die von mir vorgelegte schriftliche Habilitationsleistung eigenständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt wurde.
- Bei den wissenschaftlichen Untersuchungen, die Gegenstand der von mir vorgelegten schriftlichen Habilitationsleistung sind, ethische Grundsätze und die Grundsätze und Empfehlungen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis berücksichtigt wurden.
- An keiner anderen Hochschule ein Habilitationsverfahren von mir eingeleitet oder erfolglos beendet wurde.

02.02.2020, Dr. med. David Latz

Redaktion

W. Mutschler, München

H. Polzer, München

B. Ockert, München

D. Latz · E. Schiffner¹ · J. Schnependahl · B. H. Thalmann · P. Jungbluth · J. Grassmann · J. Windolf · S. V. Gehrmann¹Klinik für Unfall- und Handchirurgie, Universitätsklinikum Düsseldorf, Düsseldorf, Deutschland

Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei Erkrankungen des Bewegungs- und Stützapparates

Ein systematisches Review

Einleitung

„Herr Dr., wann darf ich wieder Auto fahren?“ Diese oder ähnliche Fragen sind in orthopädisch/unfallchirurgischen Praxen oder Kliniken alltäglich und haben für viele Patienten eine hohe Relevanz [64]. Das Spektrum der zugrunde liegenden Verletzung oder Erkrankung reicht von einer kurzzeitigen Ruhigstellung des Handgelenks nach einer Kontusion [3, 30], zunehmender Bewegungseinschränkung durch Arthrose bis zur Rehabilitation nach einem alloarthoplastischen Gelenkersatz [14]. In der Tat ist der behandelnde Arzt in der Pflicht, einem Patienten eine bestehende Fahrtauglichkeit mitzuteilen [45].

Um die individuelle Mobilität nicht unnötig einzuschränken, die Fähigkeit zur sicheren Fahrzeugführung jedoch zu gewährleisten, sollte hierzu ein evidenzbasierter Ansatz gewählt werden. Es existieren jedoch nur wenige Studien zum Thema Fahrtauglichkeit im Hinblick auf orthopädisch/unfallchirurgische Krankheitsbilder [15, 21, 59]. Viele Patienten sind sozioökonomisch von ihrer Fahrtauglichkeit abhängig. Bereits der temporäre Verlust der Fahrtauglichkeit, beispielsweise durch eine Ruhigstellung des Handgelenks in einem Unterarmgips, kann berufliche sowie soziale Auswirkungen bedeuten. Im Gegenzug kann die zu frühzeitige Erteilung der Fahrtauglichkeit die Sicherheit im Straßenverkehr signifikant beeinflussen und zu folgenschweren Unfällen führen [72, 73]. Zu den maßgeblichen Aufgaben der Unfall-

chirurgie gehört neben der optimalen Behandlung von Unfallverletzten die Prävention von Unfällen. Ein Blick auf die Statistik der Verkehrsunfälle zeigt, dass insbesondere die Verhütung von Verkehrsunfällen einen wichtigen Aspekt in der unfallchirurgischen Versorgung darstellt [73].

Die zumeist temporäre Einschränkung der Fahrtauglichkeit muss von der generellen Fahreignung unterschieden werden. In Deutschland sind Rechtsmediziner, Betriebsmediziner und Ärzte mit der curricularen Zusatzbezeichnung *Verkehrsmedizin* in die Beurteilung der sog. Fahreignung involviert. Fahreignung wird nach § 2 Abs. 4 StVG definiert als: „Geeignet zum Führen von Kraftfahrzeugen ist, wer die notwendigen körperlichen und geistigen Anforderungen erfüllt und nicht erheblich oder nicht wiederholt gegen verkehrsrechtliche Vorschriften oder gegen Strafgesetze verstoßen hat. Ist der Bewerber auf Grund körperlicher oder geistiger Mängel nur bedingt zum Führen von Kraftfahrzeugen geeignet, so erteilt die Fahrerlaubnisbehörde die Fahrerlaubnis mit Beschränkungen oder unter Auflagen, wenn dadurch das sichere Führen von Kraftfahrzeugen gewährleistet ist.“ Als Entscheidungshilfe dienen in Deutschland die *Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahrereignung*, die im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) regelmäßig von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in fachspezifischen Arbeitsgruppen erstellt und herausgegeben

werden [15]. Die Begutachtungsleitlinien stellen für Ärzte die maßgebliche Grundlage für die Beurteilung der Eignung zum Führen von Kraftfahrzeugen dar. Wenn sie angewandt werden, bedarf es keiner expliziten Begründung. Wird jedoch von den Leitlinien abgewichen, z. B. weil Untersuchungen zum Zeitpunkt der vorherigen Begutachtungsleitlinien begonnen haben und nach diesen fortgesetzt werden sollen oder ein Einzelfall fachlich anders zu würdigen ist, ist dies möglich, bedarf aber in der Regel einer detaillierten Begründung [15]. Im Unterkapitel 3.3 „Kraftfahrereignung bei Bewegungsbehinderungen“ (Stand Mai 2018) ist vereinfacht vermerkt: „Auf Vorschlag des Verbandes der Technischen Überwachungsvereine (Merkblatt VdTÜV Kraftfahrwesen 745, Ausgabe 11.99 ‚Sicherheitsmaßnahmen bei körperbehinderten Kraftfahrern‘) sind spezielle Anforderungen an die Anpassung am Fahrzeug oder orthopädischen Hilfsmittel zu stellen...“ [15]. Im Zweifelsfall bedeutet dies, dass in jedem Fall eine für den Patienten kostenintensive und individuelle Begutachtung des Kraftfahrzeugs sowie des Patienten durch einen Arzt und einen Mitarbeiter des TÜV zu erfolgen hat. Die aktuellen Leitlinien sind somit für die Beurteilung der Kraftfahrereignung als sehr kostenintensiv zu bezeichnen und werden darüber hinaus den Bedürfnissen des Mediziners für die Beurteilung der Fahrtauglichkeit im klinischen Alltag mit zumeist temporärer Bewegungseinschränkung oder Ruhigstellung nicht gerecht.

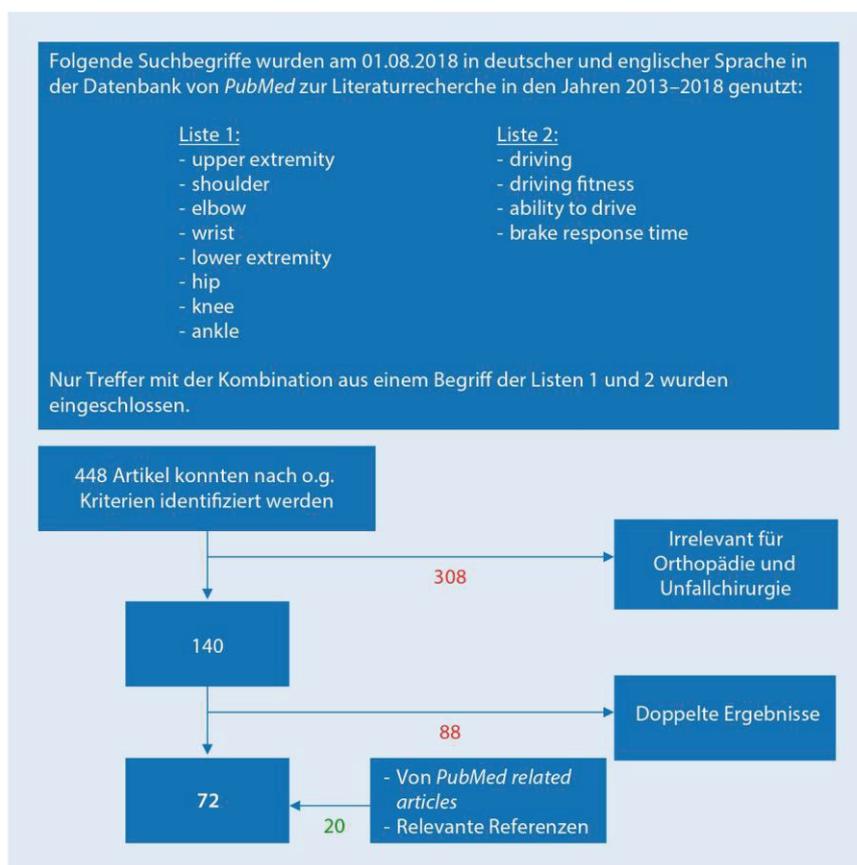


Abb. 1 ▲ Algorithmus zur Auswahl relevanter Studien des Reviews

Eine wissenschaftlich fundierte Zusammenstellung kraftfahrereignungsaus-schließender, -eignungseinschränkender und die Fahrtauglichkeit beeinflussender und objektivierbarer Bewegungseinschränkungen und Erkrankungen aus dem Bereich der Orthopädie und Unfallchirurgie existiert aktuell somit nicht. Ärzten, die im klinischen Alltag Empfehlungen bezüglich Fahrtauglichkeit aussprechen, steht somit nur eine eingeschränkte Entscheidungshilfe zur Verfügung. Ebenso besteht eine gewisse Unsicherheit aufseiten der Begutachtenden, der Fahrerlaubnisbewerber und -inhaber im Hinblick auf ihre bekannten orthopädisch/unfallchirurgischen Erkrankungen und der eigenen Kraftfahrereignung. Nach Kenntnisstand der Autoren gibt es bisher nur wenige Studien über die Fahrtauglichkeit bei orthopädisch/unfallchirurgischen Krankheitsbildern (z. B. notwendiger Bewegungsumfang und Koordination einzelner Gelenke), welche den behandelnden Ärzten als

evidenzbasierte Grundlage zur Begutachtung dienen könnten.

Basierend auf aktuellen Studien soll die vorliegende systematische Übersichtsarbeit den behandelnden Arzt bei der Beurteilung der Fahrtauglichkeit und Fahrereignung nach orthopädisch/unfallchirurgischen Erkrankungen unterstützen.

Material und Methodik

Zur Beantwortung der Fragestellung, ab wann die Fahrtauglichkeit oder Fahrereignung nach orthopädisch/unfallchirurgischen Erkrankungen evidenzbasiert empfohlen werden kann, erfolgte eine systematische Literaturrecherche nach einem vordefinierten Algorithmus (Abb. 1). Alle Artikel der Datenbank PubMed, die von 2013 bis 2018 publiziert wurden, wurden am 01.08.2018 nach den Stichworten der Liste 1: „upper extremity“, „lower extremity“, „shoulder“, „elbow“, „wrist“, „hip“, „knee“ und „ankle“, in Kombination mit den Stichworten

der Liste 2: „driving“, „driving fitness“, „ability to drive“, „brake response time“, „brake force“, durchsucht. Alle Artikel, die sowohl ein Stichwort aus den Listen 1 und 2 enthielten, wurden in die weitere Recherche eingeschlossen. Von PubMed vorgeschlagene „related articles“ wurden ebenfalls überprüft. Ferner wurden die Referenzen von relevanten Artikeln kontrolliert und ggf. miteingeschlossen. Es wurde lediglich deutsch- und englischsprachige Literatur ausgewertet. Weitere Ausschlusskriterien wurden nicht definiert. Die jeweiligen Suchbegriffe wurden sowohl in Deutsch als auch in Englisch für die Literaturrecherche genutzt. Es wurden 20 weitere Artikel nach dem Studium der Referenzen sowie der von PubMed vorgeschlagenen „related articles“ hinzugefügt.

Ergebnisse

Durch die vorliegende Literaturrecherche konnte der Einfluss verschiedener klinisch relevanter Parameter wie Bewegungseinschränkungen verschiedener Gelenke, spezifische orthopädisch/unfallchirurgische Erkrankungen oder der Einfluss nach einer orthopädisch/unfallchirurgischen Operation auf das Führen eines Kraftfahrzeugs beurteilt werden. Um den größtmöglichen Nutzen als Leitfaden für den täglichen Gebrauch in der Praxis zu gewährleisten, wurden diese Parameter in folgende Kategorien eingeteilt:

- I. Untere Extremität,
- II. Obere Extremität.

Untere Extremität

Die Literaturrecherche ergab, dass für die Beurteilung der unteren Extremität insbesondere die Bremsreaktionszeit („brake response time“) sowie die Bremskraft („brake force“) zur Beurteilung der Fahrtauglichkeit herangezogen werden [4, 5, 12, 29, 41, 57]. Eine Bremsreaktionszeit von ca. 750 ms kann als normwertig bezeichnet werden [16]. Für die Bremskraft werden in der Literatur 100 N als notwendiger Mindestwert angegeben [37, 62].

Bewegungslimitierung/ Ruhigstellung

Im klinischen Alltag werden häufig bewegungslimitierende Orthesen oder Gipsruhigstellungen für die untere Extremität eingesetzt, die die Fahrtauglichkeit beeinflussen können. Dammerer et al. untersuchten den Einfluss von häufig verwendeten Sprunggelenkorthesen (Walker mit einstellbarem Gelenk, sprunggelenkstabilisierende Orthese, Sprunggelenkbandage, [6, 7, 43]), Knieorthesen (Hartraahmenorthese mit einstellbarem Gelenk, patellofemorale Orthese, Kniebandage; [5]) und Hüftgelenkorthesen (Hüftorthese, Hüftbandage; [8]) auf die Bremsreaktionszeit. Es konnte gezeigt werden, dass das Tragen einer sprunggelenkstabilisierenden Orthese sowie einer Sprunggelenkbandage keinen signifikanten Einfluss auf die Bremsreaktionszeit hat. Das Tragen einer Unterschenkelgipse zeigte jedoch eine signifikant höhere Bremsreaktionszeit, weshalb die Autoren das Führen eines Kfz mit einer solchen Orthese nicht empfehlen [6, 7, 43, 56]. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass das Tragen einer Kniegelenkhartraahmenorthese zu einer signifikant höheren Bremsreaktionszeit führt und eine sichere Teilnahme am Straßenverkehr nicht gewährleistet ist [5]. Eine patellofemorale Orthese, Kniebandage sowie Hüftorthese und Hüftbandage hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Bremsreaktionszeit [5, 6, 23]. Waton et al. konnten zeigen, dass es durch die Anlage eines Oberschenkelgipses, Unterschenkelgipses oder einer in 0° fixierten Hartraahmenorthese zu einer signifikant höheren Bremsreaktionszeit kam. Hieraus kann geschlossen werden, dass das Führen eines Kfz bei anliegendem Gips an der unteren Extremität als nicht sicher zu bewerten ist [71].

Orthopädisch/unfallchirurgische Erkrankungen und postoperative Zustände

Eine häufige Fragestellung bezüglich Fahrtauglichkeit im Hinblick auf die untere Extremität stellen in der Orthopädie die Arthrose sowie der alloarthroplastische Gelenkersatz des Hüft- oder Kniegelenks dar. Unsicherheit besteht oftmals auch, ab wann einem Patienten

Unfallchirurg <https://doi.org/10.1007/s00113-018-0571-y>
© Springer Medizin Verlag GmbH, ein Teil von Springer Nature 2018

D. Latz · E. Schiffner · J. Schneppendahl · B. H. Thalmann · P. Jungbluth · J. Grassmann · J. Windolf · S. V. Gehrman

Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei Erkrankungen des Bewegungs- und Stützapparates. Ein systematisches Review

Zusammenfassung

Zielsetzung. Obwohl das Führen eines Kfz zu einem der wichtigsten Bestandteile der persönlichen Mobilität in unserer Gesellschaft geworden ist, existieren nur wenige Studien zur Fahrtauglichkeit bei orthopädisch/unfallchirurgischen Krankheitsbildern. Ziel dieses systematischen Reviews ist es, dem behandelnden Arzt eine Grundlage zu Empfehlungen und Beurteilung der Fahrtauglichkeit nach Erkrankungen des Bewegungs- und Stützapparates zu bieten. **Material und Methodik.** Für die systematische Literaturrecherche diente die Datenbank *PubMed*. Nach einem vordefinierten Algorithmus wurden alle relevanten Artikel, die von 2013 bis 2018 publiziert wurden, eingeschlossen.

Ergebnis. Die Ergebnisse der Literaturrecherche wurden in die Kategorien I. Untere Extremität und II. Obere Extremität eingeteilt und die Literatur hinsichtlich Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei

Bewegungslimitierungen durch anliegende Orthesen, orthopädisch/unfallchirurgische Erkrankungen sowie postoperative Zustände ausgewertet und tabellarisch aufgeführt. **Schlussfolgerung.** Die vorliegende Übersichtsarbeit gibt dem behandelnden Arzt eine systematische und praxisnahe Hilfestellung bei der Beurteilung der Fahrtauglichkeit nach orthopädisch/unfallchirurgischen Erkrankungen. Insbesondere für die obere Extremität können klare Empfehlungen jedoch nur eingeschränkt gegeben werden, da, im Gegensatz zur unteren Extremität, kaum einheitliche und im klinischen Alltag verwertbare Tests zur Prüfung der Fahrtauglichkeit existieren.

Schlüsselwörter

Verkehrsmmedizin · Unfallchirurgie · Kraftfahrereignung · Fahrtauglichkeit · Rechtsmedizin

Evaluation of driving fitness in patients with musculoskeletal disorders. A systematic review

Abstract

Objective. Driving a motor vehicle is one of the most important aspects of personal mobility in our society. However, there is a lack of evidence regarding driving fitness after orthopedic or trauma surgery-related diseases. Aim of this systematic review was to support the treating physician to determine the individual driving fitness in patients with musculoskeletal disorders.

Material and methods. A systematic analysis was performed using the *PubMed* database. Following a predefined algorithm, all relevant articles published from 2013 to 2018 were included.

Results. The results were categorized according to the affected part of the body into I. lower extremity and II. upper extremity. Also,

results were subcategorized into movement restrictions caused by external joint-braces, musculoskeletal diseases, and postoperative conditions.

Conclusion. This article supports the treating physician to individually determine the driving fitness in patients with musculoskeletal disorders. However, only a few standardized tests exist to individually determine the driving fitness in patients with musculoskeletal disorders. A particular shortcoming was observed for impairments of the upper extremity.

Keywords

Traffic medicine · Trauma surgery · Driving fitness · Driving safety · Forensic medicine

nach einem orthopädisch operativen Eingriff oder nach einer Fraktur wieder eine Fahrtauglichkeit ausgesprochen werden kann.

Hofmann et al. konnten nachweisen, dass eine fortgeschrittene Arthrose des rechten Knie- oder Hüftgelenks sowie des linken Kniegelenks die Bremsreaktionszeit signifikant beeinflussen und somit die Fahrtauglichkeit beeinträchtigen kann [22]. Im Einklang hierzu kamen von Bernstorff et al. zu der Schlussfolgerung, dass Arthrose des Kniegelenks einen größeren Einfluss auf die Bremsreaktionszeit als Arthrose des Hüftgelenks hat. Da jedoch keine Korrelation zwischen der radiologischen Arthrosemanifestation (nach Kellgren und Lawrence [32]) und der Bremsreaktionszeit festgestellt werden konnte, ist die Fahrtauglichkeit bei Arthrose insbesondere am klinischen Befund zu beurteilen [2]. Norm- bzw. Grenzwerte sind in der Literatur jedoch nicht beschrieben.

Bezüglich der Fahrtauglichkeit nach einem Hüft- oder Kniegelenkersatz werden unterschiedliche Empfehlungen zwischen 2 und 6 Wochen angegeben. Dies scheint jedoch im hohen Maße vom Schmerztherapiemanagement abhängig zu sein [70]. Aktuelle Studien zeigen, dass die präoperative Bremsreaktionszeit nach einer Hüfttotalendoprothese bereits nach 2 bis 4 Wochen wieder erreicht werden kann [20]. Dies steht im Einklang mit einer Metaanalyse, die die Fahrtauglichkeit nach einem Gelenkersatz der Hüfte sowie des Kniegelenks untersuchte. Die Kollegen empfehlen, dass eine Fahrtauglichkeit nach einer Hüfttotalendoprothese in der Regel nach 2 Wochen und nach einer Knieendoprothese nach 4 Wochen erreicht werden kann [66]. Auch Hernandez et al. konnten eine Fahrtauglichkeit nach einem rechtsseitigen totalen Hüftgelenkersatz nach 2 (87 % der Patienten) bis 4 (13 % der Patienten) Wochen feststellen [20]. Ähnliche Werte sind in der Literatur beschrieben [17, 35, 54]. Bei einem linksseitigen Hüftgelenkersatz scheint die Fahrtauglichkeit, basierend auf der Bremsreaktionszeit, bereits nach 8 Tagen [28] und nach einer minimalinvasiven Hüftprothese sogar nach 2 Tagen uneingeschränkt zu sein [49]. Ellanti et al. empfahlen eine etwas

konservativere Verhaltensweise mit der Erteilung der Fahrtauglichkeit, frühestens 6 Wochen postoperativ nach einer rechten Knieendoprothese [11]. Im Zweifel kann ein „step test“, der im klinischen Alltag einfach umzusetzen ist, zur klinischen Beurteilung herangezogen werden, da der „step test“ eine signifikante Korrelation zur Bremsreaktionszeit nach einem endoprothetischen Kniegelenkersatz vorweist [24].

Weitere Studien konnten nachweisen, dass bereits 2 Wochen nach einer Arthroskopie des Hüftgelenks bei femoroacetabulärem Impingement oder Labrumläsion [34, 67], eine Woche nach einer Arthroskopie des Kniegelenks [19] und 2 Wochen nach einer Arthroskopie des Sprunggelenks [36, 61] normwertige Bremsreaktionszeiten erreicht werden konnten. Zur klinischen Beurteilung kann der „sit-to-stand test“ (STST) genutzt werden, da dieser eine signifikante negative Korrelation zur Bremsreaktionszeit hat. Im STST müssen Patienten innerhalb von 10 s so häufig wie möglich aus der sitzenden in die stehende Position wechseln. Dieser Test wird auch zur Beurteilung nach einer Kniearthroskopie sowie nach komplexen Verletzungen der unteren Extremität zur Beurteilung der Fahrtauglichkeit genutzt [10, 44]. Es konnte gezeigt werden, dass 6 Wochen nach einer Kreuzbandplastik des rechten Kniegelenks sowie 2 Wochen nach einer Kreuzbandplastik des linken Kniegelenks eine normale Bremsreaktionszeit und STST-Werte nachgewiesen werden konnten [44]. Neuere Studien konnten zeigen, dass dies jedoch von der Operationstechnik abhängig zu sein scheint, da bei Kreuzbandplastiken mit einer Tibialis-anterior-Sehne bereits nach 3 Wochen normwertige Bremsreaktionszeiten beobachtet werden konnten [69].

Bezüglich Frakturen der unteren Extremität konnten Egol et al. zeigen, dass es bei Schaft- und Gelenkfrakturen der unteren Extremität durchschnittlich 6 Wochen nach Vollbelastung zu einer signifikanten Abnahme der Bremsreaktionszeit bei den Patienten kam [10]. Nach einer tibiotalaren Arthrodesese konnte ebenfalls eine signifikant höhere Bremsreaktionszeit nachgewiesen werden. Arthrodesen der übrigen Fußwurzel führten jedoch

nicht zu einer signifikant höheren Bremsreaktionszeit [60].

Einen Überblick zu den jeweiligen Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit im Hinblick auf die untere Extremität gibt

■ Tab. 1.

Obere Extremität

Die Literaturrecherche ergab, dass, im Gegensatz zur Beurteilung der unteren Extremität mit häufig verwendeten Tests wie Bremsreaktionszeit oder Bremskraft, für die obere Extremität keine einheitlichen Tests existieren. Oftmals wurden individuelle Fahrsimulatoren oder speziell aufgebaute Fahrparcours genutzt und multifaktorielle Parameter abgeleitet [9, 38, 53]. Bei den Simulatoren wurden z. B. die Zeit, die die Probanden exakt die Spur halten konnten, die Lenkreaktionszeit, die Rundenzeit oder die Anzahl an Kollisionen gemessen [18, 25, 38]. Bei den Fahrparcours wurden z. B. Rundenzeit und die Anzahl an getroffenen Pylonen gemessen [27]. In einer Studie, die die Ergonomie und optimale Sitzposition beim Führen eines Kfz untersuchte, wurden für die Beurteilung der oberen Extremität einerseits die maximale Geschwindigkeit, die für eine 90°-Lenkradbewegung notwendig ist („steering velocity test“), abgeleitet und ein sog. 20-s-Präzisionstest („20 s precision test“), bei dem die Probanden 20 s lang einen Kurs möglichst exakt nachfahren sollten, genutzt [58]. Oftmals hatten die Studien jedoch ein retrospektives Studiendesign, in denen lediglich die durchschnittliche postoperative Dauer bis zur Fahrtauglichkeit nach unterschiedlichen orthopädischen Operationen und Erkrankungen ausgewertet wurden [13, 40, 42, 47].

Bewegungslimitierung/ Ruhigstellung

Auch für die obere Extremität werden im klinischen Alltag häufig Ruhigstellungen mittels Orthesen oder verschiedenen Gipsarten notwendig, welche die Fahrtauglichkeit beeinflussen können. Eine Studie mittels Fahrsimulator ergab, dass die Ruhigstellung der Schulter in einer Schultergelenkorthese (Ultrasling III; Fa. Don Joy, Vista, CA, USA) bemerkenswerterweise keinen negativen Einfluss

Tab. 1 Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei Ruhigstellungen und orthopädischen Erkrankungen der unteren Extremität. Im Zweifel sollten klinische Tests wie der „sit-to-stand test“ (STST), die eine signifikante Korrelation zur Bremsreaktionszeit haben, durchgeführt werden

Untere Extremität	Fahrtauglichkeit	Quellen
Sprunggelenkbandage	Möglich	[6, 43, 56, 57]
Sprunggelenkstabilisierende Orthese	Möglich	[6, 56, 57]
Walker mit einstellbarem Gelenk	Nicht empfohlen	[6, 7, 56, 57]
Kniebandage	Möglich	[5]
Patellofemorale Bandage	Möglich	[5]
Kniehartrahmenorthese	Nicht empfohlen	[5, 71]
Hüftbandage	Möglich	[8, 23]
Hüftorthese	Möglich	[8, 23]
Oberschenkelgips	Nicht empfohlen	[71]
Unterschenkelgips	Nicht empfohlen	[71]
Arthrose, Hüftgelenk	Individuell	[2, 22]
Arthrose, Kniegelenk	Individuell	[2, 22]
Z. n. Hüfttotalendoprothese	Nach 2 bis 6 Wochen	[20, 24, 28, 49, 54, 66]
Z. n. Knieendoprothese	Nach 2 bis 6 Wochen	[11, 17, 29, 35, 66]
Z. n. Hüftarthroskopie	Nach 2 Wochen	[34, 67]
Z. n. Kniearthroskopie	Nach 1 Woche	[19]
Z. n. Sprunggelenkarthroskopie	Nach 2 Wochen	[36, 61]
Z. n. vorderer Kreuzbandplastik, rechts	Nach 3–6 Wochen	[44, 69]
Z. n. vorderer Kreuzbandplastik, links	Nach 2 Wochen	[44]
Z. n. Hallux-Valgus-Operation	Nach 8 Wochen	[41]
Schaft- und Gelenkfrakturen, untere Extremität	6 Wochen nach Vollbelastung	[10]

auf Standardfahrmanöver hat, jedoch zu signifikant häufigeren Kollisionen bei simulierten Ausweichmanövern führt [18]. Das Führen eines Kfz mit einer Schultergelenkorthese ist somit nicht empfohlen.

Häufig angewendete Ruhigstellungen im klinischen Alltag sind der Ober- und der Unterarmgips. Jackson et al. konnten in einem Fahrsimulator an 20 Probanden zwar einen signifikanten Einfluss auf die Lenkpräzision, jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Lenkreaktionszeit beim Tragen eines Unterarmgipses oder eines „sugar tong splint“ feststellen [25]. Auch Jones et al. konnten einen signifikanten negativen Einfluss durch einen Unterarmgips auf die Fahrtauglichkeit an 20 gesunden Probanden in einem Fahrparcours-Test nachweisen und können das Führen eines Kfz mit einem Unterarmgips nicht empfehlen. Als einzige Ausnahme wird ein Unterarmgips auf der linken Seite beim Führen eines Kfz im Rechtsverkehr genannt, da dieser keinen signifikanten Einfluss auf das

erfolgreiche Absolvieren des Fahrparcours hatte [27]. Demgegenüber konnten Mansour et al. an einem etwas größeren Probandenkollektiv (30 gesunde Probanden) im Fahrsimulator keine signifikante Beeinflussung der Rundenzeit, Lenkpräzision und Anzahl an Unfällen und somit der Fahrtauglichkeit durch einen Unterarmgips feststellen [38]. In einer Übersichtsarbeit von 2013 kamen die Autoren ebenfalls zu der Schlussfolgerung, dass die Ruhigstellung in einem Unterarmgips nicht zwingend eine Fahruntauglichkeit bedeutet [39]. Bei der Ruhigstellung mit einem Oberarmgips ist die Literatur jedoch eindeutig, dass eine Fahrtauglichkeit nicht mehr gegeben ist [3, 31, 55, 63]. Rawal et al. untersuchten den Bewegungsumfang der oberen Extremität an gesunden Probanden während einer Fahrsimulation mittels „motion tracking system“. Im Zweifel können die gemessenen Bewegungsumfänge (Schulter: Flexion: 14–54°, Adduktion/Abduktion: 9°–0–18°, Innenrotation/Außenrotation: 6°–0–32°; Ellenbogen: Flexion 35–72°,

Pronation/Supination: 77°–0–24°; Handgelenk: Palmarflexion/Dorsalextension: 34°–0–23°) zur Orientierung bei der Beurteilung der Fahrtauglichkeit bei Bewegungslimitierungen herangezogen werden [50].

Orthopädisch/unfallchirurgische Erkrankungen und postoperative Zustände

Eine häufige Fragestellung bezüglich Fahrtauglichkeit im Hinblick auf die obere Extremität stellen in der Orthopädie und Unfallchirurgie postoperative und posttraumatische Zustände dar.

Nach Wissen der Autoren scheinen Empfehlungen oder klinische Tests zur Beurteilung der Fahrtauglichkeit nach Rotatorenmanschettennaht nicht zu existieren. Einer Studie zufolge schwankt die durchschnittliche Zeit bis zur Fahrtauglichkeit nach arthroskopischer Rotatorenmanschettennaht von einem Tag bis zu 4 Monaten und teilweise sogar länger [13]. Pandis et al. untersuchten die Muskelaktivität der Schultermuskulatur während einer simulierten Autofahrt in unterschiedlichen Sitzpositionen zum Lenkrad. Schnelle Richtungswechsel führten zu einem hohen Belastungsniveau des M. supraspinatus, welches 72 % der mittleren Reißfestigkeit einer Rotatorenmanschettennaht ausmachen kann. Eine nichtvollständig ausgeheilte Rotatorenmanschettennaht kann daher die sichere Teilnahme am Straßenverkehr beeinflussen, und eine Fahrtauglichkeit ist erst nach vollständiger Ausheilung empfohlen. Interessanterweise sinkt die Belastung des M. supraspinatus ab, wenn eine Sitzposition nahe am Lenkrad gewählt wird [46]. Demgegenüber konnte gezeigt werden, dass Patienten nach arthroskopischer subakromialer Dekompression in der Regel nach 4 Wochen wieder fahrtauglich sind [40].

Bezüglich der Fahrtauglichkeit nach einer Schultertotalendoprothese konnte in einer retrospektiven Analyse gezeigt werden, dass über 90 % der Patienten nach 3 Monaten postoperativ wieder fahrtauglich waren [42].

Acharya et al. untersuchten die durchschnittliche Dauer der Fahruntauglichkeit nach offener Dekompression bei Karpaltunnelsyndrom. Die Studie ergab, dass

Tab. 2 Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bei Ruhigstellungen und orthopädischen Erkrankungen der oberen Extremität

Obere Extremität	Fahrtauglichkeit	Quellen
Schulterorthese	Nicht empfohlen	[18]
Oberarmgips	Nicht empfohlen	[3, 31, 55, 63]
Unterarmgips	Unklar, nicht empfohlen	[3, 25, 27, 38, 39]
Z. n. arthroskopischer Rotatorenmanschettennaht	Unklar, Wochen bis Monate ^a	[13, 46]
Z. n. arthroskopischer subakromialer Dekompression	Unklar, nach 4 Wochen ^a	[40]
Z. n. Schultertotalendoprothese	Unklar, nach 3 Monaten ^a	[42]
Z. n. Karpaltunneldekompression	Unklar, nach 9 Tagen ^a	[1]
Frakturen des Oberarms	Unklar, nach 16 Wochen ^a	[47]
Frakturen des Unterarms	Unklar, nach 7,5 Wochen ^a	[47]
Frakturen des Handgelenks	Unklar, nach 6 Wochen ^a	[47]

^aDie Werte beziehen sich auf retrospektive Auswertungen, ab denen Patienten in der Regel wieder fahrtauglich sind

Patienten nach offener Dekompression durchschnittlich nach 9 Tagen wieder fahrtauglich waren [1].

Auch bezüglich Frakturen der oberen Extremität im Hinblick auf Fahrtauglichkeit existieren in der Literatur keine Grenzwerte oder klinischen Tests. In einer retrospektiven Datenauswertung, in der die durchschnittliche Dauer bis zur Wiederaufnahme alltäglicher Tätigkeiten ausgewertet wurde, zeigte sich, dass nach Frakturen des Handgelenks 63,8 % bis zu 6 Wochen, nach Frakturen des Oberarms 46,2 % bis zu 16 Wochen und nach Frakturen des Unterarms 59,1 % bis zu 7,5 Wochen fahrtauglich waren [47].

Einen Überblick zu den jeweiligen Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit im Hinblick auf die obere Extremität gibt **Tab. 2**.

Diskussion

Die Beurteilung der Fahrtauglichkeit bei Bewegungseinschränkungen und Erkrankungen des Bewegungs- und Halteapparates kann nach aktuellem Kenntnisstand nur schwierig systematisiert werden. Es liegen keine expliziten Kriterien oder gesetzlich bindende Vorschriften vor, nach denen einheitlich beurteilt werden könnte [57]. Individuell sollten gelenkbezogene Parameter wie Bewegungsumfang, Kraftgrad, Schmerz sowie Kompensationsvermögen durch angrenzende Gelenke und das generelle Reaktionsvermögen, insbesondere im

Hinblick auf eine bestehende Medikation, mit in die Beurteilung einbezogen werden. Roberts et al. forderten in diesem Kontext eine höhere Selbstkontrolle und Selbstverantwortung des Patienten mit geringerer Haftung des Arztes. Patienten sollen in einem sog. 4-Punkte-Plan (1. Aushändigung eines Aufklärungsbogens durch den Arzt, welcher über die Selbstverantwortung des Patienten aufklärt; 2. der Patient soll eine Testfahrt mit einer weiteren Person außerhalb des öffentlichen Straßenverkehrs durchführen; 3. bei Unsicherheiten der Testfahrt oder in Spezialfällen (z. B. weil der Patient ein gewerblicher Fahrer ist) sollte eine offizielle Testfahrt durch eine Behörde/Fahrlehrer durchgeführt werden; 4. sollte die Gesetzgebung der jeweiligen Region oder des jeweiligen Landes andere Bestimmungen vorsehen, so sind diese vor 1.–3. zu befolgen) selbst überprüfen, ob sie sich für fahrtauglich halten [52]. Auch die hier vorliegenden Ergebnisse sind lediglich als Richtwerte anzusehen.

Zusammenfassend zeigt sich, dass in einer Vielzahl an Studien für die Beurteilung der unteren Extremität insbesondere die Bremsreaktionszeit sowie die Bremskraft genutzt werden [4, 5, 7–9, 20, 29, 33, 36, 41, 49, 56, 60, 61, 65–67]. Für die Beurteilung der oberen Extremität zeigte sich hingegen, dass eine große Unsicherheit seitens der Patienten und der beratenden Ärzte besteht, ab wann eine Fahrtauglichkeit ausgesprochen wer-

den sollte [51]. Dies liegt daran, dass im Gegensatz zur Beurteilung der unteren Extremität für die obere Extremität kaum einheitliche und im klinischen Alltag verwertbare Tests existieren [9, 38, 53]. Die zum Führen eines Kfz notwendigen Aufgaben sind für die obere Extremität mit gleichzeitiger Nutzung des Lenkrads, je nach Fahrzeugtyp der Gangschaltung etc., als wesentlich komplexer und inhomogener als die Aufgaben für die untere Extremität anzusehen. Allein die Sitzpositionen kann einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben [26, 48, 53], und dies scheint insbesondere für die obere Extremität bei Lenkradmanövern zu gelten [58]. Darüber hinaus sind bei einem Kfz mit Schaltgetriebe möglicherweise höhere Anforderungen als bei einem Kfz mit Automatikgetriebe zu stellen. Hierzu liegen jedoch keine Vergleichsstudien vor. Oftmals kann die voraussichtliche Dauer der Fahrtauglichkeit daher nur anhand von generellen Erfahrungswerten abgeschätzt und der Patient nicht individuell und mittels klinischer Tests beraten werden [1, 13, 40, 42, 47].

In diesem Zusammenhang muss jedoch gesagt werden, dass die Beurteilung der Fahrtauglichkeit mithilfe spezifischer Test wie die Bremsreaktionszeit, Bremskraft oder die Testung mittels verschiedener Fahrsimulatoren generell als kritisch zu betrachten ist, da sie nur isolierte Teilaspekte beim Führen eines Kfz darstellen. Darüber hinaus gibt es bisher keine Studien, die eine Korrelation zwischen der Bremsreaktionszeit und einem erhöhten Unfallrisiko zeigen können. Kritisch ist zudem, dass die Testung mittels Fahrsimulatoren, Bremsreaktionszeiten und Bremskraft ein gegenüber der bisherigen Fahrprüfung nach § 17 der Fahrerlaubnisverordnung (FeV) deutlich schärferes Verfahren und somit Selektionskriterium darstellt, welches von einem gesunden Fahrerlaubnisbewerber oder einem Fahrerlaubnisinhaber, der seine Fahreignung testen möchte, in einer Fahrprüfung bisher nicht verlangt wird. Es werden somit höhere Anforderungen an Patienten als an gesunde Fahrbewerber gestellt. Weiterer Kritikpunkt bezüglich der Fahrsimulatoren ist, dass dem beurteilenden Arzt im Zweifelsfall kein Instrumentari-

um zur Verfügung steht, um die gemessenen Grenzwerte im klinischen Alltag individuell nachzuvollziehen. In diesem Kontext wären objektivierbare und im klinischen Alltag umsetzbare Messverfahren, wie der bereits empfohlene STST [10, 44] zur Beurteilung der unteren Extremität, zielführender. Zur Beurteilung der individuellen Fahrtauglichkeit würden sich z. B. der notwendige Kraftgrad zum Führen eines Kfz, der mittels Jamar-Dynamometer oder die mittels Goniometer gemessenen und reproduzierbaren Bewegungsumfänge der jeweiligen Gelenke anbieten. Von der American Medical Association (AMA) und der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) wurde diesbezüglich ein Testinventar, das Assessment of driving-Related-Skills (ADReS), vorgeschlagen, um im klinischen Alltag die Fahrtauglichkeit älterer Patienten einschätzen zu können [68]. In diesem Testinventar sollen Patienten Fahrbewegungen, wie z. B. einen Schulterblick oder eine 90°-Lenkradbewegung, imitieren, und der Arzt muss einschätzen, ob diese angemessen ausgeführt wurden.

Die Literaturrecherche ergab jedoch auch, dass die Dauer der Fahrtauglichkeit im hohen Maße vom Schmerzmanagement und der Medikation abhängt [70]. In Ergänzung zu der klinischen Testung sollten daher bei der Beurteilung der Fahrtauglichkeit immer ein Schmerz-Score erhoben und die aktuelle Medikation mit in die Beurteilung aufgenommen werden, da eine signifikante Korrelation zwischen Schmerz-Score und z. B. der Bremsreaktionszeit nachgewiesen werden konnte [33]. Die Korrelation zwischen Schmerz-Score und Bremsreaktionszeit scheint jedoch gelenkspezifisch zu sein und z. B. weniger für das Sprunggelenk zu gelten [65].

Schlussfolgerung

Die vorliegende Übersichtsarbeit gibt dem behandelnden Arzt eine systematische und praxisnahe Hilfestellung bei der Beurteilung der Fahrtauglichkeit nach orthopädisch/unfallchirurgischen Erkrankungen. Insbesondere für die obere Extremität fehlt es jedoch an Evidenz, sodass hier nur Richtwerte angegeben

werden können. Auch eine systematische Einteilung ist nicht möglich, da im Gegensatz zur unteren Extremität, kaum einheitliche und im klinischen Alltag verwertbare Tests zur Prüfung der Fahrtauglichkeit existieren.

Korrespondenzadresse

E. Schiffner

Klinik für Unfall- und Handchirurgie,
Universitätsklinikum Düsseldorf
Moorenstr. 5, 40225 Düsseldorf, Deutschland
erik.schiffner@med.uni-duesseldorf.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. D. Latz, E. Schiffner, J. Schnependahl, B.H. Thalmann, P. Jungbluth, J. Grassmann, J. Windolf und S.V. Gehrmann geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Dieser Beitrag beinhaltet keine von den Autoren durchgeführten Studien an Menschen oder Tieren.

Literatur

- Acharya AD, Auchincloss JM (2005) Return to functional hand use and work following open carpal tunnel surgery. *J Hand Surg* 30:607–610. <https://doi.org/10.1016/j.jhsb.2005.06.018>
- von Bernstorff M, Feierabend M, Jordan M et al (2017) Radiographic hip or knee osteoarthritis and the ability to drive. *Orthopedics* 40:e82–e89
- Chong PY, Koehler EA, Shyr Y et al (2010) Driving with an arm immobilized in a splint: a randomized higher-order crossover trial. *J Bone Joint Surg Am* 92:2263–2269
- Dalury DF, Tucker KK, Kelley TC (2011) When can I drive?: brake response times after contemporary total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res* 469:82–86. <https://doi.org/10.1007/s11999-010-1507-1>
- Dammerer D, Giesinger JM, Biedermann R et al (2015) Effect of knee brace type on braking response time during automobile driving. *Arthroscopy* 31:404–409. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2014.09.003>
- Dammerer D, Waidmann C, Haid C et al (2015) The effect of ankle brace type on braking response time—a randomised study. *Injury* 46:2278–2282. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.07.038>
- Dammerer D, Braito M, Biedermann R et al (2016) Effect of surgical shoes on brake response time after first metatarsal osteotomy—a prospective cohort study. *J Orthop Surg Res* 11:14. <https://doi.org/10.1186/s13018-016-0350-9>
- Dammerer D, Waidmann C, Huber DG et al (2017) Effect of hip braces on brake response time: repeated measures designed study. *Prosthet Orthot Int* 41:373–378. <https://doi.org/10.1177/0309364616640925>
- DiSilvestro KJ, Santoro AJ, Tjoumakaris FP et al (2016) When can I drive after orthopaedic surgery? A systematic review. *Clin Orthop Relat Res* 474:2557–2570. <https://doi.org/10.1007/s11999-016-5007-9>

- Egol KA, Sheikhaezadeh A, Koval KJ (2008) Braking function after complex lower extremity trauma. *J Trauma Acute Care Surg* 65:1435–1438. <https://doi.org/10.1097/TA.0b013e31811eaab8>
- Ellanti P, Raval P, Rington HP (2015) Return to driving after total knee arthroplasty. *Acta Orthop Traumatol Turc* 49:593–596
- Gao Z, Li C, Hu H et al (2016) Simulator study of young driver's instinctive response of lower extremity to a collision. *Traffic Inj Prev* 17:423–429. <https://doi.org/10.1080/15389588.2015.1081898>
- Gholson JJ, Lin A, McGlaston T et al (2015) Return to driving after arthroscopic rotator cuff repair: patient-reported safety and maneuverability. *J Surg Orthop Adv* 24:125–129
- Goodwin D, Baecher N, Pitta M et al (2013) Driving after orthopedic surgery. *Orthopedics* 36:469–474
- Graecmann N, Albrecht M (2018) Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahrereignung. Stand: 24. Mai 2018. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen Mensch und Sicherheit Heft M 115
- Green M (2000) „How long does it take to stop?“ Methodological analysis of driver perception-brake times. *Transp Hum Factors* 2:195–216. https://doi.org/10.1207/sthf0203_1
- Hartman J, Thornley P, Oreskovich S et al (2018) Braking time following total knee arthroplasty: a systematic review. *J Arthroplasty* 33:284–290.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jarth.2017.08.012>
- Hasan S, Chay E, Atanda A et al (2015) The effect of shoulder immobilization on driving performance. *J Shoulder Elbow Surg* 24:273–279. <https://doi.org/10.1016/j.jse.2014.06.046>
- Hau R, Csongvay S, Bartlett J (2000) Driving reaction time after right knee arthroscopy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 8:89–92. <https://doi.org/10.1007/s001670050192>
- Hernandez VH, Ong A, Orozco F et al (2015) When is it safe for patients to drive after right total hip arthroplasty? *J Arthroplasty* 30:627–630. <https://doi.org/10.1016/j.jarth.2014.11.015>
- Heß R, Burmann M (2017) Handbuch des Strassenverkehrsrecht. C.H. Beck, München
- Hofmann UK, Jordan M, Rondak I et al (2014) Osteoarthritis of the knee or hip significantly impairs driving ability (cross-sectional survey). *BMC Musculoskelet Disord* 15:20. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-15-20>
- Hofmann UK, Thumm S, Jordan M et al (2016) The effects of hip and spine orthoses on braking parameters: a simulated study with healthy subjects. *Phys Med Rehabil* 8:35–44. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2015.06.002>
- Huang H-T, Liang J-M, Hung W-T et al (2014) Timeframe for return to driving for patients with minimally invasive knee arthroplasty is associated with knee performance on functional tests. *BMC Musculoskelet Disord* 15:198
- Jackson LT, Crisler MC, Tanner SL et al (2017) Effects of upper extremity immobilization and use of a spinner knob on vehicle steering. *Hand* 12:597–605. <https://doi.org/10.1177/1558944716675133>
- Jeong Y, Park W (2017) Differences between obese and non-obese drivers in preferred vehicle interior components setting and driving posture. *Ergonomics* 60:731–742. <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1211322>
- Jones EM, Barrow AE, Skordas NJ et al (2017) The effects of below-elbow immobilization on driving performance. *Injury* 48:327–331. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.12.024>
- Jordan M, Hofmann UK, Grünwald J et al (2014) Influence of left- and right-side total

- hip arthroplasty on the ability to perform an emergency stop while driving a car. *Arch Phys Med Rehabil* 95:1702–1709. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.03.009>
29. Jordan M, Hofmann U-K, Rondak I et al (2015) Brake response time is significantly impaired after total knee arthroplasty: investigation of performing an emergency stop while driving a car. *Am J Phys Med Rehabil* 94:665–676. <https://doi.org/10.1097/phm.0000000000000342>
 30. Kalamaras MA, Rando A, Pitchford DGK (2006) Driving plastered: Who does it, is it safe and what to tell patients. *ANZ J Surg* 76:439–441. <https://doi.org/10.1111/j.1445-2197.2006.03762.x>
 31. Kalamaras MA, Rando A, Pitchford DG (2006) Driving plastered: who does it, is it safe and what to tell patients. *ANZ J Surg* 76:439–441
 32. Kellgren JH, Lawrence JS (1957) Radiological assessment of osteo-arthrosis. *Ann Rheumatic Diseases* 16(4):494
 33. Kim C-Y, Wiznia DH, Averbukh L et al (2016) PROMIS computer adaptive tests compared with time to brake in patients with complex lower extremity trauma. *J Orthop Trauma* 30:592–596. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000000645>
 34. Kwapisz A, Momaya A, Stavrinou D et al (2017) Return to driving after hip arthroscopy. *Arthroscopy* 33:e148. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.08.185>
 35. Liebensteiner MC, Rochau H, Renz P et al (2014) Brake response time returns to the pre-surgical level 6 weeks after unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22:1926–1931. <https://doi.org/10.1007/s00167-014-3050-1>
 36. Liebensteiner MC, Braito M, Giesinger JM et al (2016) Driving ability after right-sided ankle arthroscopy—a prospective study. *Injury* 47:762–765. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2015.11.011>
 37. MacDonald W et al (1988) The effect of total hip replacement on driving reactions. *J Bone Joint Surg Br* 70-B:202–205. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.70b2.3346288>
 38. Mansour D, Mansour KG, Kenny BW et al (2015) Driving with a short arm cast in a simulator. *J Orthop Surg* 23:327–330. <https://doi.org/10.1177/230949901502300314>
 39. Marecek GS, Schafer MF (2013) Driving after orthopaedic surgery. *J Am Acad Orthop Surg* 21:696–706. <https://doi.org/10.5435/jaas-21-11-696>
 40. McClelland D, Paxinos A, Dodenhoff RM (2005) Rate of return to work and driving following arthroscopic subacromial decompression. *ANZ J Surg* 75:747–749. <https://doi.org/10.1111/j.1445-2197.2005.03529.x>
 41. McDonald E, Shakked R, Daniel J et al (2017) Driving after hallux valgus surgery. *Foot Ankle Int* 38:982–986. <https://doi.org/10.1177/1071100717711926>
 42. Muh SJ, Shishani Y, Streit J et al (2012) The impact of joint replacement on driver function and safety. *Open J Orthop* 2:121
 43. Murray J-C, Tremblay M-A, Corriveau H et al (2015) Effects of right lower limb orthopedic immobilization on braking function: an on-the-road experimental study with healthy volunteers. *J Foot Ankle Surg* 54:554–558. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2014.09.032>
 44. Nguyen T, Hau R, Bartlett J (2000) Driving reaction time before and after anterior cruciate ligament reconstruction. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 8:226–230. <https://doi.org/10.1007/s001670000115>
 45. Nunez VA, Giddins GE (2004) 'Doctor, when can I drive?': an update on the medico-legal aspects of driving following an injury or operation. *Injury* 35:888–890. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2003.11.009>
 46. Pandis P, Prinold JAI, Bull AMJ (2015) Shoulder muscle forces during driving: sudden steering can load the rotator cuff beyond its repair limit. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 30:839–846. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2015.06.004>
 47. Pasco JA, Sanders KM, Hoekstra FM et al (2005) The human cost of fracture. *Osteoporos Int* 16:2046–2052. <https://doi.org/10.1007/s00198-005-1997-y>
 48. Peng J, Wang X, Denninger L (2017) Ranges of the least uncomfortable joint angles for assessing automotive driving posture. *Appl Ergon* 61:12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.12.021>
 49. Qurashi S, Chinnappa J, Lord SJ et al (2017) Driving after microinvasive total hip arthroplasty. *J Arthroplasty* 32:1525–1529. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2016.11.052>
 50. Rawal A, Chehata A, Horberry T et al (2018) Defining the upper extremity range of motion for safe automobile driving. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 54:78–85. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.03.009>
 51. Rees JL, Sharp RJ (2002) Safety to drive after common limb fractures. *Injury* 33:51–54. [https://doi.org/10.1016/S0020-1383\(00\)00153-4](https://doi.org/10.1016/S0020-1383(00)00153-4)
 52. Roberts C, Protzer L (2016) 'Doctor, can I drive?': the need for a rational approach to return to driving after musculoskeletal injury. *Injury* 47:513–515. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2016.02.010>
 53. Van Rooij L, Elrofai H, Philippens M et al (2013) Volunteer kinematics and reaction in lateral emergency maneuver tests. *Stapp Car Crash J* 57:313
 54. Ruel AV, Lee Y-Y, Boles J et al (2015) A novel assessment of braking reaction time following THA using a new fully interactive driving simulator. *HSS J* 11:143–147. <https://doi.org/10.1007/s11420-015-9437-9>
 55. Sandvall BK, Friedrich JB (2015) Driving with upper extremity immobilization: a comprehensive review. *J Hand Surg Am* 40:1042–1047. <https://doi.org/10.1016/j.jhssa.2014.04.037>
 56. Sansosti LE, Rocha ZM, Lawrence MW et al (2016) Effect of variable lower extremity immobilization devices on emergency brake response driving outcomes. *J Foot Ankle Surg* 55:999–1002. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2016.05.010>
 57. Sansosti LE, Greene T, Hasenstein T et al (2017) U.S. State driving regulations relevant to foot and ankle surgeons. *J Foot Ankle Surg* 56:522–542. <https://doi.org/10.1053/j.jfas.2017.01.022>
 58. Schmidt S, Seiberl W, Schwirtz A (2015) Influence of different shoulder-elbow configurations on steering precision and steering velocity in automotive context. *Appl Ergon* 46:176–183. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2014.07.017>
 59. Schubert W, Huettner M, Reimann C et al (2018) Kommentar Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahreignung, 3. Aufl. Kirschbaum, Bonn
 60. Schwienbacher S, Aghayev E, Hofmann UK et al (2015) Driving and emergency braking may be impaired after tibiotalar joint arthrodesis: conclusions after a case series. *Int Orthop* 39:1335–1341. <https://doi.org/10.1007/s00264-015-2789-4>
 61. Sittapairoj T, Anthony CA, Rungprai C et al (2017) Brake reaction time after ankle and subtalar arthroscopy. *Arthroscopy* 33:2231–2237. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2017.08.245>
 62. Spalding TJ, Kiss J, Kyberd P et al (1994) Driver reaction times after total knee replacement. *J Bone Joint Surg Br* 76-B:754–756. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.76b5.8083265>
 63. Stevenson H, Peterson N, Talbot C et al (2013) An objective assessment of safety to drive in an upper limb cast. *J Hand Surg Eur Vol* 38:321–324
 64. Stinton SB, Edgar DW, Moloney NA et al (2015) When can I drive? Return to driving following a wrist fracture: a critical review. *Hand Ther* 20:95–101. <https://doi.org/10.1177/1758998315597013>
 65. Talusan PG, Miller CP, Save AV et al (2015) Driving reaction times in patients with foot and ankle pathology before and after image-guided injection: pain relief without improved function. *Foot Ankle Spec* 8:107–111. <https://doi.org/10.1177/1938640014548420>
 66. Van der Velden CA et al (2017) When is it safe to resume driving after total hip and total knee arthroplasty? *Bone Joint J* 99-B:566–576. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.99b5.bjj-2016-1064.r1>
 67. Vera AM, Beauchman N, McCulloch PC et al (2017) Brake reaction time after hip arthroscopy for femoroacetabular impingement and labral tear. *Arthroscopy* 33:971–976. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.11.020>
 68. Wang C, Kosinski C, Schwartzberg J et al (2003) Physician's guide to assessing and counseling older drivers
 69. Wasserman BR, Singh BC, Kaplan DJ et al (2017) Braking reaction time after right-knee anterior cruciate ligament reconstruction: a comparison of 3 grafts. *Arthroscopy* 33:173–180. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.05.043>
 70. Waton A, Chapman DM (2018) Right TKR patients treated with enhanced pain and rehabilitation protocols can drive at 2 weeks. *J Knee Surg*. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1660478>
 71. Waton A et al (2011) Immobilisation of the knee and ankle and its impact on drivers' braking times. *J Bone Joint Surg Br* 93-B:928–931. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.93b7.25859>
 72. World Health Organization (2011) Decade of action for road safety, 2011–2020: saving millions of lives. WHO, Geneva
 73. World Health Organization (2015) Global status report on road safety 2015. World Health Organization, Genf

Obere Extremität

<https://doi.org/10.1007/s11678-017-0426-0>

Eingegangen: 23. April 2017

Angenommen: 1. August 2017

© Springer Medizin Verlag GmbH 2017



CrossMark

David Latz¹ · Sabrina Pfau¹ · Christos Koukos¹ · Pascal Jungbluth¹ · Georg Jansing² · Erik Schiffner¹ · Lars Fabian Seiler¹ · Joachim Windolf¹ · Sebastian Viktor Gehrman¹¹ Klinik für Unfall- und Handchirurgie, Universitätsklinikum Düsseldorf, Düsseldorf, Deutschland² Lehrstuhl für Angewandte Mathematik, Mathematisches Institut, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Deutschland

Doctor, when can I drive

Die Beweglichkeit des Handgelenks beim Autofahren

Einleitung

Verletzungen des Handgelenks gehören zu den häufigsten Handverletzungen des Menschen [1]. Insbesondere bei Frakturen im Bereich des Handgelenks können Bewegungseinschränkungen auftreten, die sich auf die Fahrsicherheit beim Führen eines Kraftfahrzeugs (Kfz) auswirken. Fahruntauglich ist diejenige Person, die aufgrund einer Krankheit oder körperlichen Behinderung ein Kfz nicht sicher führen kann [2]. Der behandelnde Arzt haftet gegenüber seinen Patienten und an einem Unfall beteiligten Dritten, wenn er bei erkennbarer Einschränkung oder Aufhebung der Fahrtauglichkeit den Patienten hierüber nicht aufklärt. Diese Pflicht ist im Haftungsfall auch nachzuweisen (BGH Urteil vom 08.04.2003 Az.: VI ZR 265/02, NJW 2003, 2309). Ob ein Patient nach einer stattgehabten Verletzung des Handgelenks fahrtauglich ist, lässt sich jedoch nicht allgemeingültig feststellen, da die zum Führen eines Kfz notwendigen Funktionen ein noch unbekanntes Maß an Gelenkbeweglichkeit und Koordination erfordern. Dadurch ist auch eine transparente Beurteilung des Patienten bezüglich seiner Fahrtauglichkeit nicht möglich.

D. Latz, S. Pfau, C. Koukos, P. Jungbluth, E. Schiffner, L.F. Seiler und insbesondere S.V. Gehrman waren Hauptbeteiligte für das Management der Probanden, die statistische Auswertung der erhobenen Daten sowie die Überprüfung und Korrektur des Manuskripts. Alle Autoren haben das endgültige Manuskript gelesen und genehmigt.

Bisher existieren nur wenige Studien zum Thema Fahrtauglichkeit nach orthopädisch/unfallchirurgischen Erkrankungen, die den behandelnden Ärzten als evidenzbasierte Grundlage zur Entscheidungshilfe dienen können [3–5]. In den Begutachtungsleitlinien zur Kraftfahrereignung, die regelmäßig von der Bundesanstalt für Straßenwesen herausgegeben werden, sind keine Grenzwerte bezüglich Bewegungsumfang, Koordination und Reaktionszeit der oberen Extremität benannt [3]. Meist wird es der subjektiven Wahrnehmung des Patienten überlassen, ab wann er sich zum Führen eines Kfz sicher fühlt [6, 7]. Diese Intransparenz führt sogar dazu, dass Patienten, die mit Gipsverbänden versorgt wurden, in der Praxis durchaus Kraftfahrzeuge führen und dadurch ein nicht kalkulierbares Risiko im Straßenverkehr darstellen [8, 9].

Nach Verletzungen des Handgelenks können Bewegungseinschränkungen auftreten. Die globale Handgelenkbewegung, die als Bewegung zwischen distalem Radius und 3. Mittelhandknochen definiert wird, ist abhängig von Lebensalter, Ellenbogen- und Fingergelenkstellung [10]. Üblicherweise wird die Handgelenkbeweglichkeit mittels der maximal erreichten Werte aktiv und passiv entlang der Hauptbewegungsrichtungen (Flexion/Extension und Ulnar-/Radialabduktion) manuell goniometrisch gemessen. Über die mehrdimensionalen Bewegungen des Handgelenks bei gesunden Probanden ist bereits viel bekannt [10]. Inwieweit die Fahrtaug-

lichkeit durch Handgelenksverletzungen beeinflusst wird, ist bisher nicht bekannt.

Die häufigste Fraktur des Erwachsenen ist die distale Radiusfraktur. Sie ist zudem Osteoporose assoziiert und tritt gehäuft im Alter und bei Frauen auf [1, 11]. In der Regel ist sie Folge eines Sturzes, bei dem sich der Verletzte mit dem dorsal extendierten Handgelenk versucht abzufangen (sog. Extensionsfraktur). Aufgrund des osteoporotischen Knochens ist oft ein Bagateltrauma ausreichend. Begleitverletzungen wie Kahnbeinbrüche und Bandrupturen zwischen Kahn- und Mondbein sind hingegen oftmals Folge eines Hochrasanztraumas und mit jüngeren Patienten vergesellschaftet [12]. Die Verletzungen entstehen meist im Rahmen von Sport- und Wegeunfällen [13], besonders bei jüngeren Patienten, die im Berufsleben auf eine uneingeschränkte Handgelenkfunktion angewiesen sind [14, 15].

Die früher vorwiegend konservative Behandlung durch Ruhigstellung im Gips hat zu unzureichenden klinischen und radiologischen Ausheilungsergebnissen geführt und ist zugunsten einer operativen Behandlung gewichen [16, 17]. Zusätzlich lässt ein steigender Aktivitätsanspruch im Alter diese operativen Eingriffe zunehmen. Dennoch besteht auch aus aktueller Sicht unter gewissen Voraussetzungen die Indikation zur konservativen Therapie.

Die Entscheidung zur operativen Therapie ist u. a. abhängig von der Frakturmorphologie und -stabilität, Begleitverletzungen, Komorbiditäten und dem An-

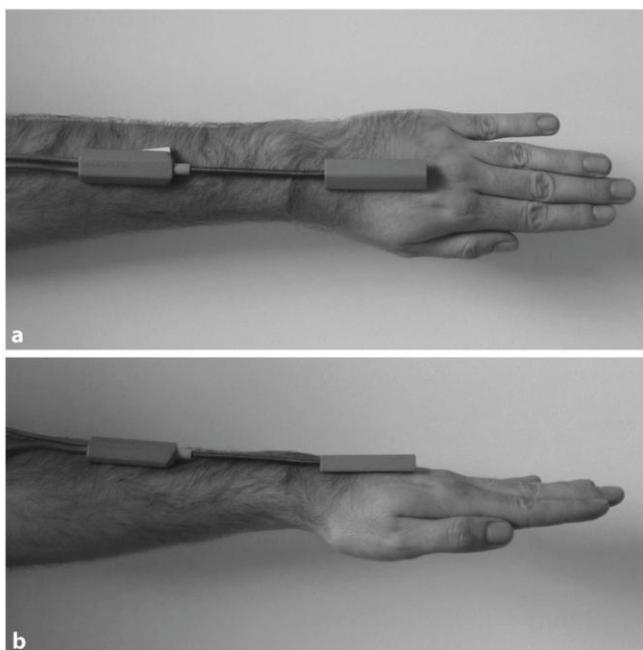


Abb. 1 ▲ Anbringung des biaxialen Elektrogoniometers mit dem distalen Sensor über dem Os metacarpale III und dem proximalen Sensor in dessen Verlängerung über dem Unterarm. Ansicht von dorsal (a) und von lateral (b)

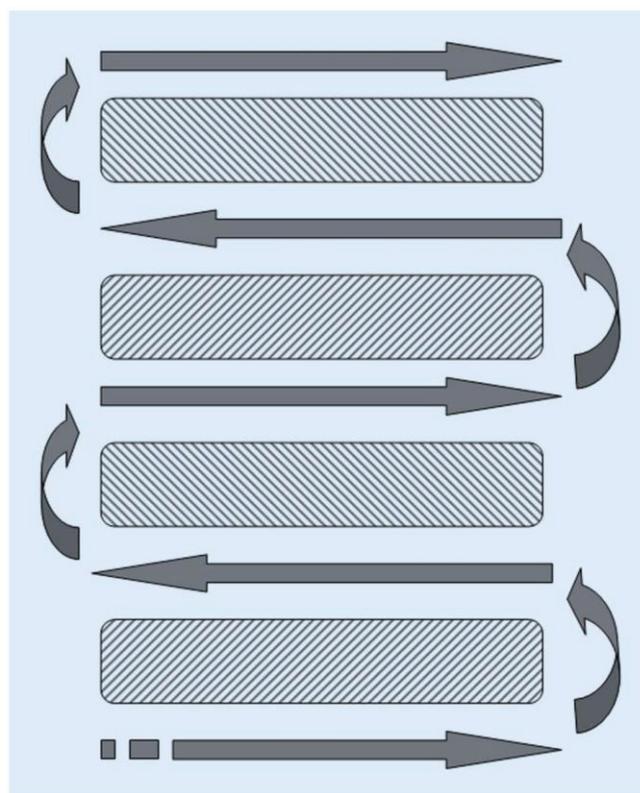


Abb. 2 ▲ Schematische Darstellung der Teststrecke

spruch der Patienten. Der Vorteil der operativen Therapie besteht in einer Wiederherstellung der Anatomie sowie übungsstabilen Fraktursituation, welche eine sofortige Beweglichkeit des Handgelenks ermöglicht und daher das funktionelle Ergebnis verbessert [17]. Hierdurch wird zwar eine Behandlung ohne Gipsruhigstellung ermöglicht, jedoch ist die Beweglichkeit des Handgelenks unmittelbar postoperativ meist noch stark eingeschränkt. Hierbei läuft der Patient Gefahr, dass er trotz gipsfreier Nachbehandlung nicht sicher ein Kfz führen wird.

In einer vorausgehenden Studie über die globale Handgelenkbeweglichkeit bei gesunden Erwachsenen wurde die Grundlage zur Analyse der Fahrtauglichkeit nach Verletzungen des Handgelenks geschaffen [10]. Die Studienergebnisse demonstrieren, inwieweit die multidirektionale Handgelenkbeweglichkeit von der Stellung der Fingergelenke abhängen. Außerdem konnte durch die Ergebnisse gezeigt werden, dass bei Bewegungseinschränkungen der Fingergelenke auch eine Einschränkung des Handgelenks zu erwarten ist. Die

Handgelenkbeweglichkeit verläuft über vier Quadranten in Flexion/Extension und Ulnar-/Radialabduktion. Die Zirkumduktionskurve des Handgelenks ist in ihrer Form asymmetrisch mit einer Abflachung im Quadranten über Flexion/Ulnarabduktion und einer spitzen Komponente über dem Quadranten der Extension/Radialabduktion. Zudem ist die Zirkumduktionskurve in ihrer Form nicht stabil, sondern von der Stellung des Ellenbogens und der Fingergelenke abhängig.

Bei verstärkter Beugung der Fingergelenke zeigt sich an gesunden Probanden eine unvorhergesehene exzentrische Abnahme in den Hauptbewegungsachsen auf den Quadranten Extension/Flexion und Radial-/Ulnarabduktion. Die Beweglichkeitsabnahme betrifft hauptsächlich die Richtungen Flexion/Ulnarabduktion und lässt sich mit dem Hand-/Fingergelenksynergismus erklären. Die globale Handgelenkbeweglichkeit wurde in vorausgehenden Studien bereits untersucht [10, 18–21].

Die zum Führen eines Kfz notwendigen Funktionen erfordern jedoch ein

noch nicht hinreichend charakterisiertes Maß an Gelenkbeweglichkeit und Koordination. Die Frage nach der Dauer der Fahruntauglichkeit nach stattgehabten Verletzungen kann nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft somit nicht allgemein beantwortet werden. Ziel der vorliegenden Studie war es, qualitative Ergebnisse über die Beweglichkeit des gesunden Handgelenks beim Führen eines Kfz zu gewinnen. Auf dieser Basis können in zukünftigen Studien möglicherweise der Einfluss von simulierten Bewegungseinschränkungen auf die Fahrleistung beurteilt und somit die Auswirkungen häufig vorkommender Verletzungen des Handgelenks abgeschätzt werden. Hierdurch können zudem mögliche Kompensationsvorgänge durch die angrenzenden Gelenke identifiziert werden. Auf dieser Grundlage können in Zukunft gegebenenfalls experimentell gesicherte Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bezüglich Einschränkungen der oberen Extremität gegeben werden.

D. Latz · S. Pfau · C. Koukos · P. Jungbluth · G. Jansing · E. Schiffner · L. F. Seiler · J. Windolf · S. Gehrmann

Doctor, when can I drive. Die Beweglichkeit des Handgelenks beim Autofahren

Zusammenfassung

Hintergrund. Die zum Führen eines Kfz notwendigen Funktionen erfordern ein noch nicht hinreichend charakterisiertes Maß an Gelenkbeweglichkeit, sodass die Frage nach der Fahrtauglichkeit nach Verletzungen nicht allgemein beantwortet werden kann. Ziel der Studie war es, qualitative Ergebnisse über die Beweglichkeit des gesunden Handgelenks beim Führen eines Kfz zu gewinnen.

Material und Methodik. Eine dreidimensionale (3D-)Bewegungsanalyse wurde an 20 gesunden Probanden am rechten Handgelenk während des Führens eines Kfz durchgeführt und mit dem individuell maximalen aktiven Bewegungsmaß, durch Zirkumduktion des Handgelenks, verglichen. Ergänzend wurde die Fläche des Bewe-

gungsraums (Verkehrsfläche) bestimmt. Zur Charakterisierung des Bewegungsmusters bei der Fahrt wurden die Handgelenkpositionen nach ihrer Aufenthaltswahrscheinlichkeit in aufsteigender Reihenfolge in 5 Stufen unterteilt.

Ergebnis. Es zeigte sich kein signifikanter Unterschied des Bewegungsausmaßes in den Hauptbewegungsachsen. Dennoch konnte eine signifikant kleinere Verkehrsfläche bei der Fahrt gegenüber der Zirkumduktion festgestellt werden, und die Extension war erst auf Stufe 5, die Ulnarabduktion auf Stufe 4 signifikant kleiner als bei der Zirkumduktion.

Schlussfolgerung. Es konnte gezeigt werden, dass das maximale aktive Bewegungsausmaß in den Hauptbewegungsachsen eines

gesunden Handgelenks beim Führen eines Kfz vollständig genutzt wird. Die signifikant kleinere Verkehrsfläche deutet darauf hin, dass die möglichen Bewegungsrichtungen des Handgelenks zwar nicht alle angesteuert werden, bestimmte Extrempositionen aber regelmäßig zu finden sind. Ferner deuten die Ergebnisse darauf hin, dass besonders die Extension und Ulnarabduktion beim Führen eines Kfz signifikant häufiger und über das aktive Bewegungsmaß hinaus genutzt werden.

Schlüsselwörter

Verkehrsmmedizin · Unfallchirurgie · Kraftfahrereignung · Fahrtauglichkeit · Radiusfraktur, distale

Doctor, when can I drive. Pattern and range of motion of the wrist while driving a car

Abstract

Background. The range of joint motion which is necessary to drive a car has not been sufficiently characterized yet. In this study, we tried to define the characteristic pattern and range of motion of the wrist while driving a car.

Materials and methods. A 3D motion analysis of the right wrist of 20 healthy subjects was performed while driving a car. To define the characteristic range of motion, the results were compared with the individual maximum active range of motion of the wrist. In addition, the area of wrist movement was calculated. In order to define the characteristic pattern of

motion while driving a car, the wrist positions were subdivided according to their location probability in five levels (25%, 50%, 75%, 90%, 99%).

Results. There were no significant differences of the range of motion in the main axes between driving a car and the individual maximum active range of motion. However, a significantly smaller area of wrist movement was observed. Remarkably, extension was not significantly smaller until level 5 and ulnar abduction until level 4.

Conclusion. Maximum active range of motion of the wrist is used in the main axes while

driving a car. The significantly smaller area of wrist movement suggests that not all possible wrist movements are used while driving a car but certain maximum movements in the main axes are regularly found. Furthermore, the results indicate that extension and ulnar abduction are used significantly more often and beyond active range of motion while driving a car.

Keywords

Traffic medicine · Trauma surgery · Driving fitness · Forensic medicine · Radius fracture, distal

Material und Methodik

Probanden

Die vorliegende Stichprobe bestand aus 20 gesunden Probanden (7 weiblich, 13 männlich). Das Alter variierte zwischen 19 und 33 Jahren und das mittlere Alter betrug 26,8 (\pm 3,1) Jahre (Mittelwert \pm Standardfehler des Mittelwerts). Zur exakten Charakterisierung des gesunden Bewegungsausmaßes des Handgelenks beim Führen eines Kfz wurden Ausschlusskriterien definiert: Nichtvorhandensein eines Führerscheins der Führerscheinklasse B, Nichtvorhan-

densein eines eigenen Fahrzeugs, Minderjährigkeit, Fahrleistung <5000 km/Jahr, Schwangerschaft, muskuloskeletale oder systemische Erkrankungen, Erkrankungen des zentralen oder peripheren Nervensystems, psychiatrische Erkrankungen und chronischer Drogen- oder Alkoholabusus. Um etwaige Ausschlusskriterien zu erkennen, füllten alle Versuchsteilnehmer einen standardisierten Fragebogen vor der Studie aus und gaben nach der Aufklärung und vor der Studie ihr schriftliches Einverständnis zur Teilnahme. Es liegt ein positives Votum (Studiennummer: 3362) der Ethikkommission der Medizinischen

Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf vor.

Bewegungsanalyse

Zur Charakterisierung des Bewegungsumfangs, welches zum Führen eines Kfz genutzt wird, wurde ein Bewegungsanalysesystem genutzt. Hierfür wurde den Probanden ein biaxiales Elektrogoniometer (Twin Axis Goniometer Typ SG 65, Fa. Biometrics Ltd. UK) in standardisierter Art und Weise an das rechte Handgelenk angelegt (▣ Abb. 1).

Mithilfe des biaxialen Elektrogoniometers können kontinuierliche Winkel-

Tab. 1 Übersicht über das Bewegungsausmaß (Flexion/Extension und Ulnar-/Radialabduktion, Grad [°]) und über die Verkehrsfläche (Quadratgrad [°²]) bei der Zirkumduktion sowie beim Führen eines Kfz (Mittelwert ± Standardfehler des Mittelwerts)

Bewegungsrichtung	Zirkumduktion	Kfz
Flexion	56,0 ± 18,0	46,6 ± 12,7
Extension	68,0 ± 12,2	73,0 ± 16,6
Ulnarabduktion	46,4 ± 10,3	49,82 ± 13,3
Radialabduktion	27,5 ± 10,4	22,58 ± 9,9
Verkehrsfläche	13.013,83 ± 3426,11	9378,28 ± 1865,49

messungen in den Hauptachsen Flexion/Extension und Ulnar-/Radialabduktion durchgeführt werden. Zunächst wurde das individuelle maximale aktive Bewegungsausmaß des Handgelenks durch aktive Zirkumduktionsbewegungen bestimmt. Hierfür führten die Probanden nach Anlage des Goniometers 5 maximale Zirkumduktionsbewegungen mit dem Handgelenk mit als auch gegen den Uhrzeigersinn durch. Der Unterarm befand sich zu jedem Zeitpunkt gegenüber dem Handgelenk in fixierter Position. Nach Bestimmung des maximalen Bewegungsausmaßes erfolgte die Messung der Beweglichkeit des Handgelenks beim Führen eines Kfz. Der Proband wurde gebeten, sich in seinem eigenen Kfz zu platzieren. Damit eine einheitliche und korrekte Sitzposition gewährleistet werden konnte, wurde diese bei jedem Probanden sorgfältig überprüft [22]. Jeder Proband wurde aufgefordert eine definierte Strecke mehrfach zu befahren (Abb. 2).

Die Fahrtgeschwindigkeit von 20 km/h wurde nicht überschritten. Die Teststrecke beinhaltet mehrere Komponenten: Nach dem Start führen die Teilnehmer zunächst eine gerade Strecke von 50 m und anschließend eine Linkskurve von 180°. Nach einer weiteren geraden Strecke von 50 m in die entgegengesetzte Richtung schloss sich eine Rechtskurve von 180° an. Im Anschluss an diese Rechtskurve führen die Teilnehmer dann erneut eine gerade Strecke von 50 m, eine 180° Linkskurve, 50 m gerade Strecke sowie eine Rechtskurve von 180°. Diese Abfolge wurde während der Testfahrt 2-mal wiederholt, um eine exakte Messung der Daten zu gewährleisten. Während der Versuchsdurchführung wurden die Bewegungsdaten des Gelenks kontinuierlich gemessen

und permanent an ein mobiles Computersystem übertragen. Im Anschluss erfolgte die Bearbeitung, statistische Auswertung und Visualisierung der Daten mithilfe der Analysesoftware Datalog (Biometrics, Ltd.) sowie eines speziell entwickelten Matlab-Programms, das in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Mathematik der Heinrich-Heine Universität Düsseldorf erstellt wurde. Nach der Aufzeichnung wurden die Daten in Hinblick auf Artefakte visuell inspiziert. Nur die Datensätze bei denen die vollständige Fixation der Messsensoren gewährleistet war, ergaben plausible Werte und wurden bei der nachfolgenden Datenanalyse weiter berücksichtigt. Aufgrund eines Defekts des Goniometers waren die Datensätze von drei Probanden fehlerhaft und mussten aus der Studie ausgeschlossen werden.

Statistik

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mithilfe der Programme Excel und SPSS23[®]. In der deskriptiven Statistik wurde von jedem der 17 Probanden das arithmetische Mittel und die Standardabweichung der Flexion/Extension und Ulnar-/Radialabduktion bei der Zirkumduktion und beim Führen eines Kfz berechnet. Ergänzend wurde die Fläche des Bewegungsraums, die aus den einzelnen Werten aller Bewegungsrichtungen entsteht und als Verkehrsfläche bezeichnet wird, bestimmt [23–25]. Zur besseren Charakterisierung des Bewegungsmusters des Handgelenks beim Führen eines Kfz wurden die Handgelenkpositionen nach ihrer Aufenthaltswahrscheinlichkeit in aufsteigender Reihenfolge in 5 Stufen (Stufe 1: 25 %, Stufe 2: 50 %, Stufe 3: 75 %, Stufe 4: 90 %, Stufe 5: 99 %) unterteilt und zur besseren Visualisie-

Tab. 2 Übersicht über das Bewegungsausmaß (Flexion/Extension und Ulnar-/Radialabduktion, Grad [°]) beim Führen eines Kfz in der jeweiligen Stufe 1–5 (Mittelwert ± Standardfehler des Mittelwerts)

	Bewegungsrichtung	Kfz
Stufe 1	Flexion	47,1 ± 12,9
	Extension	74,0 ± 16,7
	Ulnarabduktion	50,1 ± 13,4
Stufe 2	Radialabduktion	22,9 ± 10,1
	Flexion	43,7 ± 15,3
	Extension	71,2 ± 15,5
Stufe 3	Ulnarabduktion	46,7 ± 14,4
	Radialabduktion	20,7 ± 10,1
	Flexion	29,5 ± 13,4
Stufe 4	Extension	69,2 ± 16,1
	Ulnarabduktion	40,3 ± 14,4
	Radialabduktion	14,2 ± 9,1
Stufe 5	Flexion	13,0 ± 14,1
	Extension	64,0 ± 17,5
	Ulnarabduktion	35,3 ± 13,9
	Radialabduktion	8,8 ± 11,3
	Flexion	0,1 ± 18,3
	Extension	55,7 ± 19,7
	Ulnarabduktion	24,8 ± 16,1
	Radialabduktion	3,1 ± 12,3

rung als Heatmap dargestellt. Um die Daten auf eine Normalverteilung hin zu überprüfen wurde der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest durchgeführt. Mittels einer einfaktoriellem Varianzanalyse (ANOVA, „analysis of variance“) wurden die Daten, die bei der Zirkumduktion und beim Führen eines Kfz erhoben wurden, auf systematische Unterschiede hin untersucht.

Ergebnisse

Bewegungsausmaß und Verkehrsfläche

Das durchschnittliche Bewegungsausmaß in den Hauptbewegungsachsen (Flexion/Extension und Ulnar-/Radialabduktion) und die durchschnittliche Verkehrsfläche bei der Zirkumduktion sowie beim Führen eines Kfz sind in Tab. 1 dargestellt.

In der deskriptiven Statistik zeigte sich für die Zirkumduktion das größte Bewegungsausmaß in der Flexions-/

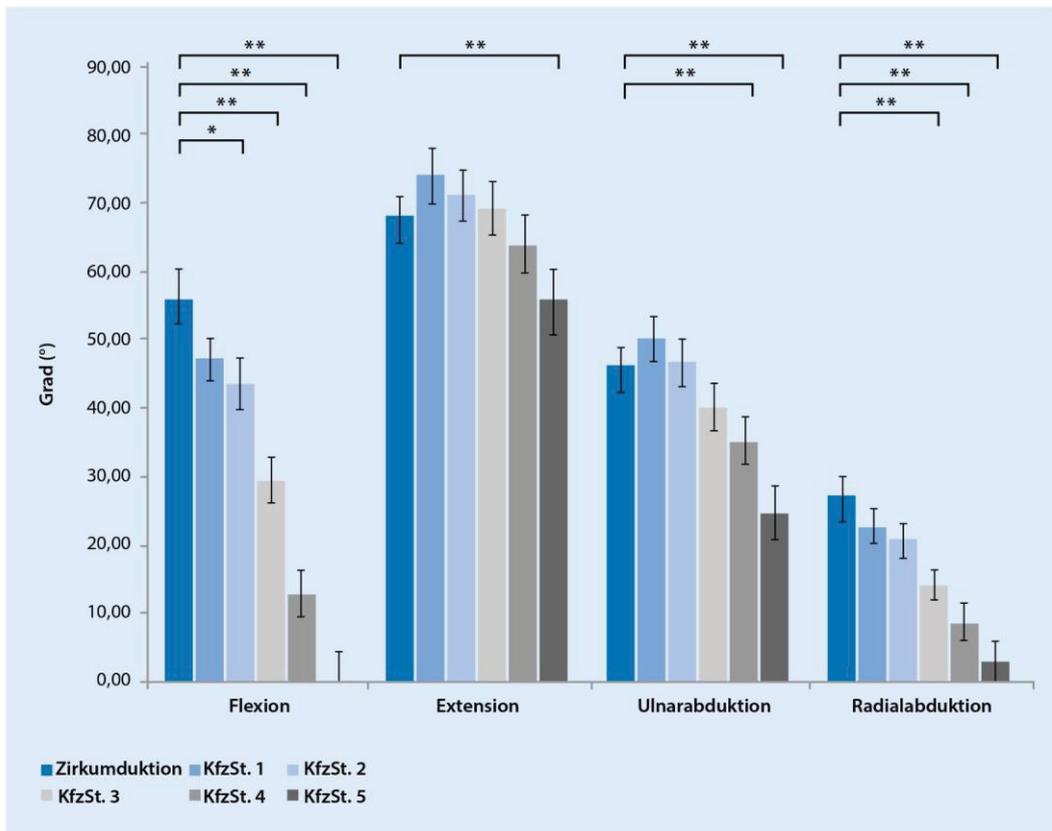


Abb. 3 ◀ Vergleich des Bewegungsausmaßes bei der Zirkumduktion gegenüber dem Bewegungsausmaß beim Führen eines Kfz in den einzelnen Bewegungsrichtungen und der jeweiligen Stufe 1–5. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwerts an (* $p \leq 0,05$, ** $p \leq 0,01$)

Extensionsachse für die Extension mit $68,0 \pm 12,2^\circ$ (Mittelwert \pm Standardfehler des Mittelwerts) und in der Ulnar-/Radialabduktionsachse für die Ulnarabduktion mit $46,4 \pm 10,3^\circ$. Dies entspricht vorausgehenden Studien des physiologischen Bewegungsausmaßes des Handgelenks [18, 26]. Beim Führen eines Kfz zeigte sich ebenfalls das größte Bewegungsausmaß in der Flexions-/Extensionsachse für die Extension mit $73,0 \pm 16,6^\circ$ und in der Ulnar-/Radialabduktionsachse für die Ulnarabduktion mit $49,8 \pm 13,3^\circ$.

Mithilfe des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests konnte eine Normalverteilung nachgewiesen werden ($Z > 0,22, p > 0,44$). Die einfaktorische ANOVA ergab keinen signifikanten Haupteffekt des Bewegungsausmaßes (Zirkumduktion vs. Kfz: 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 $F[1, 32] = 1,00, p = 0,33$). Es konnte jedoch eine signifikant kleinere Verkehrsfläche beim Führen eines Kfz gegenüber der Verkehrsfläche bei der Zirkumduktion nachgewiesen

werden (Zirkumduktion vs. Kfz: $F[1, 32] = 15,64, p = 0,00$).

Aufenthaltswahrscheinlichkeiten

Das durchschnittliche Bewegungsausmaß beim Führen eines Kfz in der jeweiligen Aufenthaltswahrscheinlichkeitsstufe ist in **Tab. 2** dargestellt.

Der Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest ergab eine Normalverteilung ($Z > 0,47, p > 0,12$). Die einfaktorische ANOVA ergab, dass sich das Bewegungsausmaß beim Führen eines Kfz erst ab der Stufe 2 in der Bewegungsrichtung der Flexion signifikant gegenüber der Zirkumduktion unterscheidet (Stufe 2: Zirkumduktion vs. Kfz: Flexion $F[1, 32] = 4,64, p = 0,04$). Ab der Stufe 3 unterscheiden sich die Bewegungsrichtungen in der Flexion und Radialabduktion signifikant (Stufe 3: Zirkumduktion vs. Kfz: Flexion: $F[1, 32] = 23,69, p = 0,00$, Radialabduktion: $F[1, 32] = 15,77, p = 0,00$). Ab der Stufe 4 sind bereits die Bewegungsrichtungen Flexion, Radial- und Ulnarabduktion beim Führen eines Kfz gegenüber der Zirkumduktion

signifikant unterschiedlich (Stufe 4: Zirkumduktion vs. Kfz: Flexion: $F[1, 32] = 60,01, p = 0,00$, Radialabduktion: $F[1, 32] = 25,28, p = 0,00$, Ulnarabduktion: $F[1, 32] = 6,99, p = 0,01$). In der Stufe 5 ist das Bewegungsausmaß beim Führen eines Kfz in allen vier Bewegungsrichtungen signifikant unterschiedlich gegenüber der Zirkumduktion (Stufe 5: Zirkumduktion vs. Kfz: Flexion: $F[1, 32] = 80,92, p = 0,00$, Extension: $F[1, 32] = 4,81, p = 0,04$, Radialabduktion: $F[1, 32] = 39,42, p = 0,00$, Ulnarabduktion: $F[1, 32] = 21,74, p = 0,00$). In **Abb. 3** ist das Bewegungsausmaß beim Führen eines Kfz in den einzelnen Bewegungsrichtungen und der jeweiligen Stufe im Vergleich zur Zirkumduktion dargestellt.

Zur besseren Visualisierung sind in **Abb. 4** exemplarisch die Zirkumduktionskurve und darüber die Heatmap (Stufe 1–5) beim Führen eines Kfz eines Probanden dargestellt.

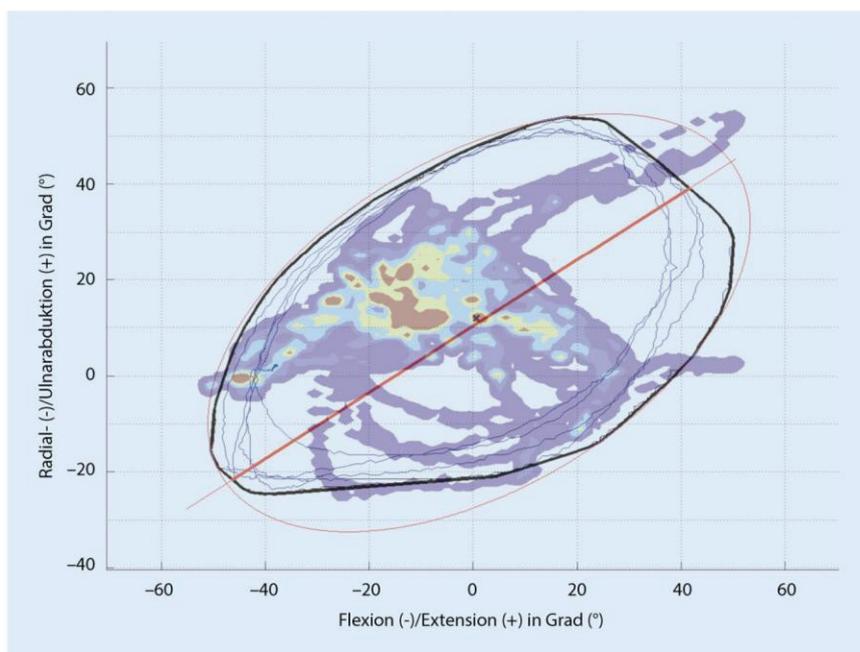


Abb. 4 ▲ Dargestellt ist die durchschnittliche Zirkumduktionsbewegung des Handgelenks eines Probanden (Schwarzes Oval), die das individuelle maximale aktive Bewegungsausmaß des Handgelenks darstellt. Darüber wurde die Verkehrsfläche in Form einer Heatmap der gleichen Probanden, die während der Fahrt eines Kfz abgeleitet wurde, gelegt (Stufe 1 = Dunkelblau, Stufe 2 = Blau, Stufe 3 = Hellblau, Stufe 4 = Gelb, Stufe 5 = Rot)

Diskussion

Bewegungsausmaß und Verkehrsfläche

In der vorliegenden Arbeit zeigte sich kein signifikanter Unterschied des Bewegungsausmaßes in den Hauptbewegungsachsen (Ulnar-/Radialabduktion und Flexion/Extension) des Handgelenks zwischen der maximal möglichen aktiven Zirkumduktion und beim Führen eines Kfz. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass das volle Bewegungsausmaß des gesunden Handgelenks in den Hauptbewegungsachsen beim Führen eines Kfz genutzt wird. Ob dieses volle Bewegungsausmaß für eine Fahrtauglichkeit jedoch notwendig ist, kann in dem vorliegenden Experiment nicht gesagt werden. Es ist davon auszugehen, dass bei freier Beweglichkeit der angrenzenden Gelenke ein deutlich kleinerer Bewegungsumfang des Handgelenks gut kompensiert werden kann [27]. Vorausgehende Studien konnten zeigen, dass nur ein sehr geringes Bewegungsausmaß des Handgelenks entlang der Hauptbewegungsachsen (Ulnar-/

Radialabduktion, Flexion/Extension) von durchschnittlich 5° Flexion und 30° Extension bei Alltagstätigkeiten und freier Beweglichkeit der angrenzenden Gelenke notwendig ist [18]. Bei einer vollständigen Ruhigstellung des Arms, z. B. durch Anlage eines Oberarmgips, kommt es hingegen zu einer signifikanten Abnahme der Fahrleistung und eine Fahrtauglichkeit kann nicht mehr attestiert werden [8, 27, 28].

In zukünftigen Studien könnten mithilfe von simulierten Bewegungseinschränkungen der Gelenke der oberen Extremität das zum Führen eines Kfz minimal benötigte Bewegungsausmaß des Handgelenks und mögliche Kompensationsmechanismen durch die angrenzenden Gelenke bestimmt werden.

Interessanterweise zeigte sich bei einigen Probanden eine größere Extensions- und Ulnarabduktionsbewegung beim Führen eines Kfz im Vergleich zur maximal möglichen aktiven Zirkumduktion. Dies könnte auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass beim Lenken nach rechts sowie beim Umgreifen des Lenkrades das Handgelenk passiv in die Extension und Ulnarabdukti-

on überstreckt wird. Insbesondere die passive Extension im Handgelenk, die bei einer Vielzahl an traumatologischen und orthopädischen Krankheitsbildern [29–32] mit einschließenden Schmerzen einhergeht, könnte möglicherweise ein nicht zu unterschätzendes Sicherheitsrisiko im Straßenverkehr darstellen. Da diese Ergebnisse jedoch statistisch nicht signifikant sind müssten Messungen an einem größeren Probandenkollektiv durchgeführt werden.

Die Auswertung der Verkehrsflächen ergab eine signifikant kleinere Fläche beim Führen eines Kfz gegenüber der Zirkumduktion. In **Abb. 4** sind die Zirkumduktion eines Probanden und darüber die Verkehrsfläche in Form einer Heatmap zur besseren Visualisierung dargestellt. Wie zuvor beschrieben zeigt sich zwar kein signifikanter Unterschied des Bewegungsausmaßes in den Hauptbewegungsachsen, dennoch ist die genutzte Fläche beim Führen eines Kfz signifikant kleiner. Die Daten deuten darauf hin, dass spezifische Kombinationsbewegungen aus den Hauptbewegungsachsen möglicherweise durch Umgreifbewegungen des Lenkrads in einem geringeren Maß genutzt werden, als dies bei einer gleichmäßigen Zirkumduktion der Fall ist. In diesem Kontext ist ein wichtiger Aspekt, dass die Zirkumduktionskurve in ihrer Form nicht stabil sondern in hohem Maße von der Finger- und Ellenbogenstellung abhängig ist [10]. Eine mögliche Interpretation wäre somit, dass es beim Festhalten und Umgreifen des Lenkrades und der damit einhergehenden, sich stetig ändernden Stellung der Finger- und Ellenbogen-gelenke zu einer signifikant kleineren Verkehrsfläche kommt.

Aufenthaltswahrscheinlichkeiten

Die Ergebnisse der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten zeigen, dass das Bewegungsausmaß in der Extension erst ab der Stufe 5 und der Ulnarabduktion ab der Stufe 4 signifikant kleiner als bei der Zirkumduktion ist. Somit befindet sich das Handgelenk beim Führen eines Kfz zu 90 % in einer Extensions- und zu 75 % in einer Ulnarabduktionsstellung, welche sich von der maximalen aktiven

Extension und Ulnarabduktion nicht signifikant unterscheidet. Einschränkungen in den Hauptrichtungen Extension und Ulnarabduktion bei Verletzungen des Handgelenks [1, 12, 33] oder bewegungseinschränkenden Maßnahmen, wie bei der Anlage eines Gips, sollten sich demnach als erstes auf die Fahrleistung und möglicherweise Fahrtauglichkeit ausüben [27, 28]. Ein Gegenargument wäre, dass auf Basis der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten nur Aussagen bezüglich der Bewegungsquantität und nicht -qualität getroffen werden können. Möglicherweise gewährleiten insbesondere seltene Extrembewegungen, welche z. B. in der Stufe 1 zu finden wären, in Gefahrensituationen die sichere Teilnahme am Straßenverkehr.

In der weiteren Datenanalyse zeigte sich, dass die Radialabduktion ab der Stufe 3 und die Flexion bereits ab der Stufe 2 signifikant kleiner als bei der Zirkumduktion sind. Demnach befindet sich das Handgelenk beim Führen eines Kfz in 50 % in einer Radialabduktions- und zu 75 % der Fälle in einer Flexionsstellung, welche signifikant kleiner als die maximale aktive Radialabduktion und Flexion ist. Verletzungen oder bewegungseinschränkende Maßnahmen des Handgelenks sollten sich hiernach im Vergleich zur Extension und Ulnarabduktion erst bei einer größeren Bewegungseinschränkung auf die Fahrleistung auswirken. Zusammenfassend müssten sich Einschränkungen der Handgelenkbeweglichkeit in absteigender Reihenfolge auf die Fahrleistung auswirken: Extension > Ulnarabduktion > Radialabduktion > Flexion. Dass sich das Handgelenk beim Führen eines Kfz zu 90 % in einer Extensions- und zu 75 % in einer Ulnarabduktionsstellung nahe der maximalen Zirkumduktion befindet, könnte damit erklärt werden, dass zum sicheren Festhalten des Lenkrades eine spezifische Mindestgriffstärke benötigt wird, die insbesondere in dieser Handgelenkstellung gewährleistet werden kann [10]. Vorausgehende Studien konnten zeigen, dass Probanden zur Entfaltung einer maximalen Griffstärke automatisch eine Handgelenkstellung von 35° Extension und 7° Ulnarabduktion einnehmen [34].

Fazit für die Praxis

- In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass das maximale aktive Bewegungsausmaß in den Hauptbewegungsachsen eines gesunden Handgelenks beim Führen eines Kfz vollständig genutzt wird.
- Die signifikant kleinere Verkehrsfläche deutet darauf hin, dass die möglichen Bewegungsrichtungen des Handgelenks, möglicherweise aufgrund von Umgreifbewegungen am Lenkrad, nicht alle angesteuert werden, bestimmte Extrempositionen aber regelmäßig zu finden sind.
- Extensions und Ulnarabduktionsbewegungen des Handgelenks werden, möglicherweise zur Gewährleistung einer Mindestgriffstärke, signifikant häufiger und über das aktive Bewegungsmaß hinaus beim Führen eines Kfz genutzt.
- Auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse können in weiteren Studien der Einfluss von simulierten Bewegungseinschränkungen des Handgelenks auf die Fahrleistung beurteilt und somit die Auswirkungen häufig vorkommender Verletzungen des Handgelenks abgeschätzt werden. Hierdurch können in Zukunft möglicherweise experimentell gesicherte Empfehlungen zur Fahrtauglichkeit bezüglich Einschränkungen der oberen Extremität gegeben werden.

Korrespondenzadresse



Dr. med. E. Schiffner
Klinik für Unfall- und Handchirurgie, Universitätsklinikum Düsseldorf
Moorenstraße 5, 40225 Düsseldorf, Deutschland
Erik.Schiffner@med.uni-duesseldorf.de

Förderung. Die Studie wurde von der Deutschen Arthrose-Hilfe e. V. finanziert.

Einhaltung ethischer Richtlinien

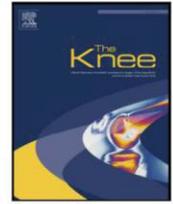
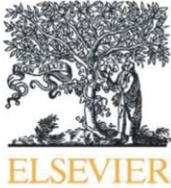
Interessenkonflikt. D. Latz, S. Pfau, C. Koukos, P. Jungbluth, G. Jansing, E. Schiffner, L.F. Seiler, J. Windolf und S. Gehrman geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Alle beschriebenen Untersuchungen am Menschen wurden mit Zustimmung der zuständigen Ethik-Kommission, im Einklang mit nationalem Recht sowie gemäß der Deklaration von Helsinki von 1975 (in der aktuellen, überarbeiteten Fassung) durchgeführt. Es liegt ein positives Votum (Studiennummer: 3362) der Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf vor. Von allen beteiligten Patienten liegt eine Einverständniserklärung vor.

Literatur

1. Gehrman SV, Windolf J, Kaufmann RA (2008) Distal radius fracture management in elderly patients: a literature review. *J Hand Surg Am* 33:421–429. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2007.12.016>
2. Madea B, Mußhoff F, Berghaus G (2007) Verkehrsmedizin – Fahreignung, Fahrsicherheit, Unfallrekonstruktion. Deutscher Ärzte-Verlag, Köln
3. Grämann N, Albrecht M (2009) Begutachtungs-Leitlinien zur Kraftfahrereignung. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Mensch und Sicherheit. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
4. Heß R, Burmann M (2009) Handbuch des Strassenverkehrsrecht. C.H. Beck, München
5. Fries W, Wilkes F, Lössl H (2008) Fahreignung bei Krankheit, Verletzung, Alter, Medikamenten, Alkohol und Drogen. C.H. Beck, München
6. Giddins GE, Hammerton A (1996) "Doctor, when can I drive?": a medical and legal view of the implications of advice on driving after injury or operation. *Injury* 27:495–497
7. Nunez VA, Giddins GE (2004) "Doctor, when can I drive?": an update on the medico-legal aspects of driving following an injury or operation. *Injury* 35:888–890. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2003.11.009>
8. Kalamaras MA, Rando A, Pitchford DGK (2006) Driving plastered: Who does it, is it safe and what to tell patients. *ANZ J Surg* 76:439–441. <https://doi.org/10.1111/j.1445-2197.2006.03762.x>
9. Von Arx OA, Langdown AJ, Brooks RA et al (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* 35:883–887. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2003.08.012>
10. Gehrman SV, Kaufmann RA, Li ZM (2008) Wrist circumduction reduced by finger constraints. *J Hand Surg Am* 33:1287–1292. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2008.04.034>
11. Tulipan J, Jones CM, Ilyas AM (2015) The effect of osteoporosis on healing of distal radius fragility fractures. *Orthop Clin North Am* 46:541–549
12. Schadel-Hopfner M, Bohringer G, Junge A et al (2001) Arthroscopic diagnosis of concomitant scapholunate ligament injuries in fractures of the distal radius. *Handchir Mikrochir Plast Chir*

- 33:229–233. <https://doi.org/10.1055/s-2001-16590>
13. Schadel-Hopfner M, Bohringer G, Gotzen L (2000) Results after minimally invasive therapy of acute scapholunate dissociation. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 32:333–338. <https://doi.org/10.1055/s-2000-10941>
 14. Schadel-Hopfner M, Bohringer G, Gotzen L (2000) Percutaneous osteosynthesis of scaphoid fracture with the Herbert-Whipple screw-technique and results. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 32:271–276. <https://doi.org/10.1055/s-2000-10935>
 15. Schadel-Hopfner M, Marent-Huber M, Gazyakan E et al (2010) Acute non-displaced fractures of the scaphoid: earlier return to activities after operative treatment. A controlled multicenter cohort study. *Arch Orthop Trauma Surg* 130:1117–1127. <https://doi.org/10.1007/s00402-009-1004-8>
 16. Hakimi M, Jungbluth P, Gehrman S et al (2010) Unidirectional versus multidirectional palmar locking osteosynthesis of unstable distal radius fractures: comparative analysis with LDR 2.4 mm versus 2.7 mm matrix-Smartlock. *Unfallchirurg* 113:210–216. <https://doi.org/10.1007/s00113-009-1708-9>
 17. Hakimi M, Jungbluth P, Windolf J et al (2010) Functional results and complications following locking palmar plating on the distal radius: a retrospective study. *J Hand Surg Am* 35:283–288. <https://doi.org/10.1177/1753193409339943>
 18. Palmer AK, Werner FW, Murphy D et al (1985) Functional wrist motion: a biomechanical study. *J Hand Surg Am* 10:39–46
 19. Moritomo H, Apergis EP, Herzberg G et al (2007) 2007 IFSSH committee report of wrist biomechanics committee: biomechanics of the so-called dart-throwing motion of the wrist. *J Hand Surg Am* 32:1447–1453. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2007.08.014>
 20. Moritomo H, Murase T, Oka K et al (2008) Relationship between the fracture location and the kinematic pattern in scaphoid nonunion. *J Hand Surg Am* 33:1459–1468. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2008.05.035>
 21. Wolfe SW, Crisco JJ, Orr CM et al (2006) The dart-throwing motion of the wrist: is it unique to humans? *J Hand Surg Am* 31:1429–1437. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2006.08.010>
 22. Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V. RV. (2015) Fahrzeuginsassen richtig sichern. ADAC e. V., München
 23. Brüser P, Noever G (1989) Klinische Forschung in der Handchirurgie: Problematik und Wert retrospektiver Studien. *Handchir Mikrochir Plast Chir* 21:62–65
 24. Fick R (2012) *Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke*. Gustav Fischer, Jena
 25. Schmidt H-M, Lanz U (2003) *Chirurgische anatomie der hand*. Thieme, Stuttgart
 26. Ryu J, Cooney WP, Askew LJ et al (1991) Functional ranges of motion of the wrist joint. *J Hand Surg Am* 16:409–419. [https://doi.org/10.1016/0363-5023\(91\)90006-W](https://doi.org/10.1016/0363-5023(91)90006-W)
 27. Stevenson H, Peterson N, Talbot C et al (2013) An objective assessment of safety to drive in an upper limb cast. *J Hand Surg Eur Vol* 38:321–324
 28. Chong PY, Koehler EA, Shyr Y et al (2010) Driving with an arm immobilized in a splint: a randomized higher-order crossover trial. *J Bone Joint Surg Am* Vol 92:2263–2269. <https://doi.org/10.2106/JBJS.I.01170>
 29. Matson AP, Dekker TJ, Lampley AJ et al (2017) Diagnosis and arthroscopic management of dorsal wrist capsular impingement. *J Hand Surg Am* 42:e167–e174. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2016.12.012>
 30. Jain K, Singh R (2014) Short-term result of arthroscopic synovial excision for dorsal wrist pain in hyperextension associated with synovial hypertrophy. *Singapore Med J* 55:547–549
 31. Roh YH, Lee BK, Noh JH et al (2014) Factors associated with complex regional pain syndrome type I in patients with surgically treated distal radius fracture. *Arch Orthop Trauma Surg* 134:1775–1781. <https://doi.org/10.1007/s00402-014-2094-5>
 32. Borisch N (2016) Arthroscopic resection of occult dorsal wrist ganglia. *Arch Orthop Trauma Surg* 136:1473–1480. <https://doi.org/10.1007/s00402-016-2539-0>
 33. Arora R, Lutz M, Hennerbichler A et al (2007) Complications following internal fixation of unstable distal radius fracture with a palmar locking-plate. *J Orthop Trauma* 21:316–322
 34. O'Driscoll SW, Horii E, Ness R et al (1992) The relationship between wrist position, grasp size, and grip strength. *J Hand Surg Am* 17:169–177



Doctor, when can I drive? – Range of motion of the knee while driving a car

David Latz^a, Erik Schiffner^{a,*}, Johannes Schnependahl^a, Konstantin Klein^a, Lisa Oezel^a, Lars Fabian Seiler^a, Pascal Jungbluth^a, Robert Alexander Kaufmann^b, Joachim Windolf^a, Sebastian Viktor Gehrman^a

^a Department of Trauma and Hand Surgery, University Hospital, Moorenstrasse 5, 40225 Düsseldorf, Germany

^b Department of Orthopaedic Surgery, Kaufmann Medical Building, 3471 Fifth Ave. Suite 1010, Pittsburgh, PA 15213, United States of America

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 June 2018

Received in revised form 9 October 2018

Accepted 7 November 2018

Keywords:

Driving fitness
Forensic medicine
Knee
Osteoarthritis
Traffic medicine
Trauma surgery

ABSTRACT

Background: One of the most important activities of daily living is operating a motor vehicle. With increasing age the prevalence of musculoskeletal disorders such as knee osteoarthritis may interfere with an individual's ability to do so safely. Physicians are tasked with determining a patient's ability to drive and yet the necessary joint range of motion required for driving a car has not been characterized.

Methods: The range of motion of the right and left knees was recorded using electrogoniometers in 20 healthy subjects while driving a car on three route types (a) city streets, b) country roads and c) highways). Special emphasis was placed on the left knee associated with changing a gear.

Results: The range of motion while driving is 40–80° for the right and 20–85° flexion for the left knee. A significant difference was noted for each *side* ($p < 0.01$) with a higher flexion occurring in the left knee ($p < 0.01$). The average position of the knee while changing a gear (beginning, maximum, ending) was: right: $55^\circ \pm 10^\circ$, $62^\circ \pm 10^\circ$, $53^\circ \pm 10^\circ$; left: $67^\circ \pm 7^\circ$, $39^\circ \pm 8^\circ$, $66^\circ \pm 8^\circ$ (mean flexion \pm standard deviation).

Conclusion: This study characterized the knee range of motion that occurs while driving a car. Our data suggests that common driving activities such as accelerating a vehicle or braking can be achieved with the right knee through a limited range of motion. The greater range of motion and the higher flexion of the left knee are mainly attributed to the gear changing. The present data may benefit physicians in their evaluation of driving capability.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Musculoskeletal health is essential for people's personal mobility and their ability to actively participate in all aspects of life [1,2]. Driving a car has become an indispensable component of our society. Subsequently, an inability to drive can often result in severe socio-economic implications. Elderly patients will often aim to continue driving and yet this patient group is particularly susceptible to [1] musculoskeletal disorders, such as knee osteoarthritis. Because pain, impaired muscular function or movement restriction of the knee can affect an individual's ability to safely operate a vehicle, traffic safety for the elderly is a growing public health issue [3–6]. For example, the time to return to driving for patients undergoing total knee arthroplasty is still discussed con-

* Corresponding author.

E-mail addresses: Erik.Schiffner@med.uni-duesseldorf.de, (E. Schiffner), rak@upmc.edu. (R.A. Kaufmann).

roversially [7]. Different recommendations ranging from two to six weeks exist [7,8] which are influenced by many factors such as perioperative pain management [9]. Despite improvements in vehicle safety, more than 1.25 million people die each year as a result of vehicular trauma worldwide. Road traffic injuries are the leading cause of death among people between 15 and 29 years of age worldwide and road traffic crashes cost most countries three percent of their gross domestic product [10]. Therefore, physicians bear a great responsibility when evaluating a patient's ability to drive. Guidelines for assessing and counseling older drivers have been created to help physicians address preventable injuries caused by motor vehicle crashes [11,12]. No objective parameters related to the necessary joint range of motion (ROM) exist. Therefore, no evidence based recommendations concerning driving capability and, in particular, knee ROM currently exist. The aim of this study was to quantify the knee ROM that is required to drive a left sided car with manual transmission on: I) city streets, II) country roads and III) highways.

2. Materials and methods

All participants had a valid driver's license and owned their vehicle, which is driven more than 5000 km/year. Exclusion criteria were musculoskeletal or systemic diseases, diseases of the central or peripheral nervous system, pregnancy, chronic drug or alcohol abuse and psychiatric disorders. Most of the participants were employees of the university hospital or students. Each subject completed a standardized questionnaire. An informed consent was obtained prior to the procedure. Approval by the institutional review board was obtained. CE certified electrogoniometers (Twin Axis goniometer type SG 65, Biometrics Ltd., Newport, UK) were used to measure the ROM (flexion/extension) of the knee while driving a car. The work mechanism of these electrogoniometers is based on the measurement of strain changes along the length of a wire. There is a composite wire with strain gauges between the two endblocks. Every time the angle changes between the two endblocks, the change in strain of the wire is measured. The design allows only measurement of angular and not of linear movements. If the endblocks move linear to each other, the output remains constant. The goniometers were attached with double sided medical adhesive tape to the

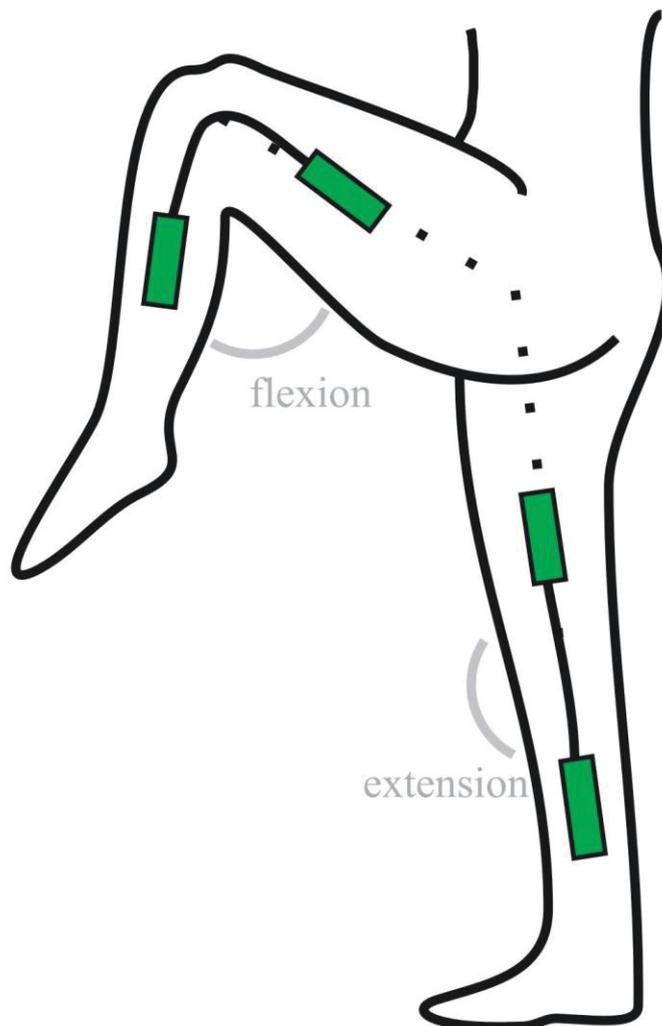


Figure 1. The goniometer was attached to the lateral aspect of the knee.

lateral aspect of each knee (Figure 1). Additionally, a single adhesive tape was placed over the top of the endblocks and a bandage was fit over the sensor and connecting leads.

After attachment of the goniometers, the individual maximum ROM of the knee was recorded. Each subject was instructed to perform 10 repetitions of maximum flexion/extension of the left and right knees upon which the average maximum ROM was calculated. Subjects were then seated in their own car (drive-side: left hand drive, transmission: manual) in a uniform and standardized position (minimum distance to the steering wheel of 25–30 cm; as small as possible head–headrest distance; suitable backrest inclination (as upright as possible)) [13]. Subjects were instructed to drive three defined route types: a) city streets, b) country roads and c) highways (Figure 2) twice. A safe vehicle velocity of 20 mph for city streets, 50 mph on county roads and 70 mph on highways was maintained. A randomized order of route types for each subject was chosen. Goniometers were connected to a mobile computer system and the ROM of the knee was continuously measured (50/s) and permanently transmitted. Special maneuvers like sudden brakes, changing a gear or if the car comes to stop at a traffic light were marked on the timeline of each subject.

To visualize, process and further analyze the raw data of the electrogoniometers the software Datalog® (Biometrics Ltd., Newport, UK) and a custom made Matlab® program were used. Data was visually inspected for artifacts and only plausible data that ensured complete fixation of the sensors was taken into further analysis. No data had to be excluded. The Shapiro–Wilk test was used to assess normal distribution. Further statistical analyses were performed using Excel® (Microsoft Corporation, Redmond Washington, United States) and SPSS25® (International Business Machines Corporation (IBM), Armonk New York, United States).

Arithmetic mean and standard deviation of the maximum flexion/extension as well as the arithmetic mean and standard deviation of flexion/extension while driving a car on different route types were calculated for each participant.

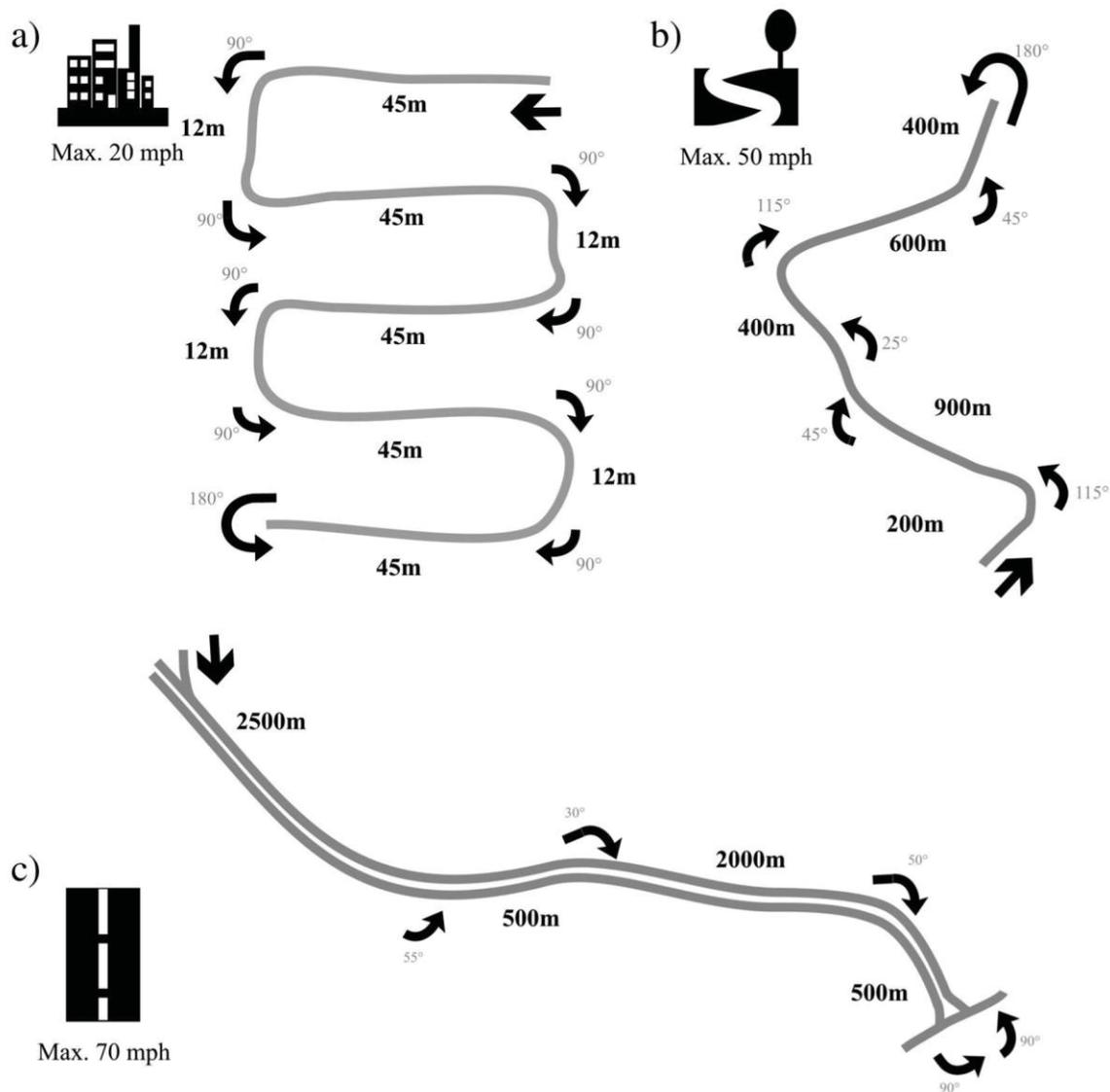


Figure 2. Schematic illustration of the three route types: a) city streets, b) country roads and c) highways.

In case of normality a univariate analysis of variance (ANOVA) with the factors *road type* (city, country and highway) and *side* (right and left knee) was performed followed by post hoc t-tests for independent samples. p values were corrected for multiple testing using the Bonferroni test and values <0.05 being assumed to be statistically significant.

For further analysis, the timeline of each subject of the continuously measured ROM (50/s) with regard to the marked maneuvers was visualized and further investigated. The most common and stereotypical maneuver that was identified is the changing a gear maneuver. Therefore, arithmetic mean and standard deviation of the knee position (flexion/extension) at the beginning, at the maximum amplitude and at the ending of changing a gear were calculated for each subject and 10 actions per subject.

3. Results

In this study, 20 healthy subjects (10 male, 10 female) participated. No one had a history of lower extremity trauma or recent immobilization. The age varied between 23 and 36 years and the mean age was 29.4 years \pm 3.0 years.

3.1. Range of motion

The average possible maximum ROM versus the ROM and the mean flexion of the right and left knees while driving on different road types is shown in Table 1. Figure 3 shows the detailed ROM while driving a car on different road types in a histogram.

The ANOVA revealed no significant main effect for road type ($F(2, 42.31) = 0.51, p = 0.60$) or interactions for road type \times side ($F(2, 83.95) = 1.01, p = 0.37$) but a significant main effect for side ($F(1, 404,760.68) = 4884.63, p < 0.01$) with a higher mean flexion for the left knee compared to the right knee.

3.2. Changing gear

In order to investigate the significant main effect for *side* with a higher mean flexion of the left knee while driving a car, the timeline of the continuously measured ROM (50/s) of each subject was visualized with regard to the marked maneuvers. The most common and stereotypical maneuver that was identified is the changing a gear maneuver (Figure 4).

Arithmetic mean and standard deviation of the knee position (flexion) at the beginning, at the maximum amplitude and at the ending of changing a gear (10 maneuvers per subject) are shown in Table 2.

4. Discussion

Driving a motor vehicle requires muscle strength, endurance, coordination, reaction time and the ability of the extremities to move [14–17]. The American Medical Association (AMA) and the National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) have created an Assessment Of Driving-Related Skills (ADReS) that include recommendations regarding 1) vision, 2) cognition and 3) motor/somatosensory function [6]. A broad range of vision and cognition tests exist to determine driving capability [11,18–20]. In contrast, only a few motor/somatosensory tests have been described and these ask the patient to either mimic the act of driving or to perform different movement tasks e.g. neck rotation, shoulder and elbow flexion or ankle plantar flexion/dorsiflexion. The examiner uses a crude scoring system: Within normal limits, not within normal limits, good range of motion with excessive pain or very limited range of motion [11]. To the author's knowledge, no study has quantified the knee range of motion required to drive a car and yet it may be desirable to combine joint range of motion with ADReS when attempting to determine driving capability. A previous study has successfully characterized range of motion of the right wrist while driving a car [14]. The goal of this study was to measure the mean range of motion of the knee while driving a car based on quantitative noninvasive measurements using electrogoniometers.

We have shown that during all our driving maneuvers the right knee moves through a very limited ROM between 40° and 80° flexion. The left knee operates through a larger ROM between 20° and 85° flexion which is a significantly higher mean flexion than the right knee. No significant differences were found between the different route types. In this study, only left sided cars with a typical right sided manual transmission were used. In this setting, subjects hold their left leg in a highly flexed knee posture with the foot comfortably positioned on a footrest (knee flexion while changing a gear: beginning: 67° \pm 7°, Table 2) and only while changing a gear is the clutch depressed with the left leg, which results in a very low flexed angle of the knee (knee flexion while changing a gear: maximum: 39° \pm 8°, Table 2). In contrast, subjects maintain speed by pressing the accelerator with their right leg and only while changing a gear do they take their

Table 1

The average maximum ROM of the knee and the mean flexion of the knee (\pm standard deviation) while driving on different road types.

	Maximum ROM	ROM while driving		
		(a) City	(b) Country	(c) Highway
<i>Right knee</i>				
Flexion	(–)1–118°	40–80°	40–80°	40–80°
Mean flexion		56° \pm 10°	55° \pm 9°	55° \pm 10°
<i>Left knee</i>				
Flexion	(–)1–120°	25–85°	25–85°	20–85°
Mean flexion		58° \pm 11°	63° \pm 8°	62° \pm 7°

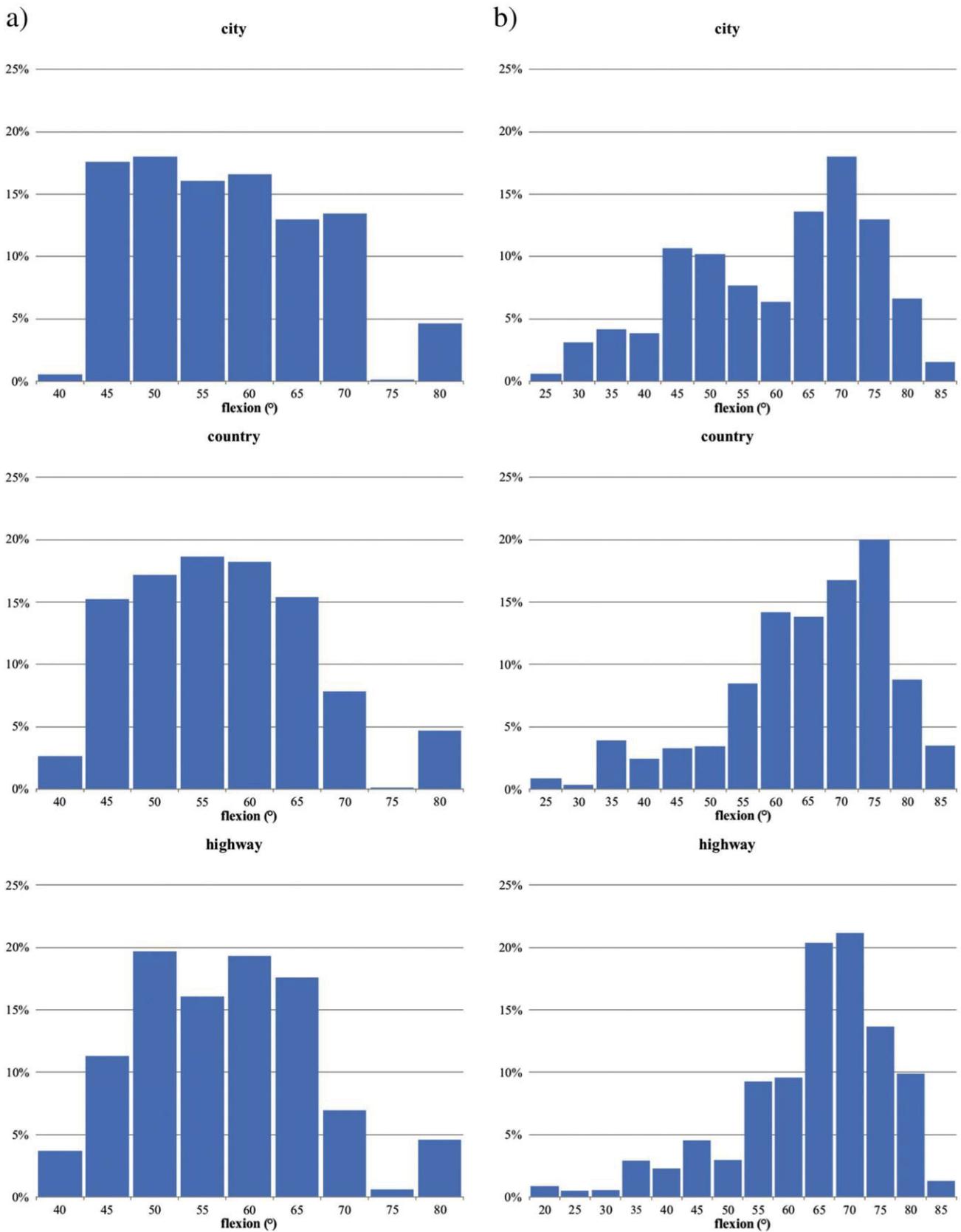


Figure 3. Histogram of the ROM (flexion) of the a) right and b) left knees while driving on city roads, country roads and highway.

Changing gear

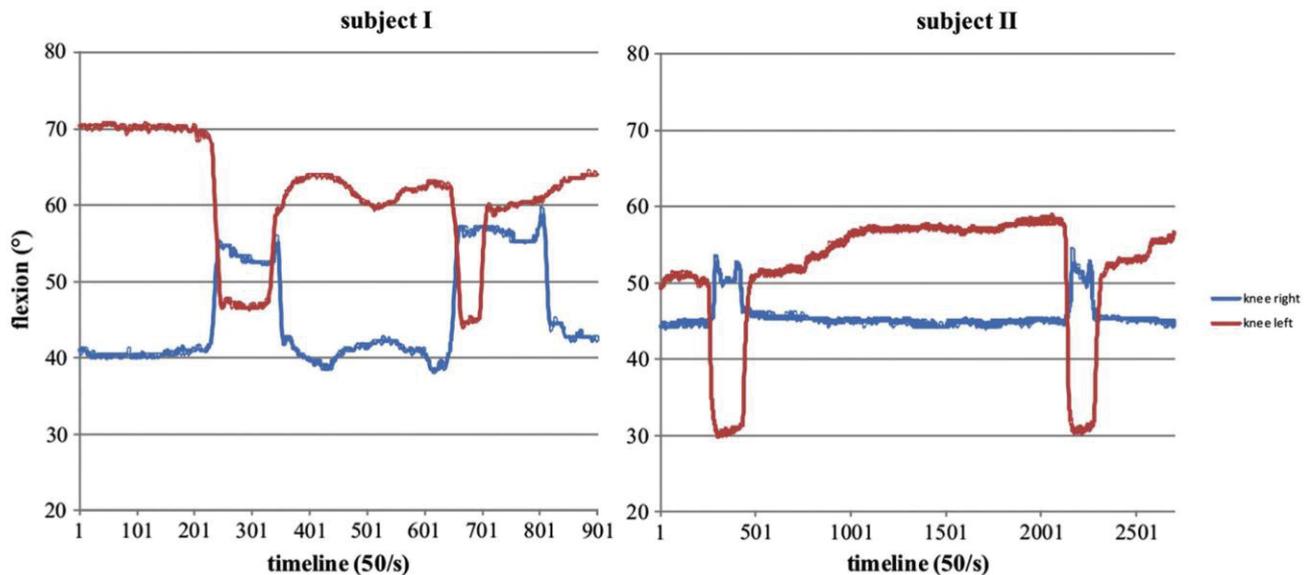


Figure 4. Example of the ROM of the right and left knees of two subjects while changing a gear twice.

right leg off the accelerator which results in a short period of higher flexion (Table 2). This could explain the greater ROM and significantly higher flexion of the left knee when compared to the right (Figure 4). With the right leg, subjects had to accelerate, maintain speed and hit the brake. The act of accelerating and using brakes has been investigated with observer reported outcomes such as response time, total brake time or required brake force [21–24]. Our data suggests that these important maneuvers can be achieved within a very small ROM within 40° and 80° flexion. In contrast, Dammerer et al. showed that movement restrictions of the right knee with a brace set to a ROM of 0° to 90° flexion already showed a significant effect on the brake response time (607 ms) in comparison to the subjects without a brace (594 ms) [24]. The authors point out, that there is no evidence to quantify the relationship between the measured increase of brake response time and the risk of an accident. In line with that, Green described, that when a person is fully aware of the time and location of the brake signal, drivers can detect a signal and move the foot from accelerator to brake pedal in 700 to 750 ms [25]. The significant increase of response time caused by a knee cast measured by Dammerer (594 vs. 607 ms) is still within the range measured by Green, and, therefore, should not influence driving capability significantly. These results support our hypothesis, that a car braking maneuver can be achieved within a small ROM located between 40° and 80° flexion as was measured in our study. The important influence of musculo-skeletal pain on driving ability has not been measured and further studies are needed to investigate its contribution [26,27].

A limitation of our study is that only left sided cars with manual transmission were used. Whether the transmission is manual or automatic should not have a substantial influence on the ROM of the right knee which is mainly used for acceleration, maintaining speed and applying the brakes. These maneuvers would be the same in cars with a manual or automatic transmission. ROM of the left knee would likely change in the setting of an automatic transmission, because subjects may choose to position their left leg in a more comfortable flexed position as they do not have to depress the clutch while changing a gear. For that reason, the ROM of the left knee would, likely, be smaller and demonstrate a higher mean flexion than in this study. The steering wheel location on the left or right side should not matter to the lower extremities because the pedals have the same arrangement in both car types. Another critical aspect is that only the knees of healthy subjects with non-painful adjacent joints were measured. Movement restriction of the ankle must be compensated by the knee [28] and this could result in greater knee ROM requirement. To investigate the influence of the synergistic equilibrium of hip, knee and ankle on the driving capability, further studies are needed.

5. Conclusion

The present study has characterized the knee range of motion that is commonly required to drive a car. Our measurements suggest that common driving activities such as accelerating or braking can be achieved with a limited right knee arc of motion

Table 2

The average position of the knee while changing a gear at beginning, at maximum and at the ending (\pm standard deviation).

Side	Knee flexion while changing a gear		
	Beginning	Maximum	Ending
Right knee	55° \pm 10°	62° \pm 10°	53° \pm 10°
Left knee	67° \pm 7°	39° \pm 8°	66° \pm 8°

between 40° and 80° flexion. The greater range of motion between 20° and 85° flexion and the significantly higher mean flexion of the left knee are attributed to the motion requirements of changing a gear. These ranges of motion may be used by the physician to assist in the determination of driving capability. Future studies that quantify the range of motion of adjacent lower extremity joints may foster our understanding of the complex interplay between joints while driving.

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing interests.

Funding

The study was partially financed by Deutsche Arthrose-Hilfe e.V.

Human and animal rights

There is a positive vote from the ethics committee of the Medical Faculty.

Informed consent

Prior to subject's participation, written informed consent was obtained.

References

- [1] Briggs AM, Cross MJ, Hoy DG, et al. Musculoskeletal health conditions represent a global threat to healthy aging: a report for the 2015 World Health Organization World Report on Ageing and Health. *Gerontologist* 2016;56:S243–55. <https://doi.org/10.1093/geront/gnw002>.
- [2] Milte R, Crotty M. Musculoskeletal health, frailty and functional decline. *Best Pract Res Clin Rheumatol* 2014;28:395–410.
- [3] Ball K, Owsley C, Stalvey B, et al. Driving avoidance and functional impairment in older drivers. *Accid Anal Prev* 1998;30:313–22.
- [4] Wang CC, Carr DB. Older driver safety: a report from the older drivers project. *J Am Geriatr Soc* 2004;52:143–9. <https://doi.org/10.1111/j.1532-5415.2004.52025.x>.
- [5] Hofmann UK, Jordan M, Rondak I, et al. Osteoarthritis of the knee or hip significantly impairs driving ability (cross-sectional survey). *BMC Musculoskelet Disord* 2014;15:20. <https://doi.org/10.1186/1471-2474-15-20>.
- [6] von Bernstorff M, Feierabend M, Jordan M, et al. Radiographic hip or knee osteoarthritis and the ability to drive. *Orthopedics* 2017;40:e82–9. <https://doi.org/10.3928/01477447-20160915-05>.
- [7] Hartman J, Thornley P, Oreskovich S, et al. Braking time following total knee arthroplasty: a systematic review. *J Arthroplasty* 2018;33:284–290.e281. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2017.08.012>.
- [8] vdVC A, TJ J, JRP A, et al. When is it safe to resume driving after total hip and total knee arthroplasty? *Bone Joint J* 2017;99-B:566–76. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.99b5.bjj-2016-1064.r1>.
- [9] Dalury DF, Chapman DM. Right TKR patients treated with enhanced pain and rehabilitation protocols can drive at 2 weeks. *J Knee Surg* 2018. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1660478> [Epub ahead of print] PubMed PMID: 29925104.
- [10] Organization WH. Global status report on road safety 2015. World Health Organization; 2015.
- [11] Association AM, US Department of Transportation, and National Highway Traffic Safety Administration. Physician's guide to assessing and counseling older drivers. Washington (DC): National Highway Traffic Safety Administration; 2003; 2009.
- [12] Hogan DB. Which older patients are competent to drive? Approaches to office-based assessment. *Can Fam Physician* 2005;51:362–8.
- [13] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. RV. Fahrzeuginsassen richtig sichern; 2015.
- [14] Latz D, Pfau S, Koukos C, et al. Doctor, when can I drive. *Obere Extremität* 2017;1–8.
- [15] Cooper JM. Clinical decision making: doctor, when can I drive? *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2007;36:78–80.
- [16] Goodwin D, Baecher N, Pitta M, et al. Driving after orthopedic surgery. *Orthopedics* 2013;36:469–74.
- [17] Chong PY, Koehler EA, Shyr Y, et al. Driving with an arm immobilized in a splint: a randomized higher-order crossover trial. *J Bone Joint Surg Am* 2010;92:2263–9. <https://doi.org/10.2106/JBJS.I.01170>.
- [18] Kunimatsu-Sanuki S, Iwase A, Araie M, et al. An assessment of driving fitness in patients with visual impairment to understand the elevated risk of motor vehicle accidents. *BMJ Open* 2015;5. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-006379>.
- [19] Korteling JE, Kaptein NA. Neuropsychological driving fitness tests for brain-damaged subjects. *Arch Phys Med Rehabil* 1996;77:138–46. [https://doi.org/10.1016/s0003-9993\(96\)90158-6](https://doi.org/10.1016/s0003-9993(96)90158-6).
- [20] Baker A, Unsworth CA, Lannin NA. Determining fitness to drive: a systematic review of the methods and assessments used after mild traumatic brain injury. *Br J Occup Ther* 2015;78:73–84. <https://doi.org/10.1177/0308022614562405>.
- [21] Dalury DF, Tucker KK, Kelley TC. When can i drive?: brake response times after contemporary total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res* 2011;469:82–6. <https://doi.org/10.1007/s11999-010-1507-1>.
- [22] DiSilvestro KJ, Santoro AJ, Tjoumakaris FP, et al. When can i drive after orthopaedic surgery? a systematic review. *Clin Orthop Relat Res* 2016;474:2557–70. <https://doi.org/10.1007/s11999-016-5007-9>.
- [23] Jordan M, Hofmann U-K, Rondak I, et al. Brake response time is significantly impaired after total knee arthroplasty: investigation of performing an emergency stop while driving a car. *Am J Phys Med Rehabil* 2015;94:665–76. <https://doi.org/10.1097/phm.0000000000000342>.
- [24] Dammerer D, Giesinger JM, Biedermann R, et al. Effect of knee brace type on braking response time during automobile driving. *Art Ther* 2015;31:404–9. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2014.09.003>.
- [25] Green M. "How long does it take to stop?" Methodological analysis of driver perception-brake times. *Transp Human Factors* 2000;2:195–216. https://doi.org/10.1207/s10720203_1.
- [26] Da Costa BR, Reichenbach S, Keller N, et al. Effectiveness of non-steroidal anti-inflammatory drugs for the treatment of pain in knee and hip osteoarthritis: a network meta-analysis. *Lancet* 2017;390:e21–33.
- [27] Davi S, Lepley A, Denegar C, et al. Influence of anterior knee pain with/without structural patellar tendon damage on arthrogenic muscle inhibition. *J Athl Train* 2017;52:S107.
- [28] Ogrodzka K, Zuka K, Niedźwiedzki T. Effects of ankle arthrodesis on functioning of the knee and hip joints during walking at natural velocity; 2007; 15–20.



ELSEVIER

BASIC SCIENCE

Doctor, when can I drive?—the range of elbow motion while driving a car



David Latz, MD^a, Erik Schiffner, MD^{a,*}, Johannes Schnependahl, MD, PhD^a,
Falk Hilsmann^a, Lars Fabian Seiler^a, Pascal Jungbluth, MD, Prof.^a,
Robert Alexander Kaufmann, MD^b, Joachim Windolf, MD, Prof.^a,
Sebastian Viktor Gehrman, MD, Prof.^a

^aDepartment of Trauma and Hand Surgery, University Hospital, Düsseldorf, Germany

^bDepartment of Orthopaedic Surgery, University Hospital, Pittsburgh, PA, USA

Background: Immobilization of the upper extremity after an acute injury or postoperatively affects an individual's ability to safely operate a motor vehicle. The elbow is particularly sensitive to immobilization, with subsequent stiffness leading to functional limitations. Most activities of daily living are successfully achieved within a "functional arc" of elbow motion between 30° and 130° of flexion. No objective guidelines exist regarding the range of motion needed to safely operate a vehicle. In this study, we measured the range of motion of right and left elbows while driving a manual-transmission car.

Materials and methods: Using electro-goniometers, we measured the flexion and extension, as well as pronation and supination, of the right and left elbows in 20 healthy, right hand-dominant subjects while driving a car. These measurements were recorded on (1) city streets, (2) country roads, and (3) highways.

Results: For city streets, the range of motion in terms of flexion and pronation/supination was 15°-105° and 0°-45°/0°-35°, respectively, for the right elbow and 20°-95° and 0°-45°/0°-40°, respectively, for the left. For country roads, it was 10°-100° and 0°-40°/0°-35°, respectively, for the right elbow and 20°-95° and 0°-30°/0°-30°, respectively, for the left. For highways, it was 5°-100° and 0°-40°/0°-35°, respectively, for the right elbow and 20°-90° and 0°-30°/0°-25°, respectively, for the left. Mean pronation was significantly higher for the right elbow ($P < .01$).

Conclusion: This study describes the range of elbow motion identified to drive a car with a manual transmission and a left-sided steering wheel. Mean pronation of the right elbow is significantly higher than that of the left. Further studies are needed to investigate the relevance of movement restrictions as they relate to handedness, steering-wheel side, and driving impairment.

Level of evidence: Basic Science Study; Kinesiology

© 2018 Journal of Shoulder and Elbow Surgery Board of Trustees. All rights reserved.

Keywords: Driving fitness; elbow; forensic medicine; range of motion; traffic medicine; trauma surgery

The ethics committee of the Medical Faculty of Heinrich Heine University Düsseldorf (No. 3362) approved this study.

*Reprint requests: Erik Schiffner, MD, Department of Trauma and Hand Surgery, University Hospital, Moorenstrasse 5, Düsseldorf 40225, Germany.

E-mail address: erik.schiffner@med.uni-duesseldorf.de (E. Schiffner).

Driving requires that the elbow move through a range of motion (ROM) that allows the driver to turn a steering wheel and, in certain cases, actuate a manual transmission. Loss of elbow motion, such as may occur after injury^{12,13,15,28} or because of immobilization, affects the ability to safely operate a motor vehicle. The ROM of the elbow significantly influences the

capacity of the upper extremity as a functional unit (shoulder, elbow, and wrist),^{3,14,23,24,29} and a loss of elbow ROM is less well tolerated than motion loss in adjacent joints.²² Thus, injuries to the elbow or restrictions of elbow ROM easily affect driving capabilities. Physicians are frequently charged with determining whether their patients are permitted to drive, and they may be held liable in the event of an accident.¹⁶ Despite this, few guidelines exist that quantify when driving may be allowed. Patients often decide based on subjective perceptions of their own capabilities.⁵ Previous studies have suggested that most activities of daily living can be accomplished with 100° of elbow flexion (30° to 130°).¹⁴ Objective parameters regarding the necessary elbow ROM for driving a car are lacking⁶ yet do exist for the wrist.¹¹ The aim of this study was to measure the elbow ROM used when driving a car with a left-sided steering wheel and a manual transmission on (1) city streets, (2) country roads, and (3) highways.

Materials and methods

This was an experimental study. A total of 20 healthy, right-handed¹⁸ subjects (10 women and 10 men) without a history of upper-extremity trauma or recent immobilization participated in this study. Subject ages varied between 23 and 36 years, with a mean of 29 ± 3 years. All participants were required to possess a valid driver's license and own their own vehicle, which they drove more than 5000 km/yr. All cars had a left-sided steering wheel. The exclusion criteria were pregnancy, musculoskeletal or systemic diseases, diseases of the central or peripheral nervous system, psychiatric disorders, and chronic drug or alcohol abuse. Each subject completed a standardized questionnaire, and written informed consent was obtained prior to subjects' participation.

To characterize the ROM of the elbow, we used an electrogoniometer (Twin Axis goniometer, type SG 65; Biometrics Ltd, Newport, UK) and torsionmeter (Single Axis torsionmeter, type Q 150; Biometrics Ltd) that recorded flexion-extension and pronation-supination, respectively. Electro-goniometers measure flexion-extension based on strain changes along the length of a wire between 2 end blocks. The design measures only angular and not linear movements. Torsionmeters measure pronation-supination based on relative axial rotation between 2 end blocks. If the torsionmeter is bent, the output remains constant. The goniometer was attached with double-sided medical adhesive tape to the lateral aspect of the elbow, and the torsionmeter was attached to the ulnar aspect of the neutral-positioned forearm (Fig. 1, a).

To determine each participant's valid and reproducible full elbow ROM, we instructed the subjects to perform 10 repetitions of maximum flexion-extension and pronation-supination for each elbow, and these values were compared with an external goniometer. Differences greater than $\pm 10^\circ$ were excluded. After the individual maximum ROM was determined, subjects were fitted while in their own car, which had a steering wheel on the left side and a manual transmission. A uniform sitting position was carefully established for each participant.¹ We instructed the subjects to drive 3 predetermined routes twice each—(1) city streets, (2) country roads, and (3) highways (Fig. 1, b)—and not to exceed maximum speeds of 30, 80, and 120 km/h for city streets, country roads, and highways, respectively. All subjects drove on the right side of the road, and the order of traveled routes was randomized for each subject.

During the procedure, motion data of the joints were continuously measured (50/s) and transmitted to a mobile computer system.

We processed raw data from the electro-goniometer and torsionmeter using Datalog analysis software (Biometrics Ltd) and a customized MATLAB program (The MathWorks, Natick, MA, USA). The mean and standard deviation of flexion-extension and pronation-supination measurements were calculated for every road type. For statistical analysis, the SPSS software program (version 25; IBM, Armonk, NY, USA) performed a multivariate analysis of variance (MANOVA) with the factors road type (city, country, and highway) and arm side (right and left elbow) followed by a subsequent univariate analysis that was performed for data with a normal distribution to assess for statistical differences. *P* values were corrected for multiple testing using the Bonferroni test. *P* < .05 was assumed to be statistically significant. In addition, we ranked the relative probabilities of different elbow positions and displayed the findings as a histogram. Kolmogorov-Smirnov tests were used to assess for normal distributions.

Results

The Edinburgh Handedness Inventory¹⁸ indicated that all participants were right handed.

Extension-flexion

The individual maximum and minimum extension-flexion of the elbow and the mean extension-flexion of the elbow while driving on different road types are shown in Table I. Descriptive statistics of the probability of elbow position in extension-flexion are shown in Table II and Figure 2.

A Kolmogorov-Smirnov test showed no normal distribution for elbow extension-flexion overall (*P* < .001) but showed a normal distribution for mean extension-flexion (*P* = .08). The MANOVA showed no significant main effect for road type (Wilks Λ = 0.98; $F_{4,226}$ = 0.49; *P* = .75) or interactions (Wilks Λ = 0.99; $F_{4,226}$ = 0.27; *P* = .90) but showed a significant main effect for arm side (Wilks Λ = 0.91; $F_{2,113}$ = 5.74; *P* = .004). The subsequent univariate analysis showed no significant difference in extension-flexion for the right elbow compared with the left elbow for all road types ($F_{1,238.97}$ = 0.80; *P* = .37).

Pronation-supination

The individual maximum and minimum pronation-supination of the elbow and the mean pronation-supination of the elbow

Table I Individual maximum and minimum extension-flexion of elbow and mean extension-flexion of elbow (\pm standard deviation) while driving different road types

	ROM, °			
	Maximum extension/flexion	Mean flexion while driving		
		City	Country	Highway
Right elbow	0-7/0-127	59 \pm 16	55 \pm 18	54 \pm 18
Left elbow	0-8/0-127	56 \pm 15	52 \pm 18	51 \pm 18

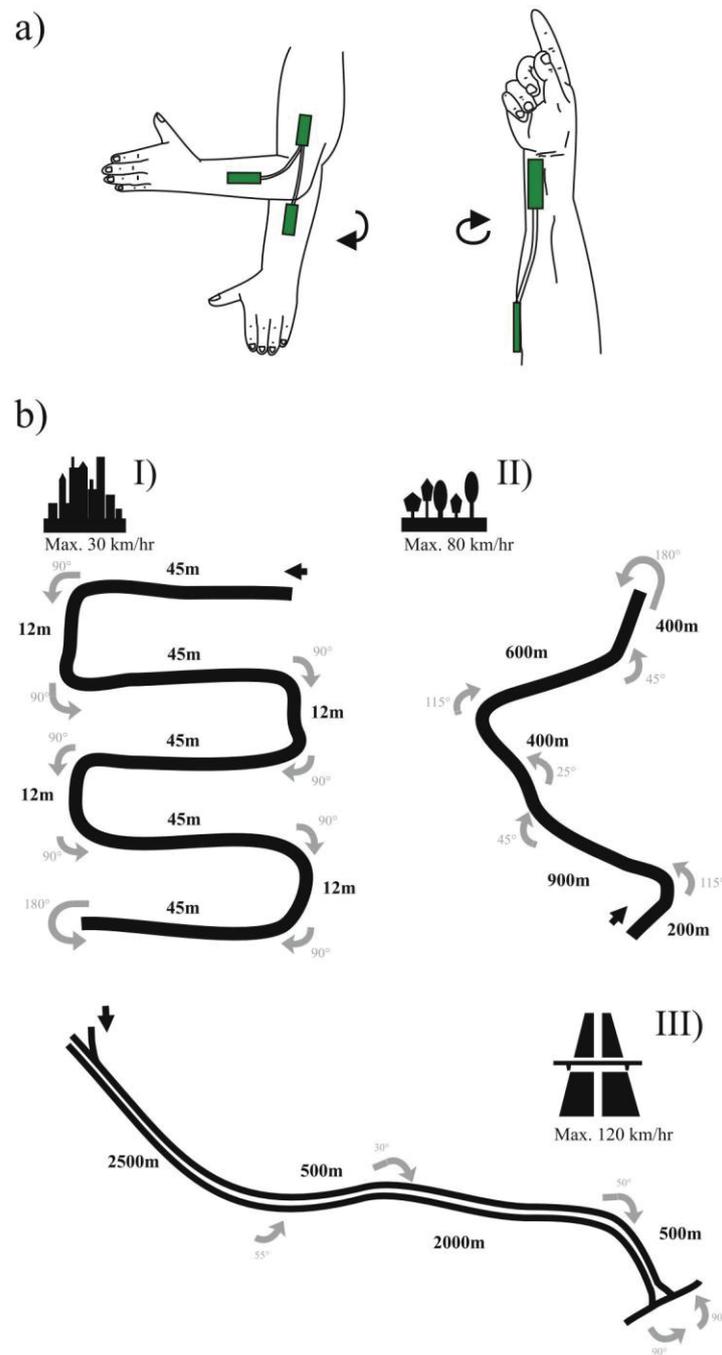


Figure 1 (a) The goniometer was attached to the lateral aspect of the elbow, and the torsionmeter was attached to the ulnar aspect of the forearm in neutral position. (b) Schema of routes: (I) city streets, (II) country roads, and (III) highway. *Max*, maximum.

while driving on different road types are shown in Table III. Descriptive statistics of the probability of elbow position in pronation-supination are shown in Table IV and Figure 3.

A Kolmogorov-Smirnov test showed no normal distribution for elbow pronation-supination overall ($P < .001$) but showed a normal distribution for mean pronation-supination ($P = .2$). The MANOVA showed no significant main effect for road type (Wilks $\Lambda = 0.98$; $F_{4,226} = 0.49$; $P = .75$) or interactions (Wilks $\Lambda = 0.99$; $F_{4,226} = 0.27$; $P = .90$) but showed

a significant main effect for arm side (Wilks $\Lambda = 0.91$; $F_{2,113} = 5.74$; $P = .004$). The subsequent univariate analysis showed higher mean pronation for the right elbow compared with the left elbow for all road types ($F_{1,1703.21} = 10.79$; $P = .001$).

Discussion

The elbow ROM that is required for performing most tasks is between 30° and 130° of flexion and between 50° of pro-

Table II Flexion of elbow in different location probabilities while driving different road types

	Flexion, °			
	Approximately 99%	Approximately 90%	Approximately 75%	Approximately 50%
Right elbow				
City	15-105	25-90	35-75	45-65
Country	10-100	25-85	35-75	30-50
Highway	5-100	30-90	30-70	35-50
Left elbow				
City	20-95	30-85	40-85	45-70
Country	20-95	30-85	30-75	30-55
Highway	20-90	25-80	25-70	30-40 and 65-75

Table III Individual maximum and minimum pronation-supination of elbow and mean pronation-supination of elbow while driving different road types

	ROM, °			
	Maximum pronation/supination	Mean pronation while driving		
		City	Country	Highway
Right elbow	0-50/0-48	10 ± 12	12 ± 13	11 ± 13
Left elbow	0-52/0-47	6 ± 12	2 ± 12	2 ± 12

nation and 50° of supination.^{14,24,29} When this motion is not achieved, a variety of treatment options may be considered.^{9,13} To our knowledge, no investigation using goniometers has studied the elbow ROM required to drive a car. Rawal et al¹⁹ defined the ROM of the upper extremity using a driving simulator and motion analysis with 13 cameras at different angles. In contrast, our study provides an ROM that was measured during actual driving conditions and in a manner that can be easily rechecked with an external goniometer. At present, there are no clear guidelines for advising patients regarding their potential driving limitations as they relate to elbow motion. The goal of this study was to demonstrate the mean ROM of the elbow while driving a car based on quantitative noninvasive measurements.

In this study, we identified the range of elbow motion that encompassed approximately 99% of those activities encountered by the right elbow during different driving conditions.

This ROM lies between 15° and 105° of flexion and 0° and 45° of pronation/0° and 35° of supination for city roads; between 10° and 100° of flexion and 0° and 40° of pronation/0° and 35° of supination for country driving; and between 5° and 100° of flexion and 0° and 40° of pronation/0° and 35° of supination for highway driving. Mean pronation of the left elbow was significantly lower for all road types (Tables I-IV). All of the subjects were right handed and drove cars with a steering wheel on the left side mandating greater pronation by the right elbow during manipulation of the manual transmission. Our data demonstrate that the ROM of 5° to 105° in flexion-extension and 0°-45°/0°-35° in pronation/supination encompasses all the motion encountered by the right elbow and that the left elbow has fewer ROM needs. Furthermore, 50% of the right elbow ROM lay between 30° and 65° of flexion and between 0° and 25° of pronation. For the left elbow, 50% of the ROM lay between 30° and 75° of flexion and between 5° of supination and 25° of pronation (Tables II and IV).

Our results suggest that new guidelines for immobilization include a "driving arc of motion" that allows 5° to 105° in flexion and 0°-45°/0°-35° in pronation/supination. These findings correlate with recent studies that have warned against driving while immobilized in a long-arm cast,²⁶ whereas a short-arm cast with unrestricted elbow motion can be considered safer.⁸ Different driver handedness as well as car features such as transmission type and steering-wheel location would potentially influence the ROM. In our study, the ROM of the elbow was characterized only in right-handed participants who did not exhibit discomfort or stiffness in adjacent

Table IV Pronation-supination of elbow in different location probabilities while driving different road types

	Pronation/supination, °			
	Approximately 99%	Approximately 90%	Approximately 75%	Approximately 50%
Right elbow				
City	0-45/0-35	0-35/0-20	0-25/0-15	0-20/0-0
Country	0-40/0-35	0-25/0-20	0-25/0-0	0-25/10-0
Highway	0-40/0-35	0-25/0-20	0-25/0-5	0-20/5-0
Left elbow				
City	0-45/0-40	0-30/0-20	0-30/0-10	0-25/0-5
Country	0-30/0-30	0-25/0-20	0-25/0-5	15-5/0-0
Highway	0-30/0-25	0-20/0-20	0-20/0-5	15-5/0-0

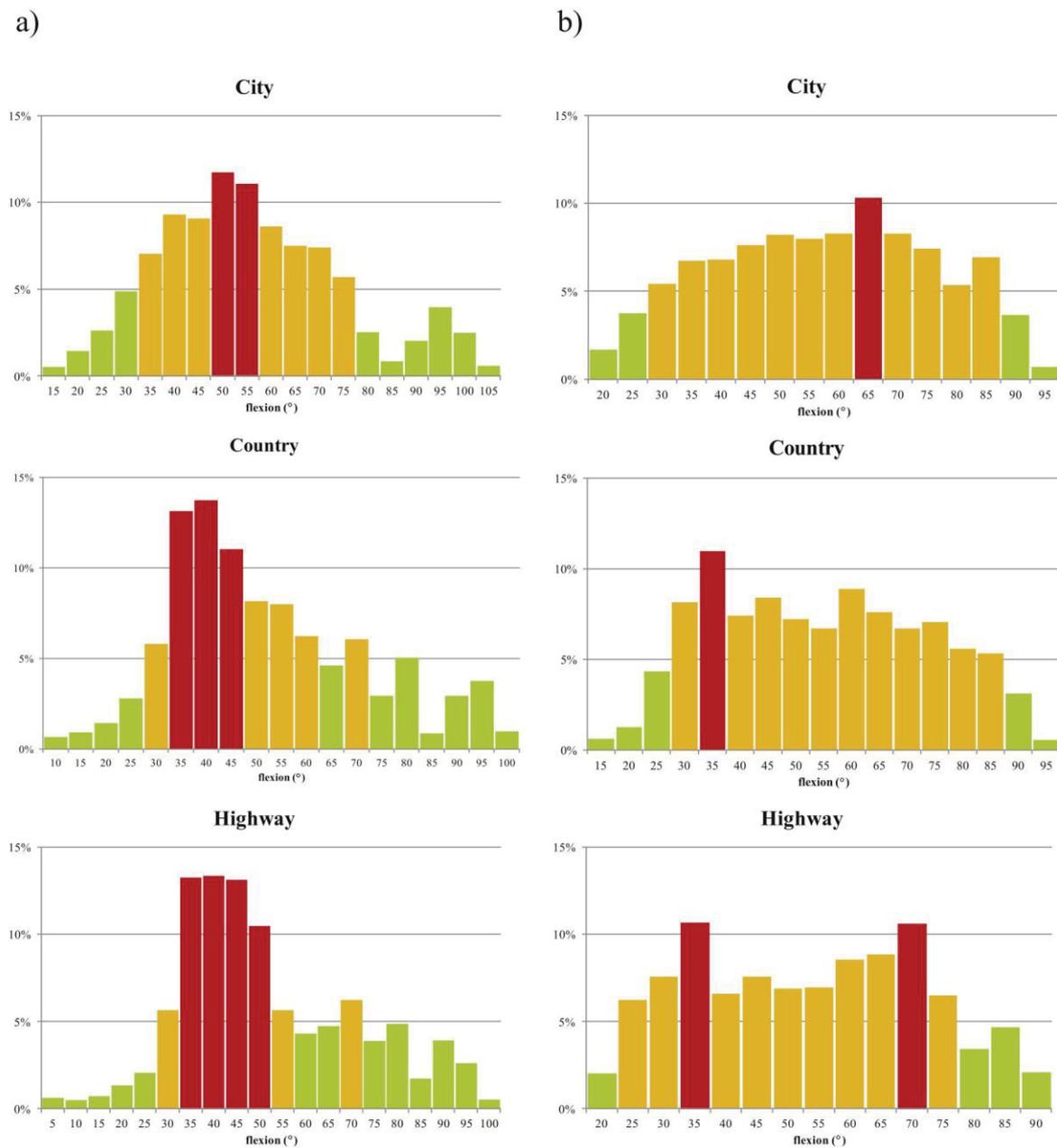


Figure 2 Histogram of range of motion in extension-flexion for right (a) and left (b) elbows (green indicates <5%; yellow, >5%; and red, >10%).

joints. Movement restriction of 1 joint as well as different handedness may influence the motion in adjacent joints.^{7,30,31}

Further studies are needed to investigate the impact that elbow ROM restrictions may have on the actual ability to safely drive a car. Even though a certain ROM was observed, our results cannot suggest that a smaller motion capability renders vehicle operation unsafe. Furthermore, rare extreme movements, for example, turning the steering wheel quickly in a critical evasion maneuver or rapidly switching to another gear while overtaking a car, could be more important for safe driving than frequent average movements. Hence, it would be important to classify typical car driving maneuvers and examine their ROM requirement in addition

to the necessary coordination, accuracy, speed, and reaction time in an additional study.

Our data do not provide insight into how movement quality such as coordination, reaction time, or accuracy influences driving capability, aspects that have been investigated in patients with Parkinson disease.^{4,10,25} Furthermore, the influence that musculoskeletal discomfort has on driving capability may warrant exploration. Conditions such as medial or lateral epicondylitis,^{27,32} olecranon bursitis,²⁰ impingement,^{17,21} or arthritis²⁸ may affect driving capability and would benefit from further evaluation in randomized controlled studies. Such efforts may lead to an objective assessment of what constitutes “safe driving.”

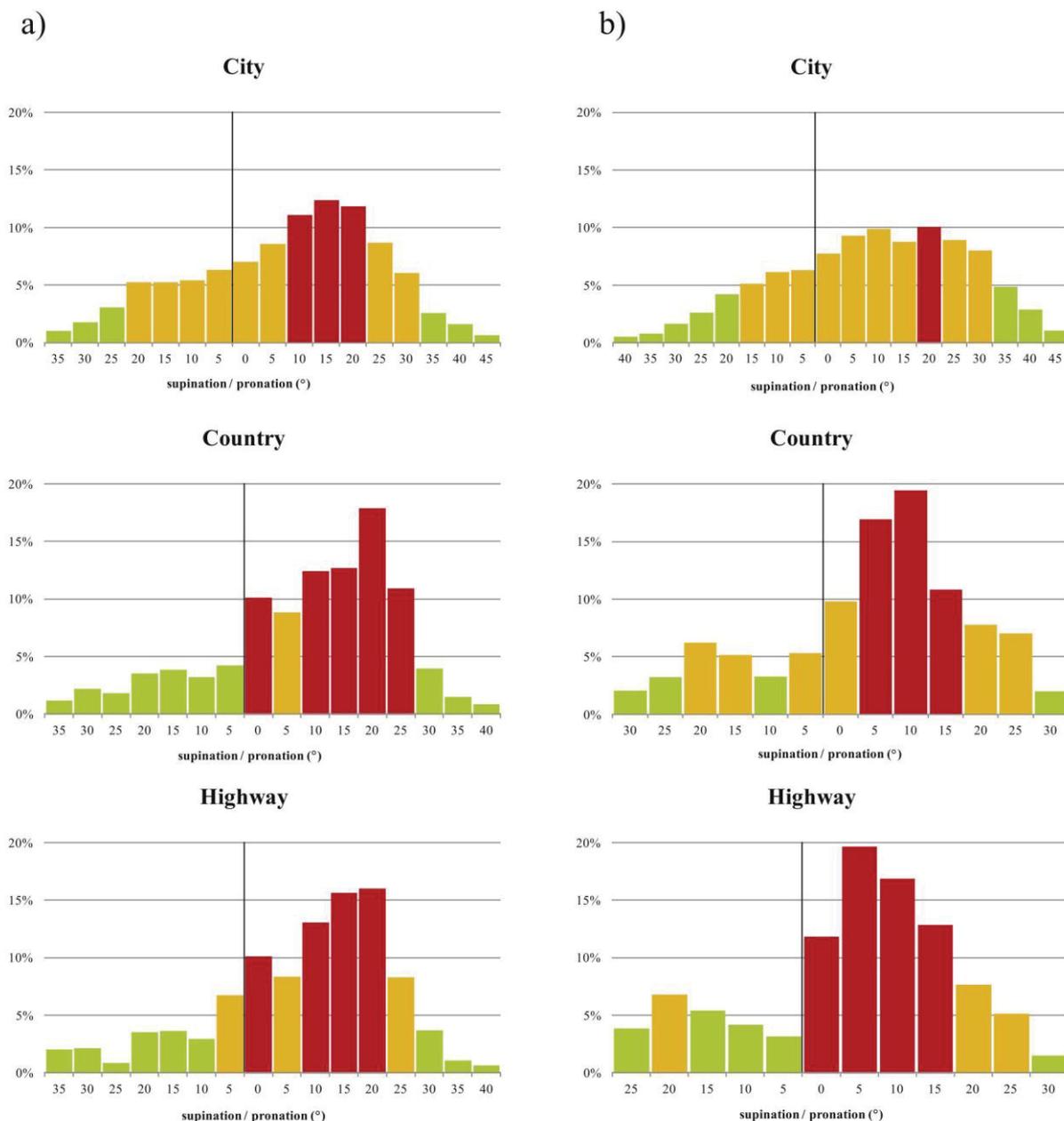


Figure 3 Histogram of range of motion in supination-pronation for right (a) and left (b) elbows (green indicates <5%; yellow, >5%; and red, >10%).

A major technical limitation of this study relates to matching the pronation-supination of the forearm with the torsionmeter attached to the ulnar aspect of the forearm. When starting pronation or supination, no measurement errors are expected owing to soft tissue and skin movements. However, while achieving the maximum degree of pronation and supination, skin movements and relative movement of soft tissues lead to measurement errors larger than $\pm 10^\circ$. To minimize that risk, double-sided adhesive tape was placed between the goniometer end blocks and the skin, a single adhesive tape was placed over the top of the end blocks, and bandages were fit over the whole sensor and interconnect lead. Still, our results for electro-goniometric maximum pronation/supination

(approximately 0° - 50° / 0° - 50° , Table III) could not reach the expected maximum ROM obtained using a goniometer (71° - 84°),² indicating that our maximum values may not be valid. However, the mean ROM of pronation and supination while driving a car was smaller than 15° of pronation (Table III), and 90% of all pronation and supination activities lay between 0° and 35° and between 0° and 20° , respectively (Table IV), indicating that our subjects operated in a limited and, therefore in this study, valid ROM. Within this ROM, only minor measurement errors smaller than $\pm 10^\circ$ were expected, and therefore, our results should be valid.

On the basis of these results, further studies may quantify the upper extremity as a functional unit that consists of

wrist, elbow, and shoulder motion. It may be of value to impart different simulated ROM limitations in any one joint and identify how other joints compensate for these, as well as how driving performance is affected. With these data, it may be possible to give experimentally and evidence-based recommendations for the timing and functional motion required to return to driving safely.

Conclusion

This study describes the range of elbow motion while driving a car on different road types. When driving a car with a left-sided steering wheel and a manual transmission on the right side, mean pronation of the right elbow is significantly higher than that of the left elbow. Our results further suggest that movement restrictions in pronation could possibly affect driving capability earlier than restricted supination. Further studies may shed light on the relationship between restricted elbow motion and handedness or different car settings.

Disclaimer

The study was partially financed by Deutsche Arthrose-Hilfe eV. Grant ID: P203-A335-Windolf-EP1-gehr1-hand-pr-II-54k-2009-12.

The authors, their immediate families, and any research foundations with which they are affiliated have not received any financial payments or other benefits from any commercial entity related to the subject of this article.

References

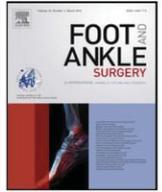
- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club. RV. Fahrzeuginsassen richtig sichern. Munich: ADAC; 2015. p. 23. <www.adac.de/ratgeber-verkehr>; accessed October 5, 2018.
- Boone DC, Azen SP. Normal range of motion of joints in male subjects. *J Bone Joint Surg Am* 1979;61:756-9.
- Cooper JE, Shwedyk E, Quanbury AO, Miller J, Hildebrand D. Elbow joint restriction: effect on functional upper limb motion during performance of three feeding activities. *Arch Phys Med Rehabil* 1993;74:805-9.
- Crizzle AM, Classen S, Uc EY. Parkinson disease and driving an evidence-based review. *Neurology* 2012;79:2067-74. <http://dx.doi.org/10.1212/WNL.0b013e3182749e95>
- Giddins GE, Hammerton A. 'Doctor, when can I drive?': a medical and legal view of the implications of advice on driving after injury or operation. *Injury* 1996;27:495-7.
- Goodwin D, Baecher N, Pitta M, Letzelter J, Marcel J, Argintar E. Driving after orthopedic surgery. *Orthopedics* 2013;36:469-74. <http://dx.doi.org/10.3928/01477447-20130523-08>
- Gunal I, Kose N, Erdogan O, Gokturk E, Seber S. Normal range of motion of the joints of the upper extremity in male subjects, with special reference to side. *J Bone Joint Surg Am* 1996;78:1401-4.
- Kalamaras MA, Rando A, Pitchford DG. Driving plastered: who does it, is it safe and what to tell patients. *ANZ J Surg* 2006;76:439-41. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1445-2197.2006.03762.x>
- Kim S-J, Shin S-J. Arthroscopic treatment for limitation of motion of the elbow. *Clin Orthop Relat Res* 2000;375:140-8.
- Korteling JE, Kaptein NA. Neuropsychological driving fitness tests for brain-damaged subjects. *Arch Phys Med Rehabil* 1996;77:138-46.
- Latz D, Pfau S, Koukos C, Jungbluth P, Jansing G, Schiffler E, et al. Doctor, when can I drive. *Obere Extremit* 2017;1-8. <http://dx.doi.org/10.1007/s11678-017-0426-0>
- Malone KJ, Martineau PA, Hanel DP. Ulnar collateral ligament reconstruction in posttraumatic elbow release. *Orthopedics* 2012;35:e202-7. <http://dx.doi.org/10.3928/01477447-20120123-10>
- Modabber MR, Jupiter JB. Reconstruction for post-traumatic conditions of the elbow joint. *J Bone Joint Surg Am* 1995;77:1431-46.
- Morrey B, Askew L, Chao E. A biomechanical study of normal functional elbow motion. *J Bone Joint Surg Am* 1981;63:872-7.
- Nandi S, Maschke S, Evans PJ, Lawton JN. The stiff elbow. *Hand* 2009;4:368-79. <http://dx.doi.org/10.1007/s11552-009-9181-z>
- Nunez VA, Giddins GE. 'Doctor, when can I drive?': an update on the medico-legal aspects of driving following an injury or operation. *Injury* 2004;35:888-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.injury.2003.11.009>
- Ogilvie-Harris D, Gordon R, MacKay M. Arthroscopic treatment for posterior impingement in degenerative arthritis of the elbow. *Arthroscopy* 1995;11:437-43.
- Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971;9:97-113.
- Rawal A, Chehata A, Horberry T, Shumack M, Chen C, Bonato L. Defining the upper extremity range of motion for safe automobile driving. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2018;54:78-85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.03.009>
- Reilly D, Kamineni S. Olecranon bursitis. *J Shoulder Elbow Surg* 2016;25:158-67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jse.2015.08.032>
- Robinson PM, Loosemore M, Watts AC. Boxer's elbow: internal impingement of the coronoid and olecranon process. A report of seven cases. *J Shoulder Elbow Surg* 2017;26:376-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jse.2016.09.035>
- Rommens PM, Kuchle R, Schneider RU, Reuter M. Olecranon fractures in adults: factors influencing outcome. *Injury* 2004;35:1149-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.injury.2003.12.002>
- Safaei-Rad R, Shwedyk E, Quanbury A, Cooper J. Normal functional range of motion of upper limb joints during performance of three feeding activities. *Arch Phys Med Rehabil* 1990;71:505-9.
- Sardelli M, Tashjian RZ, MacWilliams BA. Functional elbow range of motion for contemporary tasks. *J Bone Joint Surg Am* 2011;93:471-7. <http://dx.doi.org/10.2106/JBJS.I.01633>
- Schreier DR, Banks C, Mathis J. Driving simulators in the clinical assessment of fitness to drive in sleepy individuals: a systematic review. *Sleep Med Rev* 2018;38:86-100. <http://dx.doi.org/10.1016/j.smrv.2017.04.004>
- Stevenson HL, Peterson N, Talbot C, Dalal S, Watts AC, Trail IA. An objective assessment of safety to drive in an upper limb cast. *J Hand Surg Eur Vol* 2013;38:321-4. <http://dx.doi.org/10.1177/1753193412451385>
- Tarulli A. Focal pain syndromes of the extremities. Cham: Springer; 2016. ISBN 978-3-319-29630-2.
- Timmerman LA, Andrews JR. Arthroscopic treatment of posttraumatic elbow pain and stiffness. *Am J Sports Med* 1994;22:230-5.
- Vasen AP, Lacey SH, Keith MW, Shaffer JW. Functional range of motion of the elbow. *J Hand Surg Am* 1995;20:288-92.
- Wagner ER, Elhassan BT, Kakar S. Long-term functional outcomes after bilateral total wrist arthrodesis. *J Hand Surg Am* 2015;40:224-8. e1. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhssa.2014.10.032>
- Weiss A-PC, Wiedeman G, Quenzer D, Hanington KR, Hastings H, Strickland JW. Upper extremity function after wrist arthrodesis. *J Hand Surg Am* 1995;20:813-7.
- Winston J, Wolf JM. Tennis elbow: definition, causes, epidemiology. In: *Tennis elbow*. Cham: Springer; 2015. p. 1-6.



Contents lists available at ScienceDirect

Foot and Ankle Surgery

journal homepage: www.elsevier.com/locate/fas



Doctor, when can I drive? – Range of functional ankle motion during driving

David Latz^a, Erik Schiffner^{a,*}, Johannes Schnependahl^a, Jan Peter Grassmann^{a,b}, Pascal Jungbluth^a, Robert Alexander Kaufmann^b, Joachim Windolf^a, Sebastian Viktor Gehrman^a

^a Department of Orthopedics and Trauma Surgery, University Hospital, Moorenstrasse 5, 40225 Düsseldorf, Germany

^b Department of Orthopaedic Surgery, Kaufmann Medical Building, 3471 Fifth Ave. Suite 1010, Pittsburgh, PA 15213, United States

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 May 2019

Received in revised form 24 November 2019

Accepted 29 December 2019

Available online xxx

Keywords:

Driving capability

Driving safety

Ankle

Osteoarthritis

Ankle stiffness

Ankle Range of motion

ABSTRACT

Background: Driving a motor vehicle needs a specific joint mobility and yet only limited knowledge exists regarding the necessary ankle range of motion. The goal of this study is to characterize the sequence and range of ankle motion.

Methods: The arc of plantarflexion/dorsiflexion and supination/pronation was recorded in the right and left ankle using electrogoniometers while thirty laps were driven by fifteen healthy participants around a course in a manual transmission car with a left sided steering wheel. The driver was required to perform the following maneuvers during each lap: (I) Vehicle acceleration and gear change, (II) Sudden evasion, (III) Routine turning, (IV) Rapid turning, (V) Vehicle acceleration followed by emergency braking.

Results: Driving required the right ankle to plantarflex 13 ± 9 and dorsiflex 22 ± 7 while supinating 15 ± 7 degrees and pronating minimally. The left ankle plantarflexed 19 ± 10 and dorsiflexed 17 ± 10 while supinating 15 ± 7 degrees and pronating minimally. The right ankle dorsiflexed significantly more ($p=0.00$), and yet the left ankle had a significantly higher maximum plantarflexion and range of plantarflexion/dorsiflexion ($p=0.00$). Emergency braking resulted in a significantly higher maximum plantarflexion as well as plantarflexion/dorsiflexion range when compared to other maneuvers.

Conclusion: This study describes the range of ankle motion identified to drive a car with a manual transmission and a left-sided steering wheel. The right and left ankle exhibit different arcs of motion during driving. This knowledge may assist when evaluating a patient's driving capability. Further studies are needed to investigate whether movement restrictions impair driving.

Level of evidence: Basic science study.

© 2020 European Foot and Ankle Society. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Driving a car is an indispensable component of our society and an inability to drive may result in severe socio-economic implications. Ankle arthritis or injury such as sprains or fractures may impair this joint's range of motion [1,2], which can impact the ability to safely drive a car [3,4].

The elderly often rely on driving as their only means of personal mobility [5,6]. Elderly patients are particularly susceptible to

musculoskeletal disorders and often strive to continue driving even when impaired [5]. Because joint dysfunction can affect the ability to safely operate a vehicle, safe driving for the elderly is a growing public health concern [7,8].

Physicians often evaluate a patient's ability to drive and may benefit from guidelines that assist in this process. In previous studies, wrist, elbow and knee range of motion requirements for driving a car have been characterized [9–11]. No objective parameters related to the necessary ankle joint range of motion (ROM) exist [3]. Previous studies do suggest that ankle movement restriction impairs the braking response time [3,12,13].

Given that arthritis in the elderly and injury in younger patients may affect movement, characterization of ankle ROM during driving may be of value when attempting to determine

* Corresponding author at: Department of Orthopedics and Trauma Surgery, University Hospital, Moorenstrasse 5, 40225 Düsseldorf, Germany.

E-mail addresses: Erik.Schiffner@med.uni-duesseldorf.de (E. Schiffner), kaufmannra@upmc.edu (R.A. Kaufmann).

<https://doi.org/10.1016/j.fas.2019.12.006>

1268-7731/© 2020 European Foot and Ankle Society. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

driving capability. The aim of this study was to measure the ankle ROM that is required to drive a left sided car with a manual transmission.

2. Materials and methods

Prior to initiating this study, approval by the ethics committee was obtained. After obtaining informed consent, each participant completed a standardized questionnaire where exclusion criteria were defined. In particular, participants with psychiatric disorders, pregnancy, chronic drug or alcohol abuse, systemic or musculo-skeletal disorders (e.g. rheumatism, spondylarthropathy, osteoarthritis), diseases of the central or peripheral nervous system were excluded. In order to ensure driving competence, only participants with a valid driver's license and who drove their own car at least 5000 km a year were included. Most of the participants were students or employees of the university hospital. All participants were wearing conventional low cut shoes. After acquisition of the informed and written consent, electrogoniometers (CE certified Twin Axis goniometer type SG 110A, Biometrics Ltd., Newport, UK) were attached to the right and left ankle with double sided medical adhesive tape (Fig. 1).

Electrogoniometers measure strain changes along the length of a wire between two end-blocks (Fig. 1). As the angle changes between the two end-blocks, the change in wire strain is measured and yet, if the endblocks move linear to each other, the output remains constant. After attachment of the electrogoniometers, a connection to a mobile computer system was established using Bluetooth. In this setting, ROM was continuously measured at 50 Hz and monitored for aberrant data artifact. In order to determine each participant's valid ankle ROM, participants were instructed to perform ten repetitions of maximum plantarflexion/dorsiflexion and pronation/supination. These values were compared to measurements obtained with an external goniometer and calibration between the two ensured.

All measurements took place on a closed testing ground. To simulate a realistic but also standardized setting, participants were seated in their own car but in a uniform position. Drivers were seated with at least 25 cm between the body and steering wheel with the distance between the head and headrest minimized and with the back as upright as possible [14]. In this study, only left sided cars with a right sided manual transmission were used. After ensuring proper goniometer attachment and a stable bluetooth connection, subjects completed a pylon-marked standardized driving course two times. The driving course (Fig. 2) consisted of five common driving maneuvers: (I) Vehicle acceleration and gear change (0–50 km/h), (II) Sudden evasion, (III) Routine turning, (IV) Rapid turning, (V) Vehicle acceleration followed by emergency braking (anti-lock braking system (ABS) is initiated). Every participant was instructed not to exceed maximum speeds of 50 km/hr.

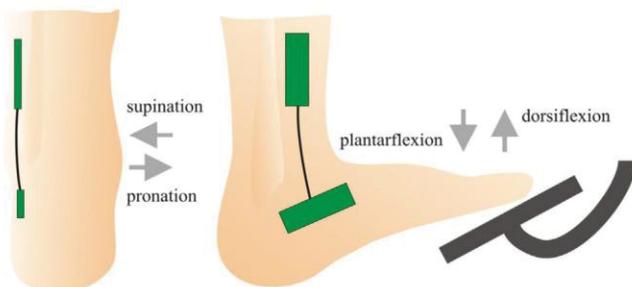


Fig. 1. Attachment of the Twin Axis electrogoniometer on the ankle.

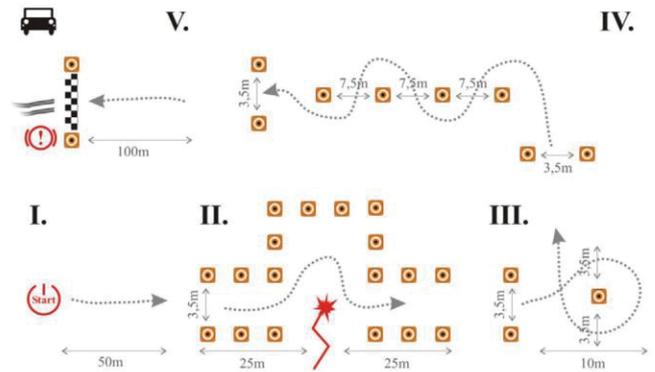


Fig. 2. Pylon-marked course with five typical driving maneuvers: (I) Vehicle acceleration and gear change (0–50 km/h), (II) Sudden evasion, (III) Routine turning, (IV) Rapid turning, (V) Vehicle acceleration followed by emergency braking (ABS has been triggered). Participants were instructed not to exceed maximum speeds of 50 km/hr.

Fig. 2 Pylon-marked course with five typical driving maneuvers: (I) Vehicle acceleration and gear change (0–50 km/h), (II) Sudden evasion, (III) Routine turning, (IV) Rapid turning, (V) Vehicle acceleration followed by emergency braking (ABS has been triggered). Participants were instructed not to exceed maximum speeds of 50 km/hr.

Acquired data was visualized for artifacts and further processing occurred with Datalog[®] (Biometrics Ltd., Newport, UK) software and a custom made Matlab[®] program. The Shapiro Wilk test was used to assess normal distribution. Statistical Analysis was performed using SPSS25[®] (International Business Machines Corporation (IBM), Armonk New York, United States). ROM of plantarflexion/dorsiflexion (Arithmetic mean, maximum plantarflexion, maximum dorsiflexion and range between maximum plantarflexion and dorsiflexion) and of supination/pronation (Arithmetic mean, maximum supination, maximum pronation and range between maximum supination and pronation) of the left and right ankle, were calculated for each participant while driving a car in each typical driving maneuver.

A univariate analysis of variance (ANOVA) with the factors maneuver (I.-V.) and side (right and left) was performed followed by post hoc t-tests for independent samples with corrected p-values for multiple testing using the bonferroni test. Only values <0.05 were assumed to be statistically significant.

3. Results

Fifteen healthy subjects participated in this study. Nobody was excluded due to criteria or unacceptable data collection. 11 subjects were male and 4 female. The average age was 33 ± 8 years, the average height was 179 ± 11 cm and the average weight was 78 ± 15 kg (mean ± standard deviation).

3.1. Range of motion

For all maneuvers, ROM of the right ankle was 13 ± 9/22 ± 7 degrees plantarflexion/dorsiflexion with a range of 35 ± 5 degrees and 15 ± 7/- degrees supination/pronation with a range of 11 ± 4 degrees. ROM of the left ankle was 19 ± 10/17 ± 10 degrees plantarflexion/dorsiflexion with a range of 36 ± 10 degrees and 15 ± 7/- degrees supination/pronation with a range of 11 ± 4 degrees.

Table 1 shows the detailed ROM of the left and right ankle (mean plantarflexion/dorsiflexion, maximum plantarflexion, maximum dorsiflexion, range between maximum plantarflexion and

Table 1

ROM of the right and left ankle (plantarflexion = pf, dorsiflexion = df, supination = sup., pronation = pro.) while driving typical maneuvers (I–V.).

Right ankle									
Maneuver	max. pf.	mean df.	max. df.	range of pf./df.	max. pro.	mean sup.	max. sup.	range of sup./pro.	
I.	3 ± 9°	3 ± 10°	17 ± 1°	20 ± 5°	/	8 ± 6°	13 ± 8°	9 ± 5°	
II.	1 ± 10°	5 ± 10°	20 ± 9°	20 ± 6°	/	9 ± 6°	14 ± 7°	9 ± 5°	
III.	3 ± 9°	5 ± 10°	21 ± 7°	24 ± 5°	/	8 ± 5°	14 ± 6°	10 ± 3°	
IV.	1 ± 9°	3 ± 10°	21 ± 7°	22 ± 6°	/	8 ± 5°	14 ± 6°	10 ± 5°	
V.	13 ± 9°	0 ± 9°	22 ± 7°	35 ± 5°	/	9 ± 6°	15 ± 7°	11 ± 4°	
Left ankle								range of sup./pro.	
Maneuver	max. pf.	mean pf.	max. df.	range of pf./df.	max. pro.	mean sup.	max. sup.	range of sup./pro.	
I.	17 ± 10°	1 ± 8°	16 ± 12°	33 ± 11°	/	8 ± 6°	15 ± 6°	11 ± 4°	
II.	14 ± 11°	2 ± 11°	13 ± 12°	27 ± 13°	/	7 ± 7°	14 ± 7°	11 ± 5°	
III.	18 ± 10°	1 ± 7°	15 ± 11°	33 ± 10°	/	8 ± 6°	15 ± 6°	12 ± 6°	
IV.	16 ± 11°	(-)2 ± 10°	16 ± 10°	32 ± 9°	/	8 ± 7°	15 ± 7°	12 ± 6°	
V.	19 ± 10°	3 ± 8°	17 ± 10°	36 ± 10°	/	9 ± 6°	15 ± 7°	11 ± 4°	

dorsiflexion; mean supination/pronation, maximum supination, maximum pronation, range between maximum supination and pronation), while driving different maneuvers.

Table 1 ROM of the right and left ankle while driving typical maneuvers (I–V.).

The ANOVA showed a significant main effect for *side* for all parameters of plantarflexion/dorsiflexion with a significantly larger dorsiflexion of the right ankle and a significantly larger plantarflexion and range of plantarflexion/dorsiflexion of the left ankle (mean: $F(1, 1284.97) = 14.47$, $p = 0.00$, maximum dorsiflexion: $F(1, 1662.87) = 17.86$, maximum plantarflexion: $F(1, 12258.58) = 125.931$, $p = 0.00$ and range: $F(1, 4891.63) = 68.64$, $p = 0.00$) but only for range of supination/pronation ($F(1, 184.40) = 7.84$, $p = 0.01$).

Furthermore, a significant main effect for *maneuver* for maximum plantarflexion ($F(4, 703.42) = 7.23$, $p = 0.00$) could be found. Post hoc tests revealed a significantly higher maximum plantarflexion while driving maneuver V (acceleration & emergency brake) compared to all other maneuvers I–IV ($p = 0.01$). Another significant main effect could be found for *maneuver* for range of plantarflexion/dorsiflexion ($F(4, 1205.54) = 16.91$, $p = 0.00$) with a significant interaction for *maneuver* × *side* ($F(4, 283.60) = 3.98$, $p = 0.00$). Post hoc tests revealed a significant larger range of plantarflexion/dorsiflexion only for the right ankle while driving maneuver V compared to maneuvers I–IV ($p = 0.01$) and a significant smaller range of plantarflexion/dorsiflexion for the left ankle while driving maneuver II compared to V ($p = 0.00$).

3.2. Sequence of motion

Fig. 3 illustrates stereotypical movement sequences of the continuously measured ankle ROM (50/s) for each driving maneuver.

Fig. 3 Example of the movement sequence and ROM of the right and left ankle while driving maneuvers: (I) Vehicle acceleration and gear change, (II) Sudden evasion, (III) Routine turning, (IV) Rapid turning, (V) Vehicle acceleration followed by emergency braking. Y-axis describes the ROM (positive degrees are dorsiflexion and supination, negative degrees are plantarflexion and pronation); x-axis describes the timeline (50/s).

3.3. Range & sequence of motion

In summary, this study suggests that both ankles are used in a limited ROM while driving (right ankle: $13 \pm 9/22 \pm 7$ degrees flexion/extension, $15 \pm 7/-$ degrees supination/pronation; left ankle: $19 \pm 10/17 \pm 10$ degrees flexion/extension, $15 \pm 7/-$ degrees supination/pronation).

When comparing the right and left sides, the right ankle has a significantly higher mean and maximum dorsiflexion, whereas the left ankle has a significantly higher mean and maximum plantarflexion as well as range of plantarflexion/dorsiflexion ($p = 0.00$, **Table 1**).

Operating a motor vehicle is characterized by a finite number of driving and non-driving-related-activities [15]. In this study, only driving-related-activities were investigated. The right leg is primarily involved in depressing the gas pedal and then is tasked with rapidly switching between the gas and brake pedals. The right leg must also remain in a prepared-standby position between these tasks and is then needed for vigorous emergency braking. These activities force the right ankle to work most of the time in a slightly dorsiflexed posture while carefully depressing the gas or brake pedals (**Fig. 3**, mean dorsiflexion in maneuvers I., III., IV.). It then extends more when switching between the gas and the brake pedals and then again while it is waiting for the left leg to depress and release the clutch (**Fig. 3**, dorsiflexion peaks in maneuvers I–III. and V.). In only exceptional situations is it placed in a highly plantarflexed position (hitting the brake or gas pedal vigorously, **Fig. 3**, plantarflexion peaks in maneuvers II. and V.).

When comparing the right and left ankles, the right is used in a significantly higher mean and maximum dorsiflexion vs. the left and has a significantly higher mean and maximum plantarflexion as well as range of plantarflexion/dorsiflexion.

Our results further suggest that supination and pronation are of a rather minor importance when compared to plantarflexion and dorsiflexion. In line with that, no prolonged braking reaction time could be found when the right ankle was immobilized with a brace that limited supination/pronation but allowed with free plantarflexion/dorsiflexion. Braking reaction time is longer when plantarflexion and dorsiflexion is limited with a boot-type ankle brace [12].

3.4. Conclusion

The present study has characterized the ankle range of motion that is commonly required to drive a car. Our measurements suggest that the right ankle is primarily slightly dorsiflexed so as to position it for depressing the gas or brake pedals and then highly dorsiflexed when switching between the two. The right ankle plantarflexes a substantial amount only when the vehicle is being forcefully braked or rapidly accelerated. The left ankle operates through a larger range of motion when compared to the right and is either in a highly plantarflexed position when depressing the clutch or highly dorsiflexed when waiting to do so. During vehicle idling, the left ankle rests in a slightly

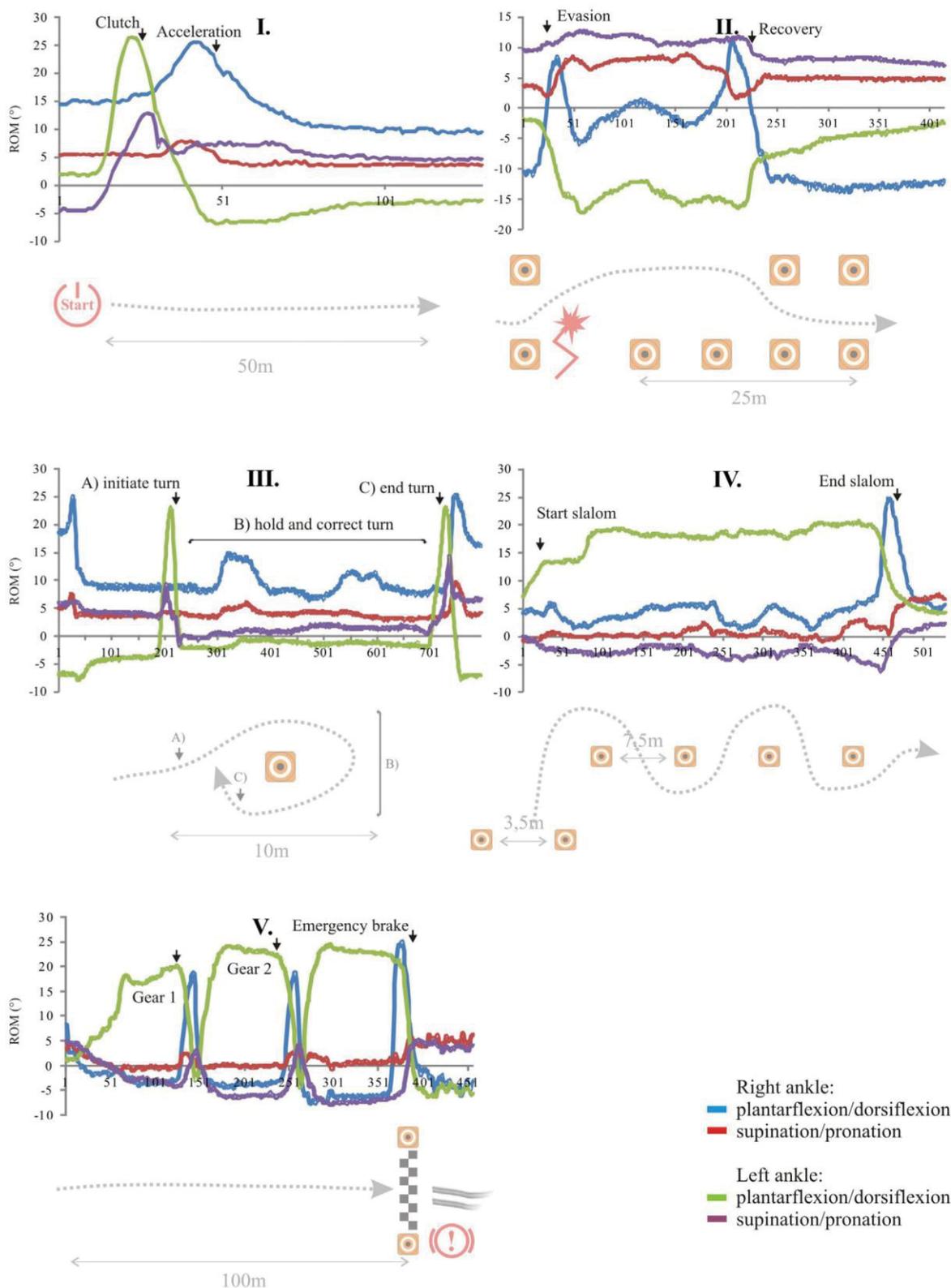


Fig. 3. Example of the movement sequence and ROM of the right and left ankle while driving maneuvers: (I) Vehicle acceleration and gear change, (II) Sudden evasion, (III) Routine turning, (IV) Rapid turning, (V) Vehicle acceleration followed by emergency braking. Y-axis describes the ROM (positive degrees are dorsiflexion and supination, negative degrees are plantarflexion and pronation); x-axis describes the timeline (50/s).

plantarflexed posture. Our results suggest that movement restrictions in dorsiflexion and plantarflexion may possibly affect the driving capability sooner than a loss of supination or pronation. Furthermore, movement restriction in dorsiflexion

on the right may affect the foot transfer time and, therefore, may negatively affect driving capability. Future studies may shed light on the relationship between ankle, knee and hip while driving a car in these important maneuvers.

4. Discussion

Only young and healthy subjects participated in this study to ensure that the range of motion of the ankle was measured under normal conditions without any compensation mechanisms or strategies. Driving is a complex psychomotor process, which can be quantified through different parameters such as braking force, braking reaction time and especially the foot transfer time [16–19]. Hofmann et al. showed, that ankle braces can result in a significant increase of foot transfer time and braking reaction time which can lead to an increased stopping distance of more than one meter when driving 100 km/h [20].

Our data revealed no significant difference of maximum and mean dorsiflexion between maneuvers. Analyzing the sequence of motion (Fig. 3) suggests that dorsiflexion of the right ankle seems to be crucial when gently accelerating, maintaining a prepared-standby modus and while switching between gas and brake pedal. Therefore, restricted dorsiflexion may be a decisive parameter that influences foot transfer time.

In contrast, a significantly higher maximum plantarflexion and range of plantarflexion/dorsiflexion could be found for the acceleration & emergency brake maneuvers V when compared to all other driving activities. Only when accelerating quickly or when hitting the brake pedal vigorously for emergency braking is the right ankle highly plantarflexed to generate appropriate strength (Fig. 3, maneuver V.). Therefore, restricted plantarflexion may also be a decisive parameter that influences the ability to impart substantial braking force. Further studies are needed to definitively make that assertion.

A limitation of our study is that only left sided cars with manual transmission were used. Whether the transmission is manual or automatic should not have a substantial influence on the ROM of the right ankle, which is used for acceleration, maintaining speed and applying the brakes. These maneuvers would be the same in cars with a manual or automatic transmission. ROM of the left ankle would likely be smaller in the setting of an automatic transmission, because subjects may choose to position their left leg in a more comfortable position as they do not have to depress the clutch while changing a gear. In 2018, approximately 80% of cars sold in Europe were built with a manual transmissions, which compares to only 3% of cars sold in U.S. [21,22]. However, since driving a car with manual transmission seems to be more complex than driving a car with an automatic transmission, we decided to investigate this group. A patient that is able to drive a car with manual transmission should be able to drive a car with automatic transmission safely. For the right ankle, transmission type should not have a significant influence on the ROM, because driving related activities should be the same. For the left ankle, ROM should at least be smaller in the setting of an automatic transmission, because there would be no need of depressing a clutch while changing a gear or while braking.

This study does not provide insight into combined motion sequences of the lower extremity (ankle, knee and hip) nor compensation mechanisms of the adjacent joints, which can be expected, when ankle motion is restricted [23,24]. In further studies the influence of simulated ROM restrictions of the ankle, knee or hip and the identification of ROM compensation of the adjacent joints can be measured. Furthermore, it may be of value to evaluate muscle activity and strength with electromyography while driving different maneuvers, particularly as they relate to the creation of braking force. Greater knowledge of strength limitation, dexterity and ROM of each joint as well as compensation strategies may lead to evidence based recommendations when evaluating driving capability. In contrast to motion analysis systems with cameras [25], our electrogoniometers can easily re-check ROM and may be a tool for determining ability to

drive after injury. Further studies are needed to determine reliable and in daily clinical practice re-checkable limits of strength, dexterity and ROM of each joint to give physicians evidence based recommendations when answering the question: “Doctor, when can I drive?”.

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing interests.

Human and animal rights

There is a positive vote from the ethics committee of the Medical Faculty.

Informed consent

Prior to subject's participation, written informed consent was obtained.

Funding

The study was partially financed by Deutsche Arthrose-Hilfe e.V.

References

- [1] Aigner R, Lechler P, Boese CK, Ruchholtz S, Frink M. Operative treatment of geriatric ankle fractures with conventional or locking plates. A retrospective case-control study. *Foot Ankle Surg* 2019;25(6):766–70, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fas.2018.10.002>.
- [2] Doherty C, Delahunt E, Caulfield B, Hertel J, Ryan J, Bleakley C. The incidence and prevalence of ankle sprain injury: a systematic review and meta-analysis of prospective epidemiological studies. *Sports Med* 2014;44(1):123–40, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s40279-013-0102-5>.
- [3] Latz D, Schiffner E, Schnependahl J, Thalmann BH, Jungbluth P, Grassmann J, et al. Evaluation of driving fitness in patients with musculoskeletal disorders: a systematic review. *Unfallchirurg* 2019;122(9):697–705, doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00113-018-0571-y>.
- [4] Cooper JM. Clinical decision making: doctor, when can I drive? *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2007;36:78–80.
- [5] Briggs am, Cross MJ, Hoy DG, Sánchez-Riera L, Blyth FM, Woolf AD, et al. Musculoskeletal health conditions represent a global threat to healthy aging: a report for the 2015 World Health Organization World Report on ageing and health. *Gerontologist* 2016;56:S243–55, doi: <http://dx.doi.org/10.1093/geront/gnw002>.
- [6] Milte R, Crotty M. Musculoskeletal health, frailty and functional decline. *Best Pract Res Clin Rheumatol* 2014;28:395–410.
- [7] Ball K, Owsley C, Stalvey B, Roenker DL, Sloane ME, Graves M. Driving avoidance and functional impairment in older drivers. *Accid Anal Prev* 1998;30:313–22.
- [8] Wang C, Kosinski C, Schwartzberg J, Shanklin A. Physician's guide to assessing and counseling older drivers. 2003.
- [9] Latz D, Pfau S, Koukos C, Jungbluth P, Jansing G, Schiffner E, et al. Doctor, when can I drive. *Obere Extremität* 2017;1–8.
- [10] Latz D, Schiffner E, Schnependahl J, Klein K, Oezel L, Seiler LF, et al. Doctor, when can I drive? – Range of motion of the knee while driving a car. *Knee* 2019;26(1):33–9, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.knee.2018.11.005>.
- [11] Latz D, Schiffner E, Schnependahl J, Hilsmann F, Seiler LF, Jungbluth P, et al. Doctor, when can I drive?—The range of elbow motion while driving a car. *J Shoulder Elbow Surg* 2019;28(6):1139–45, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jse.2018.11.053>.
- [12] Dammerer D, Waidmann C, Haid C, Thaler M, Krismer M, Liebensteiner MC. The effect of ankle brace type on braking response time – A randomised study. *Injury* 2015;46:2278–82, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.injury.2015.07.038>.
- [13] Jeng CL, Lin JS, Amoyal K, Campbell J, Myerson MS. Driving brake reaction time following right ankle arthrodesis. *Foot Ankle Int* 2011;32:896–9, doi: <http://dx.doi.org/10.3113/FAL.2011.0896>.
- [14] Allgemeiner deutscher automobil-club e.V. RV. Fahrzeuginsassen richtig sichern. 2015.
- [15] Häußlschmid R, Pfleging B, Butz A. The influence of non-driving-related activities on the driver's resources and performance. *Automotive user interfaces*. Springer; 2017. p. 215–47.
- [16] Morrison RW, Swope JG, Halcomb CG. Movement time and brake pedal placement. *Hum Factors* 1986;28:241–6, doi: <http://dx.doi.org/10.1177/001872088602800211>.

- [17] Hofmann UK, Thumm S, Jordan M, Walter C, Rondak I-C, Ipach I. The effects of hip and spine orthoses on braking parameters: a simulated study with healthy subjects. *PM&R* 2016;8:35–44, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.pmrj.2015.06.002>.
- [18] Hoffmann ER. Accelerator-to-brake movement times. *Ergonomics* 1991;34:277–87, doi:<http://dx.doi.org/10.1080/00140139108967313>.
- [19] Waton A, Kakwani R, Cooke NJ, Litchfield D, Kok D, Middleton H, et al. Immobilisation of the knee and ankle and its impact on drivers' braking times: a driving simulator study. *J Bone Jt Surg Br Vol* 2011;93:928–31, doi:<http://dx.doi.org/10.1302/0301-620X.93B7.25859>.
- [20] Hofmann UK, Thumm S, Jordan M, Mittag F, Rondak I-C, Ipach I. How do ankle braces affect braking performance? An experimental driving simulation study with healthy volunteers. *J Rehabil Med* 2015;47:963–9.
- [21] GmbH DAT. DAT report. 2017.
- [22] Fleming C. The disappearing stick shift: less than 3% of cars sold in the U.S. have manual transmissions. *Im Internet*: <https://www.latimes.com/business/autos/la-autoshw-la-fi-hy-disappearing-stick-shift-20161115-story.html>.
- [23] Wu W-L, Su F-C, Cheng Y-M, Huang P-J, Chou Y-L, Chou C-K. Gait analysis after ankle arthrodesis. *Gait Posture* 2000;11:54–61, doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0966-6362\(99\)00049-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0966-6362(99)00049-1).
- [24] Kerkhoff YRA, van Boxtel W, Louwerens JWK, Keijsers NLW. Asymmetries in gait and balance control after ankle arthrodesis. *J Foot Ankle Surg* 2018;57:899–903, doi:<http://dx.doi.org/10.1053/j.jfas.2018.03.022>.
- [25] Rawal A, Chehata A, Horberry T, Shumack M, Chen C, Bonato L. Defining the upper extremity range of motion for safe automobile driving. *Clin Biomech* 2018;54:78–85, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2018.03.009>.

Lebenslauf

Dr. med. David Latz

Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie

Adresse: Schillerstraße 49, 40237 Düsseldorf

Tel.: 0172/7869749

E-Mail: David.Latz@gmx.de

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 18. Februar 1987

Geburtsort: Merzenich

Staatsangehörigkeit: deutsch

Konfession: evangelisch

Familienstand: verheiratet

Klinischer Werdegang

23.01.2020	Facharzt für Orthopädie und Unfallchirurgie
02.2016 bis 23.01.2020	Assistenzarzt in Weiterbildung an der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie im Universitätsklinikum Düsseldorf, Chefarzt Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf
12.2013 bis 01.2016	Assistenzarzt in Weiterbildung für die Basisweiterbildung Chirurgie an der Klinik für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie im Sana Krankenhaus Benrath, Chefarzt Dr. med. Alexander Olk

Promotion

07.2010 bis 11.2014 Institut für Klinische Neurowissenschaften und Medizinische Psychologie der Heinrich Heine Universität Düsseldorf. Titel der Dissertation: Modulation motorkortikaler Oszillationen bei motorischem Lernen; hierzu Freisemester WS 2010/2011. Gesamtprädikat: - magna cum laude –

Praktisches Jahr

10.2012 bis 01.2013 Drittes Tertial des Praktischen Jahres, Innere Medizin
Universitätsklinikum Düsseldorf, Kardiologie und
Gastroenterologie

06.2012 bis 09.2012 Zweites Tertial des Praktischen Jahres, Abteilung Chirurgie
Spital STS AG Saanen Lehrkrankenhaus der Universität
Bern, Schweiz

02.2012 bis 06.2012 Erstes Tertial des Praktischen Jahres, Hals-Nasen-Ohren
Klinik Universitätsklinikum Düsseldorf

Hochschulstudium

08.2013 Approbation als Arzt

10.2006 - 06.2013 Studium der Humanmedizin an der
Heinrich Heine Universität Düsseldorf
Gesamtnote: - Gut (1,66) -

06.2013 Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

03.2009 Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung

Schulbildung

1997 bis 2006 Stiftisches Gymnasium Düren
Allgemeine Hochschulreife

Weitere Qualifikationen und Fortbildungen

04.2019 Plenardidaktik, Arbeitsgruppe Medizindidaktik, PD Dr. med.
Matthias Hofer, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

04.2019 Professionelle Mitarbeiterauswahl und
Mitarbeitereinarbeitung, Junior Scientist and International
Researcher Center, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

03.2019 Führungskompetenzen für promovierte
Wissenschaftler/innen, Junior Scientist and International
Researcher Center, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

02.2019 Zur Sache und auf den Punkt kommen – Grundlagen der
Moderation, Junior Scientist and International Researcher
Center, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

11.2018 Gute Wissenschaftliche Praxis, Junior Scientist and
International Researcher Center, Heinrich-Heine-Universität
Düsseldorf.

11.2018 AO Trauma Kurs II, Düsseldorf.

02.2017 Wiener Handkurs, Basiskurs.

12.2015 31. Nürnberger Arthroskopiekurs und Gelenksymposium:
AGA Basiskurse: Knie, Schulter, Hüfte. Aufbaukurse: Knie,
Schulter.

01.2015	Weiterbildung Sonographie der Bewegungsorgane Grund- und Aufbaukurs nach DEGUM-Richtlinien. Zusatzbezeichnung steht aus.
09.2014	Zusatz-Weiterbildung Manuelle Medizin / Chirotherapie (320/320 Stunden + Prüfung absolviert). Zusatzbezeichnung steht aus.
08.2014	Beginn mit der Zusatz-Weiterbildung Akupunktur (aktuell 192/200 Stunden absolviert).
03.2014	AO Trauma Kurs I, Düsseldorf.