Universitätsklinikum Ulm
Klinik für Orthopädie
Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. H. Reichel

Unterschiede der intraoperativen Kniekinematik mit und ohne Blutsperre im Rahmen der endoprothetischen Versorgung

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin der Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

Kay Peter Freisem
Ostfildern
2025

Amtierender Dekan: Prof. Dr. Thomas Wirth

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Martin Faschingbauer

2. Berichterstatter: PD. Dr. Raffael Cintean

Tag der Promotion: 26.06.2026

Meiner Großmutter

Veröffentlichungen:

Teile dieser Dissertation sind als Publikation in der Zeitschrift „Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy, 2024“ erschienen:

Faschingbauer M, Freisem K, Khury F, Martin RJ, Bieger R, Reichel H. Tourniquet does not affect intraoperative kinematics during total knee arthroplasty: Results of a prospective study using a robotic assistance system. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2024;32:678-84.
https://doi.org/10.1002/ksa.12086

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis I

Abkürzungsverzeichnis III

1. Einleitung 1

1.1 Klinische Relevanz der Blutsperre 1

1.2 Intraoperative Kinematik mit und ohne Blutsperre 3

1.3 Ziel der Studie 5

2. Material und Methoden 7

2.1 Studiendesign und Patientenkollektiv 7

2.2 Material 8

2.3 Apparative Hilfsmittel 8

2.3.1 Blutsperre 8

2.3.2 NAVIO® OP-System 9

2.3.3 Screenshots 13

2.4 Methoden 15

2.4.1 Operationsverfahren 15

2.4.2 Messverfahren 17

2.5 Klinische Evaluationsbögen 17

2.5.1 Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score 18

2.5.2 Oxford Knee Score 18

2.6 Statistik 18

3. Ergebnisse 20

3.1 Demografie 20

3.1.1 Geschlecht und Patientenalter 20

3.1.2 Operationsseite 20

3.1.3 Body-Mass-Index ... 20

3.2 Mediale Gelenkspalten ... 21

3.3 Laterale Gelenkspalten ... 30

3.4 Klinische Ergebnisse ... 40

3.4.1 Auswertung Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score ... 40

3.4.2 Auswertung Oxford Knee Score ... 41

4. Diskussion ... 43

4.1 Klinische Relevanz ... 43

4.2 Vergleichbarkeit der Daten ... 44

4.2.1 Patientenkollektiv ... 44

4.2.2 Methodik ... 45

4.2.3 Weitere beeinflussende Faktoren ... 47

4.3 Outcome der Patienten ... 47

4.4 Schlussfolgerung und Ausblick ... 48

5. Zusammenfassung ... 50

6. Literaturverzeichnis ... 52

Danksagung ... 56

Lebenslauf ... 57

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen	Beschreibung
ANOVA	Analysis of Variance
BMI	Body-Mass-Index
CORI®	Robotisch assistiertes OP-System (Smith & Nephew)
CPAK	Coronal Plane Alignment of the Knee
CR	Cruciate-Retaining
Gap	Kniegelenksspalte
GIMP	GNU Image Manipulation Program
J.	Jahre
K-TEP	Kniegelenk-Totalendoprothese
KOOS	Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score
MRT	Magnetresonanztomographie
NAVIO®	Robotisch assistiertes OP-System (Smith & Nephew)
OKS	Oxford Knee Score
PE-Inlay	Polyethylen-Inlay
RKU	Universitäts- und Rehabilitationskliniken Ulm
SD	Standardabweichung
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences
TEP	Totalendoprothese

1. Einleitung

Die erste beschriebene Verwendung einer Blutsperre reicht bis in das Jahr 600 v. Chr. zurück. Damals bestand sie noch aus einfachen Lederriemen und wurde zunächst für Amputationen verwendet. Im Laufe der Jahrhunderte entwickelte sich die Blutsperre weiter zu einem etablierten chirurgischen Hilfsmittel, wie wir es heute nutzen [23].

Die Verwendung einer Blutsperre zur Implantation einer Knie-Totalendoprothese ist heute in Deutschland üblich. Somit wird der Operationskomfort erhöht, Blutungen vermindert und die Haftung des eingebrachten Knochenzements erhöht [27]. Dennoch ist die Blutsperre ein kontrovers diskutiertes Thema. Die dieser Arbeit zugrunde liegende Fragestellung sowie das prospektive Studiendesign wurden bereits in einer wissenschaftlichen Publikation dargestellt [7]. Die vorliegende Dissertation dient der erweiterten methodischen Darstellung sowie der vertieften Analyse der erhobenen Daten.

1.1 Klinische Relevanz der Blutsperre

In einer Umfrage der American Association of Hip and Knee Surgeons im Jahre 2020 gaben von 365 Orthopäden 24 % an, dass sie unter allen Umständen eine Blutsperre während der Operation einer Knie-TEP anlegen (25 % im Jahr 2018 und 37 % im Jahr 2009). 47 % gaben an, immer eine Blutsperre zu verwenden, wenn keine vaskulären Vorerkrankungen bekannt sind. 16 % der Befragten gaben die Verwendung einer Blutsperre nur während des Freilegens und Zementierens an (14 % im Jahr 2018 und 5 % im Jahr 2009) und 13 % gaben an, unter keinen Umständen eine Blutsperre zu verwenden (12 % im Jahr 2018) [1].

Die wichtigsten Gründe, die für eine Blutsperre sprechen, sind der geringere intraoperative Blutverlust und die damit einhergehende bessere Übersicht während der Operation. So stellten Cai et al. fest, dass der intraoperative Blutverlust signifikant durch das Verwenden einer Blutsperre reduziert werden kann [5]. Die damit einhergehende Übersichtlichkeit der Operation wurde von Kirkley et al. in einer Studie zur Verwendung der Blutsperre bei Kniegelenksarthroskopien objektiviert [13]. Dazu wurden die teilnehmenden Chirurgen zur Übersicht und zur

momentanen Schwierigkeit (technical difficulty) der Operation befragt. Demnach ist die Übersicht während der Operation bei geschlossener Blutsperre dreimal höher als bei fehlender Blutsperre. Die Schwierigkeit wurde als rund doppelt so groß angegeben, wenn keine Blutsperre verwendet wurde. Die verminderte Schwierigkeit und die bessere intraoperative Sicht wirken sich ebenfalls auf eine signifikante Verkürzung der Operationszeit aus. So stellten Cao et al. in ihrer Metaanalyse fest, dass sich die Operationszeit um durchschnittlich 8,98 Minuten verkürzte [6]. Zhang et al. zeigten in ihrer Studie eine Verkürzung der Operationszeit um ca. 4,57 Minuten [30]. Des Weiteren konnte in einigen Studien bei Verwendung einer Blutsperre ein im Schnitt signifikant breiterer Zementmantel gemessen werden, als es ohne Blutsperre der Fall war [11, 15, 21, 27, 29]. Im Zusammenhang mit der verbesserten Zementpenetration in den Knochen sowie des breiteren Zementmantels gehen die Studien von einer Verminderung der Prothesenlockerungsrate und einer verbesserten Lebensdauer der Implantate aus. Hierzu bedarf es allerdings weiterer Untersuchungen.

Gegen das Verwenden einer Blutsperre im Rahmen der Knie-Endoprothetik sprechen hingegen ein in einigen Studien aufgeführter paradox erhöhter Blutverlust [24], erhöhte frühe postoperative Schmerzen sowie häufigere postoperative Wundkomplikationen [14].

So wurde in einer retrospektiven Kohortenstudie mit 132 Patienten von Schnettler et al. ein erhöhter totaler Blutverlust beim Verwenden einer Blutsperre festgestellt [24]. Als paradoxer Blutverlust wird hierbei der erhöhte gesamte postoperative Blutverlust trotz intraoperativ verminderten Blutverlusts bezeichnet. Dieser wurde in den vorliegenden Studien nach den Methoden von Bourke und Smith [4] oder Gross [10] berechnet. Pfitzner et al. stellten zudem neben dem erhöhten paradoxen Blutverlust eine Erhöhung der postoperativen Schmerzen fest [21]. Dies konnte in anderen Studien nicht bestätigt werden. Hier zeigte sich kein erhöhter postoperativer Schmerz [8, 19]. Anhand dieser Beispiele zeigt sich, wie kontrovers die Verwendung einer Blutsperre diskutiert wird.

1.2 Intraoperative Kinematik mit und ohne Blutsperre

Eine weitere wichtige Überlegung für oder gegen das Verwenden einer Blutsperre kann die vermeintliche Beeinflussung der Beweglichkeit im Kniegelenk durch den entstandenen Druck von bis zu 350 mmHg auf die Oberschenkelmuskulatur sein.
Beim Kniegelenk handelt es sich um ein bikondyläres Gelenk mit Bewegungsmöglichkeiten um zwei Achsen. Um die Transversalachse mit Flexion und Extension, sowie um die Longitudinalachse mit Außen- und Innenrotation (s. Tabelle 1). Zudem kommt es bei Flexion im Kniegelenk zum sogenannten femoralen Rollback. Die Transversalachse wandert während der Beugebewegung nach dorsal. Dabei handelt es sich um eine kombinierte Gleit- und Drehbewegung.

Tabelle 1: Bewegungsumfang des Kniegelenks

Bewegung	Bewegungsumfang
Extension/Flexion	5°–0°–140°
Außenrotation/Innenrotation	30°–0°–10°

Für die Bewegung im Kniegelenk sind zwei ventrale Muskeln und vier dorsale Muskeln zuständig (s. Tabelle 2 und 3).

Tabelle 2: Ventrale Muskelgruppe des Oberschenkels

Muskel	Funktion im Kniegelenk
M. quadriceps femoris	- Extension
M. sartorius	- Flexion - Innenrotation

Tabelle 3: Dorsale Muskelgruppe des Oberschenkels

Muskel	Funktion im Kniegelenk
M. biceps femoris	- Flexion - Außenrotation
M. semitendinosus	- Flexion - Innenrotation
M. semimembranosus	- Flexion - Innenrotation
M. popliteus	- Innenrotation

Im Kniegelenk artikulieren die Femurkondylen zum einen mit den Tibiakondylen und zum anderen mit der Rückfläche der Patella. Dadurch entstehen zwischen den jeweiligen Knochen sogenannte Gelenkspalten (Gaps). Zwischen Femur und Tibia gibt es den medialen Gelenkspalt und den lateralen Gelenkspalt. Diese sind zum Beispiel auf Röntgenaufnahmen oder im MRT relevant, da sie auf Gelenkpathologien wie Arthrosen hindeuten können. Die Gelenkspaltweite im gesunden Kniegelenk ist in Tabelle 4 dargestellt [2, 3, 20, 25].

Tabelle 4: Durchschnittswerte der medialen und lateralen Gelenkspalten bei Gesunden

Medialer Kniegelenkspalt	Lateraler Kniegelenkspalt
Frauen: Ø 4,8 mm (± 0,7 mm)	Frauen: 5,6 mm (± 0,8 mm–0,9 mm)
Männer: Ø 5,7 mm (± 0,8 mm)	Männer: 6,1 mm - 6,3 mm (SD ≈ 0,6 mm - 0,7 mm)

Die Gelenkspalten sind nicht statisch, sondern verändern sich bei Flexion und Extension des Kniegelenks. Zudem kommt es durch Valgus- und Varusstress zu einer Veränderung der Gelenkspalten. Hierbei spielen verschiedene Faktoren wie die Inkongruenz der Gelenkfläche, die bandhaften Strukturen (Ligamentum

collaterale laterale und Ligamentum collaterale mediale, Ligamentum cruciatum anterius und Ligamentum cruciatum posterius) sowie die Knorpelstrukturen (Meniscus medialis und Meniscus lateralis) eine Rolle. Zudem wird das Kniegelenk durch die oben genannte Muskulatur stabilisiert.
Durch den auf diese Muskelgruppen wirkenden Druck durch das Anlegen einer Blutsperre ist anzunehmen, dass es zu einer Verkürzung der Muskulatur und einer damit einhergehenden Verminderung der Beweglichkeit im Kniegelenk kommt. Bereits 1999 zeigten Marson et al., dass die Anlage einer Blutsperre zu einer Veränderung des patellofemoralen Trackings führt [17].
Die meisten bisher zur Beweglichkeit des Kniegelenks durchgeführten Studien beziehen sich jeweils auf die postoperative sogenannte Range of Motion. Hierbei wird die postoperative Beweglichkeit eine bestimmte Zeit nach Implantation einer Knie-Totalendoprothese (K-TEP) gemessen (z. B. zwei Monate postoperativ).
Zur unmittelbar intraoperativen Veränderung der Beweglichkeit, zum Beispiel durch das Anlegen einer Blutsperre, finden sich hingegen bislang nur wenige Studien.
Eine Verkürzung der Muskulatur, die mit einer verminderten Beweglichkeit einhergeht, würde zu kleineren medialen und lateralen Gelenkspalten führen. Dies wiederum könnte in einer nicht optimalen Lage der Knie-TEP nach dem Öffnen der Blutsperre resultieren. Zur genauen Messung der medialen und lateralen Gelenkspalten kann, wie in unserer Studie, der NAVIO® OP-Roboter während der Implantation einer K-TEP verwendet werden.

1.3 Ziel der Studie

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen der Verwendung einer Blutsperre und der intraoperativen Kinematik im Rahmen der Implantation einer Knie-Totalendoprothese besteht.
Hintergrund dieser Fragestellung ist die klinisch relevante Annahme, dass durch die Anlage einer Blutsperre Veränderungen der Weichteilspannung sowie der periartikulären Druckverhältnisse auftreten können, welche potenziell Einfluss auf die intraoperativ gemessene Kniekinematik nehmen.
Hierzu werden Messwerte der medialen und lateralen Gelenkspalten über den gesamten Flexions- und Extensionsradius des Kniegelenks in 10°-Schritten

erhoben. Die Datenerfassung erfolgt hierbei mithilfe des NAVIO®-Systems, welches eine robotisch assistierte, präzise und reproduzierbare intraoperative Quantifizierung der Gelenkspaltverhältnisse ermöglicht. Dadurch soll eine möglichst hohe Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Parameter erreicht werden. Im Anschluss an die Datenerhebung erfolgt eine statistische Auswertung der Messwerte mit dem Ziel, potenzielle Unterschiede zwischen Eingriffen mit und ohne Blutsperre zu identifizieren. Dabei steht insbesondere die Frage im Vordergrund, ob sich relevante Veränderungen der Gelenkspaltweiten über den Bewegungsumfang hinweg nachweisen lassen und ob diese als klinisch bedeutsam zu interpretieren sind.

Im Rahmen der Untersuchung soll folgende Nullhypothese geprüft werden:

- Das Verwenden einer Blutsperre im Rahmen der Implantation einer Knie-Totalendoprothese hat keinen Einfluss auf die intraoperativ erhobene Kniekinematik.

Die vorliegende Dissertation basiert auf einem bereits publizierten Studiendesign und stellt eine vertiefte Auswertung der erhobenen Daten dar [7].

2. Material und Methoden

2.1 Studiendesign und Patientenkollektiv

Das Studiendesign sowie das Patientenkollektiv wurden bereits publiziert [7]. Die folgenden Abschnitte stellen eine detaillierte Darstellung und erweiterte methodische Beschreibung der im Rahmen dieser Studie erhobenen Daten dar.

In der Zeit vom November 2020 bis November 2021 wurden insgesamt 50 Patienten mit fortgeschrittener Gonarthrose im Varus- und physiologischem Alignment mit einer robotisch-assistierten Knie-Totalendoprothese versorgt. Im Rahmen dieser prospektiven Studie wurden alle beteiligten Probanden konsekutiv eingeschlossen. Hierbei wurden nur Patienten eingeschlossen, bei denen die Möglichkeit zur Verwendung des OP-Roboters NAVIO® der Firma Smith & Nephew bestand. Zudem wurden alle Patienten vom selben erfahrenen Operateur in den Universitäts- und Rehabilitationskliniken Ulm (RKU) behandelt.
Ausschlusskriterien waren ein BMI ≥ 36 kg/m², eine mechanische Valgusachse > 3° und Patienten mit jeglicher Kontraindikation zur Verwendung einer Blutsperre, wie zum Beispiel einer peripheren arteriellen Verschlusskrankheit oder Gefäßprothesen. Es ergab sich eine Patientenreihe von 24 weiblichen und 26 männlichen Patienten mit einem Durchschnittsalter von 74,92 Jahren (52 J. – 88 J.) mit einer Standardabweichung von 7,95 Jahren. Der durchschnittliche BMI betrug 29,3 kg/m² (22 kg/m² – 35 kg/m²). Es wurde bei 25 Patienten das linke und bei 25 Patienten das rechte Knie operiert.
Alle Patienten wurden vor der Operation über die Teilnahme an der Studie informiert. Zudem wurde das jeweilige schriftliche Einverständnis eingeholt. Eine zustimmende Stellungnahme durch die Ethikkommission der Universität Ulm liegt vor (Antrag Nr. 329/20). Der Workflow der Operation wurde durch die Studie nicht gestört oder verändert.
Die Patienten wurden am Tag vor ihrer Operation und jeweils drei Wochen nach ihrer Operation mit zwei klinischen Fragebögen befragt. Hierzu wurden die Patienten im Rehabilitationshotel des RKU kurz vor der Entlassung aufgesucht.

Patienten, die sich in einer externen Rehabilitationseinrichtung befanden, wurden die Fragebögen auf dem Postweg zugeschickt.

2.2 Material

Die Probanden wurden allesamt mit einer Knie-Totalendoprothese vom Typ Legion® CR der Firma Smith & Nephew versorgt. Die Operation wurde bei allen 50 Patienten vom selben erfahrenen Operateur nach stets demselben Standard durchgeführt. Die Implantation erfolgte mithilfe des NAVIO® OP-Systems von Smith & Nephew. Ab Patient 42 wurde ein Update der Firma Smith & Nephew eingespielt. Der Name des Systems änderte sich zu CORI®, wobei die Durchführung der Messung unverändert blieb. Lediglich die Skalierung der Screenshots änderte sich, ohne Auswirkung auf die Studie.

2.3 Apparative Hilfsmittel

Das operative Vorgehen sowie die intraoperative Messmethodik entsprechen dem bereits publizierten Protokoll [7] und werden im Folgenden zur besseren Nachvollziehbarkeit detailliert beschrieben.

2.3.1 Blutsperre

Bei allen Patienten wurde eine Blutsperre der Firma ulrich medical mit einer Länge von 860 mm und einer Breite von 100 mm verwendet (s. Abbildung 1). Die Blutsperre wurde jeweils ca. 30 cm oberhalb des Gelenkspaltes platziert. Es erfolgte das Aufpumpen der Blutsperre auf 350 mmHg.



Abbildung 1: Blutsperre der Firma ulrich medical (Quelle: nach [7], Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

2.3.2 **NAVIO® OP-System**

Zur Messung des lateralen und medialen Gelenkspaltes (Gaps) wurde das NAVIO® OP-System von Smith & Nephew verwendet. Hierbei handelt es sich um ein System zur chirurgischen Planung, Navigation, intraoperativen Visualisierung und robotisch-assistierten Fräsung im Rahmen der Kniegelenksimplantation. Es ermöglicht, die Kinematik des Kniegelenks visuell und objektiv darzustellen. Das NAVIO® OP-System wird im RKU standardmäßig verwendet, wodurch eine hohe Expertise bei der Nutzung des Systems besteht.

Das System verfügt über einen tibialen und einen femoralen Navigationstracker sowie ein Handstück. In Verbindung mit dem zugehörigen Kamerawagen kann das System stets die genaue Position von Femur und Tibia bestimmen. Hierzu werden am distalen Femur und der proximalen Tibia je zwei Pins für die Navigationstracker

gesetzt und bikortikal fest verankert. Auf diesen werden die Femur-Tracker (s. Abbildung 2) und die Tibia-Tracker (s. Abbildung 3) mit jeweils vier Tracking-Markern angebracht (s. Abbildung 4).



Abbildung 2: Positionierung des Femur-Trackers (Quelle: Surgical Technique Guide for Knee Arthroplasty, Smith & Nephew, 06-2019, S. 7, Figure 8; Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Smith & Nephew)



Abbildung 3: Positionierung des Tibia-Trackers (Quelle: Surgical Technique Guide for Knee Arthroplasty, Smith & Nephew, 06-2019, S. 7, Figure 7; Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Smith & Nephew)

Es werden zwei Prüfpunkt-Verifizierungsstifte (Checkpoint Pins), einer in der Metaphyse des Femurs (lateral oder medial) und einer distal des zu erwartenden Schnitts in der Tibia, fixiert. Mit dem Handstück werden die gesetzten Prüfpunkte registriert. Sie dienen während der gesamten Operation als Referenzpunkte für die gesetzten Tracker. Somit kann während der Operation stets der korrekte Sitz der Tracker überprüft werden. Mit dem Handstück werden nun die Landmarken bestimmt. Das Handstück verfügt dazu ebenfalls über vier Tracking-Marker und eine Punktsonde.



Abbildung 4: Angebrachter Tibia-Tracker mit Tracking-Markern (Quelle: Surgical Technique Guide for Knee Arthroplasty, Smith & Nephew, 06-2019, S. 8, Figure 11; Abdruck mit freundlicher Genehmigung von Smith & Nephew)

Es werden die medialen und lateralen Malleoli-Punkte sowie die Mittelpunkte der femoralen und tibialen Gelenkfläche (Knee Centers) registriert. Zur Ermittlung des Hüftzentrums wird die femorale Tracker-Reihe durch Kreisbewegungen der Hüfte nachgezeichnet. Es folgt die Definition der Neutralposition unter leichtem axialem Druck. Die normale Beugebewegung des Kniegelenks und die femoral-kinematische Rotationsachse werden durch Bewegen des Beines bis zur maximalen Flexion im Kniegelenk bestimmt. Somit hat das System alle relevanten Daten erfasst, um nun die Kinematik des Beines zu bestimmen. Zur Bestimmung der lateralen und medialen Gaps, also der Aufklappbarkeit des Kniegelenks, wird das Knie unter Varus- und Valgusstress über den gesamten Bewegungsumfang durchbewegt. Mithilfe der Daten kann nun das Computersystem die Planung der Endoprothese unterstützen und bei der Implantation helfen.

2.3.3 **Screenshots**

Die für die Studie relevanten Messdaten wurden nach Implantation der Knie-TEP erhoben. Hierzu wurde noch intraoperativ die Kniekinematik mit einliegender Knie-TEP zuerst mit Blutsperre und dann ohne Blutsperre über den gesamten Bewegungszyklus von 0° bis 120° unter Varus- sowie Valgusstress aufgenommen. Der Workflow der Operation blieb hierdurch unverändert.
Die aufgenommenen Screenshots zeigen die Kinematik des Kniegelenks anhand der lateralen und medialen Gaps (s. Abbildung 5).

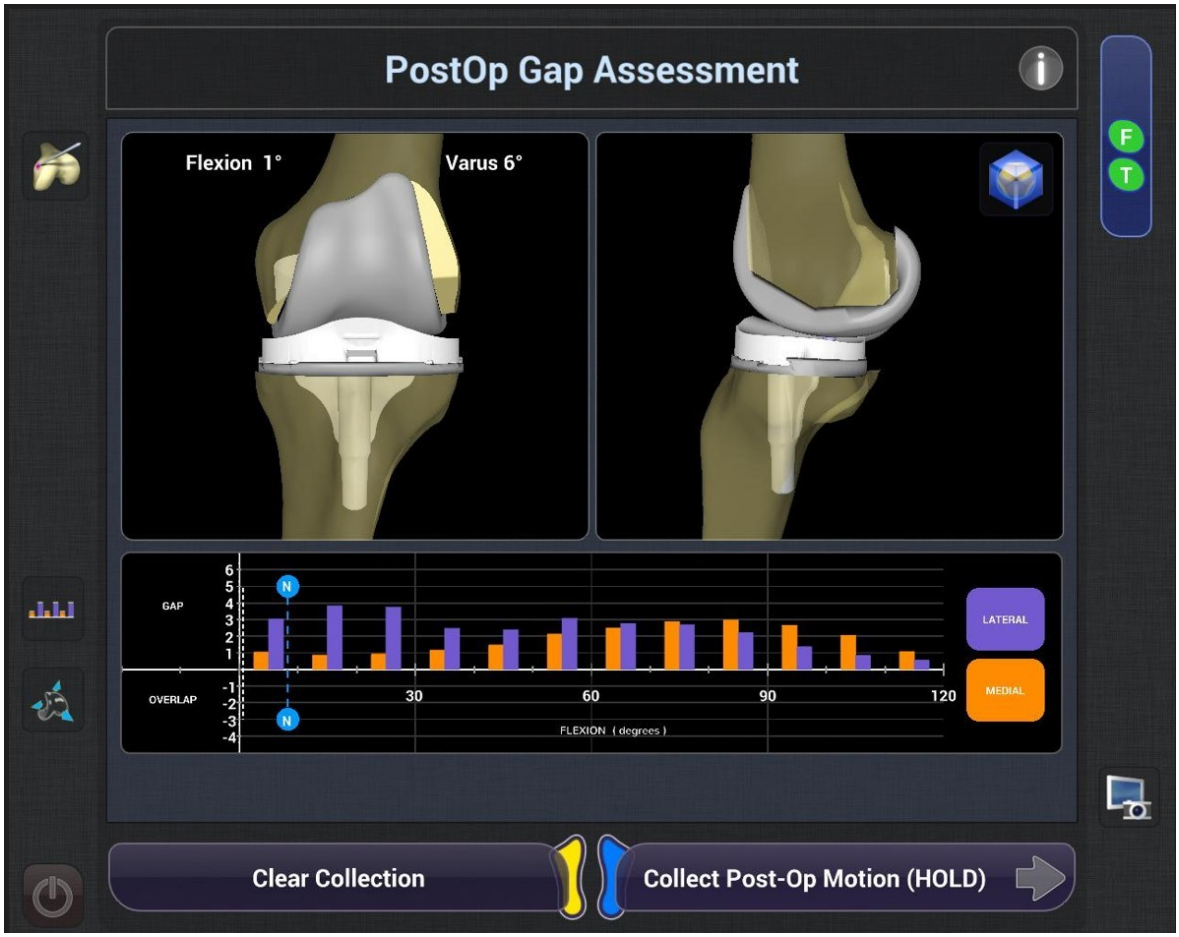

Abbildung 5: Der intraoperative Screenshot des NAVIO®-Systems zeigt in der unteren Grafik die Kniekinematik im Sinne der medialen (orange) und lateralen (violett) Kniegelenksspalten über den Bewegungszyklus von 0° bis 120°. Jeder Balken zeigt die jeweilige Aufklappbarkeit in mm. (Quelle: Eigene Darstellung)

Hierbei handelt es sich um die medialen und lateralen Kniegelenksspalten, die jeweils in 10°-Schritten von 0° Extension bis 120° Flexion gemessen wurden. Für jeden Patienten wurden jeweils zwei Screenshots, einer vor und einer nach dem Öffnen der Blutsperre, aufgenommen. Somit wurden für jeden Patienten 12 Werte medial und 12 Werte lateral vor dem Öffnen der Blutsperre sowie 12 Werte medial und 12 Werte lateral nach dem Öffnen der Blutsperre ermittelt (s. Abbildung 5).
Die Bilder wurden in Form einer JPG-Datei gespeichert und anschließend auf einen Computer übertragen. Die Navigationsdaten wurden den jeweiligen Patienten zugeordnet. Die Zuordnung wurde mittels Operationsdatum und Operationsseite verifiziert, um eine Verwechslung auszuschließen.
Zur Auswertung der Screenshots wurde das frei verfügbare pixelbasierte Grafikprogramm GNU Image Manipulation Program (GIMP) verwendet. Es erfolgte das Vergrößern des Bildes um 1600 % der Originalgröße zur Darstellung der einzelnen Pixel. In den jeweiligen Screenshots entspricht 1 mm 18,5 Pixeln. Somit lassen sich die Balken auf einen Pixel genau ausmessen, wobei eine Messungenauigkeit von 0,05 mm auftritt. Anschließend wird das Ergebnis auf eine Dezimalstelle gerundet (s. Abbildung 6).
Die Umwandlung der visualisierten Daten in Zahlenwerte ist notwendig, da das NAVIO® OP-System die zugrundeliegenden Zahlenwerte nicht zur Einsicht freigibt.

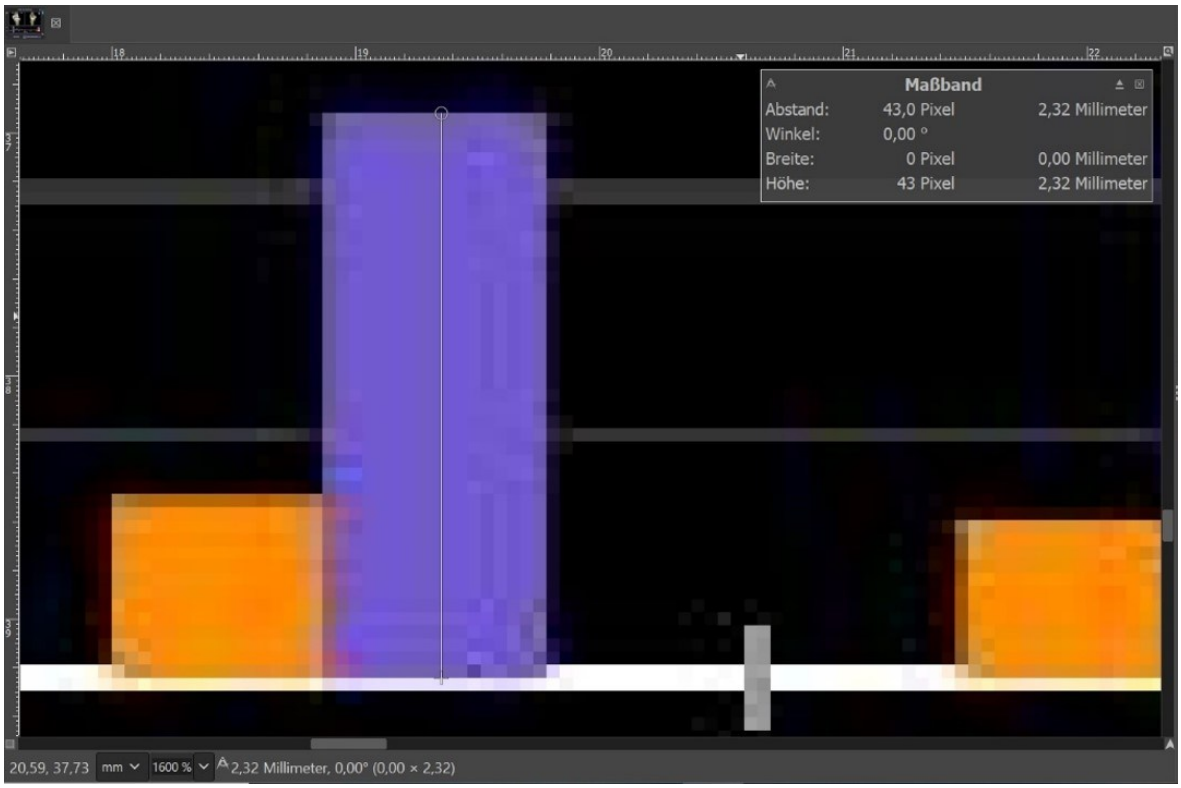

Abbildung 6: Exemplarische Pixelmessung des lateralen Gelenkspalts. Es wurden 43 Pixel gemessen, entsprechend 2,32 mm. Zur Darstellung der Pixelstruktur wurde der Screenshot um 1600 % vergrößert. (Quelle: Eigene Darstellung)

2.4 **Methoden**

2.4.1 **Operationsverfahren**

Alle Patienten wurden mittels einer Knie-Totalendoprothese nach dem gleichen Prozedere versorgt. Die Patienten wurden in Rückenlage gelagert. Die Blutsperre wurde am zu operierenden Oberschenkel angebracht. Das Operationsgebiet wurde abgewaschen und steril abgedeckt. Die Blutsperre wurde auf einen Druck von 350 mmHg aufgepumpt. Es folgte der erste Hautschnitt am Femur von circa 20 cm Länge und eine scharfe Präparation durch das Subkutangewebe. Nach dem Darstellen der Kapsel folgte eine mediale Arthrotomie mit Darstellung des Gelenks. Das vordere sowie das hintere Kreuzband wurden beurteilt, das vordere Kreuzband wurde entfernt. Zudem wurden beide Menisken beurteilt. Es erfolgte im Anschluss die patientenabhängige Denervierung an der Patella sowie eine Osteophytenabtragung. Ein Rückflächenersatz der Patella erfolgte nicht. Der

Zugang wurde tibial im Sinne eines minimalen medialen Releases erweitert. Das Kniegelenk wurde aufgestellt und es wurden an Femur und Tibia je zwei Pins für die Navigationstracker gesetzt und fest verankert. Nach Überprüfung auf absolut stabilen Trackersitz folgte die Osteophytenabtragung im Bereich des Femurs und der Tibia. Nach Bestimmung von Hüftzentrum und Sprunggelenkszentrum erfolgte das Einlesen der Knochenanatomie nach dem Standardprotokoll. Anschließend wurde die bestehende Deformität eingelesen und die Weichteilspannung von Extension bis zur tiefen Flexion bestimmt. Hierfür wurde das Gelenk mit speziellen Retraktoren aufgespannt. Es erfolgte die Präzisierung des initialen Operationsplans anhand der Weichteilsituation mit Anpassung der Prothesenposition sowie Ausführung des roboterassistierten Operationsplanes. Hierzu wurden zunächst die distalen Femurresektionsebenen medial und lateral gefräst. Danach erfolgte das roboterassistierte Einbringen der Bohrlöcher und das Aufsetzen des 4:1-Schnittblocks. Nach der navigationsgestützten Varus- und Valgusausrichtung, Flexions- und Extensionsausrichtung sowie Rotationsausrichtung erfolgte die Durchführung der 4:1-Schnitte und Verifikation dieser, unter Zuhilfenahme des NAVIO®-Systems. Daraufhin folgte das roboterassistierte Einbringen der tibialen Bohrlöcher und des tibialen Schnittblocks mit anschließender Verifikation durch das NAVIO®-System. Die tibiale Resektion und das Entfernen der tibialen Knochen-Knorpel-Scheibe wurde durchgeführt. Nunmehr erfolgte das Einsetzen des Balancers in Streckung sowie die Überprüfung der Bandsymmetrie und der medialen und lateralen Stabilität in 90° Beugung. Es wurde eine Probetibiabasisplatte eingebracht, das tibiale Implantatlager wurde festgepinnt und vorbereitet. Die Femurkomponente wurde aufgebracht und auf ihren Sitz überprüft. Es folgte das Einbringen eines Polyethylen-Inlays (PE-Inlay). Die Stabilität in Beuge- und Streckstellung wurde sowohl in mediolateraler als auch in anteroposteriorer Ebene mithilfe des NAVIO®-Systems überprüft. Die Patella wurde auf eine ordnungsgemäße Kinematik überprüft. Es folgte die Messung der lateralen und medialen Gelenkspalten über den gesamten Bewegungsumfang zunächst mit aktiver Blutsperre. Nach Deaktivieren der Blutsperre erfolgte eine Wartezeit von einer Minute. Anschließend wurde eine erneute Messung der lateralen und medialen Gelenkspalten ebenfalls über den gesamten Bewegungsumfang durchgeführt. Nach erneutem Schließen der Blutsperre wurde das Probeimplantat

entfernt und es folgte die Reinigung der Resektionsflächen mit der Jet-Lavage und eine anschließende lokale Infiltrationsanästhesie mit Ropivacain, Ketorolac und Adrenalin zur Unterstützung der postoperativen Analgesie und Blutstillung im dorsalen Gelenkraum. Die Navigationstracker und Pins wurden entfernt und die definitiven Prothesenteile eingebracht. Die Prothesenteile wurden unter den Gelenkflächen sowie im Bereich des tibialen Kiels zementiert. Ein PE-Inlay wurde eingebracht. Das Kniegelenk wurde in Extensionsstellung gehalten, bis es zur vollständigen Zementaushärtung kam. Anschließend wurden die Zementreste sorgfältig entfernt. Nach ausgiebiger Spülung wurde die Blutsperre geöffnet und Blutstillung wurde durchgeführt. Die Gelenkkapsel wurde in 90° Kniebeugung genäht. Intraartikulär wurden 3 g Tranexamsäure injiziert. Es erfolgte eine Subkutannaht und das Klammern der Haut. Nach Anbringen des sterilen Verbands folgte die Wicklung des Beines mit elastischen Langzugbinden. Zum Abschluss wurde eine Bildwandlerkontrolle des Kniegelenks in zwei Ebenen durchgeführt.

2.4.2 **Messverfahren**

Die Blutsperre wurde wie für dieses Operationsverfahren üblich am Übergang von proximalem zu mittlerem Drittel des Oberschenkels angelegt und ein konstanter Druck von 350 mmHg angelegt.

Die intraoperative Messung der medialen und lateralen Gelenkspalten wurde jeweils sowohl bei geschlossener Blutsperre als auch bei offener Blutsperre durchgeführt. Im Rahmen des unveränderten Operationsablaufs erfolgte die Messung jeweils bei einliegendem Probeinlay zum standardisierten Zeitpunkt noch vor tatsächlicher Implantation der Prothesenkomponenten. Zwischen den Messungen mit geschlossener Blutsperre und offener Blutsperre lagen maximal drei Minuten. Nach der Messung mit geschlossener Blutsperre wurde jeweils eine Minute gewartet, bevor die Messung mit offener Blutsperre durchgeführt wurde. Die Messungen wurden stets vom selben Operateur durchgeführt.

2.5 **Klinische Evaluationsbögen**

Zur Beurteilung des Outcomes sowie zur anamnestischen und klinischen Datenerfassung der Patienten wurden jeweils am Tag vor der Operation und drei

Wochen nach der Operation zwei Evaluationsbögen zusammen mit den Patienten erhoben.
Die Patienten wurden am Tag vor der Operation mittels des Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS) und des Oxford Knee Score (OKS) befragt. Die gleichen Befragungen wurden drei Wochen postoperativ wiederholt. Diese dienten der Überprüfung des Outcomes und blieben ohne Einfluss auf die Ergebnisse der Studie.

2.5.1 **Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score**

Der Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score ist ein Fragebogen, der insgesamt 42 Fragen umfasst. Diese gliedern sich in fünf Unterkategorien: Symptome, Schmerzen, Aktivitäten des täglichen Lebens, Sport und Freizeit, Lebensqualität. Aufgrund des Durchschnittsalters von 75 Jahren und der präoperativen Einschränkungen der Patienten wurde in der Studie auf die Unterkategorie Sport und Freizeit verzichtet. Somit verblieben vier Unterkategorien, die jeweils präoperativ mit postoperativ verglichen wurden. Die maximal zu erreichende Punktzahl jeder Unterkategorie beträgt 100 Punkte. Hierbei bedeuten 100 Punkte, dass keinerlei Einschränkungen bestehen. Ein Score von lediglich 0 Punkten bedeutet hingegen, dass die größtmöglichen Einschränkungen bestehen.

2.5.2 **Oxford Knee Score**

Als zweiter klinischer Score wurde der Oxford Knee Score erhoben. Dieser wurde speziell zur Beurteilung der Funktion und Schmerzen nach Implantation einer Knie-TEP entwickelt. Er umfasst zwölf Fragen mit jeweils fünf Antwortmöglichkeiten. Für die Antworten wird eine Punkteskala von 0 bis 4 Punkten angelegt. Hierbei stehen 0 Punkte für den höchsten und 4 Punkte für den geringsten Schweregrad der Einschränkungen. Damit ergibt sich ein möglicher Gesamtscore von 48 Punkten. Dieser ist gleichbedeutend mit dem bestmöglichen Outcome.

2.6 **Statistik**

Die deskriptive Statistik erfolgte mit Microsoft Excel in der Version 2312. Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit dem Statistikprogramm IBM SPSS

Statistics in der Version 28.0.1.0. Verglichen wurden jeweils die zwölf gemessenen Werte für den medialen Gelenkspalt mit Blutsperre mit den zwölf gemessenen Werten für den medialen Gelenkspalt ohne Blutsperre. Die zwölf Werte geben jeweils die Aufklappbarkeit des Kniegelenks in Millimetern von 0° bis 120° in 10°-Schritten wieder. Analog dazu wurde mit den 24 Werten für den lateralen Gelenkspalt verfahren.

Bei den untersuchten Variablen (medialer und lateraler Gelenkspalt in Millimetern) handelt es sich um intervallskalierte Messgrößen. Unter der Annahme voneinander unabhängiger Beobachtungen und einer näherungsweisen Normalverteilung der Residuen bei einem Stichprobenumfang von $n > 30$ wurde zur Analyse eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt.

Die Teststatistik wurde berechnet und auf statistische Signifikanz geprüft. Das Signifikanzniveau wurde a priori auf $\alpha = 0{,}05$ festgelegt. P-Werte $< 0{,}05$ wurden als statistisch signifikant gewertet.

Zur Quantifizierung der Effektstärke wurden der Korrelationskoeffizient r nach Pearson sowie die Effektstärke f nach Cohen berechnet. Entsprechend den Konventionen nach Cohen wurden Effektstärken von $f \geq 0{,}10$ als klein, $f \geq 0{,}25$ als mittel und $f \geq 0{,}40$ als groß interpretiert.

Zur Bestimmung der erforderlichen Mindeststichprobengröße wurde eine a priori Poweranalyse mit dem Programm G*Power (Version 3.1, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Deutschland) durchgeführt. Hierbei wurde eine mittlere Effektstärke von $f = 0{,}25$ angenommen. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0{,}05$ festgelegt und eine Teststärke (Power) von $1 - \beta = 0{,}95$ definiert. Auf dieser Grundlage ergab sich eine erforderliche Stichprobengröße von $n = 46$. Die statistische Planung und Auswertung orientierte sich an der bereits publizierten Analyse [7].

3. Ergebnisse

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf einer bereits publizierten prospektiven Studie von Faschingbauer et al. [7] und werden hier detailliert sowie kapitelweise aufgearbeitet.

3.1 Demografie

Es konnten insgesamt 54 Patienten in die Studie eingeschlossen werden. Davon mussten vier Patienten im Nachhinein aus der Studie ausgeschlossen werden. Die Ausschlüsse erfolgten aufgrund technischer Probleme, postoperativer Nachblutung, fehlender Erstbefragung sowie der intraoperativen Änderung der OP-Methode.

3.1.1 Geschlecht und Patientenalter

Bei den Patienten handelte es sich um 24 weibliche und 26 männliche Patienten. Das Alter der Patienten betrug im Mittel 74,92 Jahre (52 Jahre – 88 Jahre). Die Standardabweichung (SD) lag bei 7,95 Jahren.

3.1.2 Operationsseite

Es wurde bei 25 Patienten das linke Knie und bei 25 Patienten das rechte Knie operiert. Bei einem Patienten wurden sowohl die rechte als auch die linke Seite versorgt. Da zwischen den Operationen ein zeitlicher Abstand von 6 Monaten bestand, konnte dieser Patient ebenfalls in die Studie aufgenommen werden.

3.1.3 Body-Mass-Index

Der durchschnittliche BMI betrug 29,3 kg/m² (22,95 kg/m² – 35,93 kg/m², SD = 3,91). Davon waren sieben Patienten mit einem BMI zwischen 18,5 kg/m² und 24,9 kg/m² normalgewichtig. Bei 22 Patienten wurde eine Präadipositas mit einem BMI zwischen 25 kg/m² und 29,9 kg/m² festgestellt. Einen BMI zwischen 30 kg/m² und 34,9 kg/m² und damit eine Adipositas Grad I wiesen 14 Patienten auf und mit einem BMI von ≥ 35,0 kg/m² lag bei sieben Patienten eine Adipositas Grad II vor.

3.2 **Mediale Gelenkspalten**

Die dargestellten Messwerte entsprechen den bereits publizierten Ergebnissen [7]. Für die Messungen des medialen Gelenkspalts (s. Abbildung 7) ergab sich bei keiner der zwölf Paarungen ein signifikanter Unterschied zwischen den Messungen mit und ohne Blutsperre.

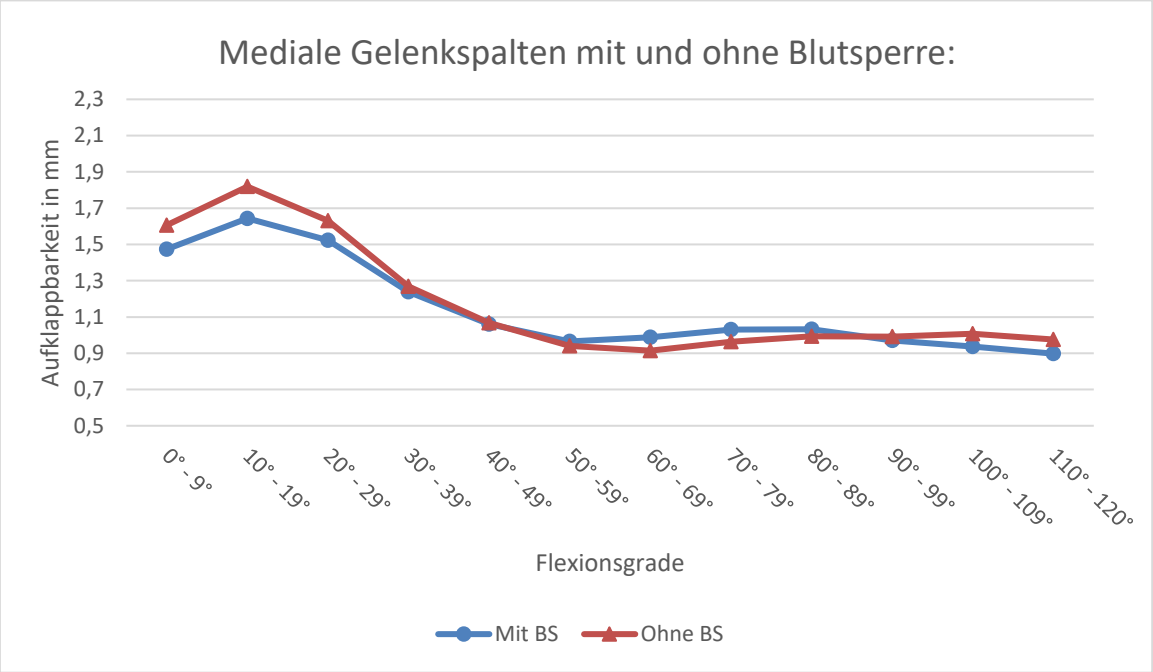

Abbildung 7: Vergleich der Aufklappbarkeit des medialen Gelenkspaltes in mm mit Blutsperre (blau) und ohne Blutsperre (orange). BS = Blutsperre. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

So zeigt sich für die Flexionsgrade 0°–9° nach dem Öffnen der Blutsperre eine nicht signifikante ($p = 0{,}38$) vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm und eine schwache berechnete Effektstärke nach Cohen ($f = 0{,}13$).

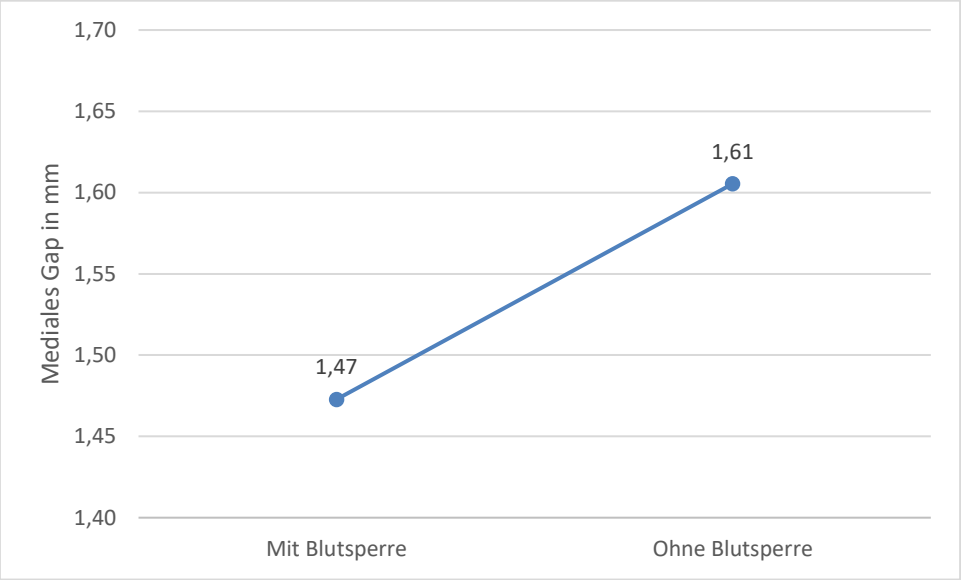

Abbildung 8: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 0–9° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 10°–19° ergab sich nach dem Öffnen der Blutsperre eine nicht signifikante (p = 0,173) vermehrte Aufklappbarkeit von 0,2 mm mit einer schwachen berechneten Effektstärke nach Cohen (f = 0,20).

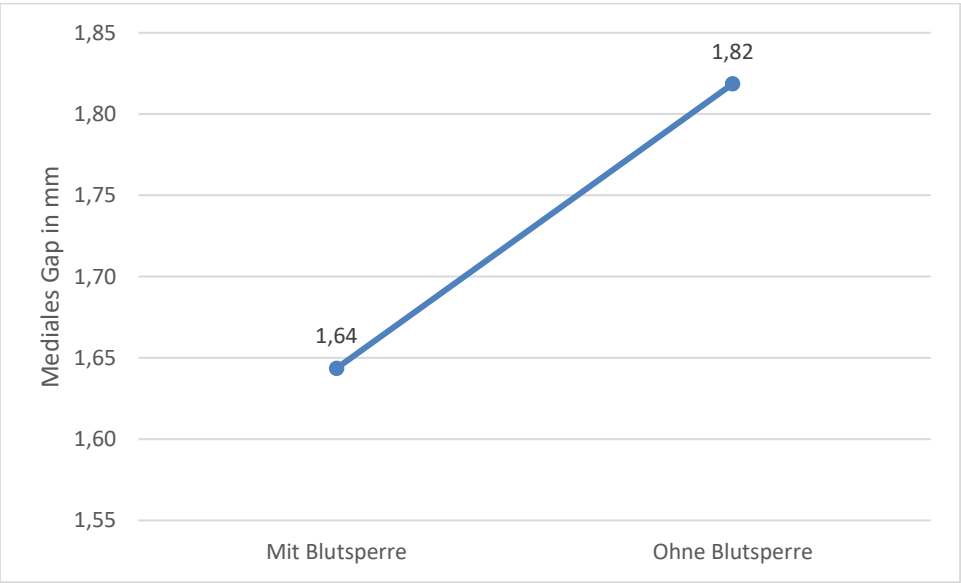

Abbildung 9: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 10°–19° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 20°–29° ergab sich nach dem Öffnen der Blutsperre eine nicht signifikante (p = 0,453) vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm. Zudem zeigte sich eine schwache berechnete Effektstärke nach Cohen (f = 0,11).

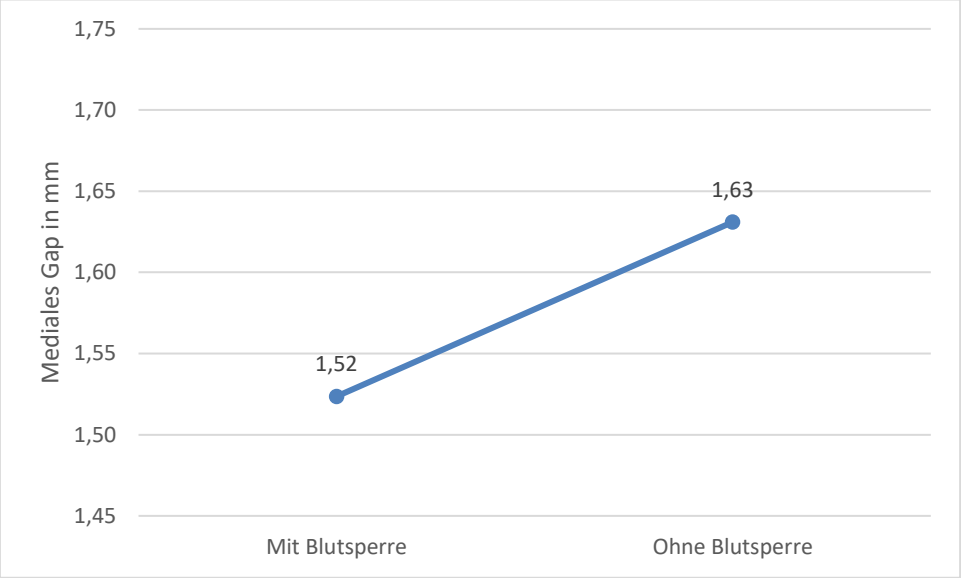

Abbildung 10: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 20°–29° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei den Flexionsgraden 30°–39° kam es ohne Blutsperre zu einer vermehrten Aufklappbarkeit von 0,1 mm. Diese war nicht signifikant (p = 0,396). Die Effektstärke hierbei betrug f = 0,12 und war somit schwach.

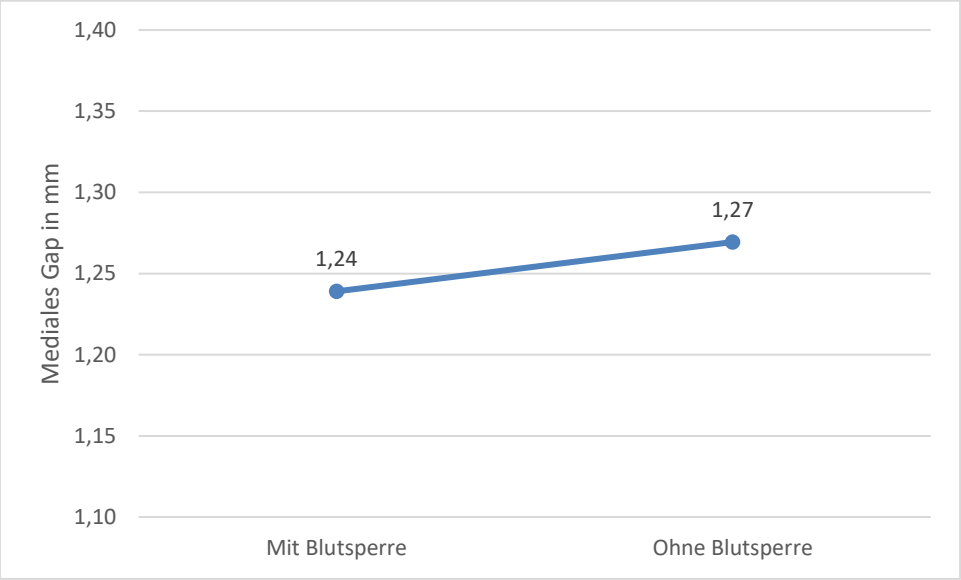

Abbildung 11: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 30°–39° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Die Flexionsgrade 40°–49° zeigten keine Unterschiede in der Aufklappbarkeit mit und ohne Blutsperre. Die Ergebnisse waren ebenfalls nicht signifikant (p = 0,278) und hatten eine schwache Effektstärke (f = 0,16).

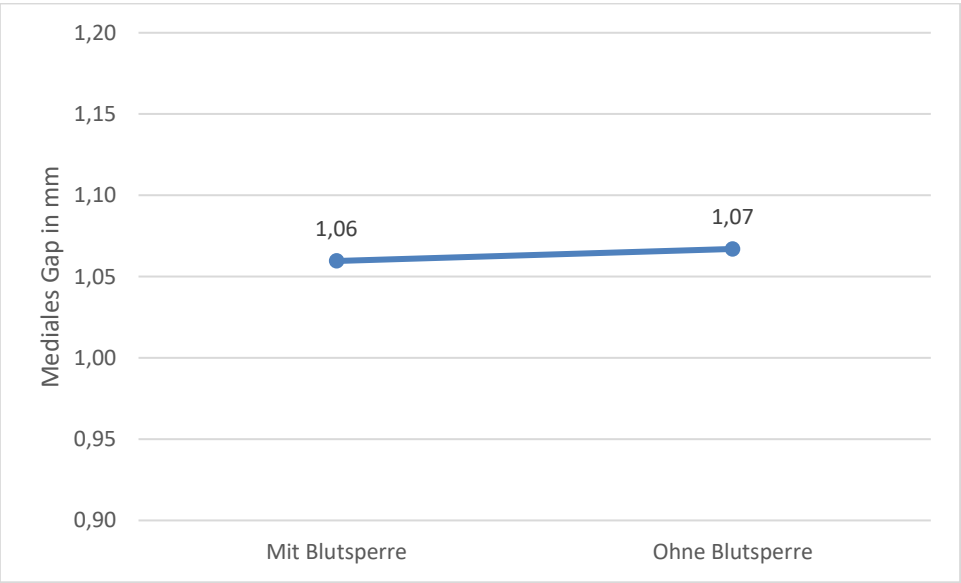

Abbildung 12: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 40°–49° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 50°–59° ergab sich eine nicht signifikante ($p = 0,16$) verminderte Aufklappbarkeit von -0,1 mm mit offener Blutsperre. Die Effektstärke war hierbei schwach ($f = 0,20$).

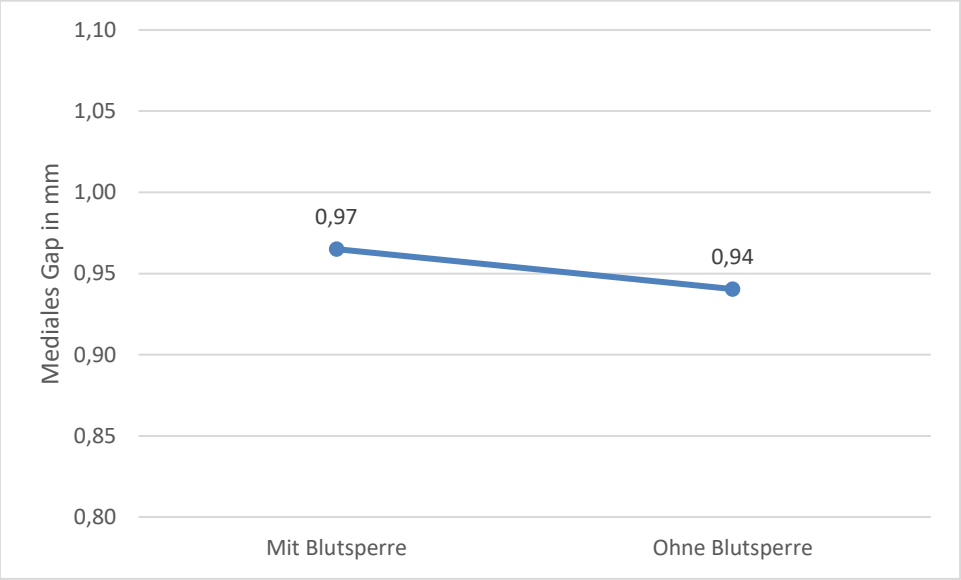

Abbildung 13: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 50°–59° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei den Flexionsgraden 60°–69° kam es ebenfalls zu einer verminderten Aufklappbarkeit von -0,1 mm ohne Blutsperre und einer schwachen berechneten Effektstärke (f = 0,24). Das Ergebnis war nicht signifikant (p = 0,101).

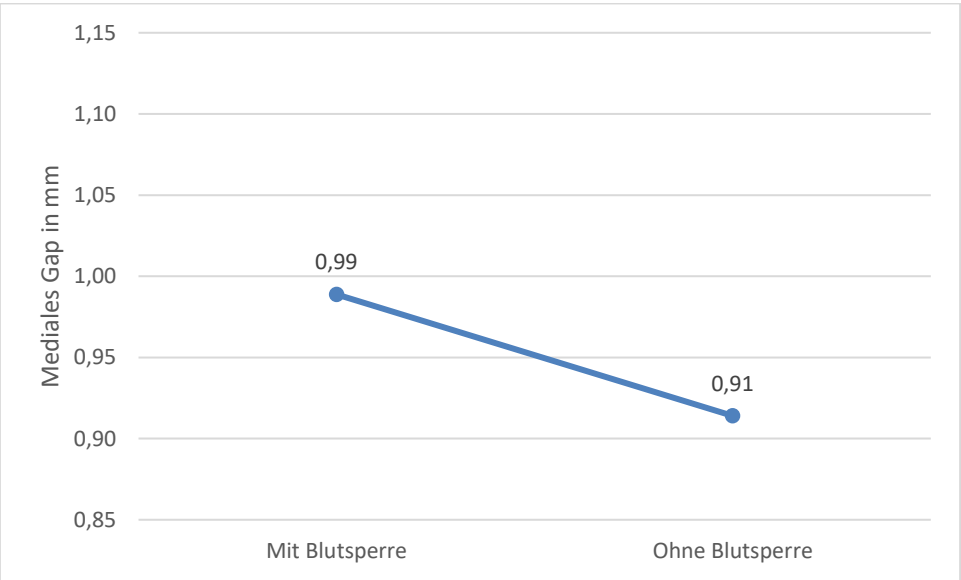

Abbildung 14: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 60°–69° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei den Flexionsgraden 70°–79° kam es nach dem Öffnen der Blutsperre zu keiner Veränderung in der Aufklappbarkeit. Das Ergebnis war nicht signifikant (p = 0,125) und mit schwacher berechneter Effektstärke (f = 0,22).

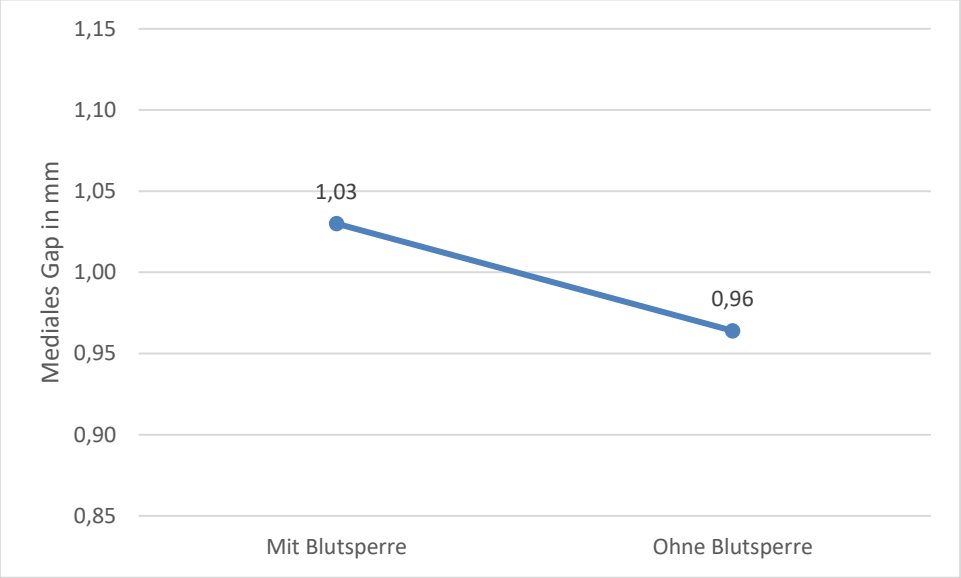

Abbildung 15: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 70°–79° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Auch bei den Flexionsgraden 80°–89° kam es zu keiner Veränderung in der Aufklappbarkeit, nachdem die Blutsperre geöffnet wurde. Das Ergebnis war nicht signifikant (p = 0,155) und wies eine schwache Effektstärke auf (f = 0,21).

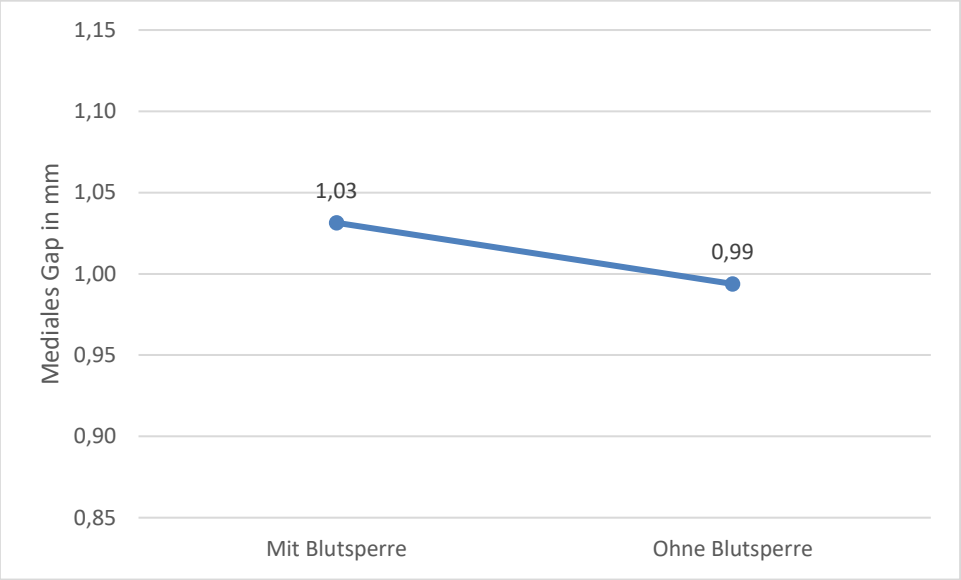

Abbildung 16: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 80°–89° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Ebenso kam es bei den Flexionsgraden 90°–99° zu keiner Veränderung in der Aufklappbarkeit. Die Ergebnisse waren ebenfalls nicht signifikant (p = 0,381) und mit schwacher Effektstärke (f = 0,13).

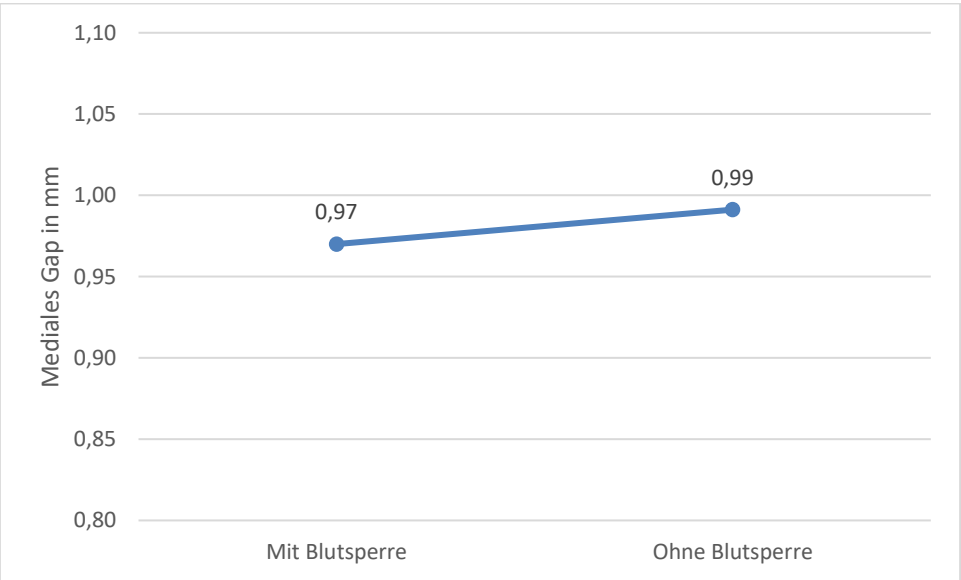

Abbildung 17: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 90°–99° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei den Flexionsgraden 100°–109° zeigte sich nach dem Öffnen der Blutsperre eine nicht signifikante (p = 0,625) vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm. Für die Flexionsgrade 100°–109° zeigte sich zudem eine sehr geringe Effektstärke (f = 0,07).

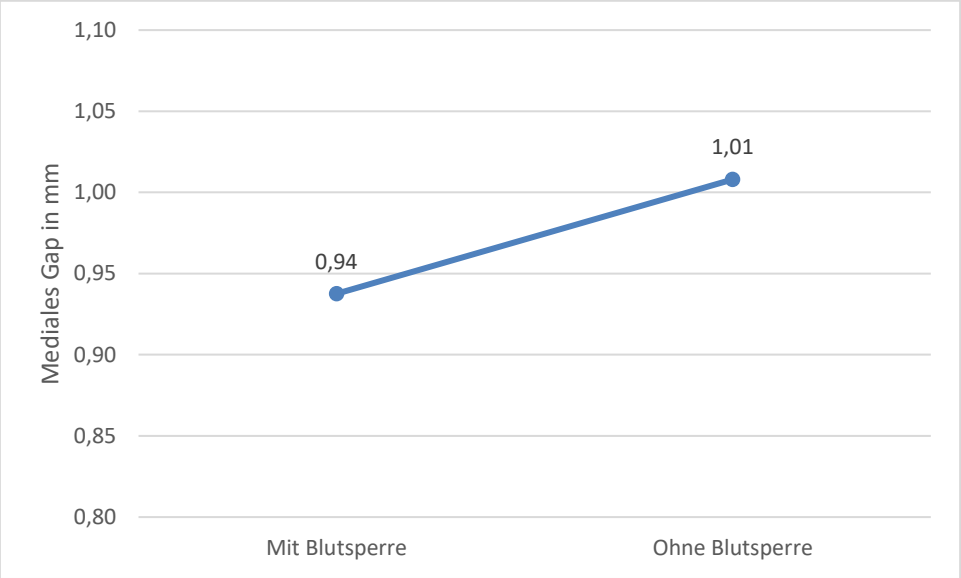

Abbildung 18: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 100°–109° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 110°–120° ergab sich eine nicht signifikante (p = 0,816) vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm mit offener Blutsperre. Die Effektstärke war mit f = 0,03 ebenfalls als sehr klein zu bewerten.

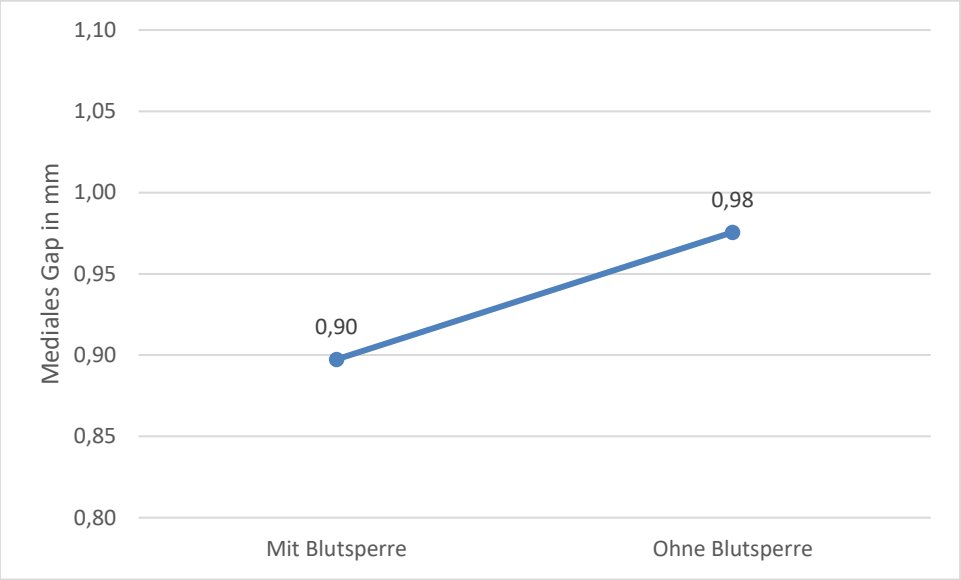

Abbildung 19: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 110°–120° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Die erhobenen Messwerte zeigen Abweichungen von -0,2 mm bis 0,1 mm (s. Tabelle 5).

Tabelle 5: Dargestellt ist die Größe des medialen Gelenkspaltes (in mm), mit und ohne Blutsperre bei den jeweiligen zugehörigen Flexionsgraden im Kniegelenk. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Flexionsgrade im Kniegelenk	Aufklappbarkeit **mit** Blutsperre (medialer Gelenkspalt in mm)	Aufklappbarkeit **ohne** Blutsperre (medialer Gelenkspalt in mm)	Differenz (mm)
0°–9°	1,5	1,6	-0,1
10°–19°	1,6	1,8	-0,2
20°–29°	1,5	1,6	-0,1
30°–39°	1,2	1,3	-0,1
40°–49°	1,1	1,1	0,0
50°–59°	1,0	0,9	0,1
60°–69°	1,0	0,9	0,1
70°–79°	1,0	1,0	0,0
80°–89°	1,0	1,0	0,0
90°–99°	1,0	1,0	0,0
100°–109°	0,9	1,0	-0,1
110°–120°	0,9	1,0	-0,1

Im Mittel zeigte sich eine Abweichung der Aufklappbarkeit der medialen Gelenkspalten von -0,04 mm mit einer Standardabweichung von 0,09 mm (s. Abb. 20).

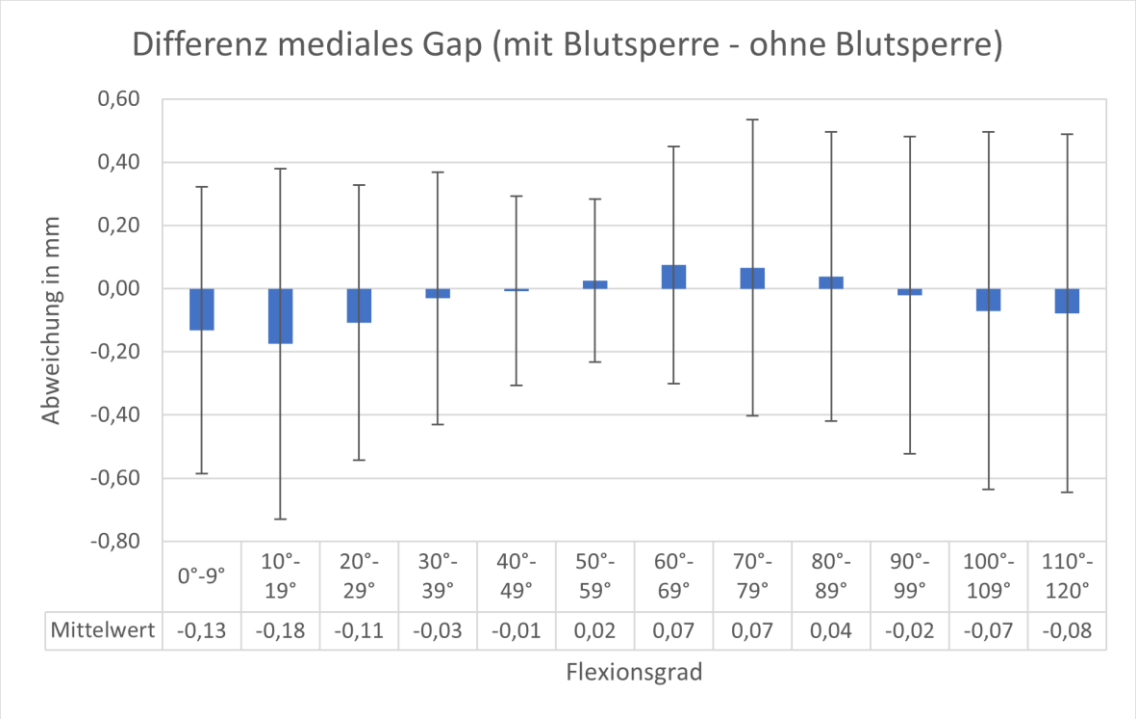

Abbildung 20: Darstellung der jeweiligen Abweichung im medialen Gelenkspalt bei Verwendung der Blutsperre im Verhältnis zu offener Blutsperre mit Angabe der Standardabweichung und Mittelwert in mm. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

3.3 **Laterale Gelenkspalten**

Die dargestellten Messwerte entsprechen den bereits publizierten Ergebnissen [7]. Bei der Messung der lateralen Gelenkspalten (s. Abbildung 21) zeigte sich bei vier Flexionsgraden (10°–19°, 20°–29°, 100°–109°, 110°–120°) ein signifikanter Unterschied zwischen Messungen mit und ohne Blutsperre. Zudem entsprachen deren Effektstärken einem mittleren Effekt.

Die Effektstärke der restlichen acht Flexionsgrade war schwach (0°–9°, 30°–39°, 80°–89°, 90°–99°) oder lag unterhalb der Schwelle eines schwachen Effekts (40°–49°, 50°–59°, 60°–69°, 70°–79°).

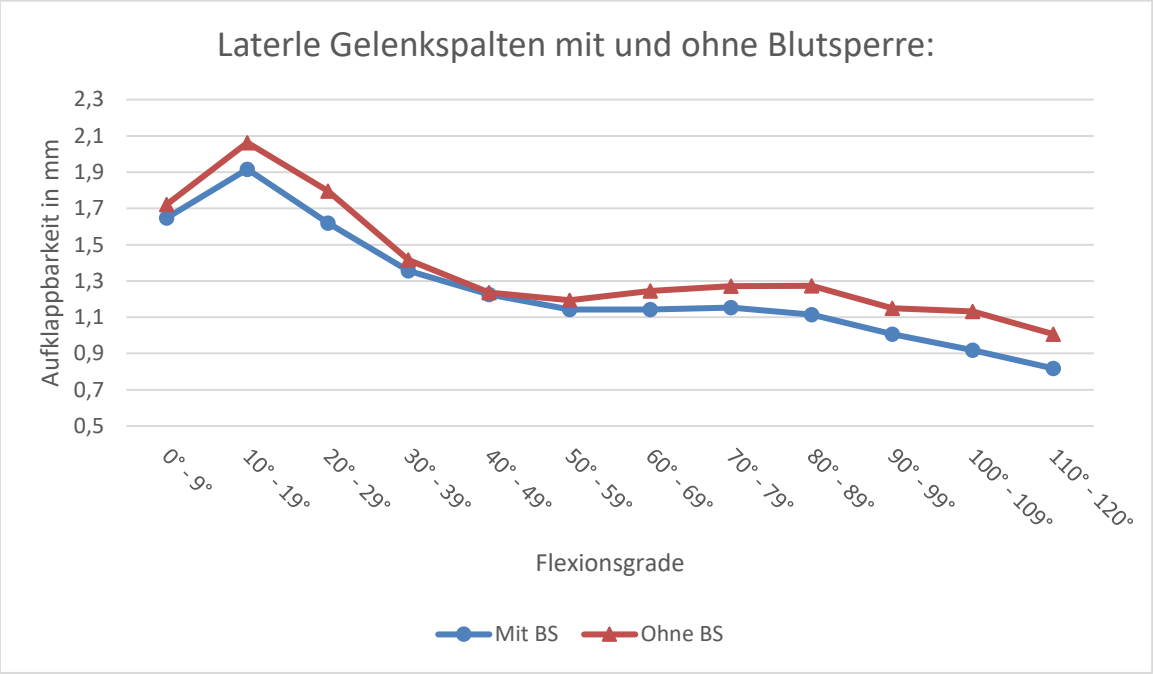

Abbildung 21: Vergleich der Aufklappbarkeit des lateralen Gelenkspaltes in mm mit Blutsperre und ohne Blutsperre. BS = Blutsperre. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 0°–9° ergab sich eine vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm nach dem Öffnen der Blutsperre. Das Ergebnis war mit p = 0,116 nicht signifikant. Die Effektstärke war schwach (f = 0,23).

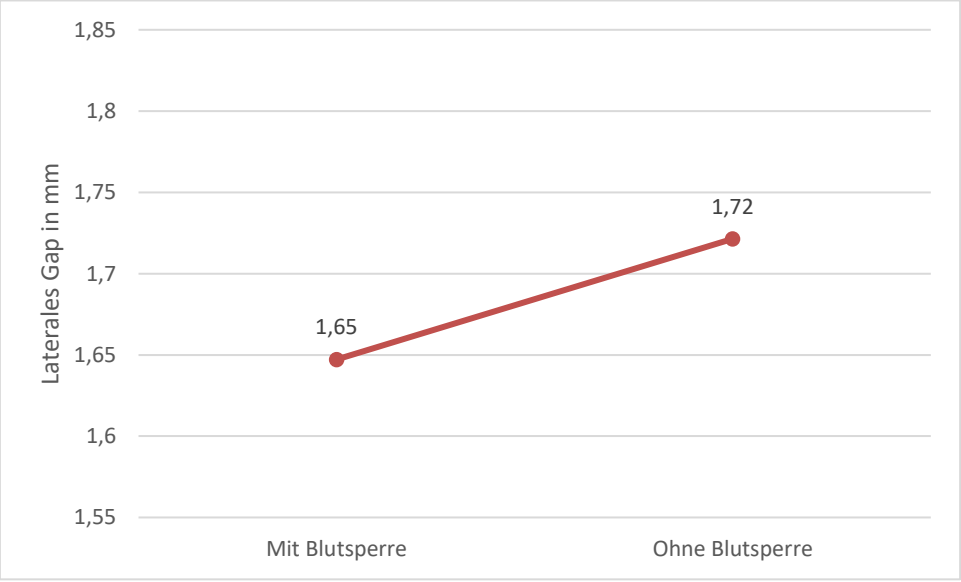

Abbildung 22: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 0°–9° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 10°–19° betrug der laterale Gelenkspalt mit Blutsperre 1,9 mm und ohne Blutsperre 2,1 mm. Die vermehrte Aufklappbarkeit war mit 0,2 mm signifikant vergrößert (p = 0,018). Die Effektstärke nach Cohen war mittelgroß (f = 0,35).

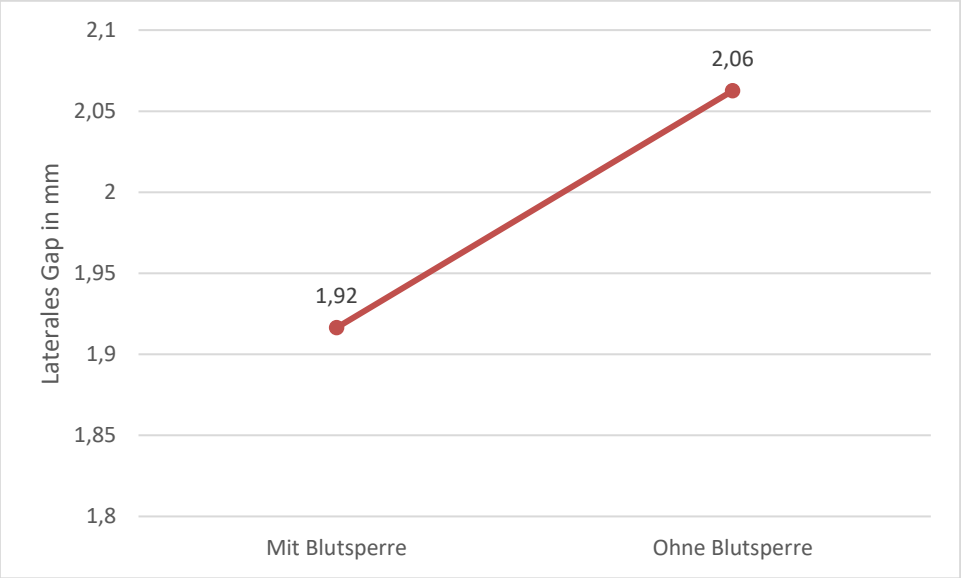

Abbildung 23: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 10°–19° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für 20°–29° ergab sich mit Blutsperre ein Wert von 1,6 mm und ohne Blutsperre ein Wert von 1,8 mm. Die Differenz von 0,2 mm vermehrter Aufklappbarkeit war ebenfalls signifikant (p = 0,02).
Die Effektstärke war mittelgroß (f = 0,34).

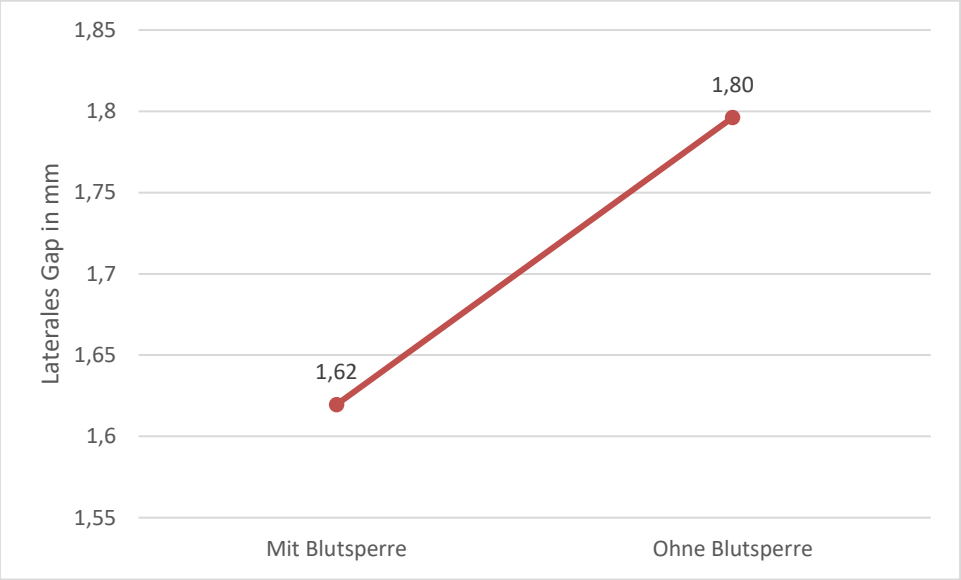

Abbildung 24: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 20°–29° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 30°–39° ergab sich keine veränderte Aufklappbarkeit mit und ohne Blutsperre. Das Ergebnis war nicht signifikant (p = 0,337). Die Effektstärke war schwach (f = 0,14).

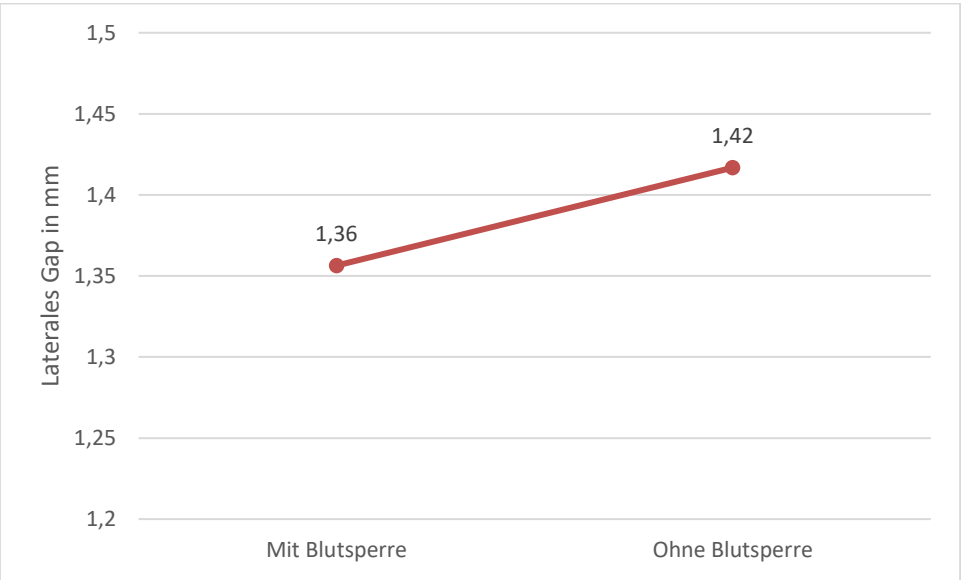

Abbildung 25: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 30°–39° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für 40°–49° ergab sich keine veränderte Aufklappbarkeit mit und ohne Blutsperre. Das Ergebnis war nicht signifikant und es zeigte sich eine sehr geringe Effektstärke (p = 0,822, f = 0,03).

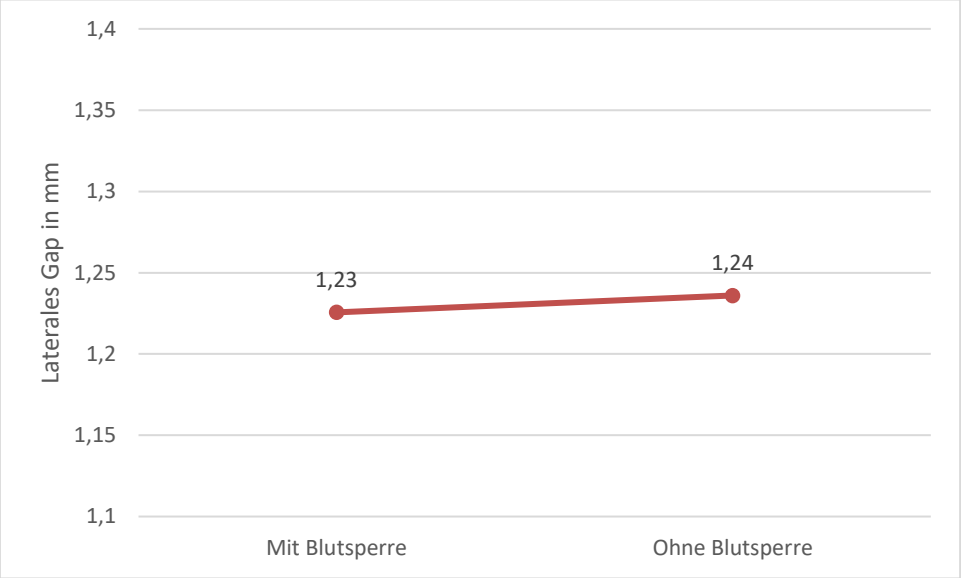

Abbildung 26: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 40°–49° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 50°–59° ergab sich eine nicht signifikante (p = 0,684) vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm. Auch hier zeigte sich eine sehr geringe Effektstärke mit f = 0,05.

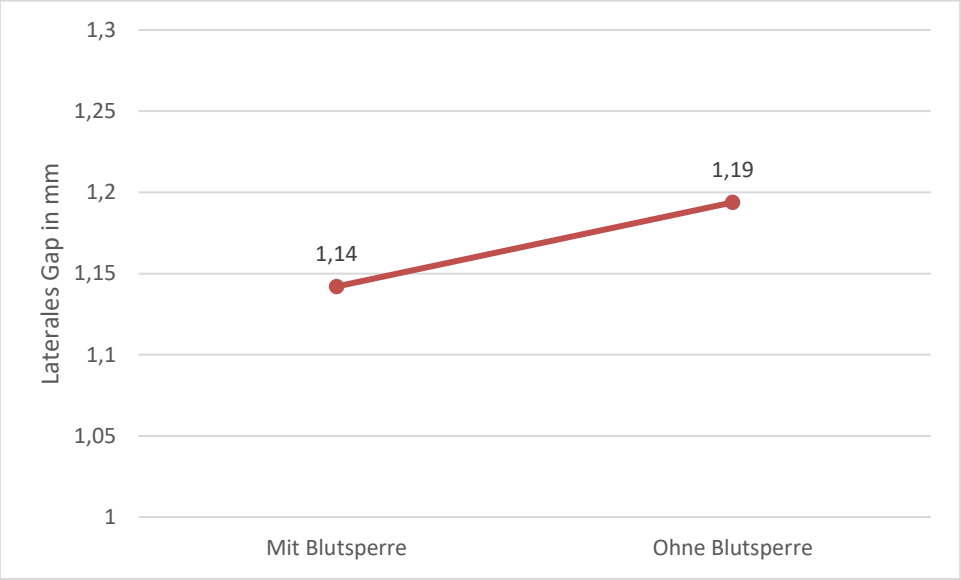

Abbildung 27: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 50°–59° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei 60°–69° ergab sich eine vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm.
Diese war nicht signifikant und die berechnete Effektstärke war sehr gering (p = 0,772, f = 0,04).

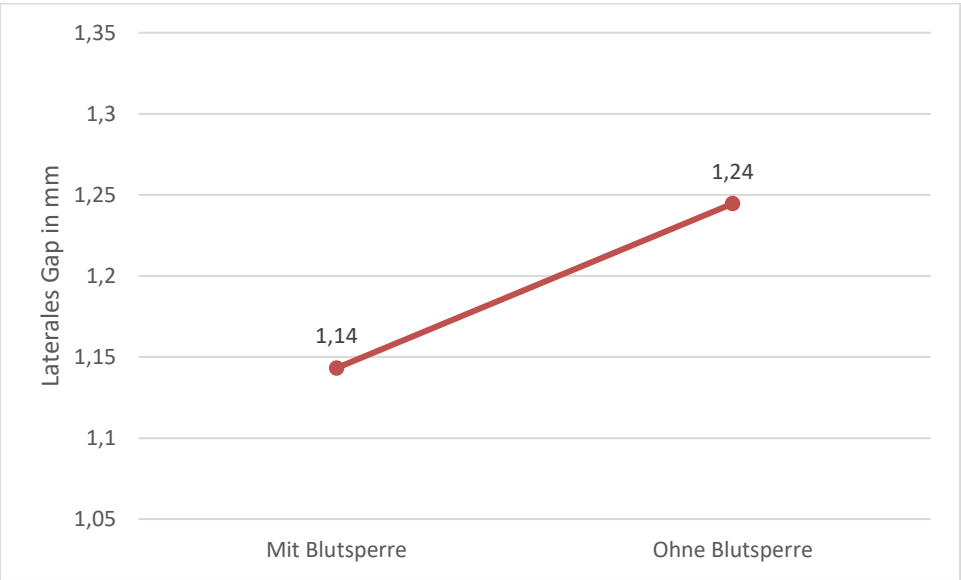

Abbildung 28: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 60°–69° Flexion Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei 70°–79° zeigte sich ebenfalls eine nicht signifikante vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm. Die berechnete Effektstärke nach Cohen war sehr gering (p = 0,623, f = 0,07).

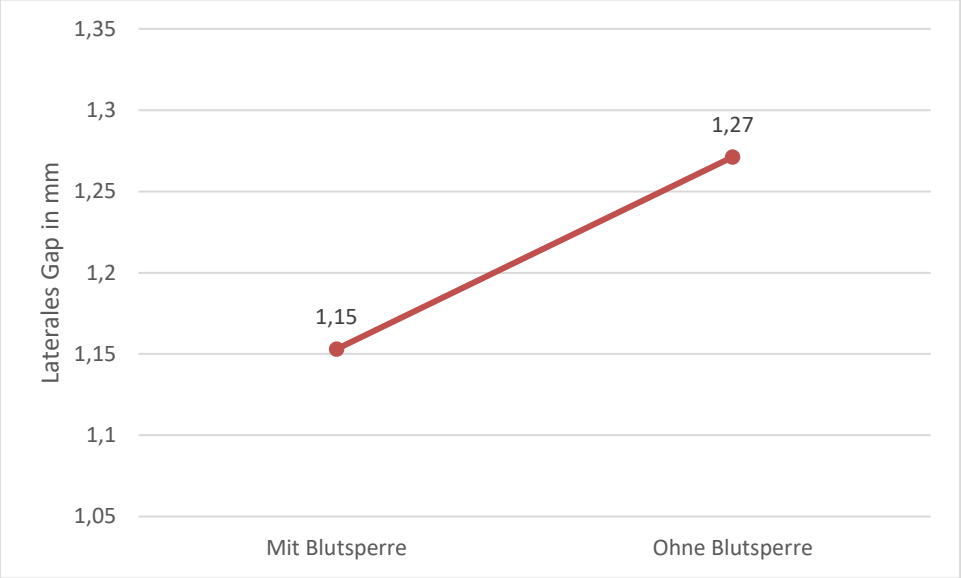

Abbildung 29: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 70°–79° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 80°–89° ergab sich nach dem Öffnen der Blutsperre eine nicht signifikante (p = 0,234) vermehrte Aufklappbarkeit von 0,2 mm im lateralen Gelenkspalt. Das Ergebnis zeigte eine schwache berechnete Effektstärke nach Cohen (f = 0,17).

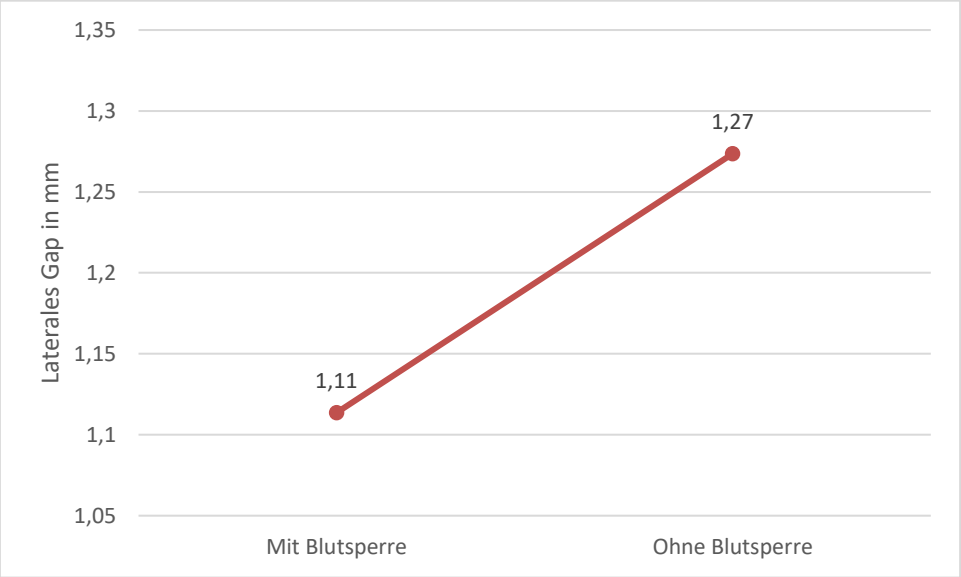

Abbildung 30: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 80°–89° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei den Flexionsgraden 90°–99° zeigte sich ohne Blutsperre eine nicht signifikante vermehrte Aufklappbarkeit von 0,1 mm (p = 0,19). Die berechnete Effektstärke war schwach (f = 0,19).

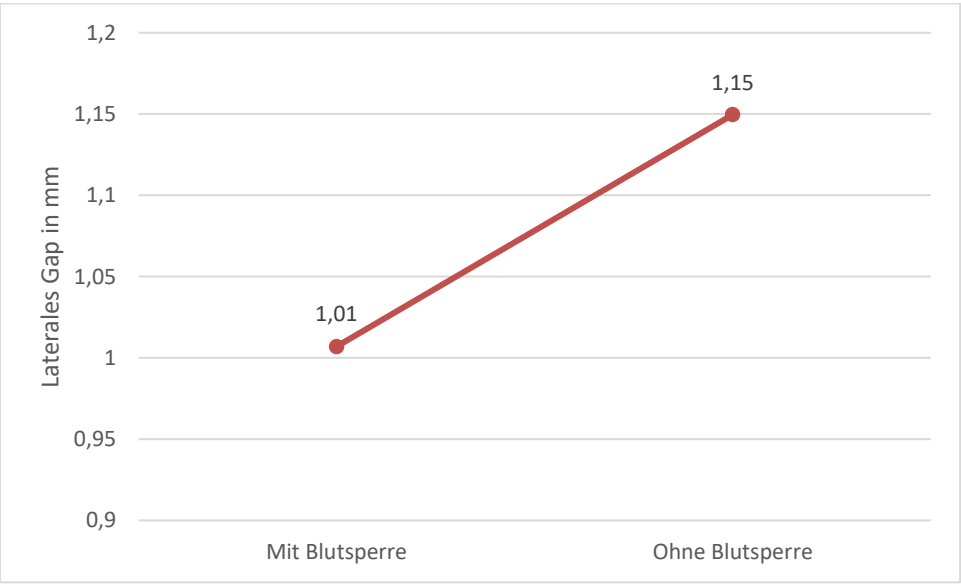

Abbildung 31: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 90°–99° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Bei den Flexionsgraden 100°–109° kam es zu einer signifikanten (p = 0,021) Vergrößerung des lateralen Gelenkspaltes von 0,9 mm auf 1,1 mm nach dem Öffnen der Blutsperre. Die berechnete Effektstärke wurde mit f = 0,34 als mittelgroß angegeben.

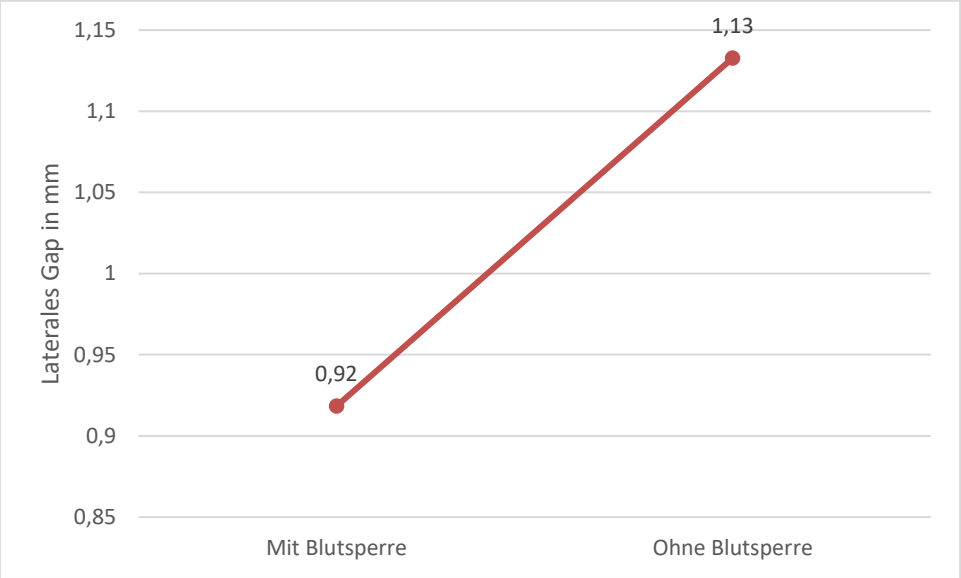

Abbildung 32: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 100°–109° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Für die Flexionsgrade 110°–120° kam es ohne Blutsperre zu einer vermehrten Aufklappbarkeit von 0,8 mm auf 1,0 mm. Das Ergebnis hierbei war ebenfalls signifikant (p = 0,038) und hatte eine mittlere Effektstärke (f = 0,30).

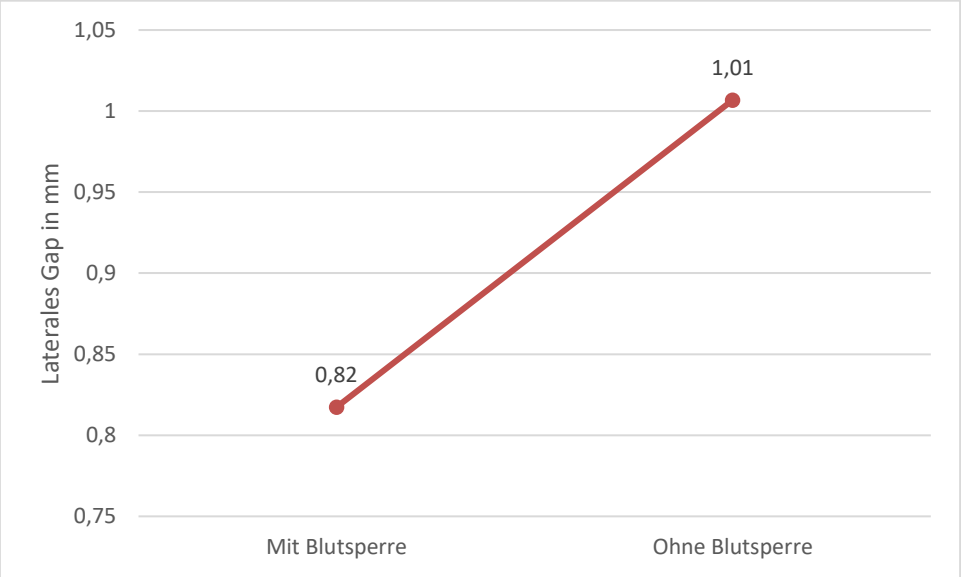

Abbildung 33: Differenz mit und ohne Blutsperre bei 110°–120° Flexion. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Die mittleren Abweichungen der lateralen Gelenkspalten reichten von -0,2 mm bis 0,0 mm (s. Tabelle 6).

Tabelle 6: Dargestellt ist die Größe des lateralen Gelenkspalts (in mm), mit und ohne Blutsperre bei den jeweiligen zugehörigen Flexionsgraden im Kniegelenk. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Flexionsgrade im Kniegelenk	Aufklappbarkeit **mit** Blutsperre (lateraler Gelenkspalt in mm)	Aufklappbarkeit **ohne** Blutsperre (lateraler Gelenkspalt in mm)	Differenz (mm)
0°–9°	1,6	1,7	-0,1
10°–19°	1,9	2,1	-0,2
20°–29°	1,6	1,8	-0,2
30°–39°	1,4	1,4	0,0
40°–49°	1,2	1,2	0,0
50°–59°	1,1	1,2	-0,1
60°–69°	1,1	1,2	-0,1
70°–79°	1,2	1,3	-0,1
80°–89°	1,1	1,3	-0,2
90°–99°	1,0	1,1	-0,1
100°–109°	0,9	1,1	-0,2
110°–120°	0,8	1,0	-0,2

Die jeweilige Standardabweichung sowie der jeweilige Mittelwert der einzelnen Flexionsgrade sind in Abbildung 34 dargestellt.

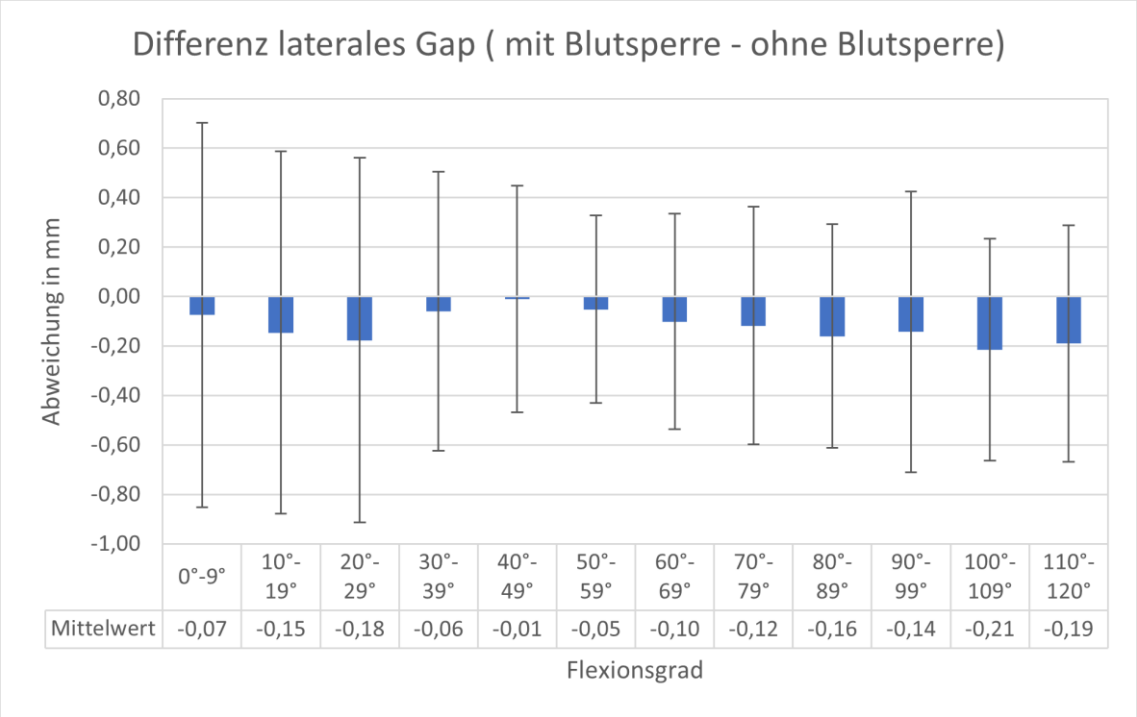

Abbildung 34: Dargestellt ist die Differenz der Aufklappbarkeit des lateralen Kniegelenkspalts mit und ohne Blutsperre. Zusätzlich ist die Standardabweichung für die jeweiligen Flexionsgrade dargestellt. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

3.4 Klinische Ergebnisse

3.4.1 Auswertung Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score

Die Auswertung des KOOS zeigte, inwieweit die Behandlung einen klinischen Erfolg erzielt hatte. Es wurden vier der fünf im KOOS aufgeführten Dimensionen befragt. Symptome (7 Fragen), Schmerzen (9 Fragen), Aktivitäten des täglichen Lebens (17 Fragen) und die Lebensqualität im Zusammenhang mit dem betroffenen Knie (4 Fragen). Aufgrund des Alters und der Vorerkrankungen der Patienten wurde die fünfte Dimension „Funktionsfähigkeit im Sport und in der Freizeit“ nicht abgefragt.

Die Auswertung der Bögen ergab für alle Dimensionen eine Verbesserung der Punktzahl.

Im Bereich Symptome erhöhte sich die durchschnittliche Punktzahl von 55 ± 17 Punkte präoperativ auf 74 ± 18 Punkte postoperativ.

Bei den Schmerzen kam es zu einer Erhöhung der Punktzahl von 52 ± 17 Punkte auf 74 ± 19 Punkte.

Die Aktivitäten des täglichen Lebens zeigten bei den Patienten im Schnitt eine Erhöhung von 54 ± 18 auf 81 ± 17 Punkte.

In der Dimension der Lebensqualität im Zusammenhang mit dem betroffenen Knie kam es zu einer Erhöhung der Punktzahl von 31 ± 17 auf 59 ± 21 Punkte (vgl. Abbildung 35).

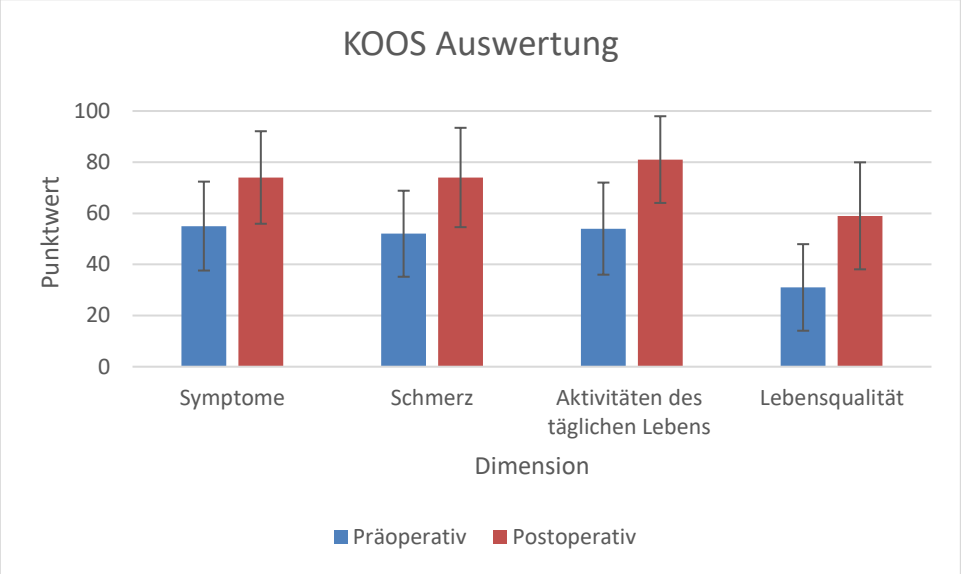

Abbildung 35: Auswertungsergebnisse der präoperativen im Vergleich zu den postoperativen KOOS-Fragebögen in den vier erhobenen Unterkategorien (Dimensionen) auf einer Skala von 0 bis 100 Punkten. Zudem Darstellung der jeweiligen Standardabweichung. 0 Punkte entsprechen dem höchsten und 100 Punkte dem niedrigsten Schweregrad der Einschränkung.

3.4.2 **Auswertung Oxford Knee Score**

Bei der Auswertung der 12 Fragen des Oxford Knee Scores wurde ebenfalls das Gesamtoutcome der Patienten objektiviert. In der durchgeführten Studie kam es zu

einer Erhöhung des postoperativen Punktwertes von 23 ± 8 Punkte auf 27 ± 11 Punkte (vgl. Abbildung 36).

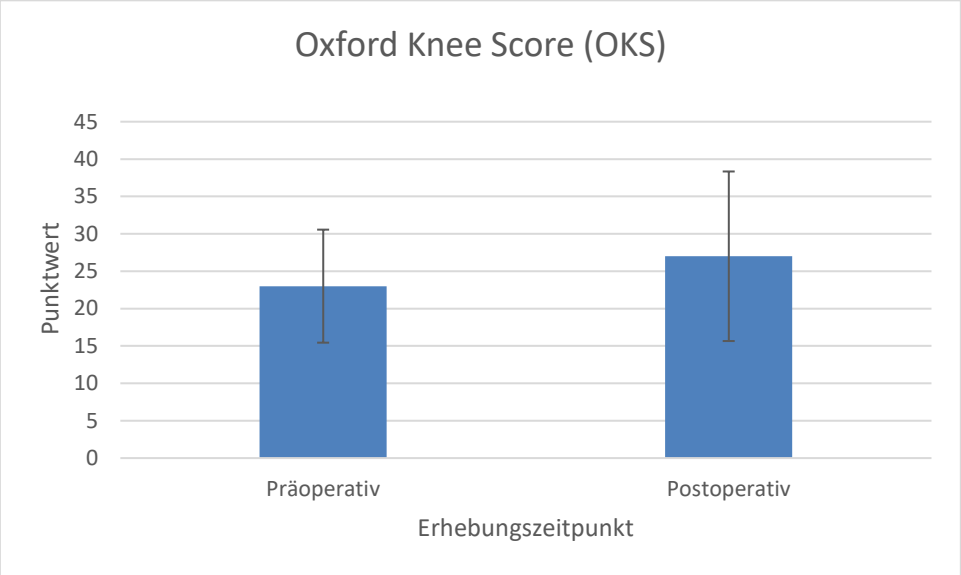

Abbildung 36: Vergleich des präoperativ erhobenen OKS mit dem postoperativ erhobenen OKS auf einer Skala von 0 Punkten bis 48 Punkten. 0 Punkte entspricht dem höchsten und 48 Punkte dem niedrigsten Schweregrad der Einschränkung.

4. Diskussion

4.1 Klinische Relevanz

Als primäre Hypothese wurde überprüft, ob das Verwenden einer Blutsperre im Rahmen der Implantation einer Knie-Totalendoprothese einen Einfluss auf die intraoperativ erhobene Kniekinematik hat. Hierbei wurden anhand der Messungen lediglich in den lateralen Gelenkspalten bei einer Flexion von 10°–19°, 20°–29°, 100°–109° sowie 110°–120° signifikante Änderungen festgestellt. Die Messwerte in den vier angegebenen Flexionsgraden zeigen eine Vergrößerung des Gelenkspalts von jeweils 0,2 mm. Es ist davon auszugehen, dass die angegebenen 0,2 mm keine klinische Relevanz haben. Die Hypothese, dass die Implantation der Prothese bei anliegender Blutsperre zu einer fehlerhaften oder verschlechterten postoperativen Lage führen könnte, kann somit nicht bestätigt werden.

Die vorliegende Diskussion basiert auf den Ergebnissen einer bereits publizierten prospektiven Studie [7] und erweitert diese um eine vertiefte methodische sowie klinische Einordnung.

Bei der durchgeführten Studie handelt es sich um die erste nach unserem Kenntnisstand durchgeführte Studie, bei der die Beweglichkeit im Kniegelenk in Abhängigkeit von einer Blutsperre über den gesamten Bewegungsumfang untersucht wurde. Die wenigen teils vergleichbaren Studien zur intraoperativen Kinematik mit und ohne Blutsperre kommen allerdings ebenfalls zu einem klinisch nicht relevanten Ergebnis [12, 28].

Tsubosaka et al. untersuchten in ihrer Studie bei 20 Patienten unter anderem den medialen und lateralen Kniegelenkspalt. Hierzu wurden allerdings lediglich Messungen bei voller Extension und in 90° Flexion durchgeführt [28]. Somit lassen sich anhand dieser Studie keine Aussagen über den gesamten Bewegungsumfang des Knies treffen. Ebenso zeigten Kim et al. in ihrer 2017 durchgeführten Studie keine klinische Relevanz in Bezug auf die intraoperative Kinematik. Hierbei wurden allerdings nur sieben Flexionsgrade erfasst [12]. In einer weiteren Studie untersuchten Matsui et al., ob der Flexionsgrad beim Schließen der Blutsperre den Winkel zwischen der Tangente der Femurkondylen und der tibialen osteotomierten Fläche beeinflusst. Auch hier zeigte sich keine klinische Relevanz [18]. Aufgrund

der an unterschiedlicher Stelle gemessenen Gelenkspalten ist auch diese Studie nicht direkt mit unserer vergleichbar.

4.2 **Vergleichbarkeit der Daten**

4.2.1 **Patientenkollektiv**

In der durchgeführten Studie wurden 50 Patienten eingeschlossen. Hierbei handelte es sich um 24 weibliche und 26 männliche Patienten. Es wurde jeweils 25-mal das linke und 25-mal das rechte Knie operiert. Im Hinblick auf das Geschlecht zeigte sich im Vergleich zu ähnlichen Studien eine deutlich ausgeglichenere Verteilung. So untersuchten Kim et al. 37 weibliche und lediglich 7 männliche Patienten [12]. Tsubosaka et al. schlossen lediglich 20 Patienten, davon 18 weibliche und 2 männliche, in ihre Studie ein [28]. Es kann davon ausgegangen werden, dass es aufgrund geschlechtsspezifisch unterschiedlicher Muskelmasse bei Frauen und Männern zu abweichenden Ergebnissen kommen könnte.

Es wurden in der Studie Patienten mit einer Valgusstellung des Knies > 3° ausgeschlossen. Nach der CPAK-Klassifikation (Coronal Plane Alignment of the Knee) wurden hauptsächlich Knie der Gruppe I (43,5 %) und der Gruppe II (28,3 %) versorgt (s. Abbildung 37) [7, 16]. Somit wurden hauptsächlich Knie mit Varusstellung sowie Neutralstellung und jeweils distalem Apex der Gelenklinie versorgt. Lediglich 6,6 % der Patienten wiesen eine Valgusstellung im Kniegelenk auf, diese jedoch aufgrund der Ausschlusskriterien mit einem Winkel < 3°.

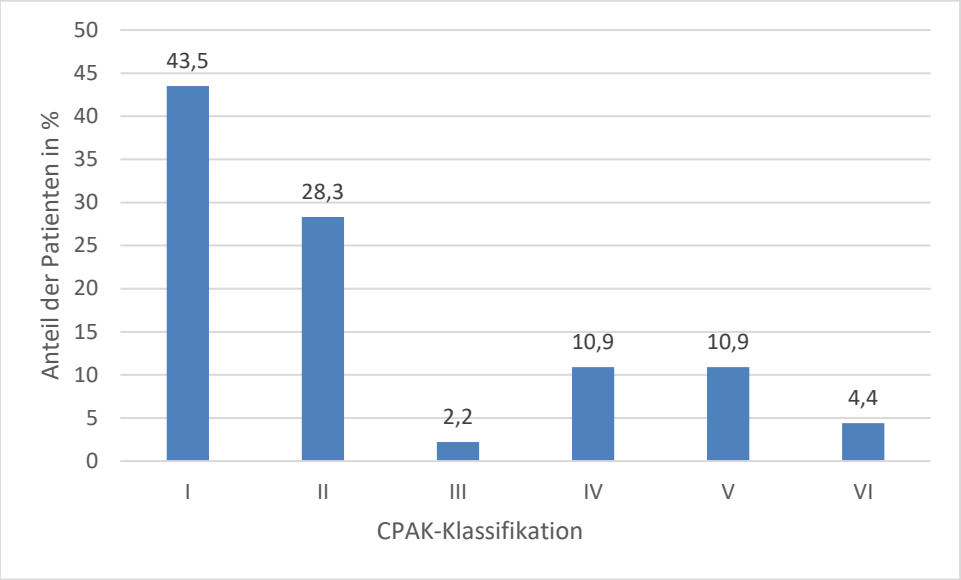

Abbildung 37: Das Diagramm zeigt die CPAK-Gruppenzugehörigkeit der in die Studie eingeschlossenen Patienten in Prozent. Eigene Darstellung basierend auf publizierten Daten [7].

Somit kann das Ergebnis der Studie lediglich auf Kniegelenke mit Varusstellung angewandt werden. Über die Kinematik von Kniegelenken in Valgusstellung kann keine Aussage getroffen werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass es bei Einschluss von lediglich Patienten mit einer Valgusstellung im Kniegelenk zum genau gegenteiligen Effekt kommt (mediale Unterschiede und lateral gleichbleibende Werte). In einem Studiendesign mit sowohl Valgus- als auch Varusstellungen würden sich die signifikanten Werte somit gegenseitig neutralisieren und die Studie wäre nicht aussagekräftig.
Zudem können einige weitere Kriterien die Kinematik im Kniegelenk beeinflussen. Um eine valide Aussage über die Gesamtheit der Bevölkerung treffen zu können, müssten noch weitere Daten der Patienten wie BMI, Geschlecht, Grunderkrankungen, Oberschenkelumfang, Muskelmasse und weitere Faktoren zusätzlich hinzugezogen und separat ausgewertet werden. Diese Faktoren wurden im Rahmen dieser Studie nicht gesondert betrachtet.

4.2.2 **Methodik**

Auch bei der Art der Anwendung der Blutsperre zeigen sich teils deutliche Unterschiede. So können sich unter anderem folgende Faktoren sowohl positiv als

auch negativ auf das Outcome bei Verwendung der Blutsperre auswirken. Zum einen die Zeit der Kompression, zum anderen die Stärke der Kompression. In der vorliegenden Studie wurde ein Kompressionsdruck von 350 mmHg über eine Dauer von weniger als einer Stunde angewandt. Diese Dauer konnte bei Bedarf verlängert werden.

Smith et al. untersuchten bei 100 Patienten die Auswirkung der Kompressionszeit auf das Outcome der Patienten im Hinblick auf postoperative Schmerzen, Haltbarkeit der Prothesen, postoperative Beweglichkeit (Range of Motion) und Blutungen (Hb-Messungen). Dabei wurden die Gruppen in Kurzzeit-Kompression (unter 10 Minuten) und Langzeit-Kompression (über 10 Minuten) eingeteilt. Hierbei zeigten sich keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen [26]. Es bleibt anzumerken, dass eine Kompression von unter 10 Minuten für die Implantation der K-TEP keine klinisch relevante Kompressionsdauer darstellt und bei der Verwendung der Blutsperre eine Kompressionsdauer von > 10 Minuten die Regel darstellt.

In einer Studie zur Untersuchung verschiedener Kompressionsdrücke teilten Pinsornsak et al. 150 Patienten in drei Gruppen ein. Gruppe 1 wurde bei einem Kompressionsdruck der Blutsperre von 75 mmHg, Gruppe 2 bei 100 mmHg und Gruppe 3 bei 150 mmHg operiert. Die postoperativen Schmerzen waren in Gruppe 3 am größten und in Gruppe 1 am geringsten. Ebenso zeigten sich in Gruppe 3 vermehrt Wundkomplikationen. Bezüglich des Blutverlustes, der Range of Motion, des Knee Society Score und der postoperativen Schwellung ergaben sich in allen drei Gruppen keine Unterschiede. Insgesamt war das Outcome bei einem Kompressionsdruck von 75 mmHg am besten [22].

In unserer Klinik wurde nach Durchführung der Studie der standardisierte Kompressionsdruck der verwendeten Blutsperren auf 250 mmHg reduziert, jedoch unabhängig von deren Ergebnissen. Somit könnte es aufgrund des geminderten Drucks zu einer Veränderung der Gelenkspalten kommen. Hierbei ist von einer geringeren Spaltmaßdifferenz auszugehen.

Das Aufpumpen der Blutsperre wurde im Rahmen der Studie jeweils in 90° Flexion durchgeführt. Hierbei stellt sich die Frage, ob ein Aufpumpen der Blutsperre bei anderen Gelenkstellungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen könnte. In einer von Matsui et al. durchgeführten Studie zur jeweiligen Gelenkstellung während

des Aufpumpens der Blutsperre zeigte sich allerdings kein Einfluss auf die Kniegelenksspalten. So erfolgte das Aufpumpen der Blutsperre bei 104 Patienten sowohl in vollständiger Flexion als auch in vollständiger Extension. Die Kniegelenkspalten wurden jeweils bei 0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120° und in maximaler Flexion gemessen. Hierbei zeigte sich kein signifikanter Unterschied bezüglich der Kniegelenksspalten [18].
Aufgrund des Versuchsaufbaus war es nicht möglich, die Beweglichkeit der Patella und deren Einfluss auf die Gesamtbeweglichkeit des Kniegelenks zu erfassen. Somit kann anhand unserer Studie keine Aussage dazu getroffen werden, ob die Kompression des M. quadriceps femoris durch die mögliche Limitation der patellaren Beweglichkeit einen Einfluss auf das Ergebnis hat.

4.2.3 **Weitere beeinflussende Faktoren**

Ein weiterer studienbeeinflussender Faktor stellt das jeweils durchgeführte Anästhesieverfahren dar. So wurden die Patienten in der von uns durchgeführten Studie jeweils mit dem individuell bestmöglichen Verfahren anästhesiert. Großteils erhielten die Patienten eine sonografiegesteuerte Regionalanästhesie mittels Psoas-Kompartment-Block und Nervus ischiadicus-Blockaden. Diese regionalen Verfahren wurden mit einer Spinalanästhesie oder Vollnarkose kombiniert. Eine Vollnarkose mit Relaxierung könnte unter Umständen in einer abweichenden Beweglichkeit im Kniegelenk resultieren. Um hierzu eine Aussage treffen zu können, wäre ein Vergleich verschiedener Anästhesieverfahren notwendig. Da es sich jedoch um eine Messwiederholung bei jeweils demselben Patienten handelt, spielt der Einfluss des Anästhesieverfahren eine sehr geringe Rolle und ist zu vernachlässigen. Das jeweilige Anästhesieverfahren wurde im Rahmen unserer Studie nicht differenziert betrachtet.

4.3 **Outcome der Patienten**

In der von uns durchgeführten Studie wurden lediglich vier Patienten nachträglich aus der Studie ausgeschlossen. Die Operationen konnten alle erfolgreich und aus operativer Sicht komplikationslos abgeschlossen werden. Anhand der erhobenen Scores kann zudem gezeigt werden, dass die Implantation der K-TEP auch für die

jeweiligen Patienten zu einem zufriedenstellenden klinischen Outcome geführt hat. Dies zeigt ebenfalls, dass keine klinische Relevanz der in unserer Studie erhobenen signifikanten Ergebnisse besteht.
Hierbei gilt zu beachten, inwieweit die beiden erhobenen Fragebögen bereits drei Wochen postoperativ eine valide Aussage bezüglich des Outcomes treffen können. Eine zusätzliche Patientenbefragung nach weiteren zwölf Monaten könnte hier eine genauere Aussage erlauben. Allerdings konnten Goh et al. in ihrer Studie zum Vorhersagewert des OKS eine hohe Korrelation zwischen der Erhebung nach sechs Monaten im Vergleich zur Erhebung nach zwei Jahren zeigen [9]. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die von uns erhobene postoperative klinische und funktionelle Verbesserung eine valide Aussage liefert und die Werte im weiteren Verlauf voraussichtlich weiter steigen werden.

4.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich anhand der vorliegenden Studie zeigen, dass die Verwendung einer Blutsperre im Rahmen der Implantation einer Knie-Totalendoprothese keinen klinisch relevanten Einfluss auf die intraoperative Kniekinematik hat.
Die primäre Hypothese eines relevanten kinematischen Einflusses der Blutsperre auf die intraoperative Gelenkbeweglichkeit konnte somit nicht bestätigt werden.
Zwar zeigten sich bei einzelnen Flexionsgraden in den lateralen Gelenkspalten signifikante Veränderungen, die gemessene Differenz von im Mittel 0,2 mm kann jedoch nicht als klinisch relevant angesehen werden. Eine Beeinträchtigung der postoperativen Prothesenlage oder der funktionellen Ergebnisse aufgrund der Verwendung einer Blutsperre scheint vor diesem Hintergrund unwahrscheinlich.
Die im Rahmen der Studie erhobenen klinischen Scores stützen diese Einschätzung, da sie durchgehend eine postoperative Verbesserung gezeigt haben. Somit zeigt sich kein Hinweis auf einen funktionellen Nachteil durch die intraoperative Verwendung der Blutsperre.
Limitierend ist insbesondere der im Vergleich hohe verwendete Kompressionsdruck sowie der Ausschluss von Patienten mit ausgeprägter Valgusfehlstellung zu werten. In weiteren Studien sollten daher unterschiedliche Kompressionsdrücke,

Kompressionsdauern sowie Beinachsenkonfigurationen berücksichtigt werden. Zudem wäre eine längerfristige Nachuntersuchung zur Detektion möglicher weiterer Effekte auf das funktionelle Outcome oder die Implantatstandzeit sinnvoll.

Die zentralen Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits publiziert [7]. Die Dissertation dient der umfassenden Darstellung, Kontextualisierung und kritischen Diskussion dieser Daten.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Verwendung einer Blutsperre unter kinematischen Gesichtspunkten keinen klinisch relevanten Einfluss auf die intraoperative Beweglichkeit des Kniegelenks hat. Die Anlage einer Blutsperre kann daher weiterhin als sicheres und vertretbares Hilfsmittel in der Knieendoprothetik angesehen werden.

5. Zusammenfassung

Das Verwenden einer Blutsperre im Rahmen der Implantation einer Knie-Totalendoprothese wird immer wieder sehr kontrovers diskutiert. Zahlreiche Studien untersuchten bereits verschiedene Faktoren, die für oder gegen eine Blutsperre sprechen. Allerdings wurden bisher kaum Untersuchungen bezüglich der intraoperativen Kniekinematik durchgeführt. Die vorliegende prospektive Studie sollte zeigen, ob das Verwenden der Blutsperre einen Einfluss auf die intraoperative Beweglichkeit und Kinematik im Kniegelenk hat.

Hierzu wurden 50 Patienten untersucht, bei denen eine Knie-Totalendoprothese implantiert wurde. Die Operation wurde robotisch assistiert mithilfe des NAVIO®-Systems durchgeführt. Somit ließen sich jeweils die lateralen Gelenkspalten sowie die medialen Gelenkspalten mit geschlossener und geöffneter Blutsperre vergleichen. Hierzu wurden jeweils zwölf Messwerte über den Extensions- und Flexionsradius des Kniegelenks von 0° bis 120° in 10°-Schritten erhoben. Die erhobenen Werte konnten postoperativ anhand intraoperativ angefertigter Screenshots ausgewertet werden.

Zudem wurden zwei klinische Scores (Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score, Oxford Knee Score) jeweils einen Tag prä- und drei Wochen postoperativ erhoben, um das klinische Outcome der Patienten zu objektivieren.

Bei der Auswertung der Messwerte zeigte sich für die lateralen Gelenkspalten bei vier Flexionsgraden (10°–19°, 20°–29°, 100°–109°, 110°–120°) ein signifikanter Unterschied der Gelenkspaltweiten. Hierbei kam es im Mittel bei allen vier Flexionsgraden nach dem Öffnen der Blutsperre zu einer Vergrößerung des Gelenkspalts um 0,2 mm. Für die medialen Gelenkspalten zeigte sich für keinen der Flexionsgrade eine signifikante Veränderung.

Die erhobenen klinischen Scores zeigten durchweg eine Verbesserung der Punktwerte nach durchgeführter Implantation.

Aufgrund der geringen Abweichung von 0,2 mm gehen wir von keiner klinischen Relevanz der Messwerte, auch nicht der signifikant unterschiedlichen Messwerte, aus. Das durchweg gute Outcome der Patienten spricht ebenfalls gegen eine klinische Relevanz der Diskrepanz der Gelenkspalten.

Als limitierender Faktor der Studie kann der im Vergleich hohe Kompressionsdruck von 350 mmHg gesehen werden. Zudem wurden Patienten mit einer Valgusstellung > 3° von der Studie ausgeschlossen. Die Ergebnisse können somit nur eine Aussage über Patienten mit Normal- oder Varusstellung im Kniegelenk treffen. Auch eine weitere Einteilung der Patienten nach dem Body-Mass-Index sowie nach verwendetem Anästhesieverfahren könnte die Ergebnisse weiter differenzieren.
In Summe zeigte sich, dass es zu keiner klinisch relevanten Veränderung der Kinematik im Kniegelenk bei der Verwendung einer Blutsperre kommt.
Aufgrund der Studienergebnisse kann im Hinblick auf die Beweglichkeit im Kniegelenk weiterhin die Verwendung einer Blutsperre empfohlen werden.

6. Literaturverzeichnis

1. Abdel MP, Meneghini RM, Berry DJ (2021) Current Practice Trends in Primary Hip and Knee Arthroplasties Among Members of the American Association of Hip and Knee Surgeons: An Update During the COVID-19 Pandemic. J Arthroplasty 36:S40-S44.e3. doi: 10.1016/j.arth.2021.01.080
2. Barua DS, Roy V, Ahmed J, Pandey D, Shah V, Ashraf S, Karim M (2023) Medial Knee Joint Space in Relation to Joint Function and Early Knee Pain in 20-45-Year Adults: A Cross Sectional Study. Indian J Orthop 57:1640–1645. doi: 10.1007/s43465-023-00980-w
3. Beattie KA, Duryea J, Pui M, O'Neill J, Boulos P, Webber CE, Eckstein F, Adachi JD (2008) Minimum joint space width and tibial cartilage morphology in the knees of healthy individuals: a cross-sectional study. BMC Musculoskelet Disord 9:119. doi: 10.1186/1471-2474-9-119
4. Bourke DL, Smith TC (1974) Estimating allowable hemodilution. Anesthesiology 41:609–612. doi: 10.1097/00000542-197412000-00015
5. Cai DF, Fan QH, Zhong HH, Peng S, Song H (2019) The effects of tourniquet use on blood loss in primary total knee arthroplasty for patients with osteoarthritis: a meta-analysis. J Orthop Surg Res 14:348. doi: 10.1186/s13018-019-1422-4
6. Cao Z, Guo J, Li Q, Wu J, Li Y (2021) Comparison of efficacy and safety of different tourniquet applications in total knee arthroplasty: a network meta-analysis of randomized controlled trials. Ann Med 53:1816–1826. doi: 10.1080/07853890.2021.1991588
7. Faschingbauer M, Freisem K, Khury F, Martin RJ, Bieger R, Reichel H (2024) Tourniquet does not affect intraoperative kinematics during total knee arthroplasty: Results of a prospective study using a robotic assistance system. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 32:678–684. doi: 10.1002/ksa.12086
8. Goel R, Rondon AJ, Sydnor K, Blevins K, O'Malley M, Purtill JJ, Austin MS (2019) Tourniquet Use Does Not Affect Functional Outcomes or Pain After Total Knee Arthroplasty: A Prospective, Double-Blinded, Randomized Controlled Trial. J Bone Joint Surg Am 101:1821–1828. doi: 10.2106/JBJS.19.00146

9. Goh GS, Bin Abd Razak HR, Tay DK-J, Lo N-N, Yeo S-J (2021) Early post-operative oxford knee score and knee society score predict patient satisfaction 2 years after total knee arthroplasty. Arch Orthop Trauma Surg 141:129–137. doi: 10.1007/s00402-020-03612-2
10. Gross JB (1983) Estimating allowable blood loss: corrected for dilution. Anesthesiology 58:277–280. doi: 10.1097/00000542-198303000-00016
11. Hegde V, Bracey DN, Johnson RM, Dennis DA, Jennings JM (2021) Tourniquet Use Improves Cement Penetration and Reduces Radiolucent Line Progression at 5 Years After Total Knee Arthroplasty. J Arthroplasty 36:S209-S214. doi: 10.1016/j.arth.2020.12.048
12. Kim Y, Lee JK, Chung K-S, Lee D-Y, Choi CH (2017) Measurement of change on medial and lateral joint gaps by navigation system in multi-radius PS TKA. J Orthop Sci 22:693–697. doi: 10.1016/j.jos.2017.02.010
13. Kirkley A, Rampersaud R, Griffin S, Amendola A, Litchfield R, Fowler P (2000) Tourniquet versus no tourniquet use in routine knee arthroscopy: a prospective, double-blind, randomized clinical trial. Arthroscopy 16:121–126. doi: 10.1016/s0749-8063(00)90024-0
14. Liu P-L, Li D-Q, Zhang Y-K, Lu Q-S, Ma L, Bao X-Z, Zhang M (2017) Effects of Unilateral Tourniquet Used in Patients Undergoing Simultaneous Bilateral Total Knee Arthroplasty. Orthop Surg 9:180–185. doi: 10.1111/os.12329
15. Lu C, Song M, Chen J, Li C, Lin W, Ye G, Wu G, Li A, Cai Y, Wu H, Liu W, Xu X (2020) Does tourniquet use affect the periprosthetic bone cement penetration in total knee arthroplasty? A meta-analysis. J Orthop Surg Res 15:602. doi: 10.1186/s13018-020-02106-6
16. MacDessi SJ, Griffiths-Jones W, Harris IA, Bellemans J, Chen DB (2021) Coronal Plane Alignment of the Knee (CPAK) classification. Bone Joint J 103-B:329–337. doi: 10.1302/0301-620X.103B2.BJJ-2020-1050.R1
17. Marson BM, Tokish JT (1999) The effect of a tourniquet on intraoperative patellofemoral tracking during total knee arthroplasty. J Arthroplasty 14:197–199. doi: 10.1016/S0883-5403(99)90125-0
18. Matsui Y, Matsuura M, Hidaka N (2022) The knee position at tourniquet inflation does not affect the gap balancing during total knee arthroplasty. Arch Orthop Trauma Surg 142:1653–1659. doi: 10.1007/s00402-021-04017-5

19. McCarthy Deering E, Hu SY, Abdulkarim A (2019) Does Tourniquet Use in TKA Increase Postoperative Pain? A Systematic Review and Meta-analysis. Clin Orthop Relat Res 477:547–558. doi: 10.1097/CORR.0000000000000572
20. Oksendahl HL, Gomez N, Thomas CS, Badger GD, Hulstyn MJ, Fadale PD, Fleming BC (2009) Digital radiographic assessment of tibiofemoral joint space width: a variance component analysis. J Knee Surg 22:205–212. doi: 10.1055/s-0030-1247750
21. Pfitzner T, Roth P von, Voerkelius N, Mayr H, Perka C, Hube R (2016) Influence of the tourniquet on tibial cement mantle thickness in primary total knee arthroplasty. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 24:96–101. doi: 10.1007/s00167-014-3341-6
22. Pinsornsak P, Pinitchanon P, Boontanapibul K (2021) Effect of Different Tourniquet Pressure on Postoperative Pain and Complications After Total Knee Arthroplasty: A Prospective, Randomized Controlled Trial. J Arthroplasty 36:1638–1644. doi: 10.1016/j.arth.2020.12.049
23. Saied A, Ayatollahi Mousavi A, Arabnejad F, Ahmadzadeh Heshmati A (2015) Tourniquet in surgery of the limbs: a review of history, types and complications. Iran Red Crescent Med J 17:e9588. doi: 10.5812/ircmj.9588
24. Schnettler T, Papillon N, Rees H (2017) Use of a Tourniquet in Total Knee Arthroplasty Causes a Paradoxical Increase in Total Blood Loss. J Bone Joint Surg Am 99:1331–1336. doi: 10.2106/JBJS.16.00750
25. Segal NA, Frick E, Duryea J, Nevitt MC, Niu J, Torner JC, Felson DT, Anderson DD (2017) Comparison of tibiofemoral joint space width measurements from standing CT and fixed flexion radiography. J Orthop Res 35:1388–1395. doi: 10.1002/jor.23387
26. Smith AF, Usmani RH, Wilson KD, Smith LS, Malkani AL (2021) Effect of Tourniquet Use on Patient Outcomes After Cementless Total Knee Arthroplasty: A Randomized Controlled Trial. J Arthroplasty 36:2331–2334. doi: 10.1016/j.arth.2021.01.053
27. Touzopoulos P, Ververidis A, Mpogiatzis C, Chatzigiannakis A, Drosos GI (2019) The use of tourniquet may influence the cement mantle thickness under the tibial implant during total knee arthroplasty. Eur J Orthop Surg Traumatol 29:869–875. doi: 10.1007/s00590-019-02369-8

28. Tsubosaka M, Ishida K, Sasaki H, Shibanuma N, Kuroda R, Matsumoto T (2017) Effects of Suture and Tourniquet on Intraoperative Kinematics in Navigated Total Knee Arthroplasty. J Arthroplasty 32:1824–1828. doi: 10.1016/j.arth.2017.01.033
29. Zak SG, Tang A, Pivec R, Meftah M, Austin MS, Schnaser E, Schwarzkopf R (2023) The effects of tourniquet on cement penetration in total knee arthroplasty. Arch Orthop Trauma Surg 143:2877–2884. doi: 10.1007/s00402-022-04470-w
30. Zhang W, Li N, Chen S, Tan Y, Al-Aidaros M, Chen L (2014) The effects of a tourniquet used in total knee arthroplasty: a meta-analysis. J Orthop Surg Res 9:13. doi: 10.1186/1749-799X-9-13

Danksagung

Die Danksagung wurde aus datenschutzrechtlichen Gründen in der veröffentlichten Version entfernt.

Lebenslauf

Der Lebenslauf wurde aus datenschutzrechtlichen Gründen in der veröffentlichten Version entfernt.