

Aus der Klinik und Poliklinik für Orthopädie, Unfallchirurgie und Plastisch-Ästhetische
Chirurgie
der Universität zu Köln
Direktor: Universitätsprofessor Dr. med. P. Eysel

Topografische Beziehung der Arteria poplitea zur Tibia in Abhängigkeit des Beugegrades bei hoher proximaler Tibiaosteotomie

Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Laura Houben
aus Koblenz

promoviert am 02. Februar 2026

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachter: Professor Dr. med. J. Oppermann
2. Gutachter: Privatdozent Dr. med. C. Köhler

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die Anfertigung der CT-Aufnahmen wurde ohne meine Mitarbeit im Zentrum Anatomie der Uniklinik Köln von Herrn Dr. med. Baltin durchgeführt und mir zur Verfügung gestellt. Die Erhebung und Auswertung aller Messdaten mit dem Bilddarstellungs- und -bearbeitungsprogramm IMPAX EE R20 XIX SU1 der Firma Agfa HealthCare wurde von mir durchgeführt.

Die statistische Auswertung der Daten ist von mir mit Unterstützung von Herrn Dr. med. Philipp Egenolf durchgeführt worden.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 28.09.2025

Unterschrift:

Danksagung

Mein Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr. med. Johannes Oppermann für die Bereitstellung des Promotionsthemas sowie seine kontinuierliche Unterstützung und Kritik bei der Fertigstellung dieser Arbeit, neben dem klinischen Alltag.

Für die Durchführung und Bereitstellung der CT-Aufnahmen möchte ich Herrn Dr. med. Christoph Baltin ganz herzlich danken.

Weiterhin möchte ich Herrn Dr. med. Philipp Egenolf für seine wertvolle Unterstützung bei der statistischen Auswertung meinen Dank aussprechen.

Für die Auswahl und Bereitstellung der Humanpräparate danke ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Martin Scaal und Frau Jutta Knifka aus dem Zentrum Anatomie der Uniklinik Köln.

Außerdem danke ich der zentralen wissenschaftlichen Werkstatt der Universitätsmedizin Köln für die Anfertigung der speziellen Haltevorrichtung für die Kniepräparate.

Mein ganz besonderer Dank gilt den Körperspender:innen, die mit ihrer selbstlosen Körperspende die medizinische Forschung unterstützt haben. Ihre großzügige Geste wird in dieser Arbeit respektvoll gewürdigt und hat einen bedeutenden Beitrag geleistet.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1. ZUSAMMENFASSUNG	7
2. EINLEITUNG	8
2.1. Anatomie des Kniegelenks	8
2.2. Lagevarianten der Arteria poplitea	8
2.3. Gonarthrose	11
2.3.1. Ätiologie und Epidemiologie	12
2.3.2. Klassifikation	12
2.3.3. Achsdeformitäten	13
2.3.4. Therapiemöglichkeiten	14
2.4. Hohe Tibiale Osteotomie (HTO)	15
2.4.1. Durchführung der HTO	16
2.4.2. Verletzungsmuster der A. poplitea bei HTO	17
2.5. Einfluss der intraoperativen Lagerung auf Verletzungen der Arteria poplitea bei HTO	18
2.6. Ziel der Arbeit	20
3. MATERIAL UND METHODEN	21
3.1. Technisches Equipment	21
3.2. Datenerhebung und Methodik	21
3.2.1. Humanpräparate	21
3.2.2. Präparation der Humanpräparate und Anfertigung der CT-Aufnahmen	22
3.2.3. Auswertung der CT-Aufnahmen	24
3.3. Statistische Methoden	28
4. ERGEBNISSE	30
4.1. Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 0° Beugung	30
4.2. Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 30° Beugung	30

4.3.	Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 60° Beugung	31
4.4.	Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 90° Beugung	32
4.5.	Intrarater-Reliabilität von Messung 1 und 2	34
4.5.1.	Korrelation von Messung 1 und 2 auf Messhöhe 1 (Distanz 1)	34
4.5.2.	Korrelation von Messung 1 und 2 auf Messhöhe 2 (Distanz 2)	35
4.6.	Normalverteilung der Daten	35
4.7.	Abstand A. poplitea zur Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 (Distanz 1) in Abhängigkeit der Beugegrade 0°, 30°, 60°, 90°	39
4.8.	Abstand A. poplitea zur Tibiahinterkante auf Messhöhe 2 (Distanz 2) in Abhängigkeit der Beugegrade 0°, 30°, 60°, 90°	40
4.9.	Vergleich des Abstands zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante des linken und rechten Kniegelenks innerhalb einer Körperspender:in	42
5.	DISKUSSION	45
6.	LITERATURVERZEICHNIS	50
7.	ANHANG	54
7.1.	Abbildungsverzeichnis	54
7.2.	Tabellenverzeichnis	55

Abkürzungsverzeichnis

M.	Musculus
A.	Arteria
Aa.	Arteriae
N.	Nervus
cm	Zentimeter
HTO	High Tibial Osteotomy / Hohe tibiale Osteotomie
OWHTO	Open Wedge High Tibial Osteotomy / Aufklappende hohe tibiale Osteotomie
MRT	Magnetresonanztomographie
CT	Computertomographie
a.p.	Anterior-posterior
mm	Millimeter

1. Zusammenfassung

Die Behandlung einer Achsdeformität der unteren Extremität mit Hilfe einer Umstellungsosteotomie ist ein etabliertes Verfahren zur Prophylaxe der Gonarthrose, welches immer häufiger bei jungen, sportlich aktiven Patient:innen angewendet wird. Die aufklappende Technik hat sich bei der hohen tibialen Osteotomie als Methode der Wahl durchgesetzt. Bei dieser Operation besteht das Risiko, die Arteria poplitea in der Kniekehle durch die horizontale Osteotomie oder die Eröffnung des Osteotomiespalts mittels Meißel zu verletzen. Dies kann einerseits zu einer intraoperativen Blutung und andererseits zu einer Vielzahl von postoperativen Komplikationen führen. Somit ist es maßgeblich, dieses Risiko so gering wie möglich zu halten. Der Einfluss der intraoperativen Lagerung des Beines auf das Verletzungsrisiko wird in der Literatur immer wieder diskutiert. Die Ergebnisse sind jedoch kontrovers und es kann keine endgültige Handlungsempfehlung abgeleitet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden 17 Humankniegelenkspräparate mittels Computertomographie in 0°, 30°, 60° und 90° Beugung untersucht. Anschließend wurde anhand der angefertigten Bilder der Abstand der Arteria poplitea zur Tibiahinterkante auf zwei verschiedenen Höhen entsprechend der gängigen Osteotomiehöhen (genannt Distanz 1 und 2) distal des Tibiaplateaus ausgemessen.

Im Mittelwertvergleich konnte keine Signifikanz für den Unterschied des Abstands zwischen Arterie und Tibia, in Abhängigkeit von den oben genannten vier Beugegraden, nachgewiesen werden. Zwar konnte ein Trend zum größten Abstand zwischen Arterie und Tibia in 90° Beugung auf Höhe von Distanz 1, sowie in 0° Lagerung auf Höhe von Distanz 2 beobachtet werden, dieser ist jedoch aufgrund der sehr kleinen absoluten Abstandswerte von fraglicher klinischer Relevanz. Eine Korrelation zwischen zunehmendem Beugegrad und Abstand war nicht erkennbar.

Um eine mögliche relevante intraindividuelle Lagevarianz der A. poplitea zu untersuchen, wurden zudem rechte und linke Kniegelenke derselben Körperspender:innen verglichen. Hier konnte kein signifikanter Unterschied der Abstände im Rechts-Links-Vergleich in den unterschiedlichen Lagerungspositionen nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie unterstreichen die Relevanz der standardisierten Anwendung weiterer Schutzmaßnahmen für die Arterie während der Durchführung einer aufklappenden hohen tibialen Osteotomie. Dazu gehören das Einsetzen von Retraktoren, der Winkel des Sägeschnitts oder die präoperative Anfertigung einer Magnetresonanztomographie, um Lagevarianten der Arteria poplitea zu antizipieren und das Verletzungsrisiko zu minimieren.

2. Einleitung

2.1. Anatomie des Kniegelenks

Das Kniegelenk setzt sich aus dem Unterschenkelknochen (Tibia), dem Oberschenkelknochen (Femur) sowie der Kniescheibe (Patella) zusammen. Diese drei Knochen bilden innerhalb des Kniegelenks zwei Teilgelenke, das Femorotibialgelenk und das Femoropatellargelenk. Sie sind gemeinsam von einer Kapsel umgeben.

Funktionell ist das Kniegelenk ein Drehscharniergelenk. Es erlaubt zwei Freiheitsgrade, zum einen die Extension und Flexion, zum anderen, vor allem in Flexion, die Innen- und Außenrotation.

Zwischen dem flachen Plateau der Tibia und den runden Femurkondylen befinden sich zur Stabilität und zum Ausgleich der Inkongruenz zwei halbmondförmige Menisken aus Faserknorpel. Diese bestehen hauptsächlich aus Wasser und Kollagen¹. Sie wirken als Stoßdämpfer im Gelenk und wandeln Druck- in Zugkräfte um². Stabilisiert wird das Kniegelenk außerdem durch zahlreiche Muskeln und Bänder. Hier sind vor allem das vordere und hintere Kreuzband, das mediale und laterale Seitenband sowie der Musculus (M.) quadriceps femoris wichtig³.

In der Fossa poplitea verläuft das Gefäß-Nervenbündel zur Versorgung des Kniegelenks und der Kniekehle. Dieses setzt sich von tief nach oberflächlich aus der Arteria (A.) poplitea, der Vena poplitea und dem Nervus (N.) ischiadicus, beziehungsweise seinen beiden Ästen N. tibialis und N. fibularis communis, zusammen.³

Die A. poplitea bildet die Fortsetzung der A. femoralis nach ihrem Durchtritt durch den Hiatus adductorius, welcher durch den M. adductor magnus an der Oberschenkelrückseite gebildet wird. Sie zieht durch die Fossa poplitea und verläuft posterior des M. popliteus, welcher am Condylus lateralis femoris entspringt und medial an der Facies posterior tibiae ansetzt. Zur Versorgung des Kniegelenks gibt die A. poplitea fünf Äste ab, die zum Teil paarig auftreten: die Arteriae (Aa.) superiores lateralis und medialis genus, die A. genus media und die Aa. inferiores lateralis und medialis genus. Außerdem entspringen aus ihr die paarigen Aa. surales, welche die beiden Köpfe des M. gastrocnemius versorgen. Auf Höhe des M. popliteus, kaudal des Kniegelenks, gibt die A. poplitea die A. tibialis anterior ab und verläuft schließlich weiter als A. tibialis posterior, aus welcher die A. peronea entspringt.³

2.2. Lagevarianten der Arteria poplitea

Die Kenntnis über anatomische Varianten der A. poplitea ist bei orthopädischen Operationen im Bereich des Kniegelenks, wie beispielsweise der hohen tibialen Osteotomie, sehr wichtig.

Unkenntnis kann zu Gefäßverletzungen mit Blutungsereignissen, Ischämien, Gefäßdissektionen und -aneurysmen führen, welche potenziell vermeidbar sind⁴⁻⁶.

Bereits 1929 wurden von Senior abnorme Lagevarianten beschrieben^{4,7}. Im Jahr 1985 klassifizierten Lippert und Pabst verschiedene Lagevarianten der A. poplitea⁸. Diese Klassifikation wurde 1989 von Kim et al. modifiziert⁹.

Die modifizierte Klassifikation nach Kim et al. beschreibt die Höhe und Art der Aufteilung der A. poplitea in ihre Äste, die A. tibialis anterior, A. tibialis posterior und A. peronea, und setzt sich aus drei primären Lagetypen und zehn Sublagetypen zusammen^{5,9}. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

Der Lagevariante Typ I tritt am häufigsten auf und bezeichnet eine sich distal des Kniegelenks aufteilende A. poplitea (**Abbildung 1**).

Der Subtyp I-A beschreibt die Aufzweigung der A. poplitea distal des Kniegelenks in die fortlaufende A. tibialis posterior und die sich nach lateral abzweigende A. tibialis anterior. Die A. peronea entspringt etwas weiter distal aus der A. tibialis posterior.

Als Subtyp I-B wird eine Trifurkation der A. poplitea bezeichnet. Hier liegen alle drei abgehenden Äste der A. poplitea mit ihrem Ursprung weniger als 0,5 cm voneinander entfernt. Subtyp I-C bezeichnet die aus der A. poplitea fortlaufende A. tibialis posterior und einen nach lateral abzweigenden gemeinsamen Truncus von A. tibialis anterior und A. peronea.^{4,5,9}

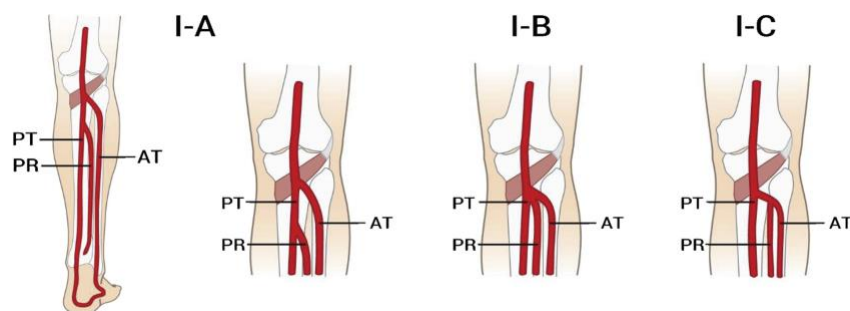


Abbildung 1: Typ I Lagevarianten der Arteria poplitea nach Kim et al. PT = A. tibialis posterior, AT = A. tibialis anterior, PR = A. peronea. (Bild adaptiert von Tomaszewski et al.⁵, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier)

Als Typ II werden alle Lagevarianten benannt, bei welchen sich die A. poplitea bereits proximal oder auf Höhe des Kniegelenks aufteilt (**Abbildung 2**).

Der Subtyp II-A zeigt einen medial oder lateral, proximal oder auf Höhe des Kniegelenks liegenden Abgang der A. tibialis anterior.

Beim Subtyp II-A2 zweigt diese medialseitig ab und zieht anterior des M. popliteus nach lateral. Die A. tibialis posterior läuft als Fortsetzung der A. poplitea und gibt weiter distal die A. peronea ab.

Zeigt sich ein gemeinsamer Truncus von A. tibialis anterior und A. peronea, welcher nach lateral zieht, so wird dies als Subtyp II-B klassifiziert.

Bezeichnend für den Subtyp II-C ist ein Abgang der A. peronea aus der A. poplitea proximal oder auf Höhe des Kniegelenks, proximal der Abgänge von A. tibialis anterior und posterior.^{4,5,9}

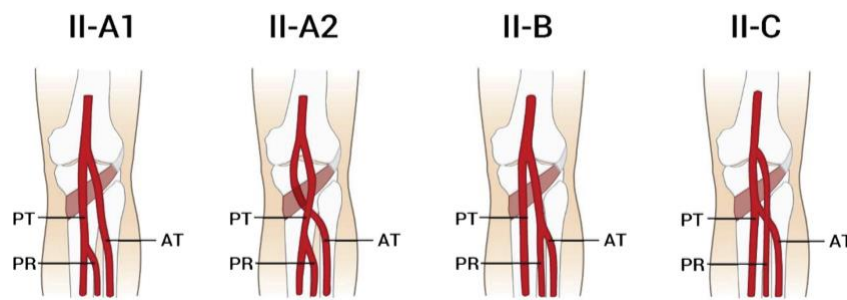


Abbildung 2: Typ II Lagevarianten der Arteria poplitea nach Kim et al. PT = A. tibialis posterior, AT = A. tibialis anterior, PR = A. peronea. (Bild adaptiert von Tomaszewski et al.⁵, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier)

Jede Art von hypo- oder aplastischem Gefäßast wird als Typ III Lagevariante klassifiziert (**Abbildung 3**).

Der Subtyp III-A bezeichnet eine Hypo- oder Aplasie der A. tibialis posterior, Subtyp III-B der A. tibialis anterior und Subtyp III-C von A. tibialis anterior und posterior.^{4,5,9}

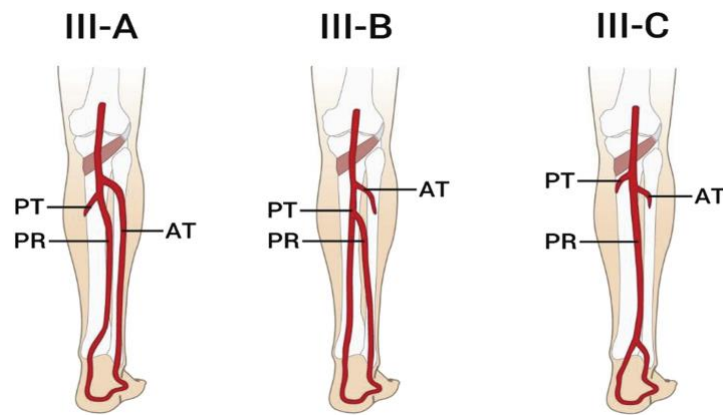


Abbildung 3: Typ III Lagevarianten der Arteria poplitea nach Kim et al. PT = A. tibialis posterior, AT = A. tibialis anterior, PR = A. peronea. (Bild adaptiert von Tomaszewski et al.⁵, mit freundlicher Genehmigung von Elsevier)

Sowohl die Meta-Analyse von Tomaszewski et al. mit 10.385 in die Studie eingeschlossenen unteren Extremitäten, als auch die Meta-Analyse von Kropman et al. mit 7671 eingeschlossenen unteren Extremitäten kamen zu dem Ergebnis, dass mit 92% bzw. 91% Anteil der Subtyp I-A am häufigsten vertreten ist. Weitere regelmäßig vorkommende Lagevarianten sind Subtyp II-A mit 2,2% bzw. 2,9%, Subtyp I-B mit 2,4% bzw. 2% und Subtyp III-A mit 1,7% bzw. 2,5%. Die verbleibenden Lagetypen sind mit einer kumulierten Häufigkeit von unter 2% sehr selten.^{4,5}

Vor allem Patient:innen mit Typ II Lagevarianten sind bei orthopädischen Eingriffen wie der hohen tibialen Osteotomie im Bereich des Kniegelenks gefährdet^{4,5}. Dies ist vor allem durch den Subtyp II-A2 begründet, welcher sich bei annähernd 50% der Patient:innen mit hohem Abgang der A. tibialis anterior findet. Bei diesen Patient:innen verläuft die medial entspringende, nach lateral laufende A. tibialis anterior nicht posterior, sondern anterior des schützenden Musculus popliteus und steht dadurch ungeschützt in direktem Kontakt zur Tibia.^{10,11}

2.3. Gonarthrose

Arthrose ist weltweit die häufigste Gelenkerkrankung im Erwachsenenalter^{12,13}. Aufgrund der demografischen Alterung und einer mit zunehmendem Alter ansteigenden Prävalenz ist sie eine bedeutsame Erkrankung in der heutigen Gesellschaft¹³⁻¹⁵. Die Arthrose des Kniegelenks, die Gonarthrose, ist der am häufigsten vorkommende Arthrose-Typ^{16,17}.

Sie beschreibt eine chronische, degenerative Erkrankung, welche sich in einer progredienten Zerstörung des Gelenkknorpels äußert^{18,19}. Sie kann sich femoro-tibial oder femoro-patellar am Knorpel manifestieren und ebenso andere Gelenkstrukturen, wie Muskeln, Bänder, Knochen oder die Gelenkkapsel schädigen¹⁵. Funktionseinschränkungen im Kniegelenk, bis zum Funktionsverlust, können das Ergebnis dieser Erkrankung sein¹⁹. Kennzeichnend für eine Gonarthrose sind progrediente Knieschmerzen, welche zunächst bei Belastung und später auch in Ruhe auftreten. Der Funktionsverlust und die Schmerzen führen häufig zu enormen Einschränkungen bei alltäglichen Aktivitäten und Verlust an Lebensqualität¹⁵.

2.3.1. Ätiologie und Epidemiologie

Grundsätzlich werden eine primäre und eine sekundäre Gonarthrose unterschieden.

Die primäre Gonarthrose ist idiopathisch.

Die Genese der sekundären Gonarthrose kann angeboren, posttraumatisch, postoperativ, durch hormonelle Erkrankungen oder durch aseptische Knochennekrosen bedingt sein. Zudem können varische und valgische Achsfehlstellungen kausal an der Entstehung einer Gonarthrose beteiligt sein.¹⁶ So zeigt eine Studie von Sharma et al., dass ein Kniegelenk ohne Knorpelschäden mit Varusfehlstellung ein 3,5-fach erhöhtes Risiko hat, eine Gonarthrose zu entwickeln.^{20,21} Weitere endogene und exogene Risikofaktoren, die das Auftreten einer sekundären Gonarthrose begünstigen, sind das Alter, das weibliche Geschlecht, die europäische Abstammung, Makrotraumata, repetitive Mikrotraumata, Übergewicht und Lifestyle-Faktoren wie Rauchen und Alkohol.^{16,22}

Angaben über die genaue Prävalenz und Inzidenz der Gonarthrose variieren in der Literatur erheblich. Gründe hierfür sind beispielsweise die schlechte Korrelation von radiologischen und klinischen Befunden, die variierenden Angaben je nach untersuchter Altersgruppe oder Land der erhobenen Studie^{16,19,23}. Durchschnittlich findet sich eine Prävalenz der Gonarthrose von 10-40% bei über 60-Jährigen^{15,16,19}.

2.3.2. Klassifikation

Die Diagnosestellung der Gonarthrose erfolgt einerseits klinisch anhand einer Anamneseerhebung und einer körperlichen Untersuchung sowie radiologisch zur Objektivierung und Sicherung der Diagnose.

Als radiologische Stadieneinteilung der Arthrose wird häufig die Klassifikation nach Kellgren und Lawrence genutzt. Sie beschreibt vier Grade der Knorpelveränderung (**Abbildung 4**).²⁴

Der Normalbefund wird mit Stadium 0 angegeben. Werden im Röntgenbild fraglich Osteophyten oder eine Gelenkspaltverschmälerung gesehen, so ist dies dem Stadium 1 zuzuordnen. Stellen sich im Röntgenbild Osteophyten dar und fraglich eine Gelenkspaltverschmälerung, wird dies als Stadium 2 klassifiziert. Das Stadium 3 kennzeichnet sich durch eine Verschmälerung des Gelenkspalts, multiple Osteophyten, eine leichte Sklerose und gegebenenfalls bereits eine Verformung der Gelenkpartner. Das Stadium 4 definiert sich wie das Stadium 3, jedoch intensiver ausgeprägt.^{24,25}

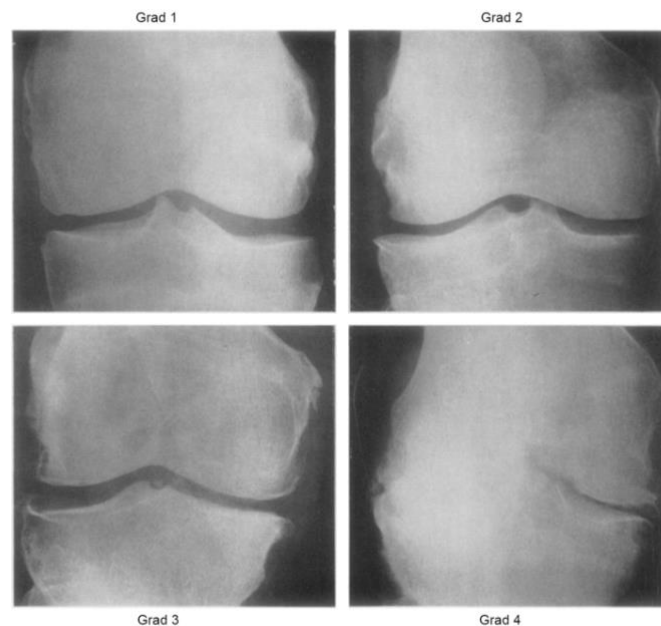


Abbildung 4: Die vier Stadien der Gonarthrose. Modifizierte Abbildung aus dem 1957 veröffentlichten Artikel von Kellgren and Lawrence²⁵.

2.3.3. Achsdeformitäten

Als Pagonarthrose wird die Arthrose des gesamten Kniegelenks bezeichnet. Im Unterschied dazu können auch lediglich einzelne Kompartimente des Kniegelenks von einer Arthrose betroffen sein. Dies kann auftreten, wenn durch eine Achsfehlstellung die Kraftübertragung auf das Kniegelenk ungleich erfolgt und es dadurch zu einer lokalen Überbeanspruchung durch die Druckbelastung kommt. Grundsätzlich wird zwischen einem Genu varum (O-Bein) und Genu valgum (X-Bein) unterschieden. Bei der Varusfehlstellung verläuft die Beinachse medial und bei der Valgusfehlstellung lateral des Kniegelenks.²⁶

Selbst bei Alltagsaktivitäten wie Gehen, Laufen und insbesondere Treppensteigen sind die Kräfte, die auf das Kniegelenk wirken, mit dem bis zu 4-fachen des Körpergewichts sehr

groß²⁷. Während sportlicher Aktivität kann die Belastung auf das bis zu 10-fache und bei Extremsport, wie z.B. Gewichtheben, bis auf das 25-fache des Körpergewichts gesteigert werden²⁸. Daher ist der Verlauf der Beinachse in einem komplexen Zusammenspiel mit Menisken, Bändern und Muskeln für die Kniestabilität und -funktion enorm wichtig, um eine lokale Fehlbelastung zu vermeiden.

Es existieren unterschiedliche Ursachen für die Entstehung einer Achsfehlstellung. Prinzipiell kann sie angeboren, idiopathisch oder erworben sein.

Im Erwachsenenalter sind die Ursachen hauptsächlich degenerative Knorpelschäden, posttraumatische Fehlstellungen, beispielsweise durch rezidivierende Kniegelenksdistorsions-traumata bei Sportler:innen, oder postoperative Veränderungen der Gelenkstellung, zum Beispiel nach einer Meniskusresektion^{29,30}.

Im Kindesalter kann sich ein Genu varum durch seltene Erkrankungen wie Rachitis, Achondroplasie oder Morbus Blount entwickeln. Bei Letzterem geschieht dies durch eine Wachstumsstörung der medialen Wachstumsfuge.^{31,32} Auch intensives Fußballtraining im Wachstumsalter kann die Bildung eines Genu varums begünstigen, da es hierbei zu einer Überlastung der medialen Wachstumsfuge kommen kann³³.

Die Ausbildung eines Genu valgums wird durch Adipositas begünstigt, insbesondere beim weiblichen Geschlecht³⁴. Aber auch seltene Erkrankungen wie beispielsweise Homozystinurie können Ursache der Fehlstellung sein³⁵.

2.3.4. Therapiemöglichkeiten

Arthrotische Gelenkveränderungen sind irreversibel. Es gibt diverse konservative und operative Therapieoptionen. Zur Auswahl eines geeigneten Therapieverfahrens sind einerseits der empfundene Leidensdruck sowie andererseits das Ausmaß und die Lokalisation des Knorpelschadens relevant.

Wenn möglich, sollten zunächst konservative Maßnahmen wie Physiotherapie, Schmerztherapie etc. ausgeschöpft werden, um eine Operation hinauszuzögern. Kann hierdurch keine zufriedenstellende Symptomkontrolle erreicht werden, empfiehlt sich die Implantation einer Endoprothese. Bei einer Pangenarthrose ist die Totalendoprothese die Therapie der Wahl.¹⁶

Besteht eine Arthrose ohne relevante Achsfehlstellung einzig des medialen oder des lateralen Kniekompartiments bei intaktem Bandapparat, kann die Implantation einer unikompartimentellen Endoprothese in Erwägung gezogen werden. Der Vorteil im Gegensatz zur bikompartimentellen Prothese besteht in einem besseren Knochenerhalt, verbessertem Bewegungsumfang und einer schnelleren Erholungsrate³⁶⁻³⁸. Da Prothesen durchschnittliche Überlebensraten von 10-20 Jahren aufweisen, profitieren vor allem jüngere Patient:innen von

der unikompartmentellen Prothese³⁷. Die Revision von einer unikompartmentellen auf eine bikompartmentelle Prothese ist, im Gegensatz zu einer Revision einer bikompartmentellen Primärendoprothese, mit einer kürzeren Operationszeit und weniger Knochenverlust verbunden^{39,40}.

Aufgrund der Irreversibilität von Knorpelschäden sind zudem prophylaktische Maßnahmen von zentraler Bedeutung. Hierbei müssen die oben genannten prädisponierenden Risikofaktoren frühzeitig, also vor dem Auftreten arthrotischer Veränderungen, erkannt werden. Hierzu gehören die Achsfehlstellungen der unteren Extremität.

Liegt eine Achsfehlstellung im Kindesalter vor, muss zunächst evaluiert werden, ob die Wachstumsfuge bereits geschlossen ist. Bei offener Wachstumsfuge ist zur Korrektur häufig eine temporäre Epiphyseodesse ausreichend.⁴¹ Sobald die Wachstumsfuge geschlossen und der Knorpel weitestgehend erhalten ist, kann die Achse nur noch mit Hilfe einer Umstellungsosteotomie korrigiert werden²⁶.

2.4. Hohe Tibiale Osteotomie (HTO)

Tibiale und femorale Umstellungsosteotomien werden bereits seit 100 Jahren in der Literatur beschrieben und sind seit den 1960er Jahren eine häufig durchgeführte Operation^{42,43}. Während die Umstellungsosteotomie damals vorwiegend bei älteren Patient:innen durchgeführt wurde, profitieren mittlerweile häufig jüngere, sportlich aktive Patient:innen unter 60 Jahren von der OP^{26,44}. Insbesondere die hohe tibiale Osteotomie in aufklappender Technik (im Folgenden auch als OWHTO = Open Wedge High Tibial Osteotomy abgekürzt) hat sich bei einer Überbelastung des medialen Kniekompartiments, bedingt durch eine Varus-Achsfehlstellung im Gelenk, etabliert²⁶.

Die valgisierende OWHTO wird durchgeführt, um die mechanische Achse und somit die einseitige Belastung des medialen Kniekompartiments auf das nicht betroffene laterale Kompartiment zu verschieben^{45,46}.

Die präoperative Planung kann mit Hilfe verschiedener Methoden durchgeführt werden. Häufige Anwendung findet die Methode nach Miniaci, welche auf den Grundlagen von Fujisawa basiert⁴⁷⁻⁵⁰. Hierbei werden anhand präoperativ angefertigter Röntgenbilder der Korrekturwinkel und die Keilbasishöhe der Osteotomie bestimmt. Der Umfang der Korrektur hängt dabei von den individuellen anatomischen Gegebenheiten sowie der individuellen Pathologie der Patient:in ab.²⁶ Eine präoperative Magnetresonanztomographie (MRT) kann zur Beurteilung der Bandstabilität und Lageanomalien der Gefäße durchgeführt werden. Dies ist häufig jedoch kein Standard.⁵¹

Noch nicht hinreichend untersucht wurde, inwieweit die Durchführung einer HTO die Implantation einer Endoprothese im Vergleich zur konservativen Behandlung von Patient:innen hinauszögert. Gemäß einem Cochrane-Review von Brouwer et al. zeigte sich jedoch, dass Patient:innen nach Erhalt einer HTO eine reduzierte Schmerzsymptomatik und eine verbesserte Kniefunktion aufwiesen⁵². Auch gibt es einzelne Studien mit vielversprechenden Erfolgsraten nach Durchführung einer HTO. So konnte in einer Untersuchung von Harris et al. in 72% der Patient:innen 20 Jahre nach Durchführung der HTO die Implantation einer Endoprothese vermieden werden⁵³.

2.4.1. Durchführung der HTO

Für die Durchführung einer OWHTO sind verschiedene Systeme unterschiedlicher Firmen erhältlich. Hier zeigen sich in den OP-Anleitungen der Firmen kleine Abweichungen der OP-Technik, des Hilfsinstrumentariums und der Retention des Osteotomiespalts. Allen Systemen gemeinsam ist jedoch, dass eine Osteotomie der medialen, anterioren und posterioren Tibia durchgeführt werden muss, welche bis hin zur lateralen Corticalis reicht.⁵⁴⁻⁵⁷ Somit besteht bei allen Systemen die Gefahr, das Neurovaskuläre Bündel in der Kniekehle zu verletzen.

Für ein besseres Verständnis der folgenden Kapitel wird nun der Operationsablauf einer OWHTO mit Hilfe des Tomofix Systems der Firma DePuy Synthes exemplarisch dargestellt.⁵⁴

Nachdem am medialen Unterschenkel, circa 1 cm unterhalb der Gelenklinie, mit einer Längsinzision der Zugang gesetzt wurde, wird die Faszie gespalten und die Sehnen des Pes anserinus mit einem Haken nach distal gezogen. Das Innenband wird partiell abpräpariert, was die Sicht auf die posteriore Tibiakante freigibt. Ein Hohmann-Haken wird hinter der posterioren Tibiakante positioniert, um die dort laufenden neurovaskulären Strukturen zu schützen.

Folgend werden zwei Osteotomien, eine transversale und eine anteriore, durchgeführt (**Abbildung 5**).

Nach Bestimmung der Osteotomiehöhe werden für die Durchführung der transversalen Osteotomie zwei Kirschnerdrähte unter Röntgenkontrolle mit Ziel auf das präoperativ bestimmte Drehzentrum in die tibiale Metaphyse parallel eingebracht. Die transversale Osteotomie kann nun entlang der Kirschnerdrähte erfolgen. Im Anschluss wird die anteriore aufsteigende Osteotomie vorgenommen. Der so entstandene Spalt kann im nächsten Schritt mit Hilfe von Osteotomie-Meißeln oder einer Knochenspreizzange langsam aufgedehnt werden. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die laterale Kortikalis nicht frakturiert. Mit Hilfe eines Osteotomiespaltmessgeräts und eines Ausrichtstabs können unter Röntgen-

kontrolle die Größe des Osteotomiewinkels und die Beinachse kontrolliert werden. Wenn das Ergebnis zufriedenstellend ist, wird nun die Osteosynthese mittels LCP-Platte und winkelstabilen Schrauben am medialen Tibiaplateau proximal und distal der Osteotomie fixiert (**Abbildung 5**).

Abschließend findet eine erneute Röntgenkontrolle und ein schichtweiser Wundverschluss statt.⁵⁴

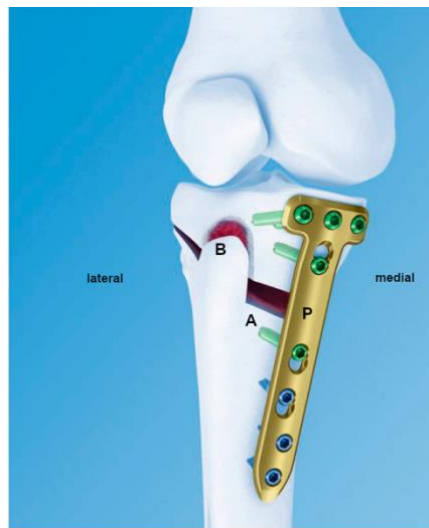


Abbildung 5: Osteotomiesägeschnitte bei hoher tibialer Osteotomie und Fixierung der Osteotomie mittels TomoFix Mediale Tibiakopfplatte. A = Transversale Osteotomie, B = Anteriore Osteotomie, P = Durch winkelstabile Schrauben in der Tibia fixierte Tomofixplatte. Modifizierte Abbildung aus dem Technique Guide für TomoFix Medial High Tibial Plate (MHT). For Medial High Tibial Osteotomies.⁵⁸ (Mit freundlicher Genehmigung von DePuy Synthes, einem Unternehmen der Johnson & Johnson MedTech)

2.4.2. Verletzungsmuster der A. poplitea bei HTO

Die Komplikationsrate der medialen OWHTO liegt im Durchschnitt bei 30%. Hier kommt es vor allem zu Minor-Komplikationen, wie beispielsweise einer Fraktur der lateralen Kortikalis (Hinge-Fraktur) oder oberflächlichen Wundheilungsstörungen. Major-Komplikationen wie tiefe Wundinfektionen oder Pseudarthrosen treten etwa in 8% der Fälle auf.^{46,59}

Eine wichtige Komplikation der HTO, die zu den Major-Verletzungen zählt, ist die Verletzung der A. poplitea in der Fossa poplitea. Mit der in der Literatur beschriebenen Komplikationsrate von ca. 2% ist diese nicht selten^{59,60}. Das Verletzungsrisiko wird zudem als unterschätzt und zu wenig untersucht eingeordnet, da die Komplikation oftmals intraoperativ nicht bemerkt wird und sich häufig erst durch postoperative Symptome oder als Zufallsbefund darstellt^{10,61}.

Kommt es zu einer Gefäßverletzung, ist in den meisten Fällen eine erneute aufwendige Operation notwendig, um die Komplikation zu beseitigen⁶².

Je nach Ausmaß der Gefäßverletzung kann es zu einer akuten arteriellen Blutung oder zu sich langsam entwickelnden Komplikationen, wie einem Aneurysma der A. poplitea oder einem Kompartmentsyndrom, kommen⁶³.

In der Literatur finden sich Case-Reports, welche die Verletzungsmuster der Arterie bei einer OWHTO beschreiben. So publizierten Attinger et al. den Fallbericht eines 42-jährigen Patienten, welcher nach einer OWHTO eine komplette Ruptur der A. poplitea aufwies. Intraoperativ wurde nach Öffnung der Blutsperre festgestellt, dass es sich um eine Blutung aus dem Knochen handelte. Daher konnte erst bei postoperativer Schwellung und Schmerzen im Bein eine Computertomographie-Angiographie durchgeführt und die Ruptur nach 24 Stunden diagnostiziert und operativ therapiert werden.⁵¹

Auch Georgoulis et al. berichten von einer klinischen Studie, in der es in einem Fall bei Durchführung einer HTO intraoperativ zu einer akuten Blutung der A. poplitea kam, welche mikrochirurgisch versorgt werden musste.⁶⁴

Shenoy et al. veröffentlichten einen Fall, bei dem nach einer komplikationslosen OWHTO zwei Wochen postoperativ ein Pseudoaneurysma festgestellt wurde, nachdem der Patient eine pulsierende Schwellung in der Kniekehle und ein Taubheitsgefühl des gesamten Beines bemerkte. Bei der gefäßchirurgischen Revisions-Operation zeigte sich der Ausgangspunkt des Aneurysmas an der Osteotomiestelle.⁶²

In einem Bericht von Franke et al. wird ein 49-jähriger Patient mit Komplikation nach HTO vorgestellt. Aufgrund einer minimalen Läsion der A. poplitea und einer Einblutung ins umliegende Gewebe entwickelte sich eine tiefe Beinvenenthrombose und ein Kompartmentsyndrom. Auch hier fiel das Aneurysma erst drei Wochen postoperativ auf.⁶³

2.5. Einfluss der intraoperativen Lagerung auf Verletzungen der Arteria poplitea bei HTO

Dass sich durch Streckung und Beugung des Kniegelenks die Position der A. poplitea durch die Schwerkraft und den Zug und Druck der Weichteile wie Muskeln, Bänder und Fettpolster verändert, ist eine durchaus naheliegende Annahme. Folgend wird in der Literatur die Hypothese, dass die Lagerung des Kniegelenks während der OWHTO Einfluss auf die räumliche Nähe der A. poplitea zur posterioren Tibiakante nimmt, schon seit vielen Jahren diskutiert. Die Empfehlungen tendieren häufig zu einer intraoperativen Lagerung des Kniegelenks in 90° Beugung.

Bereits 1987 kamen Vernon et al. in ihrer Studie an Humanpräparaten und der Darstellung in lateralen Röntgenbildern zu dem Schluss, dass sich die A. poplitea in 90° Beugung vom Tibiaknochen entfernte⁶⁵.

Eine Vielzahl weiterer Studien hat sich seitdem mit der Frage beschäftigt, ob die Lagerung intraoperativ Einfluss auf die Position der Arterie nimmt⁶⁶⁻⁷². So kamen Shetty et al. in ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass sich der Abstand zwischen Arterie und Knochen bei 85% ihrer untersuchten Patient:innen bei zunehmender Beugung signifikant vergrößerte. Sie untersuchten dazu mittels Duplex-Sonographie 100 Kniegelenke von 50 nicht voroperierten Patient:innen in Streckung und 90° Beugung. Sie beschreiben, dass sich der Durchmesser des M. popliteus in Flexion um einige Millimeter vergrößert und dass die A. poplitea sowohl am Hiatus adductorius als auch an der Bifurkation distal fixiert ist. Bei Flexion bewegt sich somit der nicht fixierte Anteil der Arterie nach proximal und bildet Spiralen hinter dem Femurknochen. Außerdem bilden die paarigen Aa. surales in Flexion einen Zug nach posterior. Diese Mechanismen könnten den vergrößerten Abstand der Arterie zur Tibiahinterkante erklären.⁶⁶

Jingoo Kim et al. führten an 7 Fresh-Frozen-Humanpräparaten jeweils eine HTO durch. Anhand von Röntgenbildern, welche in unterschiedlichen Beugegraden der Präparate aufgenommen wurden, konnte mit Hilfe von Kontrastmittel in der Arterie der Abstand von der A. poplitea zur Tibiahinterkante ermittelt werden. Der Abstand zeigte sich auch hier in 90° Beugung signifikant größer als in den anderen Beugegraden.⁶⁸

Es gibt jedoch auch vorliegende Studien mit konträren Ergebnissen. Beispielsweise kamen Zaidi et al. in einer Untersuchung von 20 Kniegelenken mittels Duplex-Sonografie in unterschiedlichen Beugegraden zu dem Ergebnis, dass sich in 12 Kniegelenken der Abstand der A. poplitea zur posterioren Tibiakante in 90° Beugung verringerte⁶⁹. Dies würde darauf hindeuten, dass die intraoperative 90°-Lagerung des Kniegelenks während der HTO das Risiko einer Verletzung erhöht.

Die bislang vorgestellten Studiendesigns basieren alle auf zweidimensionalen Untersuchungsmethoden. Zur dreidimensionalen Darstellung der komplexen anatomischen Topographie in der Kniekehle führten Yoo et al. eine Studie mittels MRT durch. Bei 30 jungen gesunden Männern veranlassten sie jeweils in Streckung und 90° Beugung ein MRT. Mittels Bildsoftware wurde 2 cm distal der Gelenklinie der Abstand zwischen der A. poplitea und der posterioren Tibiakante in zwei Ebenen gemessen. Sie kamen wie Shetty et al. und Jingoo Kim et al. zu dem Resultat, dass die Lagerung des Kniegelenks in 90° Beugung vorteilhaft ist, da der Abstand sich signifikant vergrößerte.⁷⁰

Eine weitere MRT-Studie zu der Fragestellung haben Smith et al. durchgeführt. Sie kamen jedoch bei 2 von 9 Patient:innen zu dem Schluss, dass sich der Abstand zwischen Arterie und

Tibiaknochen verringerte. Dies unterstützt das Ergebnis von Zaidi et al. und könnte auf einen nachteiligen Effekt durch die 90°-Lagerung hindeuten.⁷¹

2018 veröffentlichten Choi et al. eine Studie, in welcher in 16 Kniegelenken von Patient:innen jeweils in Streckung und Beugung ein MRT und anschließend anhand der Bilder virtuell eine HTO durchgeführt wurde. Trotz einer minimal signifikanten Vergrößerung des Abstands von der A. poplitea zur Tibiahinterkante von durchschnittlich 1,7 mm in 90° Beugung werteten sie das Ergebnis als klinisch nicht relevant genug, um einen Einfluss der Lagerung auf die intraoperative Sicherheit der Arterie zu erkennen.⁶⁷

2.6. Ziel der Arbeit

Die OWHTO stellt in der Therapie von Achsfehlstellungen und in der Prävention der Gonarthrose eine häufig durchgeführte Behandlungsoption dar, vor allem bei jungen Patient:innen. Die Gefahr, die A. poplitea im Rahmen der Osteotomie zu verletzen, ist ein ernstzunehmendes Risiko. Eine intraoperativ angepasste Lagerung der A. poplitea wäre eine leicht umsetzbare Schutzmaßnahme. Die Ergebnisse bisherig durchgeführter Studien sind kontrovers und ermöglichen keine eindeutige Handlungsempfehlung.

In der vorliegenden Arbeit soll mittels Computertomographie (CT) untersucht werden, ob sich der Abstand zwischen der A. poplitea und der Tibiahinterkante durch zunehmende Beugung verändert und somit das Risiko einer Verletzung der Arterie durch eine gezielte intraoperative Lagerung minimiert werden kann. Die CT wurde als Diagnostik ausgewählt, da sie sowohl für die präzise Darstellung von Gefäßen als auch von Knochen im klinischen Alltag Goldstandard ist. Für die Studie wurden 20 humane Kniegelenkspräparate in unterschiedlichen Beugegraden untersucht und der Abstand zwischen Arterie und Tibia erfasst.

In der Auswertung der Ergebnisse lag der Fokus auf folgenden Fragen:

- Verändert sich der Abstand der A. poplitea zur posterioren Tibiahinterkante mit zunehmendem Beugegrad?
- Zeigt sich ein Unterschied des Abstands der A. poplitea zur Tibiahinterkante auf unterschiedlichen Osteotomiehöhen?
- Gibt es eine intraindividuelle Lagevarianz der Arterie zwischen linkem und rechtem Kniegelenkspräparat innerhalb einer Körperspender:in?

3. Material und Methoden

3.1. Technisches Equipment

- Angiographic Catheter der Firma MeritMedical, Größe 5F
- CT-Gerät Arcadis Orbic der Firma Siemens
- Haltevorrichtung für Kniepräparate, angefertigt durch die zentrale wissenschaftliche Werkstatt der Universitätsmedizin Köln
- Bilddarstellungs- und -bearbeitungsprogramm IMPAX EE R20 XIX SU1, Firma Agfa HealthCare

3.2. Datenerhebung und Methodik

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise von der Präparation der Kniegelenke bis zur statistischen Auswertung der erhobenen Daten beschrieben.

3.2.1. Humanpräparate

Für die Studie wurden 20 Fresh-Frozen-Humanpräparate jeweils von der Mitte des Oberschenkels bis zur Mitte des Unterschenkels vom Zentrum Anatomie der Universität zu Köln zur Verfügung gestellt.

Es mussten 3 der 20 Präparate von der Studie ausgeschlossen werden, da die aufgenommenen CT-Bilder nicht auswertbar waren. Somit wurden 17 Präparate in die Auswertung eingeschlossen. Aufgrund mangelnder Bildqualität und fehlender Auswertbarkeit mussten außerdem jeweils ein Präparat in 0°, 30° und 60° Beugung für Distanz 1 und 2 sowie ein Präparat in allen Beugegraden für Distanz 2 von der Auswertung ausgeschlossen werden. Die Präparate stammten von insgesamt 10 Körperspender:innen, sodass von einigen Körperspender:innen sowohl das linke als auch das rechte Kniegelenk miteinbezogen wurde. In die Studie eingeschlossen wurden 9 rechte und 8 linke Kniegelenke.

Insgesamt wurden 7 weibliche und 3 männliche Körperspender:innen für die Studie zur Verfügung gestellt. Von den 17 in die Studie eingeschlossenen Humanpräparaten stammten 5 Präparate von männlichen Körperspendern und 12 von weiblichen Körperspenderinnen. Somit zeigt sich hier ein Verhältnis von 71% weiblichen zu 29% männlichen Präparaten (**Abbildung 6**).

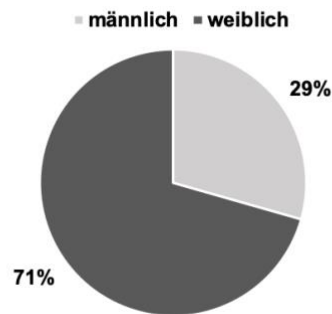


Abbildung 6: Darstellung der Geschlechterverteilung der Kniepräparate. Es zeigt sich ein Verhältnis von 71% weiblichen zu 29% männlichen Präparaten.

Die Altersverteilung der Körperspender:innen lag zwischen 61 und 94 Jahren. Die Altersspanne der weiblichen Spenderinnen bewegte sich zwischen 80 und 94 Jahren, die der männlichen Spender zwischen 61 und 89 Jahren. Das Durchschnittsalter der weiblichen Spenderinnen lag somit bei 87,4 Jahren und das Durchschnittsalter der männlichen Spender bei 72 Jahren (**Abbildung 7**).

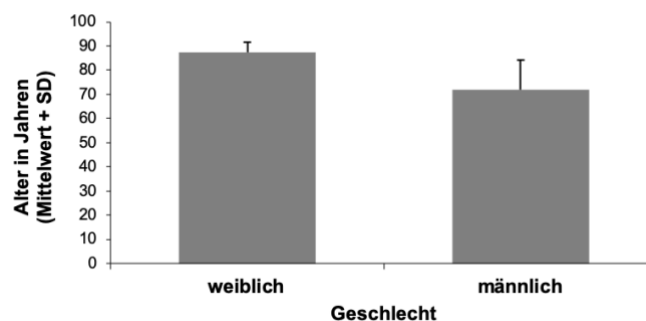


Abbildung 7: Darstellung des Altersdurchschnitts der Körperspender:innen. Vergleich der weiblichen und männlichen Körperspender:innen. Das Durchschnittsalter der weiblichen Spenderinnen lag bei 87,4 Jahren, das der männlichen Spender bei 72 Jahren.

3.2.2. Präparation der Humanpräparate und Anfertigung der CT-Aufnahmen

Vor der Präparation tauten die Humanpräparate 24 Stunden lang bei Raumtemperatur auf. Zu Beginn wurde die A. poplitea am femoralen Ende des Präparats vorsichtig freipräpariert. Um den Verlauf der Arterie in der CT darstellen zu können, wurde ein röntgenstrahlen-

undurchlässiger Angiographic Fogarty-Katheter, Größe 5F der Firma MeritMedical, durch das Lumen der Arterie von femoral nach tibial platziert und zur Fixierung der Position mit Luft befüllt.

Um den Abstand zwischen Arterie und Tibia in Abhängigkeit von der Beugung des Gelenkes untersuchen zu können, wurden die Aufnahmen in 0°, 30°, 60° und 90° Beugung angefertigt. Diese Beugegrade wurden ausgewählt, da sie eine realistische und einfach zu reproduzierende intraoperative Lagerung widerspiegeln. Eine Lagerung über 90° ist aufgrund einer häufig auftretenden passiven Weichteilhemmung sowie der Interferenz mit Lagerungsmaterialien oder der Blutsperre nur schwer standardisierbar.

Um die Fixierung in den oben genannten Beugegraden mit den humanen Kniegelenkspräparaten umzusetzen, bedurfte es einer speziellen Haltevorrichtung. Diese wurde von der zentralen wissenschaftlichen Werkstatt der Universitätsmedizin Köln für die vorliegende Studie angefertigt (**Abbildung 8A**). Die Haltevorrichtung ist röntgenstrahlendurchlässig.

Die Kniepräparate wurden mit jeweils zwei Drähten in der Haltevorrichtung fixiert. Der erste Draht wurde hierbei in Längsrichtung durch das Femur eingebracht, der zweite Draht von medial nach lateral in etwa 90° zur Femurachse (**Abbildung 8B**).

Zur Lagekontrolle des Kniegelenks in der Halterung wurden vor jeder CT-Darstellung Röntgenbilder angefertigt und die Lagerung gegebenenfalls optimiert (**Abbildung 8C**). Anschließend wurden die CT-Bilder mit dem Gerät Arcadis Orbic der Firma Siemens in Extension und 30°, 60° und 90° Flexion des Kniegelenks angefertigt (**Abbildung 8D**).

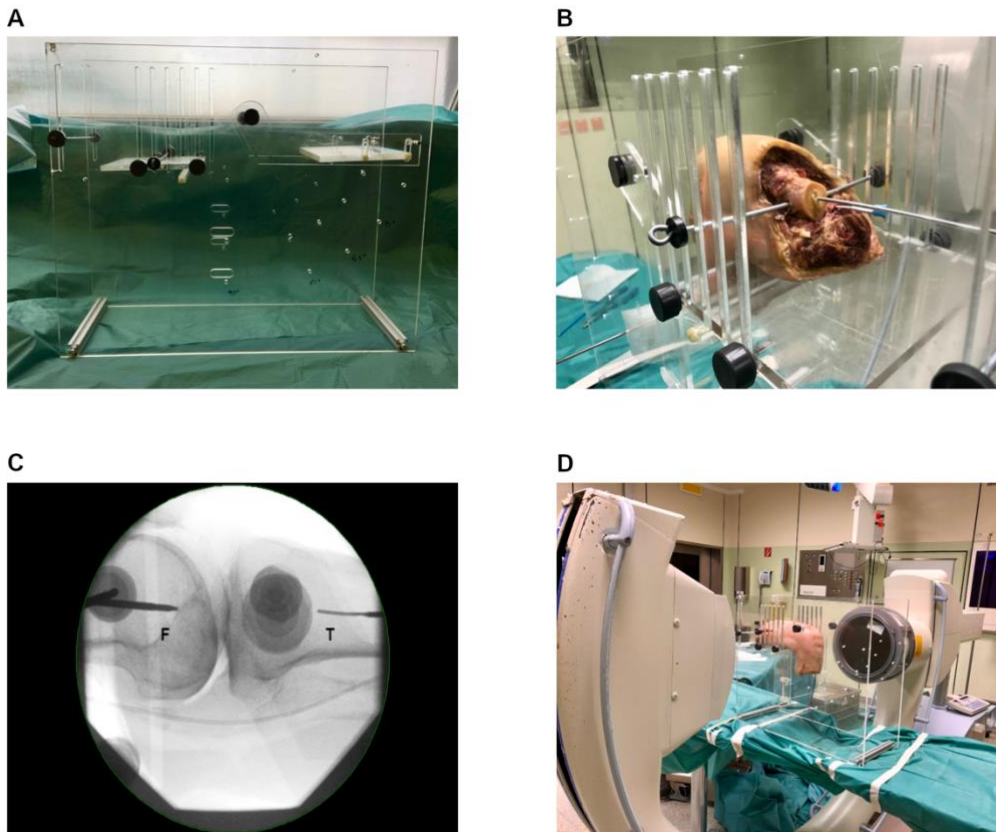


Abbildung 8: Darstellung des Versuchsaufbaus. (A) Haltevorrichtung für Kniepräparate, angefertigt durch die Zentrale wissenschaftliche Werkstatt der Universitätsmedizin Köln. (B) Einspannen des Kniepräparats in die Haltevorrichtung und Fixierung mittels Drähten. (C) Anfertigung eines Röntgenbildes zur Lagekontrolle. Es stellen sich Femur (F) und Tibia (T) dar, eingespannt in der Haltevorrichtung. (D) Anordnung im OP-Saal. Auf dem OP-Tisch befindet sich das Kniepräparat eingespannt in der Haltevorrichtung. Das CT-Gerät steht in Position.

3.2.3. Auswertung der CT-Aufnahmen

Mit Hilfe des Bilddarstellungs- und -bearbeitungsprogramms IMPAX EE R20 XIX SU1 der Firma Agfa HealthCare wurden anschließend die CT-Bilder begutachtet und vermessen. Jede Messung wurde zweimalig im Abstand von wenigen Tagen von derselben Untersucherin durchgeführt.

Um eine Komparabilität der Untersuchungen zu ermöglichen, mussten sowohl klar definierte Messpunkte festgelegt als auch das Messverfahren standardisiert werden.

Die Messpunkte sollten hierbei idealerweise im Bereich der theoretisch durchzuführenden Osteotomie liegen. Die Osteotomiehöhe der OWHTO wird in der präoperativen Planung bei

allen Patient:innen individuell ermittelt. Für die vorliegende Studie wurde jedoch eine genormte Osteotomiehöhe benötigt, sodass die Messungen reproduzierbar und auf jedes Humanpräparat übertragbar waren. In den bislang veröffentlichten Studiendesigns variiert die Osteotomiehöhe zwischen 2 und 6 cm distal des Tibiaplateaus^{61,66-68,72,73}.

In der vorliegenden Studie wurden zwei Messhöhen ausgewählt. Die erste befindet sich 3,5 cm distal des medialen Tibiaplateaus und repräsentiert die horizontale Osteotomie (Distanz 1). Bei der OWHTO wird der mediallyseitig angelegte Osteotomiespalt mittels scharfer Osteotomie-meißel um ca. 15° geöffnet und anschließend in dieser Position, in der Regel mit LCP-Platte und Schrauben, fixiert. Da auch bei diesem Operationsschritt eine Verletzungs-gefahr der A. poplitea besteht, wurde auf Höhe des kaudalen Rands des Osteotomiespalts, nach Aufklappen um 15° (Messpunkt 2), ebenfalls eine Messung des Abstands zwischen der A. poplitea und der posterioren Tibiakante vorgenommen (Distanz 2).

Die Ermittlung dieser Messpunkte sowie die Messungen wurden gemäß folgendem Algorithmus durchgeführt.

Zunächst wurden die CT-Bilder im IMPAX-Programm in den Ebenen anterior-posterior (a.p.), lateral und axial dargestellt und synchronisiert.

Anschließend wurde geprüft, auf welcher Seite des Bildes sich die mediale Kortikalis der Tibia befindet. Die Darstellung der Fibula gibt die laterale Seite des Unterschenkels an (**Abbildung 9**).

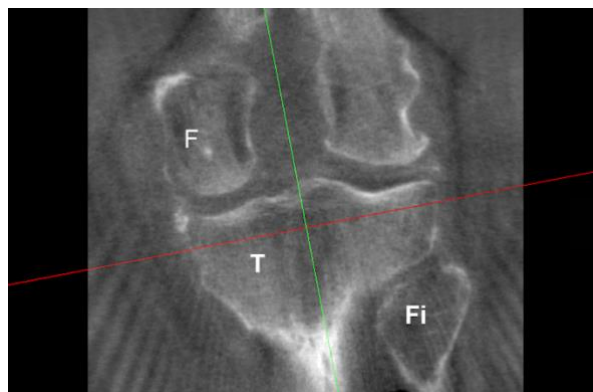


Abbildung 9: Darstellung der Fibula in der anterior-posterioren Ebene. F = Femur, T = Tibia, Fi = Fibula. Die Fibula stellt sich im Bild angeschnitten dar, somit befindet sich rechts im Bild die laterale Seite des Unterschenkels.

Nun wurde die vertikale Linie des virtuellen Fadenkreuzes in allen drei oben genannten Ebenen so eingestellt, dass sie sich mittig im Tibiaknochen befindet.

Folgend wurde die horizontale Linie des Fadenkreuzes in der a.p. Ansicht entlang des Tibiaplateaus ausgerichtet (**Abbildung 10A**). Durch die Synchronisation der Bilder verändern sich durch die Anpassung einer Ebene auch die anderen Ebenen (**Abbildung 10B**).

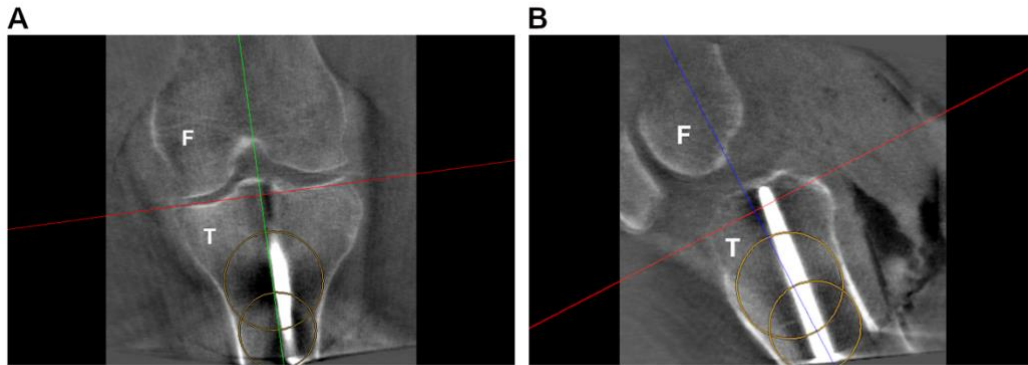


Abbildung 10: Einstellung des Tibiaplateaus in verschiedenen Ebenen. T = Tibia, F = Femur. **(A)** Darstellung des Tibiaplateaus in der anterior-posterioren Ebene. Die vertikale Linie des Fadenkreuzes (grün) befindet sich mittig im Tibiaknochen. Durch das Anlegen der Kreise konnte die vertikale Linie exakt mittig platziert werden. Die horizontale Linie des Fadenkreuzes (rot) befindet sich auf Höhe des Tibiaplateaus. **(B)** Darstellung der synchronisierten Einstellung des Tibiaplateaus in der lateralen Ebene.

An oben genannte horizontale Gerade entlang des Tibiaplateaus wurde nun eine vertikale 3,5 cm lange Linie angelegt und die Osteotomiehöhe festgelegt. Wird die horizontale Linie des Fadenkreuzes auf diese Höhe platziert (**Abbildung 11**), stellt sich durch die Synchronisation der Ebenen auch die axiale Ebene 3,5 cm distal des Tibiaplateaus dar.



Abbildung 11: Markierung der horizontalen Osteotomiehöhe. T = Tibia, F = Femur. Mit Hilfe einer Senkrechten (gelbe unterbrochene Linie), ausgehend vom Tibiaplateau, wurde eine

Markierung 3,5 cm distal des Tibiaplateaus gesetzt und die horizontale Linie des Fadenkreuzes (rot) darauf platziert.

Im axialen Bild ist der in die A. poplitea vorgeschobene Fogarty-Katheter nun deutlich zu erkennen (**Abbildung 12**). Auf dieser Höhe (theoretische Osteotomiehöhe) wurde nun der erste Abstand (Distanz 1) zwischen dem Fogarty-Katheter in der A. poplitea und der posterioren Tibiakante gemessen.

Um den Abstand auf den Millimeter genau zu ermitteln, wurde ein virtueller Kreis zur Hilfe genommen. Die Mitte des Kreises wurde exakt auf die Mitte des im Querschnitt dargestellten Fogarty-Katheters aufgesetzt und erweitert, bis der Kreis die posteriore Tibiakante erreicht (**Abbildung 12**). Der angezeigte Durchmesser wurde rechnerisch zum Radius halbiert und zu Schritten von 0,5 mm aufgerundet.

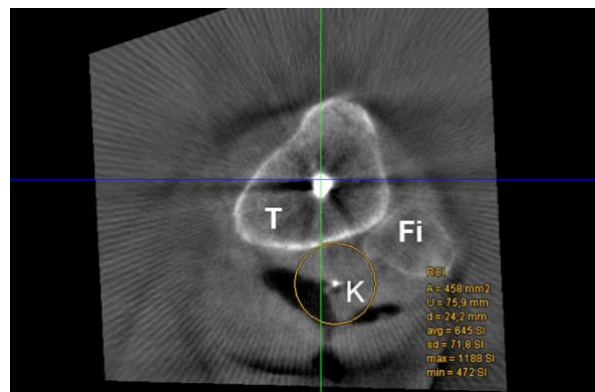


Abbildung 12: Messung von Distanz 1 in der axialen Ebene. T = Tibia, Fi = Fibula, K = Katheter. Der Kreis wurde exakt auf die Kathetermitte platziert und bis zur posterioren Tibiakante erweitert. Der angezeigte Durchmesser wurde rechnerisch zum Radius halbiert.

Um Messpunkt 2 und somit Distanz 2 zu ermitteln, wurde zunächst eine Gerade auf der, durch das Fadenkreuz virtuell dargestellten, horizontalen Osteotomielinie platziert. Durch Anlegen eines 15°-Winkels an diese Gerade kann nun am Schnittpunkt des angelegten Winkels mit der medialen Tibiakortikalis die Höhe des zweiten Messpunktes definiert werden.

Nach Positionierung der horizontalen Linie des Fadenkreuzes auf den Messpunkt 2 in der a.p. Ebene (**Abbildung 13**) lässt sich nun durch die Bildsynchronisation in der axialen Ebene die Distanz 2 analog zur Messung von Distanz 1 ermitteln (**Abbildung 14**).

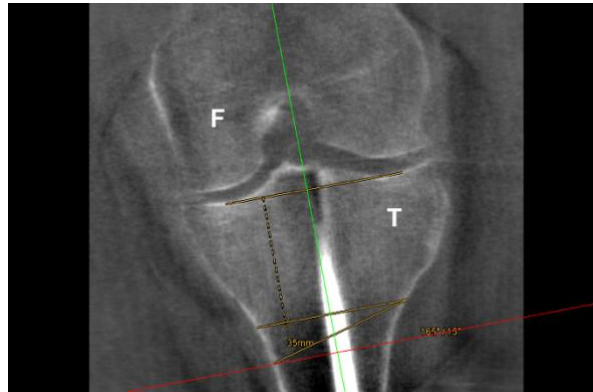


Abbildung 13: Anlegen eines 15°-Winkels zum Generieren von Distanz 2. T = Tibia, F = Femur. Es wurde eine Gerade auf Höhe der theoretisch durchzuführenden Osteotomie platziert und ein 15°-Winkel angelegt, dessen Schnittpunkt mit der medialen Tibiakortikalis den zweiten Messpunkt definiert (Distanz 2).

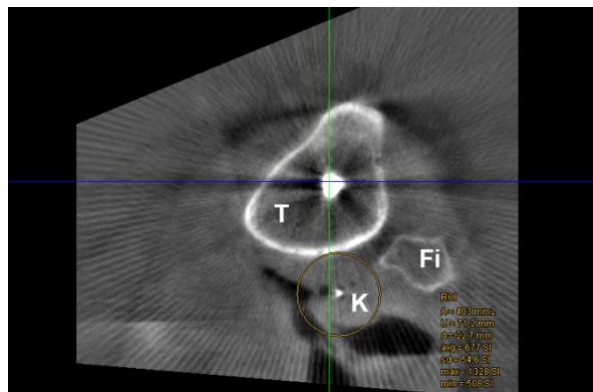


Abbildung 14: Messung von Distanz 2 in der axialen Ebene. T = Tibia, Fi = Fibula, K = Katheter. Analog zur Messung von Distanz 1 wurde mit Hilfe des Kreises der Abstand von der Kathetermitte zur posterioren Tibiakante gemessen.

3.3. Statistische Methoden

Da die Daten zweifach von derselben Untersucherin erhoben wurden, wurde zunächst ein Intraklassenkorrelationskoeffizient (Retest-Reliabilität) zur Vergleichbarkeit der Daten von Messung 1 und 2 bestimmt. Die Signifikanz der Korrelation wurde nach der Prüfung auf Normalverteilung mit einem t-Test für abhängige Stichproben bestimmt.

Anschließend wurden die Daten mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests und des Kolmogorov-Smirnov-Tests mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors auf Normalverteilung untersucht.

Zum Vergleich normalverteilter Daten mit mehr als zwei Gruppen wurde die Signifikanz für den Mittelwertvergleich der Daten in den vier Beugegraden mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse (one-way ANOVA) geprüft.

Zur Datensammlung und Erstellung der Diagramme wurde das Programm Microsoft Excel 2016 verwendet. Die eingefügten Fotos wurden mit den Programmen paint.net und GIMP bearbeitet.

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm IBM SPSS Statistics Version 26.

Signifikante Unterschiede sind mit * gekennzeichnet. Hierbei unterscheidet sich das Signifikanzniveau folgendermaßen: * entspricht $p < 0,05$; ** entspricht $p < 0,01$.

Hervorzuhebende nicht signifikante Unterschiede sind mit der Abkürzung n.s. gekennzeichnet.

4. Ergebnisse

4.1. Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 0° Beugung

Wie in **Abbildung 15A** zu sehen ist, beträgt auf Höhe von Distanz 1 der kürzeste gemessene Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante in 0° Beugung in Messung 1 und 2 jeweils 10,5 mm, beide Werte gemessen im selben Präparat. Der größte Abstand liegt hier in Messung 1 bei 18 mm und in Messung 2 bei 17 mm.

Auf Höhe von Distanz 2 (**Abbildung 15B**) liegt der minimale gemessene Abstand in Messung 1 bei 9,5 mm und in Messung 2 bei 10 mm, innerhalb eines Präparats. Der maximale Abstand beträgt 16 mm in Messung 1 und 15 mm in Messung 2.

Die maximalen Abstandswerte aus allen vier Messungen auf Höhe beider Distanzen in 0° Beugung wurden innerhalb eines Präparats gemessen.

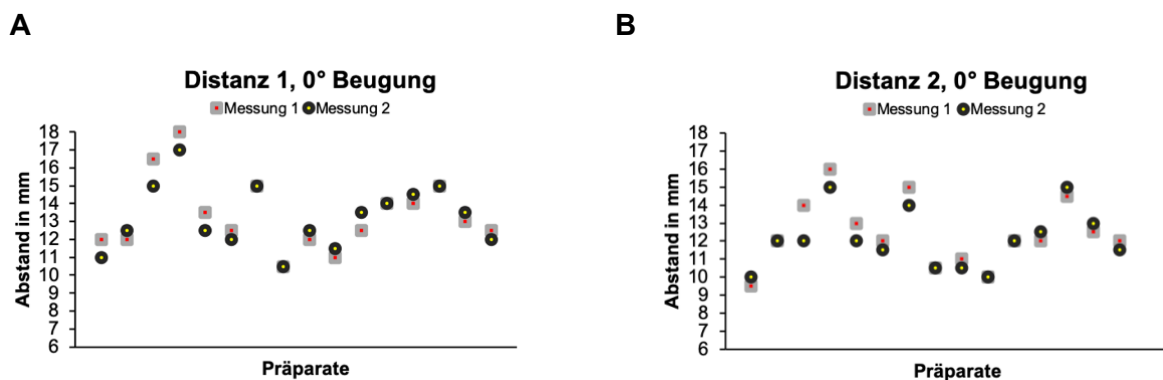


Abbildung 15: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 0° Beugung. Für eine bessere Übersicht beginnt die Y-Achse bei 6 mm. (A) Die Spannbreite der Messwerte auf Höhe von Distanz 1 reicht in Messung 1 von 10,5 mm bis 18 mm, in Messung 2 von 10,5 mm bis 17 mm. (B) Auf Höhe von Distanz 2 liegen die Messungen auf Messhöhe 1 zwischen 9,5 mm und 16 mm und auf Messhöhe 2 zwischen 10 mm und 15 mm.

4.2. Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 30° Beugung

In 30° Beugung zeigt sich auf Messhöhe 1 (**Abbildung 16A**) ein minimaler Abstandswert zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante in Messung 1 von 9 mm und in Messung 2 von 10 mm. Die maximalen Abstandswerte finden sich in Messung 1 in zwei Präparaten mit 16,5 mm und in Messung 2 in denselben Präparaten mit 17 mm und 16,5 mm.

Auf Messhöhe 2 (**Abbildung 16B**) beträgt der kürzeste Abstand zwischen Arterie und Tibiahinterkante in Messung 1 7,5 mm und in Messung 2 9 mm. Der größte Abstand in Messung 1 liegt bei 15,5 mm und in Messung 2 bei 14,5 mm.

In 30° Beugung wurden sowohl alle vier minimalen Abstandswerte (Distanz 1 und 2, Messung 1 und 2), als auch die vier maximalen Abstandswerte jeweils innerhalb eines Präparats gemessen.

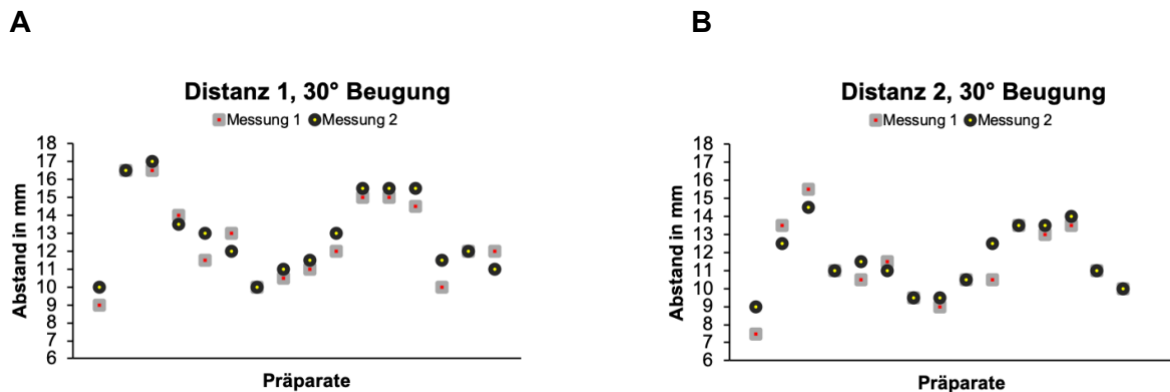


Abbildung 16: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 30° Beugung. Für eine bessere Übersicht beginnt die Y-Achse bei 6 mm. **(A)** Die Spanne der Messungen in 30° Beugung auf Messhöhe 1 erstreckt sich in Messung 1 von 9 mm bis 16,5 mm und in Messung 2 von 10 mm bis 17 mm. **(B)** Auf Höhe von Distanz 2 liegen die Werte in Messung 1 zwischen 7,5 mm und 15,5 mm und in Messung 2 zwischen 9 mm und 14,5 mm.

4.3. Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 60° Beugung

Der kürzeste Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante liegt in 60° Beugung auf Höhe von Distanz 1 (**Abbildung 17A**) in Messung 1 bei 8,5 mm und in Messung 2 im selben Präparat bei 9,5 mm. Der längste Abstand zwischen Arterie und Knochen liegt in Messung 1 und 2 jeweils bei 17 mm, gemessen innerhalb eines Präparats.

Auf Höhe von Distanz 2 (**Abbildung 17B**) wurden die kürzesten Abstände in Messung 1 und 2 im selben Präparat gemessen, wie schon auf Höhe von Distanz 1. In Messung 1 beträgt dieser 7 mm und in Messung 2 7,5 mm. Die maximalen Abstandswerte betragen in Messung 1 und 2 jeweils 13,5 mm, gemessen innerhalb eines Präparats, wobei in Messung 2 in zwei weiteren Präparaten der Wert 13,5 mm gemessen wurde.

Die maximalen Abstandswerte in 60° Beugung von Distanz 1 und 2 zeigen mit einer Differenz von 3,5 mm eine stärkere Abweichung als in den Beugegraden 0° und 30° und wurden nicht im selben Präparat gemessen.

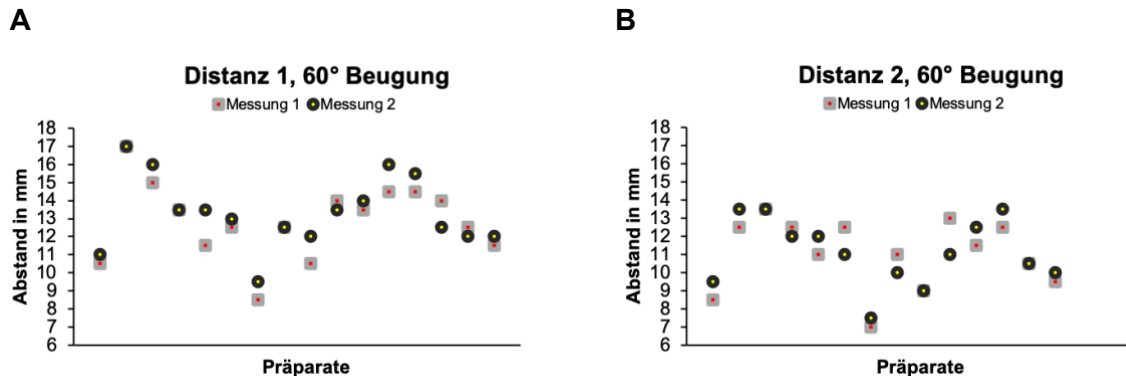


Abbildung 17: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 60° Beugung. Für eine bessere Übersicht beginnt die Y-Achse bei 6 mm. (A) Auf Höhe von Distanz 1 liegen die Werte von Messung 1 zwischen 8,5 mm und 17 mm und von Messung 2 zwischen 9,5 mm und 17 mm. (B) Auf Höhe von Distanz 2 in Messung 1 zwischen 7 mm und 13,5 mm und in Messung 2 zwischen 7,5 mm und 13,5 mm.

4.4. Messhöhe 1 (Distanz 1) und Messhöhe 2 (Distanz 2) in 90° Beugung

In 90° Beugung liegt der kürzeste Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante, gemessen auf Höhe von Distanz 1 (**Abbildung 18A**), in Messung 1 bei 11 mm und in Messung 2, gemessen im selben Präparat, bei 11,5 mm. Der längste Abstand findet sich in Messung 1 mit 18 mm und in Messung 2 in zwei Präparaten (eines identisch mit dem Präparat aus Messung 1) mit 17,5 mm.

Auf Messhöhe 2 (**Abbildung 18B**) findet sich der kürzeste Abstand in Messung 1 mit 9 mm und in Messung 2 mit 10 mm, in unterschiedlichen Präparaten. Der maximale Abstand beträgt in Messung 1 in drei Präparaten 14 mm und in Messung 2 einmalig 14,5 mm.

Auch in 90° Beugung wurden die maximalen Abstandswerte von Distanz 1 und Distanz 2 nicht im selben Präparat gemessen und auch hier zeigen die maximalen Abstandswerte der beiden Distanzen eine stärkere Abweichung von 4 mm beziehungsweise 3 mm.

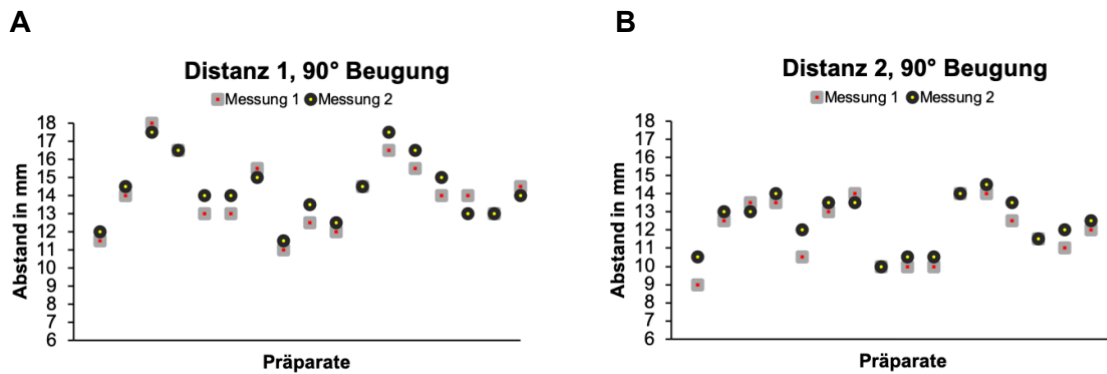


Abbildung 18: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 90° Beugung. Für eine bessere Übersicht beginnt die Y-Achse bei 6 mm.

(A) Auf Messhöhe 1 liegen die Werte von Messung 1 zwischen 11 mm und 18 mm und von Messung 2 zwischen 11,5 mm und 17,5 mm. (B) Auf Messhöhe 2 in Messung 1 zwischen 9 mm und 14 mm und in Messung 2 zwischen 10 mm und 14,5 mm.

Die Minimalwerte aller Beugegrade liegen auf Messhöhe 2 (Distanz 2), 1-2 mm unter den auf Messhöhe 1 (Distanz 1) gemessenen Werten, was aufgrund des nach distal kleiner werdenden anatomischen Querschnitts und der nach distal zunehmend fixierten Weichteilstrukturen nachvollziehbar erscheint. Dieser Unterschied wird bei Betrachtung der Maximalwerte noch deutlicher, hier liegt der Unterschied zwischen Distanz 1 und Distanz 2 im Bereich von 1-4 mm.

Auffällig ist, dass in nahezu allen Kniepräparaten die gemessenen Abstände innerhalb eines Präparats in den vier Beugegraden in einem Bereich von lediglich 3 mm differieren. In **Tabelle 1** sind beispielhaft die Werte von drei Präparaten aufgeführt.

Kniepräparat	Beugegrad			
	0°	30°	60°	90°
1	10,5 mm	10,0 mm	8,5 mm	11,0 mm
2	14,0 mm	14,5 mm	14,5 mm	14,0 mm
3	16,5 mm	16,5 mm	17,0 mm	18,0 mm

Tabelle 1: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante in drei Kniepräparaten in den Beugegraden 0°, 30°, 60° und 90°. Die Unterschiede des Abstands zwischen den vier Beugegraden innerhalb eines Präparats variieren lediglich im Bereich weniger Millimeter, auch wenn sich die Werte zwischen den Präparaten teilweise im Bereich mehrerer Millimeter unterscheiden.

4.5. Intrarater-Reliabilität von Messung 1 und 2

Die Messungen der CT-Bilder wurden zweimalig durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Messungen zu evaluieren. Die Reliabilität der Messungen wurde mit dem Intraklassenkorrelationskoeffizienten (ICC) bestimmt. Dieser wird so interpretiert, dass Werte unter 0,5 einen niedrigen Zusammenhang, Werte von 0,5 bis 0,75 einen moderaten, Werte von 0,75 bis 0,9 einen guten und Werte größer als 0,9 einen exzellenten Zusammenhang zeigen⁷⁴.

4.5.1. Korrelation von Messung 1 und 2 auf Messhöhe 1 (Distanz 1)

Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten für Messung 1 und Messung 2 in **Tabelle 2** zeigt für Distanz 1 demnach mit einem Korrelationswert von 0,959 einen exzellenten positiven Zusammenhang zwischen den beiden Messungen. Auch der Wert der Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls liegt über 0,9. Die Messungen der Intraklassenkorrelation korrelieren in allen vier Beugegraden auf einem 0,01 Fehlerniveau (zweiseitig) signifikant.

Korrelationskoeffizient in Klassen			
	Korrelation innerhalb der Klasse	95% Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Einzelne Maße	0,922	0,868	0,954
Durchschnittliche Maße	0,959	0,929	0,976

Tabelle 2: Korrelationskoeffizient für Distanz 1. Dargestellt mit dem zugehörigen 95%-Konfidenzintervall. Der Korrelationswert von 0,959 wird als exzellenter Zusammenhang gewertet.

In den graphischen Darstellungen der **Abbildungen 15A, 16A, 17A und 18A** zeigt sich, dass die Abweichung der beiden Messungen in allen vier Beugegraden für Distanz 1 überwiegend zwischen 0,5 und 1 mm liegt und somit minimal ist. Wenige Messungen zeigen eine Abweichung von 1,5 oder 2 mm. Eine maximale Differenz von 2 mm wird nicht überschritten. Die maximale gemessene Differenz zwischen Messung 1 und 2 in 0° Beugung und 30° Beugung liegt bei 1,5 mm. Für 60° Beugung konnte eine maximale Differenz zwischen den Messungen von 2 mm und in 90° Beugung von 1 mm ermittelt werden.

4.5.2. Korrelation von Messung 1 und 2 auf Messhöhe 2 (Distanz 2)

Bei der Berechnung des Korrelationskoeffizienten von Messung 1 und Messung 2 für Distanz 2 zeigt sich mit einem Wert von 0,945 ebenfalls eine exzellente Korrelation der beiden Messungen (**Tabelle 3**). Der Wert der Untergrenze des 95%-Konfidenzintervalls liegt auch hier über 0,9 im Bereich der exzellenten Korrelation. Die Messungen der Intraklassenkorrelation korrelieren in allen Beugegraden auf einem 0,01 Fehlerniveau (zweiseitig) signifikant.

Korrelationskoeffizient in Klassen			
	Korrelation innerhalb der Klasse	95% Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
Einzelne Maße	0,896	0,833	0,937
Durchschnittliche Maße	0,945	0,909	0,967

Tabelle 3: Korrelationskoeffizient für Distanz 2. Dargestellt mit dem zugehörigen 95%-Konfidenzintervall. Der Korrelationswert von 0,945 wird als exzellenter Zusammenhang gewertet.

In den graphischen Darstellungen der **Abbildungen 15B, 16B, 17B und 18B** zeigt sich, dass auch für Distanz 2 die Abweichung der beiden Messungen in allen vier Beugegraden weitgehend zwischen 0,5 und 1 mm liegt und somit minimal ist. Vereinzelt zeigen Messungen eine Abweichung von 1,5 oder 2 mm. Eine maximale Differenz von 2 mm wird auch hier nicht überschritten. In den Beugegraden 0°, 30° und 60° wurde eine maximale Differenz zwischen Messung 1 und 2 von 2 mm gemessen. In 90° Beugung lag der Wert der maximalen Differenz bei 1,5 mm.

Da bei beiden Distanzen eine exzellente Korrelation und eine Signifikanz der Korrelation auf dem 0,01 Alpha-Fehlerniveau festgestellt werden konnte, werden die folgenden Auswertungen mit den Messdaten von Messung 1 vorgenommen und dargestellt.

4.6. Normalverteilung der Daten

Im Hinblick auf die folgende statistische Analyse wurde geprüft, ob die vorliegenden Daten normalverteilt sind.

Hierzu wurde zunächst eine graphische Darstellung der Messwerte im Histogramm erstellt. Die Messwerte wurden übersichtshalber in Klassen eingeteilt.

Für Distanz 1 (**Abbildung 19**) zeigt sich bei Betrachtung der Diagramme in 0°, 60° und 90° Beugung eine Verteilung, die durch ihre Form eine Normalverteilung vermuten lässt. Die Spitzen der Diagramme liegen in 0° und 60° Beugung in der Klasse [11,5; 13) (**Abbildung 19A, C**) und in 90° Beugung in der Klasse [13; 14,5) (**Abbildung 19D**), wo sich eine leichte Rechtsverschiebung der Kurve zeigt. In 30° Beugung (**Abbildung 19B**) verteilt sich die Spitze des Diagramms auf die beiden Klassen [10; 11,5) und [11,5; 13). Außerdem zeigt sich in der Klasse [14,5; 16) eine weitere Spitze, sodass hier nicht sicher eine Normalverteilung der Daten angenommen werden kann.

Zur Bestätigung, dass die Daten normalverteilt sind, wurde daher folgend eine Analyse der Messwerte durchgeführt.

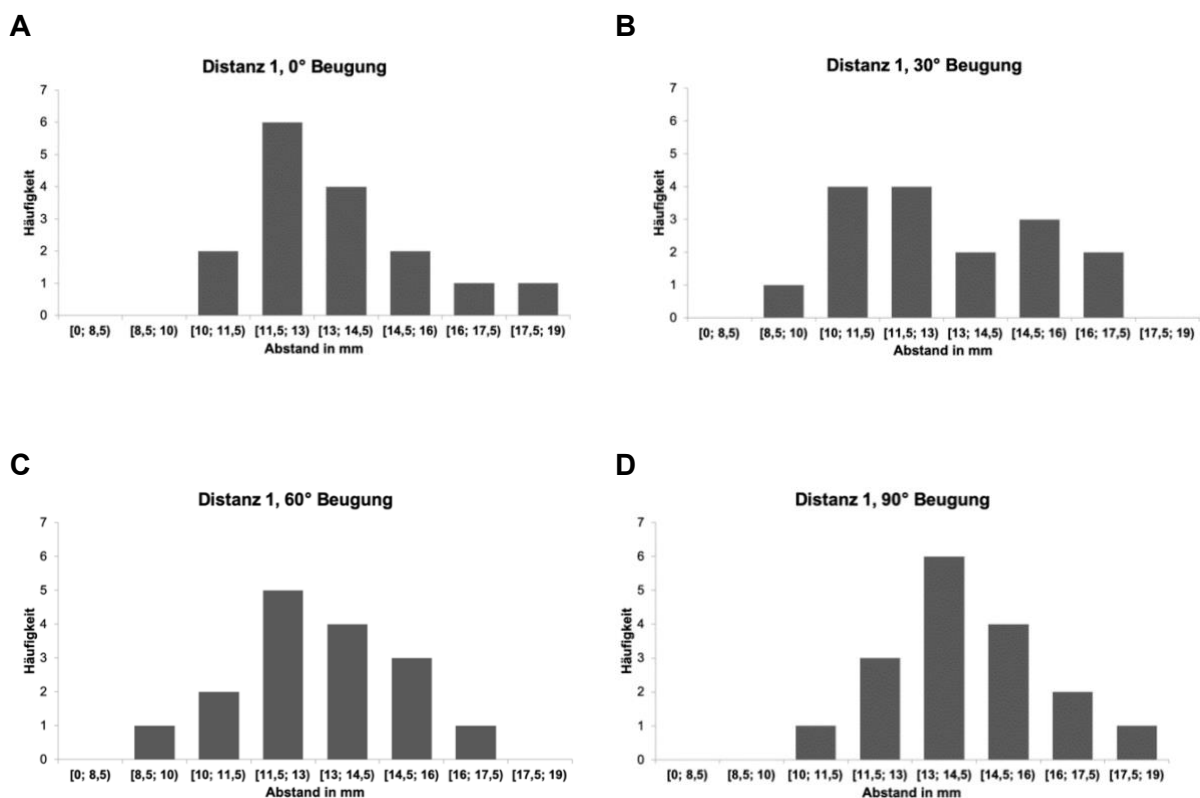


Abbildung 19: Graphische Darstellung der Normalverteilung der Messwerte für Distanz 1. Darstellung im Histogramm, in Klassen. In 0° Beugung (**A**), 60° Beugung (**C**) und 90° Beugung (**D**) zeigt sich eine Verteilung der Werte, die auf eine Normalverteilung schließen lässt. In 30° Beugung (**B**) zeigt sich eine auf zwei Klassen aufgeteilte Spitze in den Klassen [10; 11,5) und [11,5; 13) und eine weitere Spitze in der Klasse [14,5; 16), sodass hier nicht sicher von einer Normalverteilung ausgegangen werden kann.

Die statistische Analyse wurde mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests und des Kolmogorov-Smirnov-Tests mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors durchgeführt (**Tabelle 4**).

Für Distanz 1 zeigt sich im Kolmogorov-Smirnov-Test für 0°, 60° und 90° Beugung ein Wert von 0,2 und für 30° Beugung von 0,121. Im Shapiro-Wilk-Test liegen die Werte für 0° Beugung bei 0,711, für 30° Beugung bei 0,21, für 60° Beugung bei 0,94 und für 90° Beugung bei 0,926. Alle Werte liegen in beiden Tests deutlich über dem festgelegten Alpha-Fehlerwert von 0,05, sodass hier eine Normalverteilung anzunehmen ist.

Beugungsgrad	Kolmogorov-Smirnov mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors		Shapiro-Wilk	
	Statistik	Signifikanz	Statistik	Signifikanz
0°	0,132	0,200*	0,959	0,711
30°	0,203	0,121	0,919	0,210
60°	0,121	0,200*	0,975	0,940
90°	0,145	0,200*	0,974	0,926

Tabelle 4: Normalverteilung der Messwerte für Distanz 1, getestet mit Kolmogorov-Smirnov-Test und Shapiro-Wilk-Test. Die Signifikanzwerte liegen bei beiden Tests für alle Beugegrade über dem festgelegten Alpha-Fehlerwert von 0,05. Für beide Tests zeigen sich somit normalverteilte Werte. * Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

Auch für Distanz 2 wurde zunächst eine graphische Darstellung der Messwerte im Histogramm vorgenommen. Hier ist in 0° Beugung rein graphisch von einer Normalverteilung auszugehen (**Abbildung 20A**). Die Spitze des Diagramms liegt hier in der Klasse [11,5; 13). In den anderen Beugegraden lässt sich die Normalverteilung zwar erahnen, jedoch ist die Verteilung der Werte nicht eindeutig. In 30° Beugung zeigen sich zwei Spitzen in der Klasse [10; 11,5) und in Klasse [13; 14,5), sowie eine leichte Linksverschiebung der Kurve zu den kleineren Messabständen (**Abbildung 20B**). In 60° Beugung liegt die Spitze des Diagramms in der Klasse [11,5; 13) und auch hier wird eine Linksverschiebung der Kurve sichtbar (**Abbildung 20C**). In 90° Beugung präsentieren sich zwei Spitzen in den Klassen [10; 11,5) und [13; 14,5), wobei die geringe Streubreite der Daten für eine geringe Varianz der Messwerte zwischen den Präparaten spricht (**Abbildung 20D**).

Ob eine Normalverteilung vorliegt, wurde analog zu Distanz 1 mit Hilfe einer statistischen Analyse getestet.

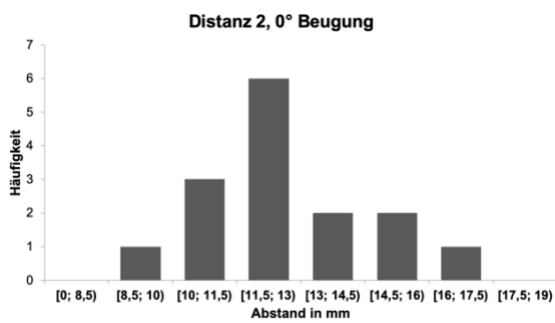
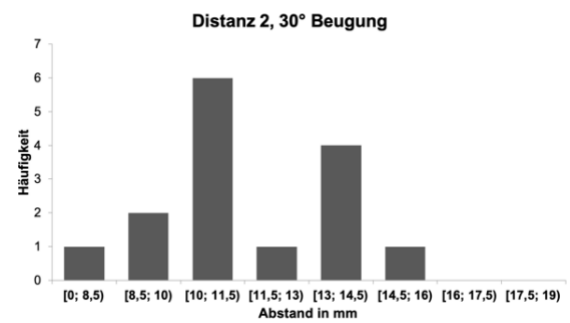
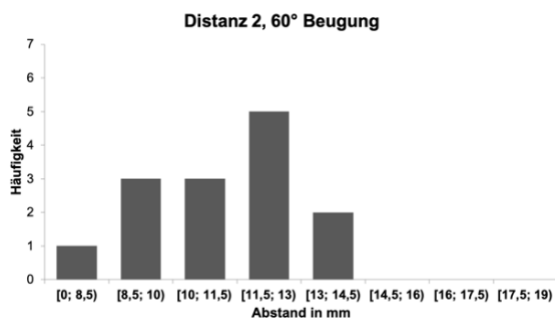
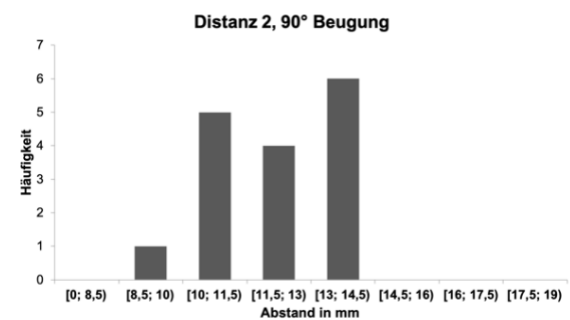
A**B****C****D**

Abbildung 20: Graphische Darstellung der Normalverteilung der Messwerte für Distanz 2. Darstellung im Histogramm, in Klassen. In 0° Beugung (**A**) zeigt sich anzunehmend eine Normalverteilungskurve. In den anderen drei Beugegraden 30° (**B**), 60° (**C**) und 90° (**D**) lässt sich die Normalverteilung erahnen, ist jedoch graphisch nicht eindeutig darstellbar.

Für Distanz 2 zeigt sich bei dem Kolmogorov-Smirnov-Test in 0° Beugung und 90° Beugung ein Wert von 0,2, in 30° Beugung ein Wert von 0,111 und in 60° Beugung ein Wert von 0,104. In Anwendung des Shapiro-Wilk-Tests stellen sich in 0° der Wert 0,647, in 30° der Wert 0,224, in 60° der Wert 0,171 und in 90° der Wert 0,101 dar (**Tabelle 5**). Alle Messwerte liegen oberhalb des festgelegten Alpha-Fehlerniveaus von 0,05 und sind somit anzunehmend normalverteilt.

Beugungsgrad	Kolmogorov-Smirnov mit Signifikanzkorrektur nach Lilliefors		Shapiro-Wilk	
	Statistik	Signifikanz	Statistik	Signifikanz
0°	0,181	0,200*	0,953	0,647
30°	0,213	0,111	0,916	0,224
60°	0,215	0,104	0,908	0,171
90°	0,146	0,200*	0,891	0,101

Tabelle 5: Normalverteilung der Messwerte für Distanz 2, getestet mit Kolmogorov-Smirnov-Test und Shapiro-Wilk-Test. Die Signifikanzwerte liegen bei beiden Tests für alle Beugegrade über dem festgelegten Alpha-Fehlerwert von 0,05. Für beide Tests zeigen sich somit normalverteilte Werte. * Dies ist eine untere Grenze der echten Signifikanz.

4.7. Abstand A. poplitea zur Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 (Distanz 1) in Abhängigkeit der Beugegrade 0°, 30°, 60°, 90°

Da alle Werte metrisch skaliert und normalverteilt sind, bietet sich die einfaktorielle Varianzanalyse ohne Messwiederholungen (ANOVA) für den Mittelwertvergleich an. Hierbei wird ermittelt, ob statistisch signifikante Unterschiede in den vier Beugegraden in Bezug auf den Abstand der A. poplitea zur posterioren Tibiakante vorliegen, bezogen auf die Grundgesamtheit. Somit kann evaluiert werden, ob die Lagerung des Kniegelenks in 0°, 30°, 60° oder 90° Beugung jeweils einen Vorteil für die Sicherheit der A. poplitea während der Operation bietet.

Die Nullhypothese lautet, dass es zwischen den Mittelwerten der einzelnen Beugegraden keinen Unterschied in der Grundgesamtheit gibt. Die Alternativhypothese besagt, dass sich mindestens zwei Beugegradmittelwerte voneinander in der Grundgesamtheit unterscheiden. Das Ziel ist, die Nullhypothese zu verwerfen und die Alternativhypothese anzunehmen.

Die Mittelwerte des Abstands zwischen A. poplitea und der posterioren Tibiakante der einzelnen Beugegrade für Distanz 1 sind in **Tabelle 6** mit der jeweiligen Standardabweichung und zugehörigem 95%-Konfidenzintervall angegeben. Hier zeigt sich, dass der Abstand in 90° Beugung am größten ist, mit einer Differenz von 0,6 mm im Vergleich zu 0° Beugung. Die große Standardabweichung und die sich überlappenden 95%-Konfidenzintervalle (**Abbildung 20**) kommen dadurch zustande, dass sich in den Einzelwerten der Präparate in 9 der 17 Präparate der größte Abstand in 90°, jedoch in vier der Präparate in 0° Beugung darlegt.

Der größte Unterschied der Abstände findet sich zwischen 90° und 30° Beugung mit 1,3 mm. Eine Korrelation zwischen zunehmendem Beugegrad und Abstand ist nicht zu erkennen.

Beugungsgrad	Mittelwert	Standard- abweichung	95% Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
0° Beugung	13,4 mm	1,9 mm	12,3 mm	14,4 mm
30° Beugung	12,7 mm	2,4 mm	11,4 mm	13,9 mm
60° Beugung	12,9 mm	2,1 mm	11,8 mm	14,0 mm
90° Beugung	14,0 mm	1,9 mm	13,1 mm	13,8 mm

Tabelle 6: Deskriptive Statistik für Distanz 1. Darstellung von Mittelwert, Standardabweichung und 95%-Konfidenzintervall. Mit einer Differenz von 0,6 mm zu 0° Beugung ist der Abstand von der A. poplitea zur Tibiahinterkante in 90° Beugung am größten.

Die Durchführung der Varianzanalyse für Distanz 1 ergab einen Signifikanzwert von 0,230. Die Mittelwerte der Abstände in den vier Beugegraden unterscheiden sich anhand unserer Stichprobengruppe auf Höhe von Distanz 1 demnach nicht signifikant (**Abbildung 21**).

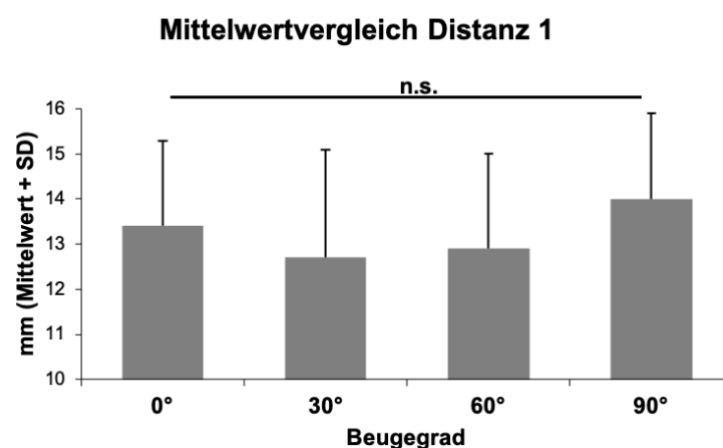


Abbildung 21: Graphische Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung des Abstands der Arterie zur Tibiahinterkante für Distanz 1 in den einzelnen Beugegraden. Für eine bessere Übersicht schneidet die Y-Achse die X-Achse bei 10 mm. Es konnte zwischen den vier Gruppen der Beugegrade kein signifikanter Unterschied in den Mittelwerten der Abstände nachgewiesen werden.

4.8. Abstand A. poplitea zur Tibiahinterkante auf Messhöhe 2 (Distanz 2) in Abhängigkeit der Beugegrade 0°, 30°, 60°, 90°

In **Tabelle 7** sind die Mittelwerte, Standardabweichungen und 95%-Konfidenzintervalle für Distanz 2 aufgeführt. Hier zeigt sich in 0° Beugung im Mittelwertvergleich der größte Abstand

von der A. poplitea zur Tibiahinterkante mit 12,4 mm. In 90° Beugung liegt der Abstand bei 11,9 mm. Die sich überlappenden 95%-Konfidenzintervalle und die große Standardabweichung (**Abbildung 22**) lassen sich auch hier mit den Einzelmessungen der Präparate erklären. Bei 9 von 17 Präparaten ist der Abstand in 0° Beugung größer als in 90° Beugung. Bei drei Präparaten ist der Abstand in 90° Beugung jedoch größer als in 0° Beugung. Der kleinste Abstand zeigt sich hier in 60° Beugung mit 11 mm. Eine Korrelation zwischen zunehmendem Beugegrad und Abstand ist auch auf Höhe von Distanz 2 nicht zu erkennen.

Beugungsgrad	Mittelwert	Standardabweichung	95% Konfidenzintervall	
			Untergrenze	Obergrenze
0° Beugung	12,4 mm	1,8 mm	11,4 mm	13,4 mm
30° Beugung	12,3 mm	2,1 mm	10,2 mm	12,5 mm
60° Beugung	11,0 mm	1,9 mm	9,9 mm	12,1 mm
90° Beugung	11,9 mm	1,7 mm	11,0 mm	12,8 mm

Tabelle 7: Deskriptive Statistik für Distanz 2. Darstellung von Mittelwert, Standardabweichung und 95%-Konfidenzintervall. Mit einer Differenz zwischen 0° und 30° von lediglich 0,1 mm ist der Abstand von der A. poplitea zur Tibiahinterkante in 0° Beugung am größten.

Auf Höhe von Distanz 2 ergab die Varianzanalyse einen Signifikanzwert von 0,216. Somit liegt auch für Distanz 2 kein signifikantes Ergebnis zwischen den Abständen von A. poplitea zur Tibiahinterkante in den einzelnen Beugegradgruppen vor (**Abbildung 22**).

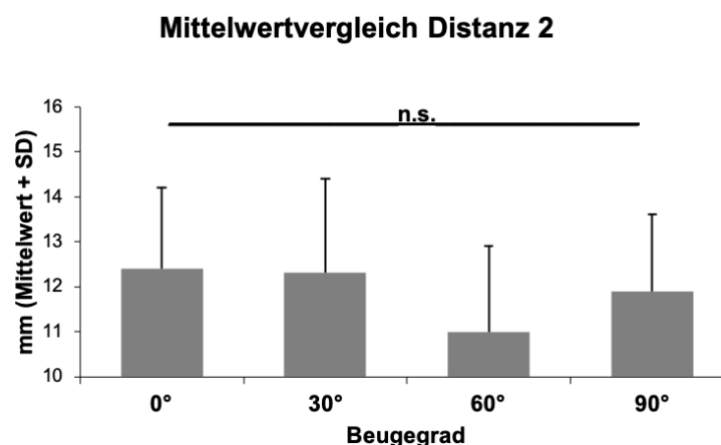


Abbildung 22: Graphische Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung des Abstands der Arterie zur Tibiahinterkante für Distanz 2 in den einzelnen Beugegraden. Für eine bessere Übersicht schneidet die Y-Achse die X-Achse bei 10 mm. Es konnte zwischen

den vier Gruppen der Beugegrade kein signifikanter Unterschied der Mittelwerte nachgewiesen werden.

4.9. Vergleich des Abstands zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante des linken und rechten Kniegelenks innerhalb einer Körperspender:in

Von sieben Körperspender:innen wurden sowohl das rechte als auch das linke Kniegelenk untersucht. Somit ergibt sich die Frage, ob es bezüglich des Abstands von A. poplitea zur posterioren Tibiakante relevante Unterschiede im Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in gibt und ob dieser Abstand in einem der vier Beugegrade besonders ausgeprägt ist.

In Streckung des Kniegelenks zeigt sich auf Höhe von Distanz 1 eine durchschnittliche Abweichung von 1,2 mm zwischen rechtem und linkem Kniegelenk innerhalb einer Körperspender:in. Auf Höhe von Distanz 2 liegt sie bei 1,6 mm. Die größte Abweichung zwischen linkem und rechtem Kniegelenk beträgt auf Höhe von Distanz 1 in K5 3 mm (**Abbildung 23A**) und auf Höhe von Distanz 2 in K1 2,5 mm (**Abbildung 23B**).

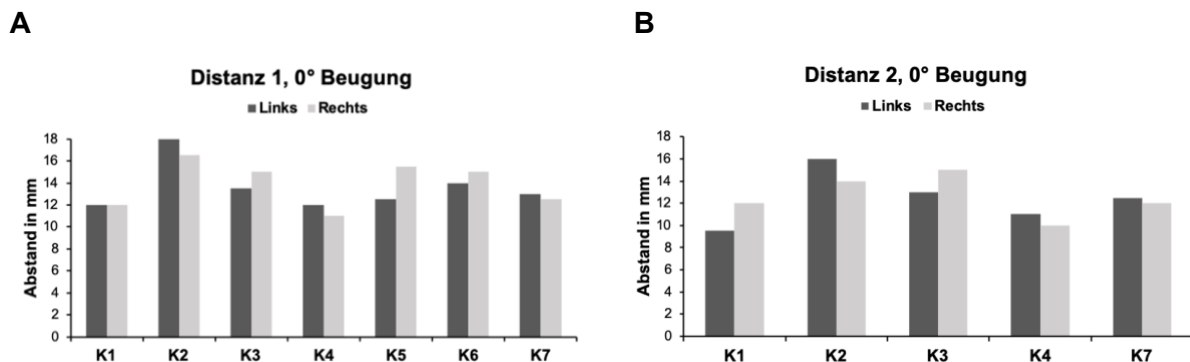


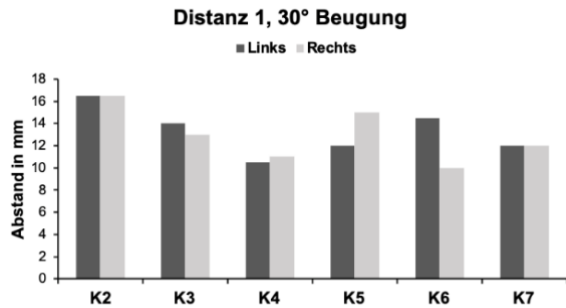
Abbildung 23: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 0° Beugung.

K = Körperspender:in. **(A)** Auf Höhe von Distanz 1, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,2 mm und einer maximalen Abweichung von 3 mm in K5. **(B)** Auf Höhe von Distanz 2, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,6 mm und einer maximalen Abweichung von 2,5 mm in K1.

In 30° Beugung zeigt sich ein durchschnittlicher Unterschied zwischen rechtem und linkem Kniegelenk innerhalb einer Körperspender:in von 1,5 mm auf Höhe von Distanz 1 und 1,6 mm

auf Höhe von Distanz 2. Der maximale Unterschied findet sich hier für Distanz 1 in K6 mit 4,5 mm (**Abbildung 24A**) und für Distanz 2 in K5 mit 3 mm (**Abbildung 24B**).

A



B

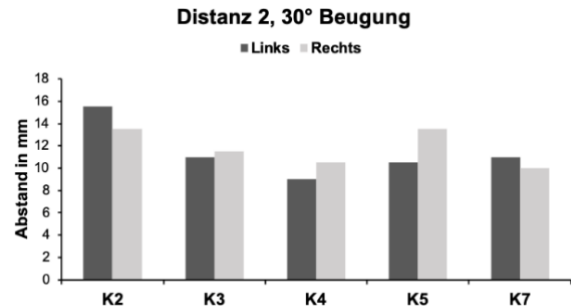
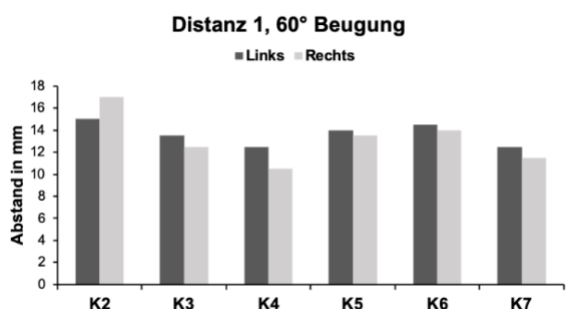


Abbildung 24: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 30° Beugung. K = Körperspender:in. **(A)** Auf Höhe von Distanz 1, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,5 mm und einer maximalen Abweichung von 4,5 mm in K6. **(B)** Auf Höhe von Distanz 2, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,6 mm und einer maximalen Abweichung von 3 mm in K5.

In 60° Beugung liegt die durchschnittliche Abweichung auf Höhe von Distanz 1 bei 1,2 mm und auf Höhe von Distanz 2 bei 1,0 mm. Die größte Abweichung im Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in findet sich mit 2 mm auf Höhe von Distanz 1 in K2 (**Abbildung 25A**) und ebenfalls mit 2 mm auf Höhe von Distanz 2 in K4 (**Abbildung 25B**).

A



B

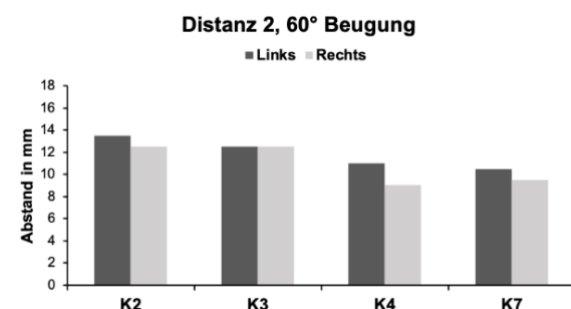
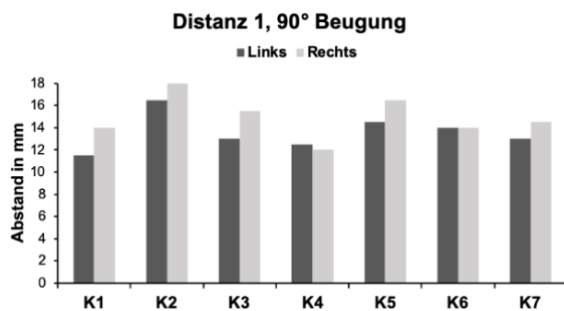


Abbildung 25: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 60° Beugung. K = Körperspender:in. **(A)** Auf Höhe von Distanz 1, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,2 mm und einer maximalen Abweichung von 2 mm in K2. **(B)** Auf Höhe von Distanz 2, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,0 mm und einer maximalen Abweichung von 2 mm in K4.

Bei einem Beugewinkel des Kniegelenks von 90° zeigt sich eine durchschnittliche Abweichung des Abstands auf Höhe von Distanz 1 von 1,5 mm und auf Höhe von Distanz 2 von 1,3 mm. Die maximale Abweichung beträgt hier 2,5 mm auf Höhe von Distanz 1 in K3 (**Abbildung 26A**) und 3,5 mm auf Höhe von Distanz 2 in K1 und K3 (**Abbildung 26B**). Auf Höhe von Distanz 2 finden sich in drei Kniepräparaten (K2, K4, K5) exakt dieselben Messwerte im Rechts-Links-Vergleich.

A



B

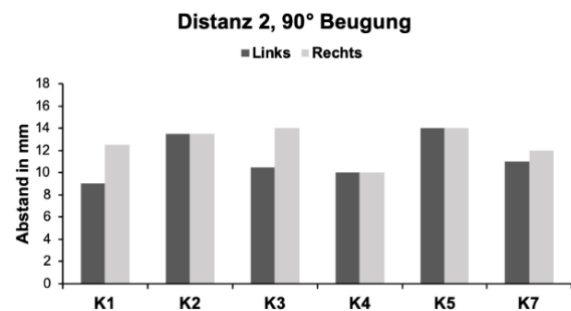


Abbildung 26: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 90° Beugung. K = Körperspender:in. **(A)** Auf Höhe von Distanz 1, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,5 mm und einer maximalen Abweichung von 2,5 mm in K3. **(B)** Auf Höhe von Distanz 2, mit einer durchschnittlichen Abweichung von 1,3 mm und einer maximalen Abweichung von 3,5 mm in K1 und K3.

Die Differenzen zwischen dem linken und rechten Kniegelenk innerhalb einer Körperspender:in sind gering. Die maximale Differenz fand sich als Ausreißer in 30° Beugung bei einer Körperspender:in und beträgt 4,5 mm. Durchschnittlich liegen die Differenzen in allen Beugegraden und auf beiden Distanzen unter 2 mm. In 60° Beugung ist die durchschnittliche Differenz mit 1,2 mm auf Messhöhe 1 und 1 mm auf Messhöhe 2 am geringsten und in 30° Beugung mit 1,5 mm auf Messhöhe 1 und 1,6 mm auf Messhöhe 2 am höchsten.

5. Diskussion

Die OWHTO ist ein häufig vollzogener Eingriff, welcher in direkter Nähe zum neurovaskulären Bündel in der Kniekehle durchgeführt wird. Die potenzielle Gefährdung der A. poplitea während einer OWHTO stellt ein ernstzunehmendes Risiko dar. Lediglich der M. popliteus schützt die Arterie anatomisch betrachtet intraoperativ vor einer Verletzung⁶⁶.

Die vorliegende Studie wurde mit Hilfe der CT-Diagnostik durchgeführt. Bislang liegen keine Studien vor, die den Einfluss der intraoperativen Beinlagerung bei einer OWHTO in den Beugegraden 0°, 30°, 60°, 90° auf die topographische Beziehung der A. poplitea zur Tibia mit dieser Diagnostik untersucht haben.

Die Computertomographie wurde aus den verschiedenen Diagnostikverfahren ausgewählt, da sie eine dreidimensionale Darstellung der Anatomie ermöglicht. Sie gilt im klinischen Alltag als Goldstandard für die Darstellung von Knochen, insbesondere zur Beurteilung der Corticalis und Gefäße (CT-Angiographie)⁷⁵⁻⁷⁷. Um die Präparate in den unterschiedlichen Beugegraden exakt einzustellen, war eine externe Haltevorrichtung notwendig. Die Realisierung einer solchen Haltevorrichtung gestaltet sich aufgrund der räumlichen Enge der MRT-Gantry und der eingeschränkten Materialauswahl als schwierig, in der CT konnte sie jedoch problemlos eingesetzt werden.

Wie in allen Studien an Humanpräparaten stellt sich die Frage der Übertragbarkeit auf die Bedingungen in vivo. Es liegen keine Kenntnisse darüber vor, ob die Körperspender:innen zu Lebzeiten über Knieschmerzen klagten. Außerdem ist fraglich, ob es zu Lebzeiten Knie-traumata oder Knie-Operationen gab. Dies könnte zu einer Veränderung von Weichteilstrukturen geführt und Einfluss auf die Ergebnisse genommen haben. Zudem muss angenommen werden, dass sich die Weichteilstrukturen postmortem verändern. Durch den fehlenden Muskeltonus, die fehlende Durchblutung und die fehlende Pulsation der Arterie sind die Weichteile fixierter und stellen sich gegebenenfalls anders dar als in vivo.

Aufgrund der ionisierenden Strahlung ist es jedoch nicht möglich, eine CT-Diagnostik an lebenden Patient:innen selektiv für diese Fragestellung durchzuführen. Aufnahmen von Patient:innen, die ohnehin eine CT-Angiographie benötigen, würden sich nicht für die Studie eignen. Dies ist darin begründet, dass die Fragestellung vier Beugegrade voraussetzt, die in jenen Aufnahmen unberücksichtigt bleiben würden.

Das durchschnittliche Alter ist mit 87,4 Jahren bei weiblichen und 72 Jahren bei männlichen Körperspender:innen höher als das Alter, in dem in der Regel die HTO durchgeführt wird^{26,44}. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen einer Gonarthrose hoch. Diese könnte

die Lagebeziehung zwischen dem Tibiaknochen und der A. poplitea verändern⁶¹. Jedoch konnten Lee et al. in einer Untersuchung zeigen, dass pathologische Prozesse im Kniegelenk durch Arthrose den Abstand zwischen A. poplitea und der Tibiahinterkante lediglich im Bereich von 1 mm verändern und eine klinische Relevanz somit unwahrscheinlich erscheint⁷⁸.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie stimmen weitestgehend mit den in der Literatur bereits veröffentlichten Ergebnissen überein.

Im Kontext dieser Studie wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der Lagerung des Kniegelenks in 0°, 30°, 60° und 90° Beugung in Bezug auf den Abstand der A. poplitea zur posterioren Tibiakante festgestellt.

Auf Höhe der gemessenen Distanz 1 war der Abstand in 90° Beugung mit durchschnittlich 14 mm (+/- 1,9 mm) zwar am größten, jedoch nicht signifikant unterschiedlich zu den anderen Beugegraden. Dies lag vor allem an den sich überlappenden Standardabweichungen der Werte. Um zu überprüfen, ob es sich bei diesen Werten um Ausreißer handelt, und um eine mögliche Signifikanz des beobachteten Trends nachzuweisen, wäre eine größer Stichprobe notwendig.

Sowohl Shetty et al. als auch Choi et al. kamen zu dem Ergebnis, dass sich in 90° Beugung der Abstand zwischen Arterie und Tibiahinterkante in den meisten Fällen vergrößert. In beiden Studien lag die durchschnittliche Zunahme des Abstands zwischen 0° und 90° Beugung jedoch lediglich bei 1,7 mm.^{66,67} Shetty et al. beschreiben, dass sich bei 85% der Patient:innen der Abstand in 90° Beugung vergrößert. Bei den verbleibenden 15% der Patient:innen bewegte sich die A. poplitea jedoch näher an die Tibiakante heran.⁶⁶

In der vorliegenden Studie betrug die durchschnittliche Zunahme des Abstands zwischen Arterie und Tibia zwischen 0° und 90° Beugung auf Messhöhe 1 lediglich 0,6 mm. Selbst wenn sich hier ein signifikantes Ergebnis gezeigt hätte, stellt sich die Frage der klinischen Relevanz. Bei Durchführung der horizontalen Osteotomie ist es fraglich, ob je nach Erfahrung des Operateurs und Sichtverhältnis nach dorsal mit großer Sicherheit auf 2 mm genau gesägt werden kann.

Auf Höhe der in der vorliegenden Studie gemessenen zweiten Distanz zeigt sich ein gegenteiliger Trend mit dem größten Abstand zwischen Arterie und Knochen in 0° Beugung. Jedoch ist auch hier das Ergebnis aufgrund großer Standardabweichungen nicht signifikant. Zu einem ähnlichen Ergebnis gelangten Zaidi et al.. Hier zeigte sich bei 12 von 20 Patient:innen ein größerer Abstand in 0° Beugung und bei 8 von 20 Patient:innen eine Zunahme des Abstands in 90° Beugung.⁶⁹

Die Fragen, weshalb sich in der vorliegenden Studie ein gegensätzlicher Trend auf Höhe der beiden Distanzen, einmal zu 90° und einmal zu 0° Beugung, zeigt und weshalb keine

Korrelation zwischen zunehmenden Beugegraden und dem Abstand festgestellt werden konnte, werden im Folgenden genauer diskutiert.

Die A. poplitea ist an zwei Punkten fixiert: kranial am Durchtritt der Arterie durch den Hiatus adductorius und kaudal am Abgang der A. tibialis anterior, welche anschließend die Membrana interossea unterhalb des Tibiofibulargelenks durchdringt. Außerdem bildet die Arterie in zunehmender Beugung spiralförmige Strukturen zwischen den beiden Fixpunkten aus, um sich dem in Beugung verminderten Platz anzupassen. Diese Spiralen entstehen vor allem im oberen Teil der Arterie und finden im Fettgewebe der Kniekehle Platz. Im mittleren und unteren Drittel der Arterie, zwischen den Fixpunkten, ist die Spiralbildung weniger stark ausgeprägt.^{65,66} Dies könnte ein Grund dafür sein, weshalb die Arterie 3,5 cm distal des Tibiaplateaus, beziehungsweise weiter distal auf Messhöhe 2, keine großen Schwankungen des Abstands zwischen Arterie und Tibia in den verschiedenen Beugegraden zeigt. Außerdem muss davon ausgegangen werden, dass in der vorliegenden Studie durch das Einbringen des Katheters der Mechanismus der Spiralbildung methodisch bedingt verhindert wird.

Diese Annahme wird durch die MRT-Studie von Shiomi et al. gestützt. Sie beschreiben, dass sich in zunehmender Beugung der Abstand von der A. poplitea zur Tibiahinterkante auf Höhe des Tibiaplateaus bis 1,5 cm distal des Plateaus vergrößert. Die Beugung weiter distal habe jedoch keinen Einfluss mehr auf die Mobilität der Arterie.⁷² Möglicherweise ist die Arterie in dem Bereich distal der 1,5 cm durch die oben genannten Gründe schon zu stark fixiert. Dies könnte die geringe Schwankung des Abstands zwischen Arterie und Tibia in den Beugegraden und die fehlende Korrelation zwischen zunehmenden Beugegraden und dem Abstand erklären.

Die Osteotomiehöhe des horizontalen Sägeschnitts wird individuell vor jeder OWHTO mit Hilfe unterschiedlicher Methoden bestimmt, bedingt durch die anatomische Variabilität der Patient:innen. Somit ist es schwierig, eine festgelegte medialeseitige Osteotomiehöhe für alle Patient:innen oder Humanpräparate in einer Studie festzulegen. In der Literatur variiert diese Höhe in unterschiedlichen Studiendesigns zwischen 2-6 cm^{67,68,70,72}.

In der vorliegenden Studie wurde eine erste Messhöhe auf Höhe der horizontalen Osteotomie 3,5 cm distal des Tibiaplateaus gewählt. Eine zweite Messhöhe, welche den Einsatz von Osteotomiemeißeln und die dadurch bedingte Verletzungsgefahr der Arterie imitiert, wurde mit Hilfe eines nach distal angelegten 15°-Winkels festgelegt.

Die unterschiedlichen Osteotomiehöhen in den verschiedenen Studiendesigns könnten durch die oben genannte anatomische Fixierung ebenfalls ein Grund für die unterschiedlichen beobachteten Trends sein. So empfehlen Kim et al. und Yoo et al. mit einer Osteotomiehöhe von 2 cm distal des Tibiaplateaus ausdrücklich eine intraoperative 90°-Lagerung^{68,70}. Choi et al. wählten in ihrer Studie eine Osteotomiehöhe von 3,5 cm, Shiomi et al. legten

mehrere Osteotomiehöhen zwischen 2-6 cm distal des Plateaus fest. Obwohl in beiden Studien signifikante Ergebnisse festgestellt wurden, weisen die Autoren jeweils auf die fehlende klinische Relevanz aufgrund eines zu minimalen Unterschiedes der Abstände von Arterie zur Tibia in den verschiedenen Beugegraden hin^{67,72}.

Sowohl die bereits veröffentlichten Studien als auch die vorliegende Studie machen deutlich, dass weitere Maßnahmen zum Schutz der A. poplitea während einer OWHTO ergriffen und standardisiert durchgeführt werden sollten.

Rein anatomisch betrachtet ist der M. popliteus der einzige Schutz der Arterie. Durch seine Funktion der Flexion des Kniegelenks gilt in der Literatur häufig die Annahme, dass sich der Muskelbauch in zunehmender Flexion vergrößert und somit die A. poplitea im neurovaskulären Bündel auf Höhe des Muskels nach dorsal drückt. Dies wurde beispielsweise in einer Studie von Yoo et al. untersucht und bestätigt.⁷⁰ Diese Studie wurde jedoch an sehr jungen Patient:innen mit einem durchschnittlichen Alter von 20,7 Jahren durchgeführt. Der Muskel ist möglicherweise altersbedingt sehr ausgeprägt. Den M. popliteus als Schutz für die Arterie anzusehen, wird von Madry et al. kritisch betrachtet, da sich der Muskel häufig dünn darstellt und somit nicht ausreichend Schutz bieten kann⁷⁹. Ob der Muskel überhaupt auf einem HTO-Level von 3,5 cm distal des Tibiaplateaus und weiter distal noch schützen kann, muss genauer untersucht werden und steht vermutlich unter dem Einfluss der individuellen Anatomie der Patient:innen.

Als zusätzliche Schutzmaßnahme während einer OWHTO kann ein Hohmann-Retraktor dorsal auf Höhe der horizontalen Osteotomie platziert werden, um das neurovaskuläre Bündel während des Sägeschnitts zu schützen^{66,72,79}. Dieser muss durch Ablösung des Periosts zwischen Knochen und Muskel positioniert werden. Wird er versehentlich dorsal des Muskels und der A. poplitea positioniert, würde dies dafür sorgen, dass die Arterie durch Zug an dem Retraktor sogar näher an die hintere Tibiakante herangezogen wird und sich das Verletzungsrisiko der Arterie erhöht.⁶⁴ Das Platzieren des Hohmann-Retraktors erfordert somit genaue Kenntnisse der Anatomie.

Außerdem sollte das Einbringen von K-Drähten stets unter Röntgenkontrolle erfolgen, um ein unkontrolliertes Einbringen der Drähte ins neurovaskuläre Bündel zu verhindern⁷⁹.

Der Sägewinkel in der Koronarebene kann zusätzlich Einfluss auf die Sicherheit der A. poplitea während der horizontalen Osteotomie nehmen. In zwei Studien wurde herausgestellt, dass eine am medialsten Punkt der Tibia durchgeführte Osteotomie eine höhere Verletzungsgefahr aufweist, wenn sie in einem Winkel von über 30-38° angesetzt wird.^{67,68}

Eine weitere Überlegung zum Schutz der Arterie ist, präoperativ bei Patient:innen mit geplanter HTO ein MRT durchzuführen, da in bis zu 6% der Bevölkerung eine hochverzweigte A. poplitea

auftritt^{10,66,68,80}. Ungefähr 2% der Bevölkerung zeigen ein Typ II, A2 Verzweigungsmuster der A. poplitea. Hierbei verläuft die proximal abgehende A. tibialis anterior nicht posterior, sondern anterior des M. popliteus, unmittelbar an der posterioren Tibiakante entlang, sodass der M. popliteus als einziger anatomischer Schutz die A. poplitea nicht mehr schützen kann.

Dies wird in einer Studie von Frey et al. deutlich.¹¹ Hier wurden die Abstände zwischen der Arterie und dem virtuell angelegten chirurgischen Instrumentarium bei HTO anhand von MRT-Bildern gemessen. Es zeigte sich, dass sich dieser Abstand im Gegensatz zu der Typ 1 Normvariante bei Patient:innen mit Typ II, A2 Variante signifikant verringert.

Während der Untersuchung befanden sich die Kniegelenke in Streckung. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die gebeugte Lagerung bei diesem Verzweigungsmuster die Position der Arterie nicht signifikant verändert, da die Arterie vom M. popliteus in beiden Beugegraden gegen die Tibiakante gedrückt wird.

Außerdem konnte in dieser Studie gezeigt werden, dass die Typ II, A2 Variante zuverlässig mittels MRT ohne Kontrastmittel erkannt werden kann.¹¹

Eine weitere Möglichkeit, eine Typ II, A2 Variante präoperativ zu diagnostizieren, ist laut einem case report von Franca et al. die Doppler-Sonographie. Auch wenn mit der Untersuchungsmethode nicht die gesamte vaskuläre Anatomie des Kniegelenks dargestellt werden kann, so ist eine Darstellung der aberranten A. tibialis anterior möglich.⁸¹ Dies könnte eine schnell verfügbare, nichtinvasive Möglichkeit bieten die intraoperative Sicherheit zu erhöhen, ist jedoch sehr abhängig von den sonographischen Fertigkeiten des Untersuchers.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die intraoperative Lagerung in 90° bei der OHTO gemäß aktueller Studienlage und der in dieser Studie beobachteten Trends einen gewissen Vorteil für die Sicherheit der Arterie ermöglichen könnte. Genauso wahrscheinlich ist es jedoch, dass sich die 90°-Lagerung bei einzelnen Patient:innen eher nachteilig auswirkt oder gar keinen Effekt zeigt. Vermutlich ist die Lagerung vor allem bei einer gelenknahen Osteotomie (bis 2 cm distal des Tibiaplateaus) aufgrund der hohen Mobilität der Arterie in diesem Bereich relevant.

Wie in der vorliegenden Arbeit herausgestellt, ist es demnach wichtig, andere Schutzmaßnahmen wie das Einbringen von Retraktoren, Röntgenkontrollen beim Einbringen von K-Drähten, einen sicheren Winkel des Sägeschnitts und gegebenenfalls ein präoperatives MRT zu ergreifen und standardisiert einzusetzen.

6. Literaturverzeichnis

1. Fox AJ, Wanivenhaus F, Burge AJ, Warren RF, Rodeo SA. The human meniscus: a review of anatomy, function, injury, and advances in treatment. *Clin Anat* 2015; **28**(2): 269-87.
2. Markes AR, Hodax JD, Ma CB. Meniscus Form and Function. *Clin Sports Med* 2020; **39**(1): 1-12.
3. Schünke M, Schulte E, Schumacher U. Prometheus LernAtlas der Anatomie: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. 4th ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2014.
4. Kropman RH, Kiela G, Moll FL, de Vries JP. Variations in anatomy of the popliteal artery and its side branches. *Vasc Endovascular Surg* 2011; **45**(6): 536-40.
5. Tomaszewski KA, Popieluszko P, Graves MJ, et al. The evidence-based surgical anatomy of the popliteal artery and the variations in its branching patterns. *J Vasc Surg* 2017; **65**(2): 521-9 e6.
6. Klecker RJ, Winalski CS, Aliabadi P, Minas T. The aberrant anterior tibial artery: magnetic resonance appearance, prevalence, and surgical implications. *Am J Sports Med* 2008; **36**(4): 720-7.
7. Senior HD. Abnormal branching of the human popliteal artery. *American Journal of Anatomy* 1929; **44**(1): 111-20.
8. Lippert H, Pabst R. Arterial Variations in Man: Classification and Frequency. 1st ed. München: J.F. Bergmann-Verlag; 1985.
9. Kim D, Orron DE, Skillman JJ. Surgical significance of popliteal arterial variants. A unified angiographic classification. *Ann Surg* 1989; **210**(6): 776-81.
10. Gerich T, Lens V, Seil R, Pape D. Aufklappende Osteotomie des Tibiakopfes. *Der Orthopaede* 2014; **43**: 1008-15.
11. Frey C, Bugarinovic G, Zhou J, et al. Effect of Anatomic Variations in the Anterior Tibial Artery on Risk of Injury During Orthopaedic Knee Surgeries. *Orthop J Sports Med* 2024; **12**(12): 23259671241301461.
12. Felson DT. Epidemiology of hip and knee osteoarthritis. *Epidemiol Rev* 1988; **10**: 1-28.
13. Woolf AD, Pfleger B. Burden of major musculoskeletal conditions. *Bull World Health Organ* 2003; **81**(9): 646-56.
14. Hunter DJ, Bierma-Zeinstra S. Osteoarthritis. *Lancet* 2019; **393**(10182): 1745-59.
15. Rabenberg M. Gesundheitsberichterstattung des Bundes Heft 54: Arthrose. 2013. <https://edoc.rki.de/bitstream/handle/176904/3241/29EzIgbSU9wwE.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
16. Michael JW, Schlüter-Brust KU, Eysel P. The epidemiology, etiology, diagnosis, and treatment of osteoarthritis of the knee. *Dtsch Arztebl Int* 2010; **107**(9): 152-62.
17. Fuchs J, Kuhnert R, Scheidt-Nave C. 12-Monats-Prävalenz von Arthrose in Deutschland. *Journal of Health Monitoring* 2017; (2 (3)): 55-60.
18. Bennell KL, Hunter DJ, Paterson KL. Platelet-Rich Plasma for the Management of Hip and Knee Osteoarthritis. *Curr Rheumatol Rep* 2017; **19**(5): 24.
19. Stöve J, Halder A, e.V. DGfOUU. Prävention und Therapie der Gonarthrose Version 5.0. 2024. <https://register.awmf.org/de/leitlinien/detail/187-050> (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
20. Sharma L, Chmiel JS, Almagor O, et al. The role of varus and valgus alignment in the initial development of knee cartilage damage by MRI: the MOST study. *Ann Rheum Dis* 2013; **72**(2): 235-40.
21. Imhoff FB, Fucentese SF, Harrer J, Tischer T. [The influence of axial deformities and their correction on the development and progression of osteoarthritis]. *Orthopade* 2021; **50**(5): 378-86.
22. Hackenbroch MH. Arthrosen: Basiswissen zu Klinik Diagnostik und Therapie. 1st ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2002.
23. Hannan MT, Felson DT, Pincus T. Analysis of the discordance between radiographic changes and knee pain in osteoarthritis of the knee. *J Rheumatol* 2000; **27**(6): 1513-7.

24. Kohn MD, Sassoon AA, Fernando ND. Classifications in Brief: Kellgren-Lawrence Classification of Osteoarthritis. *Clinical Orthopaedics and Related Research*® 2016; **474**(8): 1886-93.
25. Kellgren JH, Lawrence JS. Radiological assessment of osteo-arthritis. *Ann Rheum Dis* 1957; **16**(4): 494-502.
26. Heinecke M, Röhner E, Pietsch S, Matziolis G. [Knee realignment osteotomy in adults]. *Orthopäde* 2021; **50**(7): 570-7.
27. Kutzner I, Heinlein B, Graichen F, et al. Loading of the knee joint during activities of daily living measured in vivo in five subjects. *J Biomech* 2010; **43**(11): 2164-73.
28. Kuster MS. Exercise recommendations after total joint replacement: a review of the current literature and proposal of scientifically based guidelines. *Sports Med* 2002; **32**(7): 433-45.
29. Aubriot JH. [Post-traumatic knee degeneration]. *Rev Prat* 1998; **48**(16): 1799-804.
30. Schneider S, Dewitz H, Klein P, Schäferhoff P. Stellt die valgusierende hohe Tibiaosteotomie eine mögliche Therapiemethode bei Leistungssportlern dar? *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 2015; **66**(03): 71-7.
31. Cooke TD, Scudamore A, Greer W. Varus knee osteoarthritis: whence the varus? *J Rheumatol* 2003; **30**(12): 2521-3.
32. Kitoh H, Matsushita M, Mishima K, Kamiya Y, Sawamura K. Disease-specific complications and multidisciplinary interventions in achondroplasia. *J Bone Miner Metab* 2022; **40**(2): 189-95.
33. Thaller PH, Fürmetz J, Chen F, Degen N, Manz KM, Wolf F. Bowlegs and Intensive Football Training in Children and Adolescents. *Dtsch Arztebl Int* 2018; **115**(24): 401-8.
34. Shohat N, Machluf Y, Farkash R, Finestone AS, Chaïter Y. Clinical Knee Alignment among Adolescents and Association with Body Mass Index: A Large Prevalence Study. *Isr Med Assoc J* 2018; **20**(2): 75-9.
35. Brenton DP. Skeletal abnormalities in homocystinuria. *Postgrad Med J* 1977; **53**(622): 488-94; discussion 95-6.
36. Swienckowski JJ, Pennington DW. Unicompartmental knee arthroplasty in patients sixty years of age or younger. *J Bone Joint Surg Am* 2004; **86-A Suppl 1**(Pt 2): 131-42.
37. Steele RG, Hutabarat S, Evans RL, Ackroyd CE, Newman JH. Survivorship of the St Georg Sled medial unicompartmental knee replacement beyond ten years. *J Bone Joint Surg Br* 2006; **88**(9): 1164-8.
38. Ackroyd CE, Whitehouse SL, Newman JH, Joslin CC. A comparative study of the medial St Georg sled and kinematic total knee arthroplasties. Ten-year survivorship. *J Bone Joint Surg Br* 2002; **84**(5): 667-72.
39. Staats K, Merle C, Schmidt-Braekling T, Boettner F, Windhager R, Waldstein W. Is the revision of a primary TKA really as easy and safe as the revision of a primary UKA? *Ann Transl Med* 2016; **4**(24): 532.
40. Brown A. The Oxford unicompartmental knee replacement for osteoarthritis. *Issues Emerg Health Technol* 2001; (23): 1-4.
41. Demirel M, Sağlam Y, Yıldırım AM, Bilgili F, Şeker A, Şen C. Temporary Epiphysiodesis Using the Eight-Plate in the Management of Children with Leg Length Discrepancy: A Retrospective Case Series. *Indian J Orthop* 2022; **56**(5): 874-82.
42. Lobenhoffer P, Van Heerwaarden R, Agneskirchner JD. Kniegelenksnahe Osteotomien: Indikation- Planung- Operationstechniken mit Plattenfixateuren. 2nd ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2014.
43. Coventry MB. Upper tibial osteotomy. *Clin Orthop Relat Res* 1984; (182): 46-52.
44. Pape D, Hinterwimmer S. Kniegelenksnahe Osteotomie. *Der Orthopäde* 2017; **46**(7): 557-8.
45. Sabzevari S, Ebrahimpour A, Roudi MK, Kachooei AR. High Tibial Osteotomy: A Systematic Review and Current Concept. *Arch Bone Jt Surg* 2016; **4**(3): 204-12.
46. Han SB, In Y, Oh KJ, Song KY, Yun ST, Jang KM. Complications Associated With Medial Opening-Wedge High Tibial Osteotomy Using a Locking Plate: A Multicenter Study. *J Arthroplasty* 2019; **34**(3): 439-45.

47. Fujisawa Y, Masuhara K, Shiomi S. The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. An arthroscopic study of 54 knee joints. *Orthop Clin North Am* 1979; **10**(3): 585-608.
48. Moore J, Mychaltchouk L, Lavoie F. Applicability of a modified angular correction measurement method for open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017; **25**(3): 846-52.
49. Sivertsen EA, Vik J, Meland ASV, Nerhus TK. The Dugdale planning method for high tibial osteotomies underestimates the correction angle compared to the Miniaci method. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2023; **31**(4): 1507-14.
50. Miniaci A, Ballmer FT, Ballmer PM, Jakob RP. Proximal tibial osteotomy. A new fixation device. *Clin Orthop Relat Res* 1989; (246): 250-9.
51. Attinger MC, Behrend H, Jost B. Complete rupture of the popliteal artery complicating high tibial osteotomy. *J Orthop* 2014; **11**(4): 192-6.
52. Brouwer RW, Huizinga MR, Duivenvoorden T, et al. Osteotomy for treating knee osteoarthritis. *Cochrane Database of Systematic Reviews* 2014; (12).
53. Harris JD, McNeilan R, Siston RA, Flanigan DC. Survival and clinical outcome of isolated high tibial osteotomy and combined biological knee reconstruction. *The Knee* 2013; **20**(3): 154-61.
54. DePuySynthes. TOMOFIX® Osteotomy System, Surgical Technique: A Comprehensive Plating System for Stable Fixation of Osteotomies Around the Knee. 2014-2021. <https://www.jnjmedtech.com/en-US/product/tomofix-osteotomy-system#jnj-65699b78d5d42> (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
55. Arthrex. ContourLock™ HTO: Surgical Technique. 2018. <https://www.arthrex.com/de/weiterfuehrende-informationen/LT2-0110-EN/contourlock-hto?referringteam=knee> (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
56. Arthrex. PEEKPower™ HTO Plate: 2nd Generation | Surgical Technique. 2019. <https://zomar-bme.com/wp-content/uploads/2020/03/PEEKPower%E2%84%A2-HTO-Plate.pdf> (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
57. Arthrex. iBalance® HTO System: For Medial High Tibial Opening Wedge Osteotomy. 2022. <https://www.arthrex.com/de/weiterfuehrende-informationen/LT2-0122-EN/ibalance-hto-system?referringteam=knee> (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
58. Synthes. TomoFix Medial High Tibial Plate (MHT). For Medial High Osteotomies. . 2012. <https://pdf.medicalexpo.de/pdf-en/depuysynthes/tomofix/79814-91927.html> (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
59. Woodacre T, Ricketts M, Evans JT, et al. Complications associated with opening wedge high tibial osteotomy--A review of the literature and of 15 years of experience. *Knee* 2016; **23**(2): 276-82.
60. Kang T, Lee DW, Park JY, Han HS, Lee MC, Ro DH. Sawing toward the fibular head during open-wedge high tibial osteotomy carries the risk of popliteal artery injury. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2020; **28**(5): 1365-71.
61. Bisicchia S, Rosso F, Pizzimenti MA, Rungprai C, Goetz JE, Amendola A. Injury risk to extraosseous knee vasculature during osteotomies: a cadaveric study with CT and dissection analysis. *Clinical Orthopaedics Related Research* 2015; **473**(3): 1030-9.
62. Shenoy PM, Oh HK, Choi JY, et al. Pseudoaneurysm of the popliteal artery complicating medial opening wedge high tibial osteotomy. *Orthopedics* 2009; **32**(6): 442.
63. Franke L, Gossé F. [Angiological complications following high tibial head correcting osteotomy--a case report]. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 1997; **135**(1): 76-8.
64. Georgoulis AD, Makris CA, Papageorgiou CD, Moebius UG, Xenakis T, Soucacos PN. Nerve and vessel injuries during high tibial osteotomy combined with distal fibular osteotomy: a clinically relevant anatomic study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1999; **7**(1): 15-9.
65. Vernon P, Delattre JF, Johnson EJ, Palot JP, Clément C. Dynamic modifications of the popliteal arterial axis in the sagittal plane during flexion of the knee. *Surg Radiol Anat* 1987; **9**(1): 37-41.

66. Shetty AA, Tindall AJ, Qureshi F, Divekar M, Fernando KW. The effect of knee flexion on the popliteal artery and its surgical significance. *J Bone Joint Surg Br* 2003; **85**(2): 218-22.
67. Choi CH, Lee WS, Jung M, et al. Adequate protection rather than knee flexion prevents popliteal vascular injury during high tibial osteotomy: analysis of three-dimensional knee models in relation to knee flexion and osteotomy techniques. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2020; **28**(5): 1425-35.
68. Kim J, Allaire R, Harner CD. Vascular safety during high tibial osteotomy: a cadaveric angiographic study. *Am J Sports Med* 2010; **38**(4): 810-5.
69. Zaidi SH, Cobb AG, Bentley G. Danger to the popliteal artery in high tibial osteotomy. *J Bone Joint Surg Br* 1995; **77**(3): 384-6.
70. Yoo JH, Chang CB. The location of the popliteal artery in extension and 90 degree knee flexion measured on MRI. *Knee* 2009; **16**(2): 143-8.
71. Smith PN, Gelinas J, Kennedy K, Thain L, Rorabeck CH, Bourne RB. Popliteal vessels in knee surgery. A magnetic resonance imaging study. *Clin Orthop Relat Res* 1999; (367): 158-64.
72. Shiomi J, Takahashi T, Imazato S, Yamamoto H. Flexion of the knee increases the distance between the popliteal artery and the proximal tibia: MRI measurements in 15 volunteers. *Acta Orthop Scand* 2001; **72**(6): 626-8.
73. Chae DJ, Shetty GM, Wang KH, Montalban AS, Jr., Kim JI, Nha KW. Early complications of medial opening wedge high tibial osteotomy using autologous tricortical iliac bone graft and T-plate fixation. *Knee* 2011; **18**(4): 278-84.
74. Koo TK, Li MY. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med* 2016; **15**(2): 155-63.
75. Sakellariou G, Conaghan PG, Zhang W, et al. EULAR recommendations for the use of imaging in the clinical management of peripheral joint osteoarthritis. *Ann Rheum Dis* 2017; **76**(9): 1484-94.
76. Eckert J, Schmidt M, Magedanz A, Voigtländer T, Schmermund A. Coronary CT angiography in managing atherosclerosis. *Int J Mol Sci* 2015; **16**(2): 3740-56.
77. Deutsche Gesellschaft für Angiologie GfG. S3-Leitlinie zur Diagnostik, Therapie und Nachsorge der peripheren arteriellen Verschlusskrankheit. 2024. https://register.awmf.org/assets/guidelines/065-003l_S3_Diagnostik-Therapie-Nachsorge-periphere-arterielle-Verschlusskrankheit_2024-11_2.pdf (Zuletzt abgerufen am 28.09.2025).
78. Lee YS, Lee BK, Kim WS, Choi JS, Baek JR, Moon CW. Sagittal and coronal plane location of the popliteal artery in the open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2014; **22**(11): 2629-34.
79. Madry H, Goebel L, Hoffmann A, et al. Surgical anatomy of medial open-wedge high tibial osteotomy: crucial steps and pitfalls. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017; **25**(12): 3661-9.
80. Tindall AJ, Shetty AA, James KD, Middleton A, Fernando KW. Prevalence and surgical significance of a high-origin anterior tibial artery. *J Orthop Surg (Hong Kong)* 2006; **14**(1): 13-6.
81. França MJ, Takahashi LA, França GJ. Vascular ultrasound diagnosis and clinical implications of aberrant anterior tibial artery: case report. *J Vasc Bras* 2024; **23**: e20240030.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Typ I Lagevarianten der Arteria poplitea nach Kim et al.	9
Abbildung 2: Typ II Lagevarianten der Arteria poplitea nach Kim et al.	10
Abbildung 3: Typ III Lagevarianten der Arteria poplitea nach Kim et al.	11
Abbildung 4: Die vier Stadien der Gonarthrose	13
Abbildung 5: Osteotomiesägeschnitte bei hoher tibialer Osteotomie und Fixierung der Osteotomie mittels TomoFix Mediale Tibiakopfplatte	17
Abbildung 6: Darstellung der Geschlechterverteilung der Kniepräparate	22
Abbildung 7: Darstellung des Altersdurchschnitts der Körperspender:innen	22
Abbildung 8: Darstellung des Versuchsaufbaus	24
Abbildung 9: Darstellung der Fibula in der anterior-posterioren Ebene	25
Abbildung 10: Einstellung des Tibiaplateaus in verschiedenen Ebenen	26
Abbildung 11: Markierung der horizontalen Osteotomiehöhe	26
Abbildung 12: Messung von Distanz 1 in der axialen Ebene	27
Abbildung 13: Anlegen eines 15°-Winkels zum Generieren von Distanz 2	28
Abbildung 14: Messung von Distanz 2 in der axialen Ebene	28
Abbildung 15: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 0° Beugung	30
Abbildung 16: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 30° Beugung	31
Abbildung 17: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 60° Beugung	32
Abbildung 18: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante auf Messhöhe 1 und 2 (Distanz 1 und 2) in 90° Beugung	33
Abbildung 19: Graphische Darstellung der Normalverteilung der Messwerte für Distanz 1 ..	36
Abbildung 20: Graphische Darstellung der Normalverteilung der Messwerte für Distanz 2 ..	38
Abbildung 21: Graphische Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung des Abstands der Arterie zur Tibiahinterkante für Distanz 1 in den einzelnen Beugegraden	40
Abbildung 22: Graphische Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung des Abstands der Arterie zur Tibiahinterkante für Distanz 2 in den einzelnen Beugegraden	41
Abbildung 23: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 0° Beugung	42
Abbildung 24: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 30° Beugung ...	43
Abbildung 25: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 60° Beugung ...	43
Abbildung 26: Rechts-Links-Vergleich innerhalb einer Körperspender:in in 90° Beugung ...	44

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abstand zwischen A. poplitea und Tibiahinterkante in drei Kniepräparaten in den Beugegraden 0°, 30°, 60° und 90°	33
Tabelle 2: Korrelationskoeffizient für Distanz 1	34
Tabelle 3: Korrelationskoeffizient für Distanz 2	35
Tabelle 4: Normalverteilung der Messwerte für Distanz 1, getestet mit Kolmogorov-Smirnov-Test und Shapiro-Wilk-Test	37
Tabelle 5: Normalverteilung der Messwerte für Distanz 2, getestet mit Kolmogorov-Smirnov-Test und Shapiro-Wilk-Test	39
Tabelle 6: Deskriptive Statistik für Distanz 1	40
Tabelle 7: Deskriptive Statistik für Distanz 2	41