

Aus dem
CharitéCentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie
Centrum für Muskuloskeletale Chirurgie (CMSC)

Univ.-Prof. Dr. med. Carsten Perka
Ärztlicher Direktor

Univ.-Prof. Dr. med. Ulrich Stöckle
Geschäftsführender Direktor

Habilitationsschrift

Auswirkungen von Knie-Totalendoprothesen auf das Sprunggelenk

zur Erlangung der Lehrbefähigung
für das Fach Orthopädie und Unfallchirurgie

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinischen Fakultät
Charité–Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. Frank Graef

Eingereicht: September 2023

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Spranger

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	3
1 Einleitung	4
1.1 Spezialisierung in der Chirurgie	4
1.2 Die kinematische Kette: Wechselwirkung angrenzender Gelenke . . .	8
1.3 Fragestellungen	14
2 Ergebnisse	16
2.1 Das Auftreten von Sprunggelenkbeschwerden nach Kniegelenkersatz bei Varusgonarthrosen	16
2.2 Sprunggelenkbeschwerden nach Knie-Totalendoprothese bei Valgusgonarthrosen	26
2.3 Frontale Achsfehlstellungen am arthrotischen Kniegelenk verursachen keine ligamentären Instabilitäten am Sprunggelenk	36
2.4 Der Rückfuß kann frontale Kniedeformitäten nicht suffizient kompensieren	48
2.5 Risikofaktoren für die Entwicklung von Sprunggelenkbeschwerden nach Kniegelenk-Endoprothese	59
3 Diskussion	72
4 Zusammenfassung und Ausblick	81
5 Literatur	85
Danksagung	91
Erklärung	92

Abkürzungsverzeichnis

ADL Activities of Daily Living

ADTA Anterior Distal Tibia Angle

aHKA arithmetic Hip Knee Angle

FFI Foot Function Index

HAVA Hindfoot Alignment View Angle

ICD International Classification of Diseases

mLDFA mechanical Lateral Distal Femur Angle

LDTA Lateral Distal Tibia Angle

LWS Lendenwirbelsäule

MPTA Medial Proximal Tibia Angle

mTFA mechanical Tibio-Femoral Angle

OR Odd's Ratio

OSG Oberes Sprunggelenk

PPV Pes planovalgus

PROM Patient Related Outcome Measure

ROM Range of Motion

SF-36 Short-Form 36

TEP Total-Endoprothese

TT Talar Tilt

USG Unteres Sprunggelenk

1 Einleitung

1.1 Spezialisierung in der Chirurgie

Der Geschichte der Chirurgie ist geprägt von einer Entwicklung der Spezialisierung und im späteren Verlauf von einer Subspezialisierung. Im Mittelalter wurden chirurgische Tätigkeiten von Chirurgie-Lehrlingen, wie zum Beispiel Barbieren oder Militärärzten, durchgeführt. Diese wurden zunächst durch die beruflichen Zünfte ausgebildet. Ab dem 16. Jahrhundert folgte eine erste staatliche Reglementierung der Ausbildung dieser Chirurgen durch Einrichtung von Chirurgeschulen und die Überwachung der Ausbildung durch staatlich angestellte Ärzte. Mitte des 19. Jahrhunderts folgte die Schließung dieser Chirurgeschulen, womit der Stand des Barbierchirurgen abgeschafft wurde. Der Übergang vom „Barbierchirurgen zum akademisch ausgebildeten Arzt“ wurde wesentlich durch die Einrichtung von chirurgischen Lehrstühlen an den Universitäten vorangetrieben. In Berlin, beispielsweise, lag das Gründungsjahr für den Lehrstuhl des Fachs Chirurgie im Jahr 1810. Die weitere Spezialisierung zeigte sich im Verlauf durch die Einrichtung eines eigenständigen Lehrstuhls für Geburtshilfe 1816, sowie eines für Augenheilkunde 1828 [1].

Die Entwicklung eines eigenen Fachgebiets der orthopädischen Chirurgie sieht Dieter Wessinghage bereits in der Gründung der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie. So sprach Bernhard von Langenbeck, der Erste Vorsitzende dieser neugegründeten Gesellschaft, auf dem Eröffnungskongress am 10. April 1872 in Berlin davon, dass sein Freund Albrecht von Graefe, Ordinarius für Augenheilkunde, auf dem Höhepunkt seiner Tätigkeit, „das Gebiet seiner Wissenschaft nicht mehr ganz zu beherrschen vermöge“. „Man werde erdrückt durch die Masse des schnell wachsenden Materials“. Und weiter: „Ich glaube, meine Herren, dass wir diese Klage noch mit größerem Recht uns aneignen dürfen, und dass nur wenige von uns sich rühmen können, dass sie das ganze Gebiet der Chirurgie übersehen und beherrschen“. Die hohe Zunahme wissenschaftlicher Arbeiten und Vorträge auf chirurgischen Kongressen, vor allem im Bereich der Körperhöhlenchirurgie, führte rasch zu einer Unterrepräsentation chirurgischer Nebenfächer. Hieraus entstand der Wunsch nach einer eigenständigen Fachgesellschaft. Im April 1902 begründete der erste Kongress der Deutschen Gesellschaft für orthopädische Chirurgie die Gründung dieser – und somit der deutschen Orthopädie [2].

Mit dieser historischen Abgrenzung der Orthopädie von der Allgemeinchirurgie und anderen chirurgischen Fächern war die Spezialisierung jedoch noch nicht

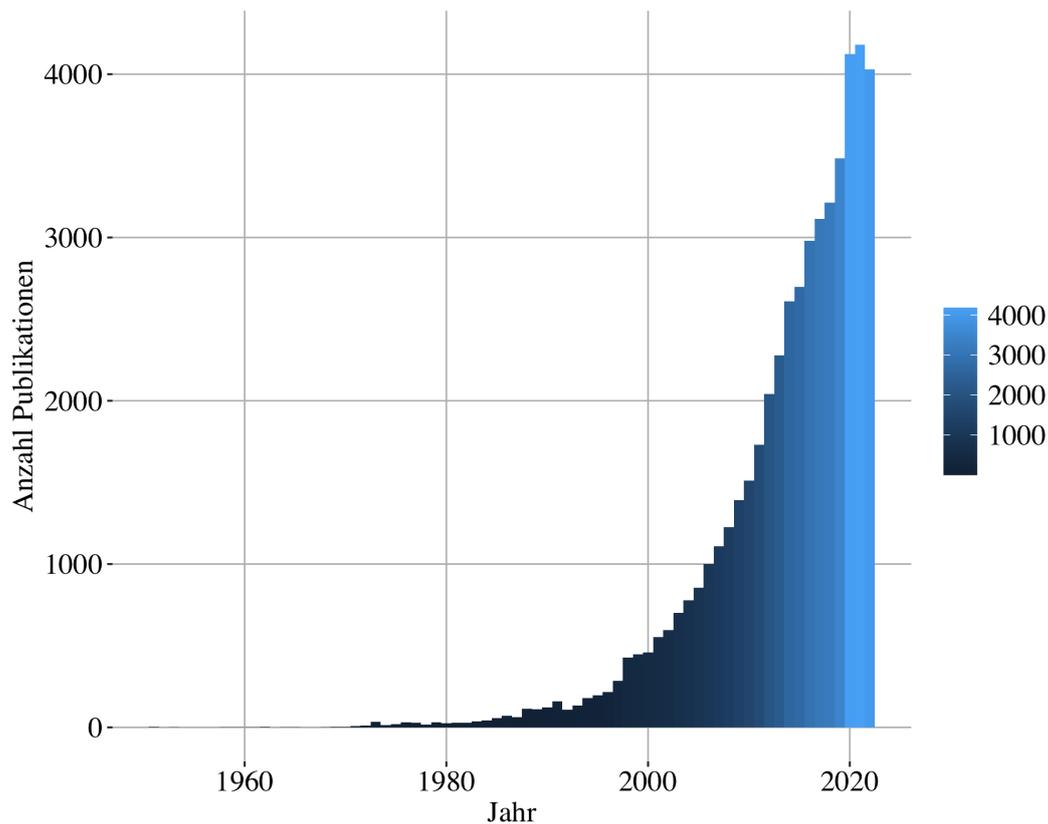


Abbildung 1: Verteilung der Anzahl an Publikationen von 1951 bis 2020 für den Suchbegriff „Total Knee Arthroplasty“ auf PubMed.gov

abgeschlossen. Eine Suchanfrage auf *PubMed.gov* mit dem Stichwort „Total Knee Arthroplasty“ zeigt beispielhaft, wie exponentiell das Wissen in nur einem Teilbereich der Orthopädie in den letzten Jahren gewachsen ist (Abbildung 1). Ruft man sich nun die oben genannte Aussage von Bernhard von Langenbeck auf dem Eröffnungskongress der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie in Erinnerung, so wird klar, warum Spezialisierungen notwendig sind. Ohne diese könnte es kaum gelingen, den Überblick über das Wissen in einem Teilbereich zu behalten.

Die *American Academy of Orthopaedic Surgeons* führt seit 1985 alle zwei Jahre Befragungen ihrer Mitglieder durch, um demographische Daten sowie Informationen hinsichtlich der praktizierenden Tätigkeit zu sammeln und auszuwerten. Die aktuell öffentlich verfügbaren Daten sind aus 2018. Hier zeigt sich, dass es allein in den Jahren 2008 bis 2018 zu einer Zunahme um 26 % spezialisierter Orthopäden gekommen war. Interessant hierbei ist, dass der Anteil an Spezialisten bei den unter 40-Jährigen über 70 % betrug. Bei den Orthopäden im Altersbereich 50-59 lag der Anteil bei knapp unter 60 % und bei den 60-69-Jährigen fanden sich noch

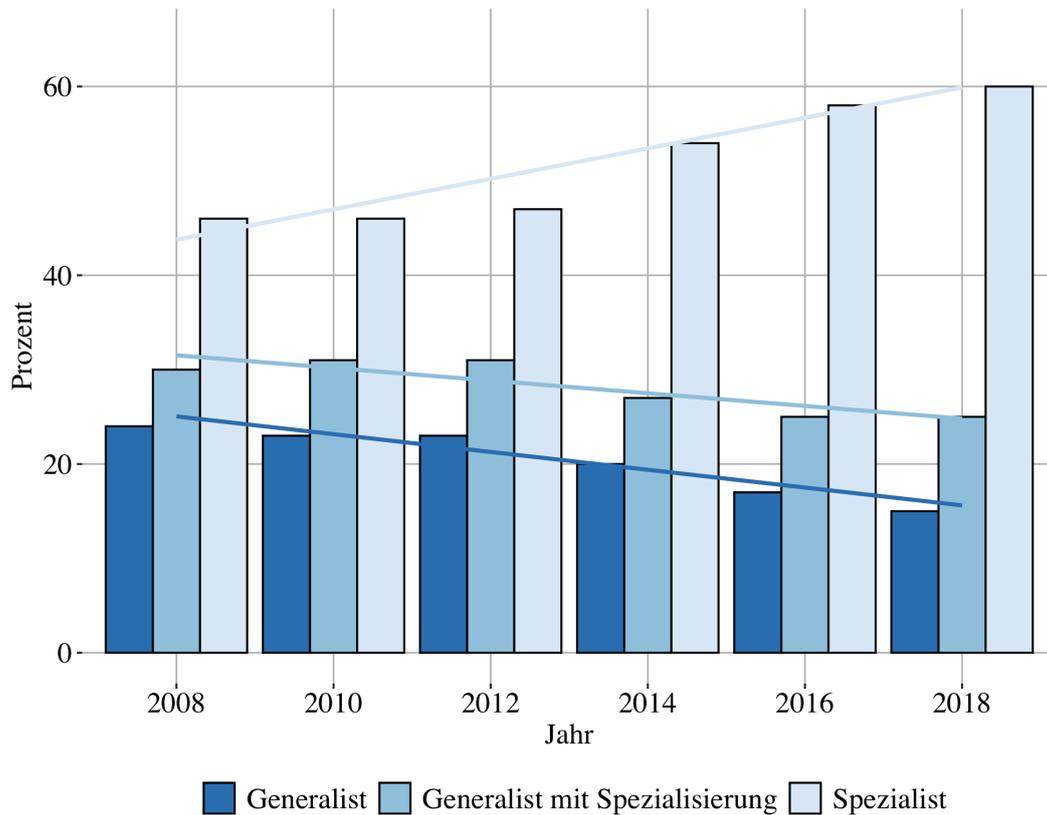


Abbildung 2: Prozentuale Verteilung von Orthopäden der „American Academy of Orthopaedic Surgeons“, welche als Generalisten, Generalisten mit Spezialisierung und als Spezialisten praktizieren [3].

circa 45 % spezialisierte Orthopäden (Abbildung 2) [3].

Neben dem exponentiellen Wissenszuwachs spielen weitere Gründe für die Spezialisierung eine Rolle. Zum einen ist die Erwartungshaltung von Patienten gegenüber dem therapeutischen Outcome gestiegen [4]. Dies könnte zum Beispiel Folge der schnellen Entwicklung neuer Therapien und moderner Medizintechnik sein sowie deren medialer Präsenz. Zudem konnte gezeigt werden, dass durch einen hohen Spezialisierungsgrad von Operateuren, die Kosten sowie Komplikationsraten von Knie-Totalendoprothesen (TEPs) gesenkt werden konnten [5,6]. Ein hoher Spezialisierungsgrad sei auch deshalb „politisch gewollt“, da die Gesellschaft nicht nur immer älter wird, sondern im hohen Alter auch weiterhin körperlich sehr aktiv ist [7]. Die Nachteile der zunehmenden Spezialisierung liegen jedoch ebenfalls auf der Hand: Spezialisten lassen sich häufig in Ballungszentren nieder, wodurch es in ländlichen Gebieten zu einer verringerten Dichte an Fachärzten kommt. Zudem werden Spezialisten die Welt eher durch ein „Prisma“ sehen: Schmerzen im Zei-

gefingert werden von einem Neurochirurgen eher einer Radikulopathie zugeordnet und von einem Handchirurgen dem Nervus medianus – „obwohl die Schmerzen vielleicht doch eine metabolische Ursache haben“ [7].

Es kann sicherlich nicht bestritten werden, dass durch eine Spezialisierung, zum Beispiel auf Knie-TEPs, die Effizienz gesteigert sowie die operative Technik perfektioniert werden kann. Es bleibt jedoch zu klären, ob dies auch zu einem verbesserten – subjektiven – Patienten-Outcome führt. Eine Studie aus 2021 analysierte Patienten-Bewertungen, welche auf dem Online-Portal *jameda.de* abgegeben wurden [8]. Auf dieser Website können Patienten ihre behandelnden Ärzte benoten von 1 = sehr gut bis 6 = ungenügend. Die Studie konnte zeigen, dass es in den Jahren 2010 bis 2019 zu keiner Verbesserung der Durchschnittsnote aller Bewertungen über alle Fachrichtungen gekommen war, 2018 war die durchschnittliche Benotung sogar schlechter als 2010. Dieses Ergebnis ist für den deutschsprachigen Bereich der Orthopädie wahrscheinlich nur begrenzt aussagekräftig, da die Bewertungen aller Fachrichtungen berücksichtigt wurden. Trotzdem findet die Subspezialisierung über alle Fachrichtungen hinweg statt – und korreliert scheinbar nicht mit der subjektiven Patientenzufriedenheit.

Eine weitere Studie aus 2022 analysierte das subjektive Patientenoutcome nach Wirbelsäulenoperationen anhand von Daten des schwedischen Wirbelsäulenregisters aus einem zehnjährigen Zeitraum (2007-2016) [9]. Hierbei wurden drei Krankheitsbilder anhand des validierten Short-Form 36 Fragebogens (SF-36) ausgewertet: Spinalkanalstenosen mit degenerativen Spondylolisthesen, Spinalkanalstenosen ohne degenerative Spondylolisthesen sowie Bandscheibenvorfälle. Die Daten zeigen dabei, wie sich bei allen drei Krankheitsbildern die Operationstechniken über den zehnjährigen Zeitraum entwickelt haben. Es konnte jedoch in keiner Kategorie des SF-36 eine signifikante Änderung des Outcomes über die Jahre festgestellt werden.

Auch eine longitudinale Analyse des Outcomes nach Knie-TEP wurde 2014 veröffentlicht [10]. Hier wurden Daten des *Mayo Clinic Total Joint Registry* aus dem 13-jährigen Zeitraum von 1993-2005 untersucht. Mittels multivariater logistischer Regression wurden wichtige Confounder wie Alter, Geschlecht, Body Mass Index, präoperative somatische und psychologische Komorbiditäten sowie präoperative Schmerzen und Limitationen hinsichtlich der Bewältigung von Alltagsaufgaben (*Activities of Daily Living* = ADL) berücksichtigt. Hierbei zeigte sich, dass das Outcome im Zeitraum 2002-2005 schlechter war als 1993-1995. Konkret stieg die

Chance (*Odd's Ratio* = OR), zwei Jahre nach Knie-TEP moderate bis schwere ADL-Limitationen zu haben, während des Studienzeitraums um 34 % (im Zeitraum 2002-2005 wiesen dies 4.7 % mehr Patienten auf als 1993-1995). Und die OR, unter moderaten bis schweren Schmerzen zwei Jahre nach Knie-TEP zu leiden, stieg um 79 % (im Zeitraum 2002-2005 gaben dies 3.6 % mehr Patienten an als 1993-1995).

Die Studie hat sicherlich ihre Schwächen: Unter anderem sind die Daten > 20 Jahre alt, es wurden keine sozioökonomischen Faktoren berücksichtigt und psychologische Vorerkrankungen (Depressionen und Angststörungen) wurden lediglich erfasst, wenn sie mittels des International Classification of Diseases-Systems klassifiziert waren. Es ist auch nicht anzunehmen, dass die Versorgungsqualität von Knie-TEPs in diesen Jahren schlechter geworden ist. Trotzdem zeigen die Daten, dass das Outcome nach einer Operation nicht zwangsweise mit dem technischen Fortschritt oder dem Grad der Spezialisierung korrelieren muss. Sondern – wie in der Studie angemerkt – die Prävalenz von Arthrosen generell zunimmt. Und damit die Anzahl an Patienten, die gleichzeitig Pathologien in angrenzenden Gelenken haben, was das Outcome nach Knie-TEP mit beeinflussen kann.

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Zusammenspiel von mehreren Gelenken und dessen wechselseitiger Einfluss aufeinander ist nicht nur wichtig, um postoperative Ergebnisse und die Patientenzufriedenheit – wie zum Beispiel nach Knie-TEP – zu optimieren. Sondern auch, um in Zeiten der zunehmenden Subspezialisierung den Blick für den ganzen Patienten nicht zu verlieren.

1.2 Die kinematische Kette: Wechselwirkung angrenzender Gelenke

Dass die Pathologie eines Gelenks über eine lange Strecke der Bewegungskette Auswirkungen auf ein entferntes Gelenk haben kann, zeigt das häufig genannte Beispiel von Rückenschmerzen bei Vorliegen eines „Plattfußes“. In der Theorie kommt es bei einem *Pes planovalgus* (PPV) durch die Pronation des Fußes und den valgischen Rückfuß zu einer Innenrotation der Tibia und des Femurs – und damit zu einer valgischen Kniegelenksstellung. Die hierdurch erhöhte Spannung der Hüftbeugemuskulatur induziert eine anteriore Beckenkipfung. Um weiterhin aufrecht stehen zu können, folgt eine kompensatorische Hyperlordose. Diese kompensatorische Hyperlordose kann zu lumbalen Beschwerden führen [11]. Wie hoch

die klinische Relevanz dieses anschaulichen Beispiels ist, wird weiterhin kontrovers diskutiert [12].

Interaktionen zwischen Beckenkipfung und funktioneller Wirbelsäulenatonomie – die spinopelvine Biomechanik – sind jedoch klinisch hochrelevant und Gegenstand aktueller wissenschaftlicher Arbeiten [13–15]. Bei einer gesunden Wirbelsäule – balanciert und flexibel – ist die Lendenwirbelsäule (LWS) im Stehen physiologisch eine Lordose. Je mehr das Becken nach vorne kippt (entsprechend des Beispiels am PPV-Patienten), desto geringer wird die azetabuläre Anteversion und desto stärker wird die Lordose in der LWS. Setzt sich der Patient nun hin, so kippt das Becken für die Sitzposition nach hinten und die LWS kompensiert diese Erhöhung der azetabulären Anteversion durch Kyphosierung. Weist ein Patient nun eine balancierte, jedoch fusionierte, LWS auf, so kann diese im Sitzen nicht mehr kyphosieren. Dementsprechend kann das Becken nicht so weit nach hinten kippen, es kommt zu keiner Erhöhung der azetabulären Anteversion. Bei Patienten mit fusionierter LWS und Hüft-TEP kann dies zu einem vorderen Impingement und letztlich Luxation der Prothese führen. Deshalb wird empfohlen, bei fusionierter und balancierter LWS die Hüftpfanne beim Gelenkersatz mit einer erhöhten Anteversion zu implantieren [16].

Ein weiteres Beispiel, das verdeutlicht, wie wichtig es ist, Gelenkinteraktionen zu berücksichtigen, ist das der Radiuskopfprothese. Eine falsch gewählte Prothesenlänge kann nicht nur zu Problemen im Humeroradialgelenk führen, sondern auch zu einem Malalignment im distalen Radioulnargelenk – und damit die Pro- und Supination einschränken [17]. Selbst in der Vorfußchirurgie kann die Korrektur eines Gelenkes Auswirkungen auf ein benachbartes haben. Wird bei Korrektur einer Hallux-valgus-Deformität, zum Beispiel am ersten Tarsometatarsal- oder Metatarsophalangealgelenk, der erste Strahl durch die Osteotomie zu stark verkürzt, so wird der zweite Strahl relativ zu lang und es kann sich eine Metatarsalgie ausbilden [18].

Die koronaren Verhältnisse der mechanischen Achse der unteren Extremität lassen sich mit einigen wenigen Winkeln beschreiben, welche auf konventionellen Röntgenbildern der gesamten unteren Extremität im Stehen ausgemessen werden können (Abbildung 3). Der mechanische tibiofemorale Winkel (*mechanical Tibio-Femoral Angle* = mTFA) beschreibt die mechanische Ganzbeinachse. Der Winkel

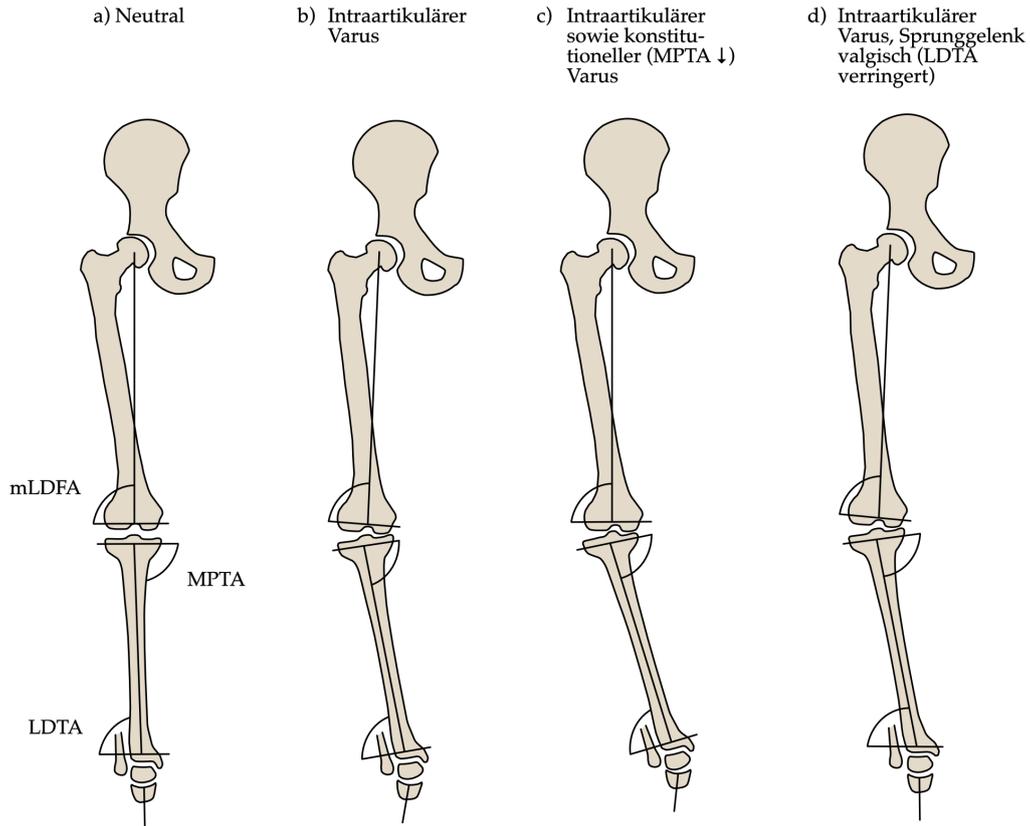


Abbildung 3: Darstellung der Achsenverhältnisse an der unteren Extremität.
 mL DFA = mechanischer lateraler Femurwinkel, MPTA = mediale proximaler Tibiawinkel, LD TA = lateraler distaler Tibiawinkel.

wird aus der mechanischen Achse des Femurs (einer Geraden, welche das Zentrum von Hüft- und Kniegelenk schneidet) sowie der mechanischen Achse der Tibia gebildet und beträgt bei einer neutralen geraden Beinachse $mTFA = 0^\circ \pm 2,9^\circ$ [19]. Der mechanische laterale Femurwinkel (*mechanical Lateral Distal Femur Angle* = mL DFA) wird aus der mechanischen Femurachse sowie einer Tangente gebildet, welcher den Femurkondylen anliegt und beträgt physiologisch $mL DFA = 87,5^\circ \pm 2,5^\circ$. Der mediale proximale Tibiawinkel (*Medial Proximal Tibia Angle* = MPTA) wird aus der mechanischen Achse der Tibia und einer Tangente der tibialen Gelenkfläche am Kniegelenk gebildet (Normwert: $MPTA = 87,5^\circ \pm 2^\circ$.) Der laterale distale Tibiawinkel (*Lateral Distal Tibia Angle* = LD TA) ist zwischen mechanischer Tibiaachse und einer Tangente der subchondralen Gelenkfläche des Tibiaplafonds (Normwert: $LD TA = 89^\circ \pm 3^\circ$) [20].

Die Kenntnis dieser Messparameter ist wichtig, um Pathologien am Kniegelenk beschreiben zu können und Indikationen für Operationen, wie für eine Knie-TEP,

stellen zu können. An Gelenken lassen sich zwei Arten von Deformitäten unterscheiden: Intraartikuläre und extraartikuläre (konstitutionelle oder posttraumatische) Fehlstellungen. Kommt es bei einem Patienten mit konstitutionell neutraler Beinachse (MPTA und mL DFA normwertig) zu einer intraartikulären Pathologie, zum Beispiel einem Morbus Ahlbäck oder einem traumatischen medialen Knorpelschaden, so kann das mediale Gelenkkompartiment im Verlauf zunehmend dekomensieren und es stellt sich – trotz konstitutionell neutraler Achse – eine Varusgonarthrose ein (Abbildung 3b). Wird nun die Indikation zur Knie-TEP gestellt, so muss geplant werden, wie die Beinachse rekonstruiert werden soll. Beim klassischen mechanischen Alignment werden die Sägeschnitte orthogonal zur mechanischen tibialen und femoralen Achse gesetzt, sodass der mTFA postoperativ 0° ($\pm 3^\circ$) beträgt [21]. In Untersuchungen an gesunden Probanden ohne Kniegelenkspathologien hat sich jedoch gezeigt, dass eine konstitutionell neutrale Beinachse nur bei 40,9% der Studienpopulation vorlag [19]. Es stellt sich deshalb die Frage, wie vorzugehen ist, wenn nicht nur eine intraartikuläre Fehlstellung, sondern die Kombination mit einer konstitutionellen Varus- oder Valgusfehlstellung vorliegt. Ein Beispiel hierfür könnte ein Patient mit intraartikulärer Varusgonarthrose sein, dessen physiologische konstitutionelle Beinachse jedoch aufgrund eines verringerten MPTA ebenfalls varisch ist (Abbildung 3c).

Wird eine Knie-TEP mit mechanischem Alignment implantiert, so werden die Sägeschnitt weiterhin orthogonal zur mechanischen Achse erfolgen – unabhängig von der konstitutionellen Anatomie. Das kann jedoch dazu führen, dass nach Implantation der Prothese die medialen und lateralen kollateralen Bänder nicht mehr balanciert sind. Deshalb müssen nach Prothesen-Implantation mit mechanischem Alignment häufig mediale oder laterale Bänder „released“ werden. Die medio-laterale Weichteilspannung operativ zu balancieren, kann sich als schwierig gestalten. Und so werden unbalancierte Knie-TEPs mit mechanischem Alignment häufig mit einem erhöhtem Abrieb, einer verringerten Range of Motion (ROM) oder einer pathologischen Knie-Kinematik in Verbindung gebracht [22].

In den letzten Jahren hat sich deshalb das Konzept des kinematischen Alignments etabliert. Hier werden die Sägeschnitte so gewählt, dass die präarthrotische konstitutionelle Anatomie wiederhergestellt wird [23]. In dem Beispiel aus Abbildung 3c würde der Patient postoperativ also ebenfalls eine varische Beinachse haben, da dies seine physiologische Konstitution ist. Um die konstitutionelle Achse

eines Patienten bestimmen zu können, wurde zum Beispiel der arithmetische *Hip-Knee-Angle* (aHKA) definiert [24], da der mTFA die Fehlstellung der Beinachse immer als Kombination aus intra- und extraartikulärer Fehlstellung darstellt. Hier wird vom MPTA der mL DFA subtrahiert ($\text{aHKA} = \text{MPTA} - \text{mL DFA}$); positive Werte = Varus, negative Werte = Valgus. Durch den aHKA kann die konstitutionelle Beinachse unabhängig von medialen oder lateralen Gelenkspaltverschmälerungen identifiziert werden. Aufgrund der heterogenen Operationstechniken des kinematischen Alignments ist bisher jedoch noch nicht klar, welche Limitationen diese Technik hinsichtlich der Indikationsstellung und der residuellen Fehlstellung hat. Es bleibt zu klären, bis zu welchem Grad einer extraartikulären Fehlstellung die Methode sicher ist. Außerdem ist zu diskutieren, welche Patienten sich hierfür eignen und welcher Grad an postoperativer residueller Fehlstellung sicher für die Standzeit der Prothese ist [25, 26].

Die klinische Erfahrung zeigt, dass Patienten nach Knie-TEP über Sprunggelenkbeschwerden klagen können [27]. Deshalb ist es bereits bei der Planung der Operation wichtig zu wissen, welche Auswirkungen die verschiedenen Alignment-Strategien auf das Sprunggelenk haben können. Bei einem intraartikulären Varus im Kniegelenk kann das Sprunggelenk, zum Beispiel aufgrund eines pathologisch verringerten LD TA, horizontal zum Boden stehen (Abbildung 3d). Wird die Beinachse nun mechanisch neutral ausgerichtet, so wird das Tibiaplafond postoperativ nicht mehr horizontal sondern valgisch zum Boden ausgerichtet sein. Die Korrektur im Kniegelenk würde also zu einer Fehlstellung im Sprunggelenk führen und hier eine pathologische Belastung im Gelenk verursachen. In einigen wenigen experimentellen Studien wurde untersucht, welche Auswirkungen koronare Korrekturosteotomien auf die Belastung im Sprunggelenk haben können. In einer 1985 durchgeführten Kadaver-Studie wurde untersucht, wie sich anteriore und posteriore oder varische und valgische Osteotomien des Unterschenkels auf die tibiotalare Kontaktfläche des oberen Sprunggelenks (OSG) auswirken. Hierfür wurde zwischen Tibia und Talus ein drucksensibler Fotofilm gelegt und Osteotomien von 5° , 10° und 15° zur Simulation von koronaren und sagittalen Fehlstellungen durchgeführt. Die größten Änderungen der tibiotalaren Kontaktfläche zeigten sich bei den distalen Osteotomien. Hier kam es zu einer deutlichen Verringerung der Kontaktfläche, was klinisch zu einer Erhöhung der Spitzenbelastungen auf den Knorpel führen könnte. Bei den proximalen Osteotomien zeigte sich jedoch kaum eine Änderung. [28]. Bei dieser Studie war das untere Sprunggelenk (USG) jedoch flexibel und konnte die

Fehlstellungen kompensieren. Denn in klinischen Studien hat sich gezeigt, dass koronare Fehlstellungen am Kniegelenk durch das USG kompensiert werden können. So führt ein Kniegelenksvarus dazu, dass das untere Sprunggelenk diese Fehlstellung durch eine Eversionsbewegung (Valgus) des USG ausgleicht. Bei valgischen Kniegelenken führt das untere Sprunggelenk eine Inversion (Varus) aus, um die Fehlstellung zu kompensieren [29]. In den Abbildungen 3b und c ist dies einmal beispielhaft für varische Fehlstellungen dargestellt.

In einer 2017 durchgeführten biomechanischen Studie wurde die Auswirkung einer proximalen Tibiaosteotomie (5° und 10°) auf das OSG bei flexiblem und fixiertem USG untersucht [30]. Hier konnte bestätigt werden, dass es bei einem flexiblen USG zu keiner signifikanten Änderung der tibiotalaren Druckverhältnisse kam. War das USG in einer Varus-Position fixiert, so kam es bereits bei einer Osteotomie von 5° zu einer signifikanten Änderung der Druckverteilung im OSG. Bei einem valgisch fixierten USG war diese Änderung weniger stark ausgeprägt. Zudem zeigte sich, dass der maximale intraartikulär gemessene Druck im OSG bei den valgisch fixierten USG weniger hoch war als bei den varisch fixierten USG. In einer weiteren biomechanischen Kadaver-Studie wurde wiederum gezeigt, dass eine valgisierende Osteotomie am Kniegelenk ab 10° zu einer signifikanten Erhöhung des Drucks im lateralen OSG-Kompartiment führte. Bei einer Valgisierung von 15° führte dies auch zu einer signifikant verringerten Kontaktfläche zwischen Tibia und Talus [31].

Diese experimentellen biomechanischen Studien zeigen auf, welchen Einfluss Achsfehlstellungen am Kniegelenk auf das Sprunggelenk haben können. Es gilt jedoch noch zu überprüfen, welche klinische Relevanz diese Studien im Bezug zur Entwicklung von Sprunggelenkbeschwerden nach Implantation einer Knie-TEP haben. In der Literatur finden sich nur einige wenige Studien, welche das Auftreten von Sprunggelenkbeschwerden nach Implantation einer Knie-TEP untersucht haben [27, 32–35]. Es konnte jedoch noch kein ausschlaggebender Risikofaktor identifiziert werden, der hierfür verantwortlich ist. Diskutiert wurden unter anderem der Grad der präoperativen Fehlstellung [32, 34, 35], eine residuelle Varusfehlstellung im Kniegelenk nach TEP [33] oder eine reduzierte ROM des USG [35]. Die Aussagekraft dieser Studien ist jedoch eingeschränkt, da sie entweder methodische Schwächen aufwiesen wie ein retrospektives Studiendesign, keine Patienten mit Valgus-Fehlstellung eingeschlossen wurden oder unzureichende Messinstrumente (fehlende Erhebungen von Patient Related Outcome Measures (PROM)) verwendet

wurden. In einigen Studien wurden zudem ausschließlich radiologische Parameter erhoben.

1.3 Fragestellungen

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es zu überprüfen, ob es nach Knie-TEP-Implantation zu Beschwerden im Sprunggelenk kommen kann und *warum*. Anhand von Querschnittstudien und prospektiven Studien sollten Risikofaktoren identifiziert werden, die mit der Entwicklung von Schmerzen im OSG nach Knie-TEP assoziiert sind. Insbesondere in der prospektiven Arbeit sollten nicht nur radiologische, sondern auch klinische Parameter erhoben werden. Mittels verifizierter PROMs wurden geeignete Messinstrumente gesucht, die hinsichtlich von Gelenkbeschwerden eine valide Trennschärfe besitzen. Die klinische Untersuchung des Fußes und Sprunggelenks sollte objektiv erfolgen, also mittels apparativer Diagnostik. Um Fußfehlstellungen prä- oder postoperativ zu diagnostizieren, wurden Ganganalysen mittels drucksensitiver digitaler Schuheinlagen durchgeführt. Außerdem sollte geklärt werden, ob hochgradige koronare Kniegelenkdeformitäten ligamentäre Instabilitäten am Sprunggelenk verursachen – und wie sich diese nach Implantation einer Knie-TEP verhalten. Zudem war das Ziel, die ROM des USG prä- und postoperativ objektiv zu untersuchen. Hieraus ergaben sich folgende Fragestellungen, die sich auch jeweils auf Unterschiede zwischen varischen und valgischen Fehlstellungen beziehen:

1. Wie hoch ist der Anteil der Patienten, die nach Implantation einer Knie-TEP Beschwerden im Sprunggelenk entwickeln?
2. Welchen Einfluss hat der Grad der Korrektur der Ganzbeinachse bei mechanisch ausgerichteten Knie-TEPs auf Schmerzen im Sprunggelenk?
3. Welchen Einfluss hat die präoperative Fehlstellung des Kniegelenks auf die ROM des USG und die Bandstabilität des Sprunggelenks?
4. Wie verändert sich das Verhältnis von medialer zu lateraler Druckverteilung am Fuß in Abhängigkeit von varischen und valgischen Fehlstellungen am Kniegelenk?
5. Wie verändert sich die medio-laterale Druckverteilung am Fuß („Gait Line“)

nach Korrektur der Ganzbeinachse durch mechanisch ausgerichtete Knie-Prothesen?

6. Welchen Einfluss haben sagittale Fehlstellungen der unteren Extremität auf die Funktion des Sprunggelenks?

2 Ergebnisse

2.1 Das Auftreten von Sprunggelenkbeschwerden nach Kniegelenkersatz bei Varusgonarthrosen

Correction of excessive intraarticular varus deformities in total knee arthroplasty is associated with deteriorated postoperative ankle function

Graef F, Falk S, Tsitsilonis S, Perka C, Zahn RK, Hommel H
Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 28, 3758–3765 (2020)

Aus der klinischen Erfahrung ist bekannt, dass nach Implantation einer Knie-TEP Beschwerden am Sprunggelenk auftreten können. In einigen wenigen Studien wurde diskutiert, dass der Grad der präoperativen Fehlstellung (gemessen als mTFA) mit postoperativen OSG-Beschwerden assoziiert sein könnte. Das Ziel dieser Querschnittstudie war es, Patienten nach Implantation einer Knie-TEP klinisch und radiologisch zu untersuchen. Außerdem sollten anhand eines validierten PROM – dem Foot Function Index (FFI) – Beschwerden am Sprunggelenk quantifiziert werden. Hierfür wurden 99 Patienten eingeschlossen, bei welchen zwischen Dezember 2002 und Dezember 2012 eine Knie-TEP implantiert wurde. Die Patienten wurden anhand der präoperativen Fehlstellung in Gruppen eingeteilt (mTFA: 0-5°, 5-10°, 10-15° und > 15°) und anhand definierter Kriterien gematched, um anhand der Anzahl der Patienten mit der höchsten Fehlstellung eine entsprechende Anzahl an Patienten in den anderen Gruppen zu generieren. Die Patienten wurden einbestellt und klinisch sowie radiologisch untersucht. Es zeigte sich, dass in der Studienkohorte 37,5 % der Patienten nach der Operation über OSG-Beschwerden klagte. Zudem korrelierte der Grad der operativen Korrektur der Ganzbeinachse signifikant mit dem postoperativen FFI. Je höher der Grad der Achskorrektur also war, desto höher waren die Beschwerden im Sprunggelenk nach der Operation. Mittels einer Receiver Operating Characteristic Kurve konnte ein Cut-Off von mTFA = 14,5° errechnet werden. Erhielten Patienten mit einem höheren mTFA eine Knieprothese, stieg das OR, postoperativ über Sprunggelenkbeschwerden zu klagen, um OR = 15,6. Des Weiteren wurde demonstriert, dass die ROM des USG mit dem postoperativen FFI und dem Grad der operativen Korrektur der Ganzbeinachse signifikant

negativ korrelierte. Je höher die Sprunggelenkbeschwerden und je höher der Grad der Umstellung, desto eingeschränkter war die ROM des USG.

<https://doi.org/10.1007/s00167-019-05812-9>

2.2 Sprunggelenkbeschwerden nach Knie-Totalendoprothese bei Valgusgonarthrosen

Correction of severe valgus osteoarthritis by total knee arthroplasty is associated with increased postoperative ankle symptoms

Graef F*, Hommel H*, Falk R, Tsitsilonis S, Zahn RK, Perka C
Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 30, 527–535 (2022)

*geteilte Erstautorenschaft

Um Unterschiede hinsichtlich der postoperativen OSG-Beschwerden zwischen Varus- und Valgusgonarthrosen herauszuarbeiten, wurden aus dem gleichen Zeitraum (Dezember 2002 bis Dezember 2012) in selbiger Methodik wie in der Arbeit aus Abschnitt 2.1 Patienten mit einer Valgusgonarthrose und einem mTFA $> 15^\circ$ identifiziert, die in diesem Zeitraum eine Knie-TEP erhalten hatten und an der Studie teilnehmen wollten. Um eine Studienpopulation zu generieren, bei welcher die Häufigkeitsverteilung des mTFA der Norm entsprach, wurden ebenfalls drei weitere Gruppen gebildet ($0-5^\circ$, $5-10^\circ$, $10-15^\circ$). Die Patienten aus der Gruppe mit einem mTFA $> 15^\circ$ wurden mit der restlichen Studienkohorte gematched, um entsprechend spezifischer Kriterien eine homogene Kohorte zu bilden. Insgesamt wurden 96 Patienten eingeschlossen und radiologisch sowie klinisch nachuntersucht. Auch hier zeigte sich, dass die postoperativen Sprunggelenkbeschwerden (gemessen mittels FFI) signifikant mit dem Grad der operativen Korrektur der Ganzbeinachse korrelierten. Mittels einer Receiver Operating Characteristic Kurve wurde ein Cut-Off hinsichtlich der Achsumstellung und erhöhten OSG-Beschwerden berechnet, welcher bei einem mTFA von $16,5^\circ$ lag. Wurden Patienten aus diesem Studienkollektiv oberhalb des Cut-Offs mittels Knie-TEP operiert und die Ganzbeinachse durch ein mechanisches Alignment korrigiert, stieg die OR um 34, postoperativ über OSG-Beschwerden zu klagen. Zudem konnte gezeigt werden, dass der FFI sowie der Grad der operativen Korrektur des mTFA signifikant negativ mit der ROM des USG korrelierte. Je höher die postoperativen Sprunggelenkbeschwerden und je höher der Grad der Korrektur, desto eingeschränkter war die ROM des USG.

<https://doi.org/10.1007%2Fs00167-020-06246-4>

2.3 Frontale Achsfehlstellungen am arthrotischen Kniegelenk verursachen keine ligamentären Instabilitäten am Sprunggelenk

Increasing grades of frontal deformities in knee osteoarthritis are not associated with ligamentous ankle instabilities

Graef F, Rühling M, Gwinner C, Hommel H, Tsitsilonis S, Perka C
Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 31, 1704–1713 (2023)

Um die Folgen von Knieprothesen auf das Sprunggelenk zu verstehen, ist es wichtig nachzuvollziehen, welche Auswirkungen Gonarthrosen auf das Sprunggelenk vor Implantation der Endoprothese haben. Insbesondere sollte nicht nur der Einfluss koronarer, sondern auch sagittaler Fehlstellungen auf das OSG untersucht werden. Bisher war unklar, ob hochgradige koronare oder sagittale Fehlstellungen der Tibia einen Einfluss auf die ligamentäre Stabilität am Rückfuß haben. Die Haupthypothese dieser Studie war, dass bei Patienten mit Varusgonarthrose – durch den kompensatorischen Rückfußvalgus – die Eversion mit dem mTFA korrelierte. Und dass bei Patienten mit Valgusgonarthrose – durch den kompensatorischen Rückfußvarus – die Inversion mit dem mTFA korrelierte. Zudem sollte untersucht werden, wie sich das sagittale Alignment auf die anteriore und posteriore Translation des Talus gegenüber der Tibia auswirkt. In dieser klinischen Studie wurden von September 2020 bis September 2021 82 Patienten (Varus $n = 52$, Valgus $n = 30$), die zur Knie-TEP geplant waren, prospektiv eingeschlossen. Eine Woche vor der Operation wurden die Patienten klinisch und radiologisch untersucht. Radiologisch wurden der mTFA, der tibiale Slope am Kniegelenk sowie der Slope am Sprunggelenk (Anterior Distal Tibia Angle = ADTA) und die Rückfußachse (Hindfoot Alignment View Angle = HAVA) bestimmt. Um koronare und sagittale ligamentäre Instabilitäten zu quantifizieren, wurde das Sprunggelenk mittels Sprunggelenkarthrometer hinsichtlich der maximalen Inversion und Eversion sowie der maximalen anterioren und posterioren talotibialen Translation untersucht. Hierbei konnte gezeigt werden, dass der ADTA signifikant mit der posterioren Talustranslation korrelierte. Je horizontaler also der tibiale Slope am OSG war, desto instabiler war der posteriore Talusshift. Zudem konnte demonstriert werden, dass der mTFA nicht mit der Inver-

sion oder Eversion korrelierte. Hochgradige Varus- oder Valgusgonarthrosen waren damit nicht mit einer erhöhten Instabilität im Sprunggelenk assoziiert. Es konnte auch nachgewiesen werden, dass der tibiale Slope am Kniegelenk keinen Einfluss auf die anterior-posteriore Translation des Talus hatte. Zudem konnte bestätigt werden, dass der mTFA signifikant mit dem HAVA korreliert.

<https://doi.org/10.1007/s00167-022-07021-3>

2.4 Der Rückfuß kann frontale Knie deformitäten nicht suffizient kompensieren

Functional gait analysis reveals insufficient hindfoot compensation for varus and valgus osteoarthritis of the knee

Rühling M, Kirschbaum S, Perka C, **Graef F**
International Orthopaedics (SICOT) 47, 1233–1242 (2023)

In retrospektiven Arbeiten konnte gezeigt werden, dass am Kniegelenk Varusdeformitäten durch einen Rückfußvalgus und Valgusdeformitäten durch einen Rückfußvarus kompensiert werden. Auch in der prospektiven Studie aus Kapitel 2.3 konnte dies bestätigt werden. Dieser Zusammenhang wurde jedoch ausschließlich radiologisch aufgezeigt. Es stellte sich die Frage, ob der Rückfuß auch klinisch-funktionell in der Lage ist, hochgradige Varus- oder Valgusdeformitäten am Sprunggelenk zu kompensieren. Die Haupthypothese war, dass es bei Varusgonarthrosen – durch die valgische Rückfußkompensation – zu einer Medialisierung der Gait Line kam. Und dass bei Valgusgonarthrosen – durch die varische Rückfußkompensation – eine Lateralisierung der Gait Line erwartet werden konnte. Hierfür wurde die Patientenkohorte von 82 Patienten (Varus $n = 52$, Valgus $n = 30$) aus der klinisch-prospektiven Studie aus Kapitel 2.3 ebenfalls eine Woche präoperativ klinisch und radiologisch untersucht. Zusätzlich wurde der talare Tilt (TT) ausgemessen. Die Patienten wurden eine Woche präoperativ mittels drucksensitiver digitaler Schuheinlagen untersucht. Dadurch sollte analysiert werden, welchen Einfluss koronare Fehlstellungen des Kniegelenks auf die medio-laterale Druckverteilung beim Gehen haben. Hierbei konnte demonstriert werden, dass die Gait Line bei Patienten mit Varusgonarthrose signifikant lateraler war als bei Valgusgonarthrosen. Bei Patienten mit Valgusgonarthrose war die Gait Line entsprechend medialisiert. Damit musste die Haupthypothese verworfen werden. Zudem konnte gezeigt werden, dass der TT signifikant mit dem mTFA korreliert. Je varischer die Ganzbeinachse war, desto varischer war auch die tibiotalare Konfiguration im OSG. Und je mehr Valgus die Ganzbeinachse hatte, desto valgischer war die Konfiguration im OSG. Dadurch konnte diese Studie zeigen, dass der Rückfuß nicht in der Lage ist, hochgradige koronare Fehlstellungen des Kniegelenks suffizient zu kompensieren.

<https://doi.org/10.1007/s00264-023-05738-5>

2.5 Risikofaktoren für die Entwicklung von Sprunggelenkbeschwerden nach Kniegelenk-Endoprothese

Increased ankle pain after total knee arthroplasty is not associated with ankle laxity or the range of motion of the subtalar joint

Rühling M, Kirschbaum S, Perka C, **Graef F**
The Bone & Joint Journal 105-B, 1159-1167 (2023)

In einer prospektiven Studie (siehe Kapitel 2.3 und 2.4) wurden zwischen September 2020 und September 2021 Patienten eingeschlossen, welche zur Implantation einer Knie-TEP geplant waren. Eine Woche präoperativ wurden die Patienten klinisch (ROM des Knie- und Sprunggelenks, FFI, Sprunggelenksstabilität mittels Arthrometer, digitale Ganganalyse) sowie radiologisch (mTFA, HAVA, TT, Meary's Angle) untersucht, um zu analysieren, welche Auswirkungen Gonarthrosen auf das Sprunggelenk haben. In dieser Studie erfolgte nun drei Monate postoperativ die Verlaufskontrolle, um die Auswirkungen einer Knie-TEP auf das Sprunggelenk zu untersuchen. Die Haupthypothese war, dass der mTFA mit den postoperativen Sprunggelenkbeschwerden signifikant korrelierte. Es konnte gezeigt werden, dass in der untersuchten Studienpopulation 23,2% der Patienten nach Kniegelenkprothese Sprunggelenkbeschwerden entwickelt hatten. In der Varus-Gruppe zeigt sich, dass die Patienten, welche postoperativ über Beschwerden im OSG klagten, präoperativ einen erhöhten TT aufwiesen, welcher durch die Knie-TEP nicht korrigiert werden konnte. In der Valgus-Gruppe konnte demonstriert werden, dass Patienten mit OSG-Beschwerden nach Knie-TEP bereits präoperativ eine pathologisch lateralisierte Gait Line hatten, welche durch die Operation nicht korrigiert werden konnte. In dieser Studie korrelierte der präoperative mTFA nicht mit dem postoperativen FFI. Zudem wiesen Patienten mit postoperativ erhöhten OSG-Beschwerden keine verringerte ROM des USG oder eine erhöhte ligamentäre Instabilität im OSG auf. Als Risikofaktoren für postoperative OSG-Beschwerden konnte bei Varus-Patienten ein präoperativ erhöhter TT identifiziert werden. Therapeutisch könnten in diesen Fällen Einlagen mit einer lateralen Schuhranderhöhung in Frage kommen, um den Druck im medialen Gelenkspalt zu verringern, oder – in ausgewählten Fällen – supramalleoläre Korrekturosteotomien. Bei Valgus-Patienten konnte eine präope-

rativ pathologisch lateralisierte Gait Line bei PPV-Fehlstellung als Risikofaktor für OSG-Beschwerden nachgewiesen werden. In diesen Fällen könnte eine physiotherapeutische Behandlung mit Gangschule sowie PPV-Einlagen zur Abstützung des medialen Gewölbes die Schmerzen im Sprunggelenk lindern.

<https://doi.org/10.1302/0301-620X.105B11.BJJ-2023-0419.R1>

3 Diskussion

In dieser Habilitationsschrift konnte die klinische Erfahrung, dass es nach endoprophetischer Versorgung des Kniegelenks zu Sprunggelenkbeschwerden kommen kann, bestätigt werden. In den dargestellten Studien wurde bei circa 25 % der Patienten nach Knieendoprothese eine Zunahme oder das erstmalige Auftreten von Schmerzen im Sprunggelenk beobachtet. Wenn knapp ein Viertel der Patienten nach der Operation über Symptome in einem angrenzenden Gelenk klagen, ist das ein signifikanter Anteil, welcher klinisch relevant ist. Dadurch ist es mit dieser Arbeit zunächst gelungen, ein Thema hervorzuheben, welches im wissenschaftlichen Diskurs bisher nur wenig Beachtung fand. Vor Durchführung dieses Forschungsvorhabens erbrachte eine Literaturrecherche eine Anzahl von drei Publikationen, welche über das Phänomen von postoperativen Sprunggelenkbeschwerden nach Knieprothese berichteten, wobei eine davon eine Case Series war [27, 32, 33]. Das Ziel dieser Habilitationsschrift war es nicht nur, die Prävalenz dieser Symptomatik zu demonstrieren – sondern auch, welche Risikofaktoren damit assoziiert sind und wie diese verhindert werden können.

Dabei konnte in der prospektiven klinischen Studie aus Kapitel 2.5 gezeigt werden, dass bei Patienten mit Varusgonarthrose ein varisch konfigurierter TT prädiktiv für das Auftreten von postoperativen Sprunggelenkbeschwerden war. Bei diesen Patienten konnte der varische TT durch die Achskorrektur mittels Endoprothese auch nicht korrigiert werden (quelle). Eine varische tibiotalare Konfiguration bedeutet, dass im OSG der mediale gegenüber dem lateralen Gelenkspalt verschmälert ist. Dass es zu einer medialen Gelenkspaltverschmälerung kam, könnte am Grad der Fehlstellung der Ganzbeinachse gelegen haben. So wurde in der prospektiven Arbeit aus Kapitel 2.4 demonstriert, dass der präoperative TT mit dem präoperativen mTFA signifikant korrelierte. Je höher die Varusfehlstellung am Kniegelenk war, desto stärker war die tibiotalare varische Fehlstellung. Und je höher die Valgusfehlstellung am Kniegelenk war, desto mehr stand das OSG tibiotalar in einer Valgus-Position [36]. In mehreren *radiologischen* Studien wurde bisher der Standpunkt vertreten, dass der Rückfuß durch Eversions- oder Inversionsbewegungen koronare Deformitäten am Kniegelenk ausgleichen kann [29, 33, 37–39]. Die Korrelation des TT mit dem mTFA demonstrierte jedoch, dass es bei hochgradigen koronaren Deformitäten am Kniegelenk zu einer Dekompensation des medialen oder lateralen Gelenkspalts im OSG kam. Damit konnte gezeigt werden, dass der

Kompensationsmechanismus des Rückfußes, höhergradige koronare Kniedeformitäten auszugleichen, nicht ausreichend ist.

Die Tatsache, dass diese scheinbare Kompensation ein radiologisches, jedoch kein klinisches, Phänomen ist, zeigte auch die Auswertung der Ganganalyse. Mittels drucksensitiver hochauflösender Schuheinlagen konnte dabei nachgewiesen werden, dass es bei Varusgonarthrosen zu einer Lateralisierung der Gait Line kam. Bei Valgusgonarthrosen konnte eine Medialisierung der Gait Line beobachtet werden [36]. Diese Ergebnisse waren überraschend, da bei einem Rückfußvalgus normalerweise eine mediale Gait Line und bei einem Rückfußvarus eine laterale Gait Line erwartet wird [40]. Der Grund hierfür liegt im komplexen biomechanischen Zusammenspiel des Rückfußes, der Fußwurzel und des Vorfußes beim aufrechten Gang. Der Gangzyklus besteht physiologisch aus drei Phasen: Dem Heel Strike, also dem Aufsetzen der Ferse auf den Boden, der Mid-Stance- und der Toe-Off-Phase, bei der über den Vorfuß und die Zehen eine Abstoßbewegung stattfindet. Beim Heel Strike steht das Subtalargelenk physiologisch in einer Valgusposition, dadurch werden die Gelenke der Fußwurzel entsperrt, wodurch diese die Kräfte beim Auftreten besser absorbieren können. In der Toe-Off-Phase steht der Rückfuß dann im Varus. Hierdurch werden die Gelenke der Fußwurzel gesperrt, um eine optimale Kraftübertragung bei der Abstoßbewegung auf den Vorfuß übersetzen zu können [41, 42]. Durch das Entsperrn der Fußwurzel beim Rückfußvalgus erklärt sich die Genese von Plattfußdeformitäten mit entsprechender Vorfußpronation. Ein varischer Rückfuß kann auf der anderen Seite eine Vorfußsupination mit Hohlfußkomponente hervorrufen. Ganganalysen haben gezeigt, dass eine Vorfußpronation zu einer Medialisierung und eine Vorfußsupination zu einer Lateralisierung der Gait Line führte [40]. Wie demonstriert, lassen sich diese Zusammenhänge jedoch nicht auf die Pathophysiologie von Gonarthrosen mit koronaren Fehlstellungen sowie deren Auswirkungen auf das Sprunggelenk übertragen. Obwohl bei Varusgonarthrosen radiologisch ein Rückfußvalgus beobachtet wurde, liefen die Patienten auf der Außenkante des Fußes. Bei Valgusgonarthrosen hatten die Patienten hingegen – trotz Rückfußvarus – eine verstärkte Belastung medial.

Postoperativ erfolgte die Analyse, wie sich die Gait Line durch die Implantation der Knieprothese verändert hatte. Dabei konnte beobachtet werden, dass bei Varusgonarthrosen die ehemals lateralisierte Gait Line korrigiert wurde – sie war postoperativ signifikant medialer als präoperativ. Bei Patienten mit Valgusgonarthrose

konnten diese Veränderungen nicht beobachtet werden. Hier war die Gait Line präoperativ medial und konnte durch die Achsumstellung der Prothese nur geringfügig nach lateral korrigiert werden. Bei denjenigen Patienten mit Valgusgonarthrose, die postoperativ über Sprunggelenkschmerzen klagten, konnte gezeigt werden, dass sowohl die prä- als auch die postoperative Gait Line signifikant und pathologisch lateralisiert war. Warum diese Patientengruppe vermehrt auf dem Fußaußenrand gelaufen war, lässt sich anhand der in diesen Studien erhobenen Parameter nicht suffizient erklären. Denkbar wäre zum Beispiel eine Hohlfußdeformität. Der Meary's Angle war bei diesen Patienten jedoch moderat erhöht, wenn auch statistisch nicht signifikant. Ein erhöhter Meary's Angle kann auf eine Plattfußdeformität mit Vorfußpronation hinweisen. Dabei wäre wiederum eine medialisierte, und keine lateralisierte, Gait Line zu erwarten gewesen. Die lateralisierte Gait Line bei Patienten mit Valgusgonarthrose und OSG-Beschwerden nach Knieendoprothese ist deshalb als Folge eines pathologischen Gangbilds zu werten. Ein pathologisches Gangbild, bei welchem Patienten mit Valgusgonarthrose über die Fußaußenkante abrollen, konnte damit als Risikofaktor identifiziert werden, der prädiktiv für das Auftreten von postoperativen Sprunggelenksbeschwerden war.

Treten bei einem Patienten nach endoprothetischer Versorgung einer Varusgonarthrose nun Schmerzen im Sprunggelenk auf, so sollte der TT bestimmt werden. Besteht eine pathologische Varuskonfiguration des OSG als Ursache für die Schmerzen, so könnten Einlagen mit einer lateralen Schuhranderhöhung Linderung verschaffen. In ausgewählten Fällen, zum Beispiel bei einem varisch konfigurierten Tibiaplafond mit pathologisch erhöhtem LDTA, kann eine supramalleoläre Umstellungsosteotomie eine adäquate Therapie darstellen. Für die Bestimmung des TT ist jedoch ein Röntgenbild des OSG im Stehen (Mortise View) notwendig. Eine radiologische Messung des TT oder anderer Winkel und Parameter des Sprunggelenks ist auf Ganzbeinröntgenaufnahmen ungenau, da der Zentralstrahl bei diesen Aufnahmen auf das Kniegelenk zeigt und das Sprunggelenk nur tangential getroffen wird, wodurch Messfehler entstehen können [43].

Werden bei Patienten mit Valgusgonarthrose nach Knie-TEP Sprunggelenksymptome beobachtet, so kann eine klinische Untersuchung dabei helfen, ein pathologisches Gangbild zu diagnostizieren. Hierbei sollte insbesondere darauf geachtet werden, ob der Patient während der drei Gangphasen über den Außenrand des Fußes abrollt. Eine Gangschule zur Harmonisierung des Gangbilds oder auch Schuheinlagen mit einer medialen Gewölbeabstützung könnten dann dabei helfen,

die Beschwerden zu lindern.

In der Literatur wird der Einfluss des TT auf Sprunggelenkschmerzen nach Knieprothesen kontrovers diskutiert. In einer 2018 publizierten prospektiven Studie wurden 65 Fälle nach endoprothetischer Versorgung des Kniegelenks nachuntersucht. Hier zeigte sich, dass bei den Patienten, die postoperativ erhöhte Sprunggelenkschmerzen hatten, der TT nicht signifikant verändert war. Überraschenderweise wurde in der Studie jedoch auch berichtet, dass sich innerhalb der gesamten Kohorte der TT von prä- zu postoperativ nicht veränderte [33]. In der Studie dieser Arbeit aus Kapitel 2.5 konnte gezeigt werden, dass innerhalb der gesamten Kohorte der TT bei Varusgonarthrosen präoperativ varisch konfiguriert war und durch die Knieprothese valgisiert wurde. Dies konnte in einer retrospektiven Studie bestätigt werden, hier wurden jedoch Ganzbeinröntgenaufnahmen ausgewertet [34]. In einer weiteren prospektiven, rein radiologischen, Studie wurde bestätigt, dass sich der TT nach Knieendoprothese veränderte. In der Studie über 375 Fälle mit Varusgonarthrose wurde der TT durch die Knie-TEP jedoch *varisiert* [37]. Eine weitere Arbeitsgruppe demonstrierte 2012 in einer Arbeit ebenfalls, dass bei Varusgonarthrosen der TT durch eine Knieendoprothese in eine Valgusposition korrigiert wurde. Aber auch hier erfolgten die radiologischen Messungen an Ganzbeinröntgenaufnahmen. In der Studie wurde zudem bemerkt, dass 30,4 % der Patienten präoperativ einen valgischen TT aufwiesen. Von diesen Patienten wiederum entwickelten 46,2 % der Patienten nach Knieprothese radiologische Arthrosezeichen im OSG. Die Autoren mutmaßten deshalb, dass eine eingeschränkte ROM des USG bei diesen Patienten dazu geführt haben könnte, dass die Varusfehlstellung am Kniegelenk durch eine valgische Stellung des OSG kompensiert wurde. Wenn nun die varische Kniegelenkachse durch eine Endoprothese korrigiert wurde, verblieb das USG durch die geringe ROM in der inkorrekten Stellung, was zu einem Fortschreiten der Arthrose führte. Da die Patienten in der Studie rein radiologisch untersucht wurden, konnte diese Hypothese nicht bestätigt werden [35].

Es stellte sich deshalb die Frage, ob eine eingeschränkte ROM des USG für die Entwicklung von Sprunggelenkschmerzen nach Knieendoprothese verantwortlich sein könnte. Die Hypothese wurde anhand einer theoretischen Überlegung aufgestellt: Wenn Patienten eine Gonarthrose mit koronaren Deformitäten aufweisen, dann ist dies ein chronischer Krankheitsprozess. Dementsprechend steht dann das USG über eine längere Zeit in der beschriebenen valgischen oder varischen Positi-

on, wodurch das Risiko erhöht wird, dass diese Position chronifiziert und die ROM des USG über den Krankheitsverlauf abnimmt. Anders als an großen Gelenken wie der Schulter, der Hüfte oder dem Knie ist die klinische Untersuchung der ROM des USG jedoch schwierig. Zum einen ist die physiologische Beweglichkeit dieses Gelenks mit einer Inversion von 25-30° und einer Eversion von 5-10° relativ gering, wodurch Messungenauigkeiten stärker ins Gewicht fallen [44]. Auch die Messung mittels Goniometer gestaltet sich aufgrund des kurzen distalen Gelenkarms schwierig. Zudem ist der rein *klinisch* gemessene Bewegungsumfang des Subtalgelenks immer eine Kombination aus der Bewegung des Gelenks an sich und der Laxizität der Innen- und Außenbänder. Eine exakte Messung der ROM des USG, ohne Einfluss der ligamentären Stabilität des OSG, ist deshalb nur fluoroskopisch möglich [45]. Für diese Arbeit wurde eine große Patientenkohorte rekrutiert, um die Ergebnisse mit einer hohen statistischen Power zu unterstützen. Eine fluoroskopische Untersuchung wäre hierfür nicht praktikabel gewesen. Um den Einfluss der ROM des USG trotzdem analysieren zu können, wurde eine Kombination aus Messung mittels Sprunggelenkarthrometer und der radiologischen Analyse des Rückfußes genutzt. Mit dem in dieser Arbeit genutzten Sprunggelenkarthrometer (Hollis Ankle ArthrometerTM, Blue Bay Research, Inc., Florida, USA) kann die maximale Inversion und Eversion sowie die anteriore und posteriore Translation des Sprunggelenks auf zwei Nachkommastellen genau untersucht werden. Die Ergebnisse des Arthrometers konnten dabei zeigen, dass sich die gemessene Inversion und Eversion zwischen den Patienten mit und ohne postoperative OSG-Schmerzen nicht unterschieden. Zudem konnte durch die radiologischen Messungen gezeigt werden, dass bei Varusgonarthrosen nach Knieprothese der Rückfuß varisiert und bei Valgusgonarthrosen der Rückfuß valgisiert wurde, was bei einer reduzierten ROM des USG nicht möglich gewesen wäre. Die Rückfußposition, gemessen mittels HAVA, unterschied sich zu keinem der Zeitpunkte zwischen der Gruppe mit und der Gruppe ohne postoperative Sprunggelenkschmerzen (quelle). Diese Arbeit konnte damit zeigen, dass die Sprunggelenkschmerzen nach Knie-TEP in dieser Kohorte nicht durch eine reduzierte ROM des USG hervorgerufen wurde.

Vor Durchführung der Studien dieser Habilitationsschrift war unklar, welchen Einfluss koronare Fehlstellungen des Kniegelenks auf die ligamentäre Stabilität des Sprunggelenks haben und wie sich dies auf die Beschwerdesymptomatik im OSG auswirkt. In der Literatur findet sich eine Studie, welche die Auswirkungen von Gonarthrosen auf die koronare und sagittale Stabilität im Sprunggelenk untersuch-

te. In dieser Studie wurden 15 Patienten mit Gonarthrose mit dem gleichen Arthrometer wie in den Studien dieser Arbeit untersucht und mit einer Kontrollgruppe aus 15 gesunden Probanden verglichen. Dabei wurde gezeigt, dass die Gruppe mit Gonarthrose eine geringere Inversion und Eversion sowie anteriore und posteriore Translation hatte als die gesunde Kontrollgruppe. In der Studie wurde jedoch nicht untersucht, wie sich der Grad der koronaren Deformität auf die ligamentäre Stabilität am OSG auswirkt [46]. Am Kniegelenk ist bekannt, dass Varusgonarthrosen eine erhöhte laterale Aufklappbarkeit und Valgusgonarthrosen eine vermehrte mediale Aufklappbarkeit des Gelenks verursachen. Ursächlich hierfür wird eine Schwächung der Kollateralbänder angenommen [47]. Ob bei Varusgonarthrosen jedoch zusätzlich der Grad der Fehlstellung mit einer erhöhten Kontraktion der medialen Kollateralbänder assoziiert ist, wird kontrovers diskutiert [48,49]. Da bei fehlenden ossären Deformitäten (MPTA und LDTA physiologisch) eine Varusgonarthrose ebenfalls eine Varisierung des Tibiaplafonds verursacht, wäre denkbar, dass auch am Sprunggelenk die Außenbänder durch die Fehlstellung am Kniegelenk elongieren. Durch die Valgisierung des Rückfußes bei Varusgonarthrosen könnten jedoch auch die medialen Kollateralbänder geschwächt werden. Des Weiteren stellte sich die Frage, wie sich die Insuffizienz dieser Bänder nach Korrektur der Beinachse verhalten würden. Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass es bei Varusgonarthrosen, durch die valgische Rückfußachse, zu einer Erhöhung der Eversion – und bei Valgusgonarthrosen, durch die varische Rückfußachse, zu einer Erhöhung der Inversion kommen würde. Zudem wurde die Hypothese aufgestellt, dass nach Korrektur der Beinachse die geschwächten Innen- oder Außenbänder zu einer medialen Instabilität bei den Patienten mit vorangegangener Varusgonarthrosen und zu einer lateralen Instabilität bei den Patienten mit zuvor bestandener Valgusgonarthrose führen würden. Um diese Frage zu beantworten, wurden in den Studien dieser Arbeit Arthrometermessungen der Sprunggelenke prä- und postoperativ durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass hochgradige Varusgonarthrosen ($mTFA > 15^\circ$) präoperativ eine verringerte Inversion und eine erhöhte Eversion gegenüber geringgradigen Varusgonarthrosen ($mTFA 0-5^\circ$) aufwiesen, was statistisch jedoch nicht signifikant war [50]. Postoperativ zeigte sich, dass die Inversion und Eversion in der gesamten Kohorte reduziert war. Damit konnte die Hypothese widerlegt werden, dass Varus- oder Valgusgonarthrosen zu ligamentären Instabilitäten am Sprunggelenk führen, die nach Implantation einer Knieendoprothese symptomatisch werden.

Mit Hilfe der Arthrometermessungen wurde zudem untersucht, welche Auswirkungen das sagittale Profil der Beinachse auf das Sprunggelenk hat. Dabei konnte gezeigt werden, dass präoperativ ein vermehrt horizontal ausgerichtetes sagittales Tibiaplafond (erhöhter ADTA) mit einer vermehrten posterioren Translation des Talus korrelierte. Dieser Zusammenhang sollte bei der Planung einer Knieendoprothese mit berücksichtigt werden. Dies betrifft zum Beispiel die Korrektur eines pathologisch erhöhten Slopes am Kniegelenk. Des Weiteren ist zu bedenken, dass sich bei Patienten mit präoperativer Flexionskontraktur am Kniegelenk die sagittale Ausrichtung des Sprunggelenks ebenfalls ändert, wenn eine Knieendoprothese implantiert wird und das Kniegelenk anschließend wieder bis auf 0° gestreckt werden kann.

In Kapitel 1.2 wurde anhand von biomechanischen Kadaverstudien erörtert, wie sich die mechanische Belastung im oberen Sprunggelenk verändert, wenn eine koronare Fehlstellung der unteren Extremität vorliegt. Hier zeigte sich *in vivo*, dass höhergradige Fehlstellungen eine geringere tibiotalare Kontaktfläche sowie einen signifikant erhöhten intraartikulären Druck zur Folge haben können [28, 30, 31]. Es stellte sich deshalb die Frage, ob der Grad der koronaren Fehlstellung bei Gonarthrosen dafür verantwortlich sein könnte, ob postoperativ Sprunggelenkbeschwerden auftreten. In der Literatur wird der Einfluss der präoperativen Ganzbeinachse auf das postoperative Outcome im Sprunggelenk kontrovers diskutiert. In einer 2016 publizierten klinischen Studie an 80 Fällen mit einer präoperativen Varusgonarthrose $> 10^\circ$ äußerten 19 Patienten (23,75%), dass sie postoperativ Sprunggelenkbeschwerden entwickelt hatten. Dreizehn Patienten aus dieser Gruppe hatten eine präoperative Fehlstellung $> 15^\circ$. Eine Korrelation zwischen präoperativem mTFA und postoperativen OSG-Beschwerden konnte trotzdem nicht nachgewiesen werden. Die Studie wies jedoch einige methodische Schwächen, wie eine fehlende Kontrollgruppe oder die dichotome Erhebung von Sprunggelenkbeschwerden, auf [32]. In einer weiteren Studie wurden prospektiv 65 Fälle eingeschlossen, welche eine Knieprothese erhielten. Hier berichteten Patienten in 12,3% der Fälle über eine Verschlechterung oder neu aufgetretene Beschwerden im Sprunggelenk. Auch hier konnte nicht nachgewiesen werden, dass Patienten mit postoperativen Sprunggelenkbeschwerden präoperativ einen höheren Grad der koronaren Fehlstellung hatten [33]. 2012 konnte eine retrospektive Studie zeigen, dass sich nach Implantation von Knieprothesen in 21,8% der Fälle neu aufgetretene radiologische Arthrosezeichen im Sprunggelenk entwickelt hatten. Diejenigen Patienten, welche

neu aufgetretene Arthrosezeichen im OSG aufwiesen, hatten eine signifikant höhere präoperative koronare Fehlstellung als die Patienten ohne postoperative radiologische Arthrosezeichen im OSG.

In den beiden retrospektiven Studien dieser Arbeit aus Kapitel 2.1 und 2.2 zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Grad der Korrektur der Ganzbeinachse und den postoperativen Sprunggelenkschmerzen [51, 52]. Interessanterweise konnte diese Korrelation in der prospektiven Studie aus Kapitel 2.5 nicht bestätigt werden (quelle). Der Grund für diese diskrepanten Ergebnisse ist wahrscheinlich, dass die retrospektiven Studien einen Selection Bias hatten. Es wurden 132 Patienten mit einer präoperativen Varusfehlstellung von $mTFA > 15^\circ$ und 91 Patienten mit einer präoperativen Valgusfehlstellung $> 15^\circ$ aus dem zehnjährigen Zeitraum von Dezember 2002 bis Dezember 2012 identifiziert. Hiervon konnten jedoch nur 39 Varus- und 36 Valgus-Patienten eingeschlossen werden. Der Selection Bias ist der Nachteil retrospektiver Arbeiten: Hier kann es vorkommen, dass nur diejenigen Patienten zur Nachuntersuchung kommen, welche Beschwerden haben. Weiterhin ist zu bedenken, dass in Kadaverstudien koronare Fehlstellungen in vivo zwar zu einer pathologischen Belastung im oberen Sprunggelenk führten, doch die Implantation einer Knieprothese *korrigiert* diese koronaren Fehlstellungen, wie die Studien dieser Arbeit demonstrieren konnten [51, 52]. Die vorliegende Arbeit konnte die Hypothese, dass der Grad der präoperativen koronaren Fehlstellung mit den postoperativen Sprunggelenkschmerzen korreliert, nicht bestätigen. Trotzdem sollte gerade bei hochgradigen Deformitäten das Sprunggelenk bei der operativen Planung der Prothese berücksichtigt werden. Denn der $mTFA$ korrelierte mit dem TT. Bei Varusgonarthrosen war ein präoperativ erhöhter TT mit postoperativen Sprunggelenkschmerzen assoziiert. Deshalb ist gerade bei hochgradigen Deformitäten die klinische und radiologische Untersuchung des Sprunggelenks vor der Operation wichtig.

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, werden in der Knieendoprothetik zwei gegensätzliche Alignmentstrategien verfolgt, das kinematische und das mechanische Alignment. Die in dieser Arbeit durchgeführten Studien analysierten ausschließlich Patienten, bei welchen eine Knieendoprothese mit mechanischem Alignment implantiert wurde. Beim kinematischen Alignment wird die Strategie verfolgt, nur die intraartikuläre Deformität zu korrigieren und konstitutionelle Deformitäten zu belassen [23]. Beim mechanischen Alignment ist das Ziel eine neutrale Beinach-

se (innerhalb einer Range von $\pm 3^\circ$) [21]. In einer prospektiven Studie konnte 2018 gezeigt werden, dass diejenigen Patienten, die nach Knie-TEP über erhöhte Sprunggelenkbeschwerden klagten, postoperativ eine residuelle Varusdeformität am Kniegelenk aufwiesen ($mTFA = 5,1^\circ \pm 2,1^\circ$). Es wurde deshalb geschlossen, dass eine residuelle Varusdeformität für die Sprunggelenkschmerzen verantwortlich war [33]. Auch bei einem kinematischen Alignment wäre ein solcher residueller Varus möglich. Aufgrund dieser Ergebnisse kann jedoch nicht geschlossen werden, dass ein kinematisches Alignment mit einem schlechteren Outcome am Sprunggelenk assoziiert ist, denn in der Literatur finden sich bisher keine Studien, welche den Einfluss von Knieendoprothesen mit kinematischem Alignment auf das Sprunggelenk untersucht haben. Auch in den beiden retrospektiven Studien dieser Arbeit aus Kapitel 2.1 und 2.2 konnte die Beobachtung, dass ein residueller Varus nach Knie-TEP die Sprunggelenkschmerzen verursacht, nicht bestätigt werden. Die Auswirkungen von kinematischen Knieendoprothesen auf das Sprunggelenk müssen in einer zukünftigen Forschungsarbeit zunächst analysiert werden. Dabei wäre interessant, wie hoch der Anteil der Patienten ist, der postoperativ über Sprunggelenkbeschwerden klagt. Zudem wäre es auch von interessant, welchen Einfluss ein *restriktives* kinematische Alignment hat, bei welchem hochgradige konstitutionelle Fehlstellungen zu einem gewissen Grad korrigiert werden, um den Abrieb der Prothese zu minimieren [53].

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Habilitationsschrift konnte erstmals eine valide Evidenz erbracht werden, welche die klinische Erfahrung hinsichtlich des Auftretens von Sprunggelenkbeschwerden nach Implantation einer Knieendoprothese bestätigte. Durch retrospektive Querschnittstudien und klinisch-prospektive experimentelle Studien konnte zunächst gezeigt werden, dass circa 25 % der Patienten nach endoprothetischer Versorgung einer Gonarthrose Beschwerden im Sprunggelenk entwickelten. In einem ersten Schritt wurde in den retrospektiven Studien das Ausmaß der präoperativen koronaren Fehlstellung als ein Risikofaktor identifiziert, welcher für die Entwicklung dieser Symptome verantwortlich sein kann. Bei Varusgonarthrosen wurde ein Cutoff von $mTFA = 14,5^\circ$ und bei Valgusgonarthrosen ein Cutoff von $mTFA = 16,5^\circ$ errechnet. Erfolgte die Korrektur einer Fehlstellung oberhalb dieser Werte mittels mechanisch ausgerichteter Prothese, stieg das Risiko signifikant an, dass Patienten nach der Operation Beschwerden im Sprunggelenk entwickelten. In einem zweiten Schritt wurden die Ergebnisse dieser retrospektiven Studie in einer großen prospektiven klinisch-experimentellen Studie validiert. Eine Korrelation zwischen dem Grad der präoperativen Fehlstellung und den postoperativen Sprunggelenkbeschwerden konnte zwar nicht nachgewiesen werden. Dennoch zeigte sich, anders als in retrospektiven radiologischen Studien postuliert, dass der Rückfuß nicht in der Lage war koronare Deformitäten des Kniegelenks suffizient zu kompensieren. Dies zeigte sich durch eine Korrelation des $mTFA$ mit dem TT und führte zu einer Dekompensation des medialen Gelenkspalts des OSG bei Varusgonarthrosen; und zu einer Dekompensation des lateralen Gelenkspalts des OSG bei Valgusgonarthrosen. In diesem Zusammenhang konnte ebenfalls mittels Ganganalyse demonstriert werden, dass Patienten mit Varusgonarthrose, trotz valgischer Rückfußkompensation, auf der Außenseite des Fußes liefen. Patienten mit Valgusgonarthrose liefen, trotz varischer Rückfußkompensation, auf der Innenseite des Fußes. In der prospektiven Studie konnte gezeigt werden, dass bei Patienten mit Varusgonarthrose, ein erhöhter TT prädiktiv für das Auftreten von postoperativen Sprunggelenkschmerzen war. Aufgrund der Korrelation des $mTFA$ mit dem TT und des Nachweises eines erhöhten TT als Risikofaktor für OSG-Beschwerden sind hochgradige koronare Deformitäten weiterhin als potentielle Auslöser für die Entwicklung von postoperativen Schmerzen im Sprunggelenk zu werten. Bei Patienten mit Valgusgonarthrose zeigte sich ein pathologisches, lateralisiertes Gangmuster als Risikofaktor für die Entwicklung von Sprunggelenkbeschwerden nach Knieen-

doprothese. Falls Patienten nach endoprothetischer Versorgung des Kniegelenks Schmerzen im Sprunggelenk entwickeln, sollte eine klinische und radiologische Untersuchung durchgeführt werden. Besteht präoperativ eine Varusfehlstellung und zeigt sich ein erhöhter TT, könnten Schuheinlagen mit einer lateralen Schuhrand-erhöhung – die zu einer Lateralisierung der Belastungsachse im OSG führen – Linderung verschaffen. Liegt zudem eine konstitutionelle Fehlstellung vor, kann in ausgewählten Fällen eine supramalleoläre Korrekturosteotomie durchgeführt werden. Liegt präoperativ eine Valgusgonarthrose vor und zeigt sich ein pathologisches Gangbild mit Abrollbewegungen über die Fußaußenkante, sollten eine physiotherapeutische Behandlung mit Gangschule zur Harmonisierung des Gangbilds sowie Schuheinlagen mit Abstützung des medialen Gewölbes als Therapiemaßnahme in Betracht gezogen werden.

Zusammenfassend sind Sprunggelenkbeschwerden nach mechanisch-ausgerichteter Knieendoprothese ein klinisch wichtiges Phänomen, dem Aufmerksamkeit gewidmet werden sollte. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, das Sprunggelenk und den Fuß bereits präoperativ klinisch zu untersuchen. Bei höhergradigen Deformitäten oder Auffälligkeiten in der klinischen Untersuchung sollten bereits vor der Operation Röntgenaufnahmen im Stehen des OSG anterior-posterior, des Fußes mit OSG seitlich sowie des Rückfußes (Aufnahme nach Saltzmann) beidseits durchgeführt werden.

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein bisher wenig beachtetes Forschungsgebiet der Endoprothetik erstmalig umfassend aufgearbeitet. Trotzdem ist diese Habilitationsschrift lediglich als Ausgangspunkt für zukünftige Studien anzusehen, da einige weitere Fragen geklärt werden müssen. In der prospektiven Studie konnte demonstriert werden, dass circa ein Viertel der Patienten postoperativ über neu aufgetretene Schmerzen im Sprunggelenk klagte. Doch diese Ergebnisse wurden drei Monate postoperativ erhoben – Ergebnisse im Langzeit-Follow-Up fehlen. Zwar bestanden in den retrospektiven Studien die OSG-Beschwerden auch nach knapp 5 Jahren, doch können diese subjektiven Beschwerden aufgrund des retrospektiven Studiendesigns zu keinen radiologischen, klinischen oder apparativen Untersuchungsdaten korreliert werden. Es gilt also zu klären, ob die identifizierten Risikofaktoren – ein erhöhter TT bei Varusgonarthrosen und eine lateralisierte Gait Line bei Valgusgonarthrosen – auch nach fünf und mehr Jahren mit den OSG-Beschwerden assoziiert sind.

Auch wenn in den Studien dieser Arbeit die ROM des USG sowie die Bandstabilität im OSG nicht als Risikofaktor für Schmerzen im Sprunggelenk nach Knieendoprothese identifiziert wurden, so sollten zukünftige Studien dennoch beide Aspekte weiterhin untersuchen. Denn die für diese Habilitationsschrift sehr aufwendig durchgeführten Messungen mittels Sprunggelenkarthrometer können „lediglich“ die Inversion und Eversion sowie anteriore und posteriore Translation des Sprunggelenks exakt erfassen. Dadurch kann jedoch nicht zwischen der ROM des USG und der Bandstabilität am OSG unterschieden werden. Denn die rein klinische Inversion und Eversion ist immer eine Kombination aus der Bewegung im USG sowie der medialen und lateralen Bandspannung im OSG [45]. Um Auswirkungen von koronaren Kniegelenkdeformitäten auf die Bewegung im USG sowie die Bandstabilität im OSG genauer zu untersuchen, könnten zum Beispiel Laufbandanalysen mit einer Kombination aus Ganganalyse sowie fluoroskopischen Untersuchungen mit kleinen Kohortengrößen durchgeführt werden.

Des Weiteren bleibt zu klären, welche Auswirkungen die verschiedenen Alignmentstrategien auf das Sprunggelenk haben. In dieser Habilitationsschrift wurden mechanisch-ausgerichtete Knieendoprothesen untersucht. Hier zeigte sich, dass Patienten mit Varusgonarthrose ein varisch konfiguriertes OSG (erhöhter TT) aufwiesen und Patienten mit Valgusgonarthrosen ein valgisch konfiguriertes OSG (negativer TT). Durch die Korrektur der Beinachse wurde dieses Malalignment im OSG korrigiert. Es bleibt zunächst zu klären, ob der TT korrigiert wird, wenn eine Knieendoprothese mittels kinematischem Alignment implantiert würde. Bei Patienten mit Varusgonarthrose und postoperativen OSG-Beschwerden zeigte sich, dass es zu *keiner* Korrektur des TT kam. Auch hier muss analysiert werden, ob Patienten mit einem pathologischen TT von einem kinematischem oder restriktiv-kinematischem Alignment profitieren würden. Aufgrund des geringeren Umfangs der koronaren Korrektur ist – aus der rein theoretischen Überlegung her – bei kinematischen Alignmentstrategien auch von einem geringeren Korrekturpotential am Sprunggelenk auszugehen.

In einer prospektiven Interventionsstudie sollte in Zukunft ebenfalls untersucht werden, wie sich die Therapien zur Behandlung schmerzhafter Sprunggelenke nach Knie-TEP auswirken. Bereits diskutiert wurden laterale Schuhranderhöhungen (durch zum Beispiel Einlegesohlen) bei Patienten mit Varusgonarthrose und postoperati-

ven Sprunggelenkschmerzen sowie einem pathologisch erhöhten TT, um die Lastverteilung im OSG zu lateralisieren. Bei Patienten mit Valgusgonarthrose und OSG-Schmerzen nach Knie-TEP sowie einem pathologisch lateralisierten Gangmuster wurde die physiotherapeutische Therapie mit Gangschule zur Harmonisierung des Gangbilds und Einlegesohlen mit medialer Gewölbeunterstützung vorgeschlagen. Doch diese Therapieansätze sind bisher noch nicht erprobt. In interventionellen Studien müsste erst die Wirksamkeit erprobt werden, bevor generelle Behandlungsempfehlungen ausgesprochen werden können.

Diese Fragen in zukünftigen Studien zu untersuchen ist essentiell, um die Versorgungsqualität nach Knieendoprothesenimplantation zu steigern. Denn wie in dieser Arbeit dargelegt ist nicht nur der fokussierte und subspezialisierte Blick auf das Kniegelenk alleine notwendig, um die Zufriedenheit der Patienten zu steigern. Sondern vielmehr der ganzheitliche Blick auf den Patienten und das Wissen um die komplexen Zusammenhänge der gesamten kinematischen Kette.

5 Literatur

- [1] M. Sachs, *Geschichte der operativen Chirurgie*. Heidelberg: Kaden-Verlag, 2003.
- [2] D. Wessinghage, “Die Gesellschaften deutscher Orthopäden in den ersten 20 Jahren,” *Orthopade*, vol. 30, no. 10, pp. 675–684, 2001.
- [3] “Orthopaedic Practice in the U.S. 2018,” *AAOS Department of Clinical Quality and Value*, 2019.
- [4] F. Lateef, “Patient expectations and the paradigm shift of care in emergency medicine,” *Journal of Emergencies, Trauma, and Shock*, vol. 4, no. 2, p. 163, 2011.
- [5] L. N. Bockhorn, R. N. Goytia, M. S. Laughlin, and A. R. Patel, “Increased Orthopedic Specialization Lowers Costs and Improves Outcomes in Total Joint Arthroplasty,” *The Journal of Arthroplasty*, vol. 34, pp. S76–S79, jul 2019.
- [6] J. N. Katz, J. Barrett, N. N. Mahomed, J. A. Baron, R. J. Wright, and E. Losina, “Association between hospital and surgeon procedure volume and the outcomes of total knee replacement.,” *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, vol. 86, pp. 1909–16, sep 2004.
- [7] J. Bernstein, “Not the Last Word: Specialization and its Discontents,” *Clinical Orthopaedics and Related Research*, vol. 473, pp. 1187–1191, apr 2015.
- [8] M. Emmert and S. McLennan, “One decade of online patient feedback: Longitudinal analysis of data from a German physician rating website,” *Journal of Medical Internet Research*, vol. 23, no. 7, pp. 1–16, 2021.
- [9] A. Joelson, F. G. Sigmundsson, and J. Karlsson, “Stability of SF-36 profiles between 2007 and 2016: A study of 27,302 patients surgically treated for lumbar spine diseases,” *Health and Quality of Life Outcomes*, vol. 20, no. 1, pp. 1–7, 2022.
- [10] J. A. Singh and D. G. Lewallen, “Are outcomes after total knee arthroplasty worsening over time? A time-trends study of activity limitation and pain outcomes,” *BMC Musculoskeletal Disorders*, vol. 15, no. 1, pp. 1–9, 2014.

- [11] N. Farahpour, A. Jafarnejhad, M. Damavandi, A. Bakhtiari, and P. Allard, “Gait ground reaction force characteristics of low back pain patients with pronated foot and able-bodied individuals with and without foot pronation.,” *Journal of biomechanics*, vol. 49, pp. 1705–1710, jun 2016.
- [12] C. B. O’Leary, C. R. Cahill, A. W. Robinson, M. J. Barnes, and J. Hong, “A systematic review: The effects of podiatrical deviations on nonspecific chronic low back pain,” *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation*, vol. 26, pp. 117–123, apr 2013.
- [13] R. K. Zahn, S. Grotjohann, M. Pumberger, H. Ramm, S. Zachow, M. Putzier, C. Perka, and S. Tohtz, “Influence of pelvic tilt on functional acetabular orientation,” *Technology and Health Care*, vol. 25, pp. 557–565, jun 2017.
- [14] H. Haffer, Z. Wang, Z. Hu, Y. Palmowski, S. Hardt, H. Schmidt, C. Perka, and M. Pumberger, “Does Total Hip Arthroplasty Affect Spinopelvic and Spinal Alignment?,” *Clinical Spine Surgery: A Spine Publication*, vol. 35, pp. E627–E635, oct 2022.
- [15] M. Muellner, L. Becker, Z. Wang, Z. Hu, S. Hardt, M. Pumberger, and H. Haffer, “Spinopelvic mobility is influenced by pre-existing contralateral hip arthroplasty: a matched-pair analysis in patients undergoing hip replacement,” *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, vol. 17, p. 64, dec 2022.
- [16] D. Phan, S. S. Bederman, and R. Schwarzkopf, “The influence of sagittal spinal deformity on anteversion of the acetabular component in total hip arthroplasty.,” *The bone and joint journal*, vol. 97-B, pp. 1017–23, aug 2015.
- [17] J.-G. Moon, J.-H. Hong, N. Bither, and W.-Y. Shon, “Can Ulnar Variance Be Used to Detect Overstuffing After Radial Head Arthroplasty?,” *Clinical Orthopaedics and Related Research®*, vol. 472, pp. 727–731, feb 2014.
- [18] S. Nakagawa, J.-I. Fukushi, T. Nakagawa, H. Mizu-Uchi, and Y. Iwamoto, “Association of Metatarsalgia After Hallux Valgus Correction With Relative First Metatarsal Length.,” *Foot and Ankle International*, vol. 37, pp. 582–8, jun 2016.
- [19] M. T. Hirschmann, S. Hess, H. Behrend, F. Amsler, V. Leclercq, and L. B. Moser, “Phenotyping of hip–knee–ankle angle in young non-osteoarthritic knees

- provides better understanding of native alignment variability,” *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, vol. 27, pp. 1378–1384, may 2019.
- [20] D. Paley and J. Pfeil, “[Principles of deformity correction around the knee].,” *Der Orthopade*, vol. 29, pp. 18–38, jan 2000.
- [21] N. F. R. Huang, M. M. Dowsey, E. Ee, J. D. Stoney, S. Babazadeh, and P. F. Choong, “Coronal alignment correlates with outcome after total knee arthroplasty: five-year follow-up of a randomized controlled trial.,” *The Journal of Arthroplasty*, vol. 27, pp. 1737–41, oct 2012.
- [22] W. Blakeney, Y. Beaulieu, B. Puliero, M.-O. Kiss, and P.-A. Vendittoli, “Bone resection for mechanically aligned total knee arthroplasty creates frequent gap modifications and imbalances.,” *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, vol. 28, pp. 1532–1541, may 2020.
- [23] W. Blakeney, J. Clément, F. Desmeules, N. Hagemeister, C. Rivière, and P.-A. Vendittoli, “Kinematic alignment in total knee arthroplasty better reproduces normal gait than mechanical alignment.,” *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, vol. 27, pp. 1410–1417, may 2019.
- [24] S. J. MacDessi, W. Griffiths-Jones, I. A. Harris, J. Bellemans, and D. B. Chen, “The arithmetic HKA (aHKA) predicts the constitutional alignment of the arthritic knee compared to the normal contralateral knee,” *Bone and Joint Open*, vol. 1, pp. 339–345, jul 2020.
- [25] S. J. MacDessi, W. Griffiths-Jones, I. A. Harris, J. Bellemans, and D. B. Chen, “Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) classification a new system for describing knee phenotypes,” *Bone and Joint Journal*, vol. 103 B, no. 2, pp. 329–337, 2021.
- [26] S. Nisar, J. Palan, C. Rivière, M. Emerton, and H. Pandit, “Kinematic alignment in total knee arthroplasty.,” *EFORT open reviews*, vol. 5, pp. 380–390, jul 2020.
- [27] J. K. Weaver and R. S. Derkash, “Ankle pain following total knee arthroplasty. A case report.,” *The Journal of arthroplasty*, vol. 7 Suppl, pp. 447–51, 1992.
- [28] R. R. Tarr, C. T. Resnick, K. S. Wagner, and A. Sarmiento, “Changes in tibiotalar joint contact areas following experimentally induced tibial angular deformities.,” *Clinical orthopaedics and related research*, pp. 72–80, oct 1985.

- [29] A. A. Norton, J. J. Callaghan, A. Amendola, P. Phisitkul, S. Wongsak, S. S. Liu, and C. Fruehling-Wall, “Correlation of knee and hindfoot deformities in advanced knee OA: compensatory hindfoot alignment and where it occurs.,” *Clinical orthopaedics and related research*, vol. 473, pp. 166–74, jan 2015.
- [30] F. Krause, A. Barandun, G. Klammer, I. Zderic, B. Gueorguiev, and T. Schmid, “Ankle joint pressure changes in high tibial and distal femoral osteotomies: a cadaver study.,” *The Bone and Joint Journal*, vol. 99-B, pp. 59–65, jan 2017.
- [31] E. M. Suero, Y. Sabbagh, R. Westphal, N. Hawi, M. Citak, F. M. Wahl, C. Krettek, and E. Liodakis, “Effect of medial opening wedge high tibial osteotomy on intraarticular knee and ankle contact pressures.,” *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 33, pp. 598–604, apr 2015.
- [32] S. Gursu, H. Sofu, P. Verdonk, and V. Sahin, “Effects of total knee arthroplasty on ankle alignment in patients with varus gonarthrosis: Do we sacrifice ankle to the knee?,” *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, vol. 24, pp. 2470–5, aug 2016.
- [33] C. W. Kim, H. C. Gwak, J. H. Kim, C. R. Lee, J. G. Kim, M. Oh, and J. H. Park, “Radiologic Factors Affecting Ankle Pain Before and After Total Knee Arthroplasty for the Varus Osteoarthritic Knee,” *Journal of Foot and Ankle Surgery*, vol. 57, pp. 865–869, sep 2018.
- [34] I. Tonogai, D. Hamada, and K. Sairyō, “Radiographic changes in coronal alignment of the ankle joint immediately after primary total knee arthroplasty for varus knee osteoarthritis,” *Foot and Ankle Online Journal*, vol. 10(2):2, 2017.
- [35] J. H. Lee and B. O. Jeong, “Radiologic changes of ankle joint after total knee arthroplasty.,” *Foot and Ankle international*, vol. 33, pp. 1087–92, dec 2012.
- [36] M. Rühling, S. Kirschbaum, C. Perka, and F. Graef, “Functional gait analysis reveals insufficient hindfoot compensation for varus and valgus osteoarthritis of the knee,” *International Orthopaedics*, vol. 47, pp. 1233–1242, may 2023.
- [37] B. O. Jeong, T. Y. Kim, J. H. Baek, H. Jung, and S. H. Song, “Following the correction of varus deformity of the knee through total knee arthroplasty, significant compensatory changes occur not only at the ankle and subtalar

- joint, but also at the foot,” *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, vol. 26, no. 11, pp. 3230–3237, 2018.
- [38] V. Kapoor, M. M. Ghosh, A. Chatterjee, K. Debnath, and G. M. Hasan, “Ankle and Hindfoot Alignment Changes in Advanced OA Varus Knees After Cruciate Retaining Total Knee Arthroplasty: A Prospective Cohort Study.,” *Indian journal of orthopaedics*, vol. 56, pp. 2101–2109, dec 2022.
- [39] W. S. Cho, H. S. Cho, and S. E. Byun, “Changes in hindfoot alignment after total knee arthroplasty in knee osteoarthritic patients with varus deformity,” *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, vol. 25, no. 11, pp. 3596–3604, 2017.
- [40] H. B. Menz, A. B. Dufour, J. L. Riskowski, H. J. Hillstrom, and M. T. Hannan, “Foot posture, foot function and low back pain: the Framingham Foot Study,” *Rheumatology*, vol. 52, pp. 2275–2282, dec 2013.
- [41] C. B. Blackwood, T. J. Yuen, B. J. Sangeorzan, and W. R. Ledoux, “The Midtarsal Joint Locking Mechanism,” *Foot & Ankle International*, vol. 26, pp. 1074–1080, dec 2005.
- [42] P. Kumar, P. K. Gowda, and M. Chhabra, “Foot Biomechanics and Relation to the Gait Cycle,” *Journal of Foot and Ankle Surgery (Asia Pacific)*, vol. 5, no. 2, pp. 68–72, 2018.
- [43] S. A. Stufkens, A. Barg, L. Bolliger, J. Stucinskas, M. Knupp, and B. Hintermann, “Measurement of the Medial Distal Tibial Angle,” *Foot & Ankle International*, vol. 32, pp. 288–293, mar 2011.
- [44] N. Krähenbühl, T. Horn-Lang, B. Hintermann, and M. Knupp, “The subtalar joint: A complex mechanism.,” *EFORT Open reviews*, vol. 2, pp. 309–316, jul 2017.
- [45] P. A. Gribble, “Evaluating and Differentiating Ankle Instability,” *Journal of Athletic Training*, vol. 54, pp. 617–627, jun 2019.
- [46] T. J. Hubbard, C. Hicks-Little, and M. Cordova, “Changes in ankle mechanical stability in those with knee osteoarthritis.,” *Archives of physical medicine and rehabilitation*, vol. 91, pp. 73–7, jan 2010.

- [47] G. M. Freisinger, E. E. Hutter, J. Lewis, J. F. Granger, A. H. Glassman, M. D. Beal, X. Pan, L. C. Schmitt, R. A. Siston, and A. M. Chaudhari, “Relationships between varus-valgus laxity of the severely osteoarthritic knee and gait, instability, clinical performance, and function,” *Journal of Orthopaedic Research*, vol. 35, pp. 1644–1652, aug 2017.
- [48] S. Okamoto, K. Okazaki, H. Mitsuyasu, S. Matsuda, and Y. Iwamoto, “Lateral Soft Tissue Laxity Increases but Medial Laxity Does Not Contract With Varus Deformity in Total Knee Arthroplasty,” *Clinical Orthopaedics & Related Research*, vol. 471, pp. 1334–1342, apr 2013.
- [49] J. Bellemans, H. Vandenuecker, J. Vanlauwe, and J. Victor, “The influence of coronal plane deformity on mediolateral ligament status: an observational study in varus knees.,” *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA*, vol. 18, pp. 152–6, feb 2010.
- [50] F. Graef, M. Rühling, C. Gwinner, H. Hommel, S. Tsitsilonis, and C. Perka, “Increasing grades of frontal deformities in knee osteoarthritis are not associated with ligamentous ankle instabilities,” *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, jun 2022.
- [51] F. Graef, R. Falk, S. Tsitsilonis, C. Perka, R. K. Zahn, and H. Hommel, “Correction of excessive intraarticular varus deformities in total knee arthroplasty is associated with deteriorated postoperative ankle function,” *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, vol. 28, pp. 3758–3765, dec 2020.
- [52] F. Graef, H. Hommel, R. Falk, S. Tsitsilonis, R. K. Zahn, and C. Perka, “Correction of severe valgus osteoarthritis by total knee arthroplasty is associated with increased postoperative ankle symptoms,” *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, vol. 30, pp. 527–535, feb 2022.
- [53] P. A. Vendittoli, S. Martinov, and W. G. Blakeney, “Restricted Kinematic Alignment, the Fundamentals, and Clinical Applications,” *Frontiers in Surgery*, vol. 8, no. July, pp. 1–12, 2021.

Danksagung

Mein großer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Carsten Perka. Er hatte die Idee für dieses Forschungsvorhaben als Habilitationsprojekt und unterstützte mich in der Durchführung sämtlicher Phasen der Planung, der Datenerhebung, Diskussion der Ergebnisse und Publikation der Studien. Vielen Dank auch für das immer zeitnahe und konstruktive Feedback.

Ich möchte mich auch sehr bei Herrn Univ.-Prof. Dr. med. Ulrich Stöckle bedanken, der mich in der Durchführung dieses Projekts unterstützte und der mir wichtige Freiräume gewährte, ohne welche diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bei Herrn Prof. Dr. med. Hagen Hommel möchte ich mich ebenfalls vielmals bedanken. Durch die Zusammenarbeit mit ihm konnten wir die Daten aus seiner Klinik in gemeinsamen Studien publizieren und die prospektive Studie vorbereiten. Für die erfolgreiche Zusammenarbeit bei Publikationen möchte ich mich ebenfalls bei Priv.-Doz. Dr. med. Robert Zahn, Dr. med. Marcel Niemann und Dr. med. Stephanie Kirschbaum bedanken.

Mein Dank gilt auch Herrn Priv.-Doz. Dr. med. Serafeim Tsitsilonis, der viele Jahre mein klinischer und wissenschaftlicher Mentor war und mir trotz des Klinikalltags Freiräume für die Durchführung dieser Studien schaffte. Hier möchte ich mich auch sehr bei Herrn Dr. med. Tobias Gehlen bedanken, der meine Forschungszeiten – trotz dadurch entstehender Mehrbelastung – unterstützte.

Ein großer und herzlicher Dank gilt Frau Marlene Rühling, welche als Doktorandin für die prospektiven Studien sämtliche – sehr aufwendigen – klinischen Untersuchungen der Patienten sorgsam und gewissenhaft durchführte und Wiederbestellungen organisierte. Ich erinnere mich lebhaft daran, wie wir mit meiner Frau zusammen nachts, mit Lötkolben und per Videocall in die USA, die Platine des Arthrometers reparierten.

Mein inniger Dank gilt meiner Frau Dr. med. Josefine Graef, die Verständnis für den Aufwand dieser Arbeit und der Publikationen hatte, die hierfür häufig Ihre Interessen hinter meine stellte und die mich in mühsamen Zeiten motivierte, weiter zu machen.

Erklärung

§ 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wurde,
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern/Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden,
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité–Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

.....
Datum

.....
Dr. med. Frank Graef