

UNIVERSITÄTSKLINIKUM HAMBURG-EPPENDORF

Zentrum für operative Medizin
Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie und Orthopädie

Direktor: Prof. Dr. med. Karl-Heinz Frosch

Outcome aszendierende versus deszendierende medial-öffnende hohe tibiale Osteotomie zur Behandlung des Genu varum

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
an der Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

vorgelegt von:

Christine Ackermann
aus Münster

Hamburg 2022

**Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 13.01.2023**

**Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.**

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Prof. Dr. Thorsten Schinke

Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter: PD Dr. Matthias Krause

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
1.1 Bedeutung der medialen Gonarthrose	5
1.2 Grundlagen der medialen Gonarthrose – Ätiologie und Pathogenese	7
1.3 Biomechanik und Messmethode der Beinachse und des posterioren tibialen Slopes	12
1.4 Indikation zur medial-öffnenden hohen tibialen Osteotomie	19
1.5 Entwicklung der unterschiedlichen Typen der hohen tibialen Osteotomie	22
1.6 Arbeitshypothese und Fragestellung	25
2 Material und Methoden	26
2.1 Patientenkollektiv	26
2.2 Präoperative Planung nach Miniaci	28
2.3 Operations-Techniken	30
2.4 Kombinationseingriffe	35
2.5 Nachbehandlungsschema nach HTO	37
2.6 Modifizierter RUST-Score	38
2.7 Klinisches Outcome	42
2.8 Statistische Auswertung	42
3 Ergebnisse	43
3.1 Patientenkollektiv	43
3.2 Radiologisches Outcome	56
3.2.1 Beinachse	56
3.2.2 Osteotomiespaltgröße	57
3.2.3 Posteriorer tibialer Slope	58
3.2.4 Modifizierter RUST-Score	61
3.2.5 Korrelationen	67
3.3 Klinisches Outcome	71
4 Diskussion	74
5 Zusammenfassung	86
6 Literaturverzeichnis	88
7 Anhang	99

7.1 Abkürzungsverzeichnis	99
7.2 Abbildungsverzeichnis	99
7.3 Tabellenverzeichnis	100
7.4 Diagrammverzeichnis	100
8 Danksagung.....	101
9 Lebenslauf	102
10 Eidesstattliche Erklärung	103

1 Einleitung

1.1 Bedeutung der medialen Gonarthrose

Die Gonarthrose ist eine degenerative Erkrankung und zählt zu der häufigsten Gelenkerkrankung in unserer Bevölkerung. Das Kniegelenk ist mit einem Anteil von über 50 % mit am häufigsten betroffen. Die Prävalenz in der Bevölkerung bezüglich arthrotischer Veränderungen steigt mit zunehmendem Alter. Weltweit sind 18 % der Frauen und 10 % der Männer über 60 Jahre von einer Kniegelenksarthrose betroffen. Laut Schwarze et al. 2020 liegen bei den über 22-Jährigen die Prävalenz zwischen 12 % (männlich) und 14 % (weiblich) (Schwarze et al., 2020). In der S2K-Leitlinie aus 2018 wird bezüglich der Gonarthrose beschrieben, dass im Alter zwischen 50 bis 54 Jahren bei 15-16 % radiologische Veränderungen auf eine Gonarthrose hinweisen (Stöve & Streubesand, 2018). Im Alter über 55 Jahre steigt die Prävalenz auf 16 % (männliche) bis 29 % (weiblich) an (Schwarze et al., 2020). Bei den 70- bis 74-Jährigen beträgt der Anteil bereits 36-40 %. Stets ist der Anteil der Frauen höher. Insbesondere bis zum Alter von 80 Jahren liegt die Prävalenz für radiologische Anzeichen einer Gonarthrose bei Frauen bei 53 % und somit deutlich höher als bei den Männern mit 33 % (Stöve & Streubesand, 2018). Die Häufigkeit nimmt somit mit dem Lebensalter zu. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die subjektiven Beschwerden nicht unbedingt mit dem radiologischen Arthrosegrad korrelieren. Lediglich zwischen 10% (männlich) und 15% (weiblich) haben subjektive Beschwerden im Alter über 60 Jahren (Hannan et al., 2000; Orth et al., 2016; Schwarze et al., 2020). Bei den über 22-Jährigen sind es zwischen 3 % (männliche) und 9 % (weiblich) (Schwarze et al., 2020). Es besteht somit eine erhebliche Diskrepanz zwischen radiologischer Gonarthrose und subjektiver, symptomatischer Gonarthrose (Hunter & Bierma-Zeinstra, 2019).

Der aus unterschiedlichen Gründen entstandene Knorpelschaden und die daraus entstandene Gonarthrose führt aller Voraussicht nach zu vermehrten, subjektiv empfundenen Schmerzen, Belastungs- und Funktionseinschränkungen, welche die Lebensqualität beeinträchtigen.

Insbesondere durch den demographischen Wandel und die Zunahme des Anteils der älteren Bevölkerung steigen so jedoch auch die volkswirtschaftlichen Kosten. Denn neben den individuellen Folgen einer Gonarthrose hat dies auch Einfluss auf

unser Gesundheitssystem und auf unsere Wirtschaft. Durch die vermehrte Inanspruchnahme des Gesundheitssystems und dessen Leistungen kommt es zu vermehrt höheren Kosten und Ausgaben. Auch Arbeitsunfähigkeiten und vorzeitige Berentung führen indirekt zu mehr Kosten (Rabenberg, 2013).

Die unterschiedlichen Therapieoptionen der Gonarthrose sind somit nicht nur für die subjektive Zufriedenheit und Erhalt der Lebensqualität von äußerster Bedeutung, sondern auch für unser Sozialsystem und die wirtschaftliche Entwicklung.

1.2 Grundlagen der medialen Gonarthrose – Ätiologie und Pathogenese

Es gibt unterschiedliche Ursachen für eine mediale Gonarthrose. Ist lediglich das mediale Kompartiment betroffen, spricht man von einer unikompartimentellen, medialen Gonarthrose. Diese kann angeboren, erworben oder posttraumatisch bedingt sein. Beinachsenfehlstellungen und folglich Fehlbelastungen im Kniegelenk sind Teil eines Circulus vitiosus (s. Abbildung 1).

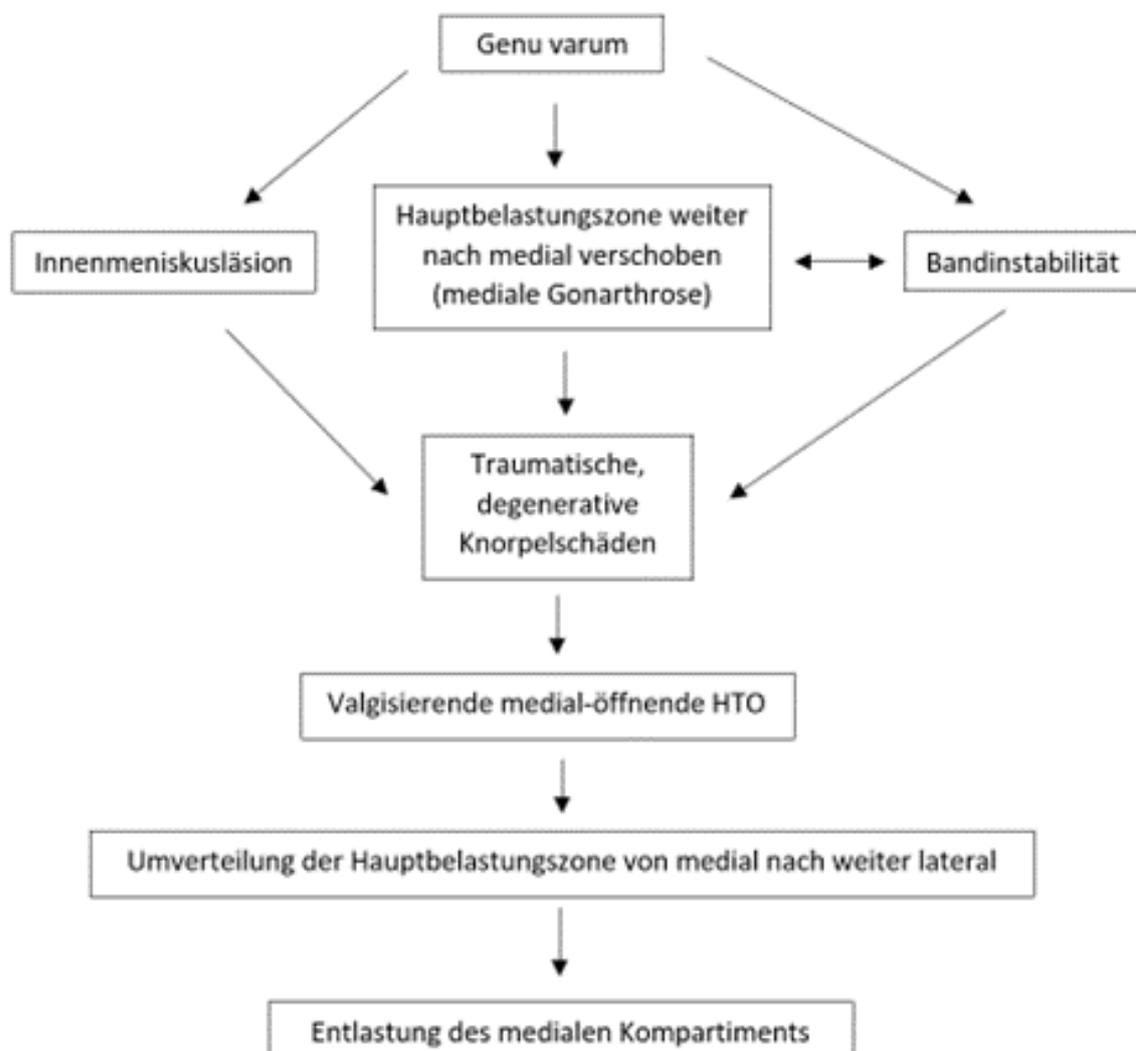


Abbildung 1: Circulus vitiosus der medialen Gonarthrose

Neben Überbelastung der Kniegelenkkompartimente durch Beinachsenfehlstellungen und körperliche Arbeit, sind das Alter und ein erhöhtes Körpergewicht weitere negativ beeinflussende Faktoren für die Entstehung einer

Gonarthrose. Auch das weibliche Geschlecht kann als Risikofaktor verstanden werden (Orth et al., 2016).

Durch die Schädigung und den Verlust des hyalinen Knorpels im Kniegelenk kommt es zu sklerotischen Umbauvorgängen im Bereich des angrenzenden Knochens. Jedoch auch weiteren Gelenkstrukturen wie die gelenkübergreifende Muskulatur, Sehnen und Bänder verändern sich und tragen zum Fortschreiten der Erkrankung und Beschwerden bei. Die Menisken dienen unter anderem als stoßdämpfendes Element und sollen so den Knorpel vor Abnutzung schützen, indem die einwirkende Kraft abgeschwächt und auf das gesamte Gelenk umverteilt wird. Durch die beiden Menisken wird die Tragfläche verdoppelt im Vergleich zur reinen Kontaktfläche zwischen Femurcondylen und Tibiaplateau. Die beiden Menisken nehmen somit mehr als 40 bis 50 % der übertragenden Kräfte auf und schützen somit die Knorpel-Knochenstruktur (Kummer, 1987). Zusätzlich hat die Synovialis und die Synovialflüssigkeit eine schützende und ernährende Funktion für den hyalinen Knorpel, da dieser keine eigene Gefäßzufuhr hat und somit auf eine indirekte Nährstoff- und Sauerstoffversorgung angewiesen ist.

In unserer Population kommt es häufiger zur medialen Gonarthrose als zur lateralen Gonarthrose. Das liegt daran, dass die Lastverteilung im Kniegelenk beim Gehen 60-80 % über das mediale Kniegelenkkompartiment geleitet wird (Schwarze et al., 2020). In den Studien von Agneskichner et al. (Agneskirchner et al., 2007), sowie in der Studie von Mina et al. (Mina et al., 2008) wurde aufgezeigt, dass bei einer mechanischen Beinachse zwischen 0° bis 6° Valgus, die Kräfte- und Druckverhältnisse im medialen und lateralen Kompartiment ausgeglichen sind. Eine Varusfehlstellung von 10° führt zu einem 7,4-fach erhöhtem Körpergewicht im medialen Kniegelenkskompartiment. Hingegen kommt es bei physiologischer Beinachse nur zu einer 3,3-fachen Belastung (Flörkemeier & Lobenhoffer, 2014).

Durch das Genu varum kommt es also zu einer Verschiebung der Hauptbelastungszone nach medial, wodurch insbesondere der Innenmeniskus eine verstärkte Belastung erfährt und sich somit das Risiko einer Innenmeniskusläsion erhöht. Folglich kommt es zu einer vermehrten Knorpelbelastung und am Ende zu einer Schädigung der Knorpelstruktur (Flörkemeier et al., 2019). Zusätzlich kommt es bei einem vorgeschädigter Knorpel schneller zur fortschreitenden Degeneration als bei einem gesunden Knorpel (Cicuttini et al., 2005).

Beinachsenfehlstellungen, Meniskusläsionen, Knorpelschäden und Bandinstabilitäten sind Folge oder Ursache der unikompartimentellen, medialen Gonarthrose (s. Abbildung 2). Patienten mit einer Varusdeformität haben ein 2-fach erhöhtes Risiko einer Gonarthrose (Brouwer et al., 2007). Schlussendlich endet die Beindeformität und die folgende Lastenverschiebung somit in einer medialen Gonarthrose. Auch infolge von Innenmeniskusläsionen oder Teilresektionen kann es zur progredienten medialen Gonarthrose kommen, da die protektive Funktion des Meniskus beeinträchtigt ist. Des Weiteren führen Bandinstabilitäten zu einer Fehlbelastung und zu einem fortschreitenden Gelenkverschleiß. Auch länger bestehende Beinachsenfehlstellungen können Bandinstabilitäten bedingen.

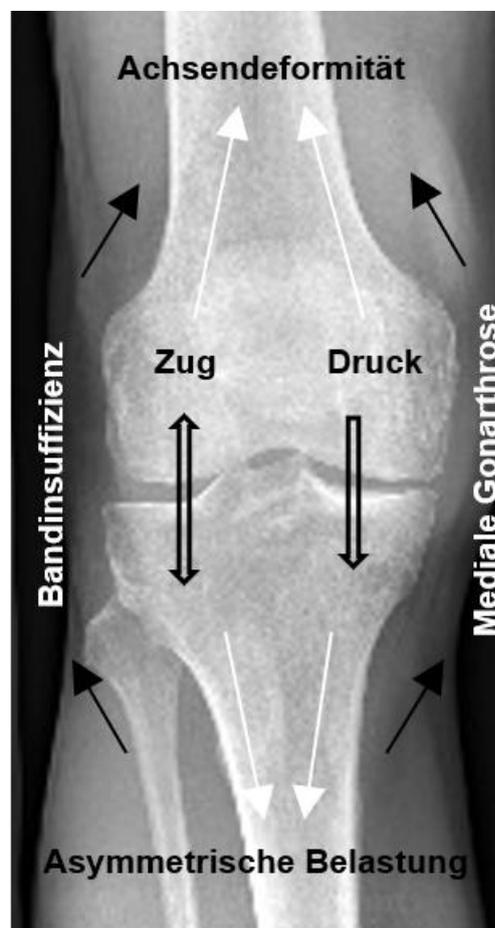


Abbildung 2: Kaskade der Beinachsenfehlstellung und deren Folgen im Kniegelenk

In einer Studie von Halder et al. (Halder et al., 2012) wurde bei der Knieendoprothetik nachgewiesen, dass bei zunehmender varischer Beinachsenabweichung von 1° der Druck medial sich um ca. 5 % erhöht. Ob diese

Erkenntnis sich direkt auf das Kniegelenk übertragen lässt, kann nicht sicher gesagt werden. Es besteht jedoch die Tendenz, dass eine Zunahme der varischen Beinachsendiformität zu einer Mehrbelastung im medialen Kompartiment führt. Agneskirchen et al. (Agneskirchner et al., 2007) zeigen, dass eine Valgisierung der Beinachse durch eine hohe tibiale Osteotomie (HTO) zu einer Beschwerdelinderung führt, aufgrund der Umverteilung der Last.

Die mediale Gonarthrose entsteht dadurch, dass der Knorpel Abbau- und Aufbau aus dem Gleichgewicht geraten. Es kommt zu einem vermehrten Knorpelabbau. Der neu gebildete Ersatzknorpel ist weniger widerstandsfähig. Mit der Zeit kommt es zu irreversiblen Schäden durch vermehrten Abrieb und Auffaserung des Knorpels. Die Synovialmembran wird gereizt und eine Entzündungsreaktion wird in Gang gesetzt. Dies führt zusätzlich zu einer vermehrten Bildung von Synovialflüssigkeit, was durch einen Gelenkerguss spürbar und sichtbar wird (Hackenbroch, 2007). Des Weiteren kommt es durch erhöhten Druck auf den Knochen zu Umbauvorgängen - der Knochen verdichtet. Im Röntgen ist eine subchondrale Sklerosierung sichtbar. Durch den erhöhten Gelenkinnendruck kommt es zur Öffnung des Markraums und Bildung von Geröllzysten, sowie zu osteophytären Anbauten und Gelenkverformungen (Rabenberg, 2013).

Die Arthrose wurde bereits durch Kellgren und Lawrence 1957 anhand von radiologischen Veränderungen in unterschiedliche Schweregrade eingeteilt. Die Abbildung 3 stammt aus der Originalarbeit von Kellgren und Lawrence 1957. Anhand eines anterior-posterioren Röntgenbildes des Kniegelenks wird die Gonarthrose in vier Grade eingeteilt (Kellgren & Lawrence, 1957).

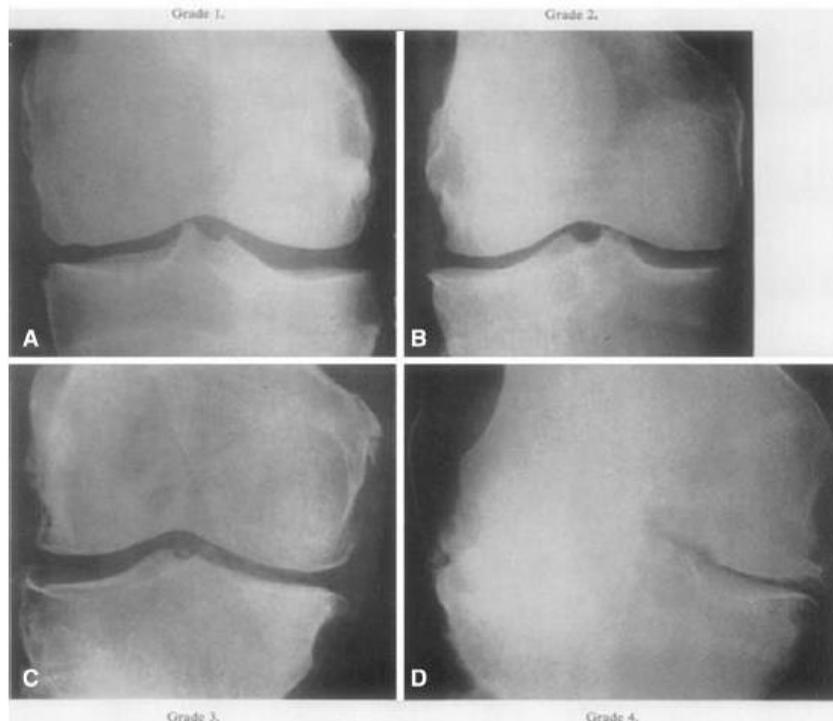


Abbildung 3: Arthrosestadien im Kniegelenk nach Kellgren and Lawrence (Kellgren & Lawrence, 1957)

Die Abbildung 3 A zeigt ein Kniegelenk mit beginnender Arthrose (Grad 1) mit subchondrale Sklerosierung ohne Gelenkspaltverschmälerung oder Osteophyten. Grad 2 mit Osteophytenbildung und geringe Gelenkspaltverschmälerung, sowie beginnenden Unregelmäßigkeiten der Gelenkfläche wird in Abbildung B dargestellt. Die Abbildung C zeigt den Grad 3 der Arthrose mit ausgeprägter Osteophytenbildung, deutlichen Unregelmäßigkeiten der Gelenkfläche und Gelenkspaltverschmälerung. Die Abbildung D verdeutlicht das letzte - 4 Stadium - der Arthrose und zeigt einen aufgehobenen Gelenkspalt mit Gelenkdestruktion und Deformierung der Gelenkpartner.

1.3 Biomechanik und Messmethode der Beinachse und des posterioren tibialen Slopes

Das Kniegelenk kann, neben der Flexion und Extension in der Frontalebene, in gebeugter Stellung auch Rotationsbewegungen (Innen- und Außenrotation) ausführen. Das Bewegungsausmaß wird nach der Neutral-Null-Methode bestimmt und beträgt in einem gesunden Kniegelenk eine Range of Motion (ROM) Extension/ Flexion 0-0-140°, Außenrotation/Innenrotation 30-0-10° (Platzer, 2009; Schiebler, 2005).

Entscheidend für die Biomechanik des Kniegelenks sind die Gelenkwinkel und das Zusammenspiel der einzelnen Strukturen und deren Stellung zueinander. Veränderung einzelner Winkel können zu Belastung bzw. Entlastung anderer Strukturen führen. Die medial-öffnende HTO hat das Ziel durch Valgisierung der varischen Beinachse zu einer Verschiebung der Hauptbelastungszone von medial nach lateral zu führen und somit das medial überbelastete Kompartiment zu entlasten.

Für die Indikationsstellung zur hohen tibialen Umstellungsosteotomie sind somit neben der Anamnese und der klinischen Untersuchung weitere radiologische Untersuchungen notwendig. Anhand der erfolgten Röntgenbilder wird präoperativ die Umstellungsosteotomie geplant. In unserer Klinik erfolgt die präoperative Planung der Beinachsenkorrektur nach Miniaci.

In dieser Arbeit sind die präoperative radiologische Bildgebung und die radiologischen Verlaufskontrollen zur Beurteilung des postoperativen Erfolges und Verifizierung der geometrischen Parameter ausschlaggebend. Präoperativ erfolgt neben der Röntgen-Ganzbeinaufnahme, ein Röntgen des Kniegelenks sagittal und gegebenenfalls im anterior-posterior Strahlengang. In einigen anderen Kliniken wird zusätzlich noch eine Röntgenaufnahme des Kniegelenks unter Belastung und 45° Flexion mit posterior-anterioren Strahlengang durchgeführt, eine sogenannte Rosenberg-Aufnahme zur Beurteilung der Arthrose. In Ergänzung zur Beurteilung der retropatellaren Arthrose kann eine Patella-Tangentialaufnahme angefertigt werden. In unserem Haus gehört dies nicht zur standardisierten präoperativen Röntgendiagnostik einer medial-öffnenden HTO und wird somit hier nicht miteinbezogen.

Zum Verständnis der medialen Gonarthrose und dessen Problembehebung durch eine hohe tibiale Umstellungsosteotomie sind bestimmte geometrische Parameter unabdingbar. Im Folgenden werden die geometrischen Parameter erläutert und definiert.

Beinachse

Um die Beinachsen und die Traglinie - und somit die Belastung im Kniegelenk zu objektivieren - müssen zunächst die jeweiligen Gelenkzentren in der Röntgen-Ganzbeinaufnahme definiert werden. Hierfür erfolgte die Röntgen-Ganzbeinaufnahme im anterior-posterioren Strahlengang, wobei das Bein im Kniegelenk vollständig gestreckt sein muss und die Patella nach ventral ausgerichtet ist. Bei der präoperativen Planung ist unter anderem zu beachten, dass bei einer Röntgen-Ganzbeinaufnahme bei einem Streckdefizit im Kniegelenk durch die vermehrte Beugung im Kniegelenk ein vermehrter Varus vorgetäuscht wird (Pape et al., 2004).

Das Hüftkopfbereich ist der Mittelpunkt des Hüftkopfes, welcher mit Hilfe der konzentrischen Kreismesslehre bestimmt wird (Pape et al., 2004). Das Kniegelenkszentrum wird femoral und tibial unterschiedlich vermessen. Das femorale Kniegelenkszentrum bildet die Mitte einer Tangente die den Femurkondylen anliegt (Paley et al., 1994). Das tibiale Kniegelenkszentrum ist die Mitte zwischen den beiden Kreuzbandhöckern (Brown & Amendola, 2012). Das Zentrum des oberen Sprunggelenks wird definiert als die Mitte der größten Ausdehnung des proximalen Talus in der Horizontalebene (Pape et al., 2004).

Bei der Auswertung der Röntgen-Ganzbeinaufnahmen unterscheidet man die anatomische Beinachse von der mechanischen Beinachse, sowie die Mikulicz-Linie, die Traglinie der unteren Extremität. Die Vermessung erfolgt mit Hilfe der oben genannten Gelenkzentren (s. Abbildung 4).

Die *anatomische Achse des Femurs* verläuft von der Mitte der Femurschaftbreite des mittleren bis distalen Schaftdrittel zum femoralen Kniegelenkszentrum. Wohingegen die *mechanische Achse des Femurs* die Verbindungslinie zwischen dem Hüftkopfbereich und dem femoralen Kniegelenkszentrum verläuft (Kapandji, 1987). Die *anatomische und mechanische Achse der Tibia* verlaufen identisch vom tibialen Kniegelenkszentrum zum Zentrum des oberen Sprunggelenks (Paley &

Tetsworth, 1992). Die *anatomische und mechanische Beinachse* ergibt sich aus den Winkeln zwischen den jeweiligen femoralen und tibialen Achsen (s. Abbildung 4).



Abbildung 4: Beinachsen

Rot: mechanische Femurachse, blau: anatomische Femurachse, grün: mechanische und anatomische Tibiaachse, orange: Mikulicz-Linie

Für die anatomische und mechanische Beinachse gibt es unterschiedliche Normwerte (Pape et al., 2004) (s. Tabelle 1). Positive Werte geben eine

Valgusfehlstellung an, negative Werte eine Varusfehlstellung. Die anatomische Beinachse liegt zwischen 5° und 7°. Die mechanische Beinachse liegt zwischen 0° bis 2,2° Valgus (Paley & Tetsworth, 1992; Pape et al., 2004).

Tabelle 1: Normwerte der anatomischen und mechanischen Beinachse

	Anatomische Beinachse	Mechanische Beinachse
Kapandji 1970	6°	0°
Paley 1992	5° – 7°	0°
Chao 1994	5,4°	-1,2° ± 2,2°
Hungerford 1995	6°	0°

Die Traglinie (Mikulicz-Linie) des Beins verläuft vom Hüftkopfbereich zum Zentrum des oberen Sprunggelenks. Bei einer physiologischen Beinachse verläuft sie durch das Kniegelenkszentrum. Verläuft die Linie medial oder lateral des Kniegelenkszentrums, liegt somit ein Genu varum oder Genu valgum vor. Der Schnittpunkt der Linie mit dem Tibiaplateau wird in Prozentsatz der Tibiaplateaubreite angegeben, wobei medial 0 % und lateral 100 % sind (s. Abbildung 5).



Abbildung 5: Abweichung der Traglinie vom Kniegelenkszentrum als Prozentsatz der Tibiaplateaubreite

Ziel der medial-öffnenden HTO bei einem Genu varum ist es, das mediale Kompartiment zu entlasten, indem die Mikulicz-Traglinie – und somit die Hauptlast – von medial nach lateral verlagert wird. Der häufig erwähnte „Fujisawa point“ bedeutet, dass die Mikulicz-Linie das Tibiaplateau bei 62 % schneidet (Brinkman et al., 2008; Fujisawa et al., 1979; Staubli & Jacob, 2010). In unserer Klinik erfolgt die Planung nach Miniaci, wobei die Mikulicz-Linie das Tibiaplateau bei 55 % schneiden soll (s. Abbildung 6).

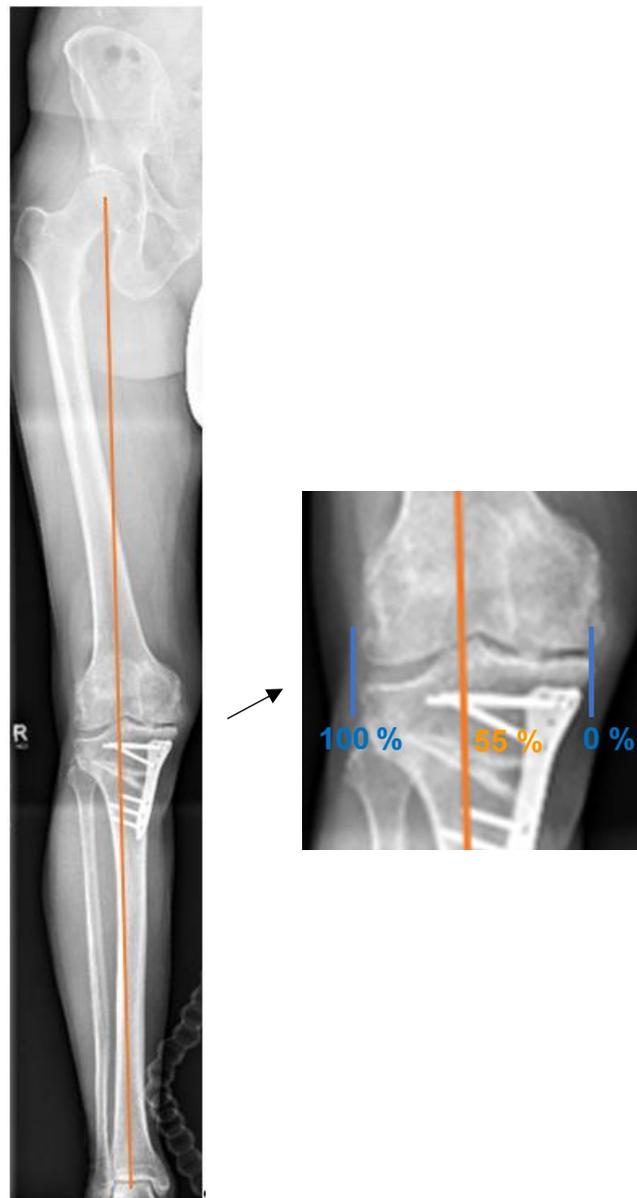


Abbildung 6: Neue Mikulicz-Linie mit dem Schnittpunkt bei 55 % des Tibiaplateaus

Posteriorer tibialer Slope

Der posteriore tibiale Slope gibt den Neigungswinkel des Tibiaplateaus in der Sagittalebene an. Der Normwert variiert in der Literatur und hängt auch von der Untersuchungsmethode (Röntgen, CT, MRT) ab. Es besteht eine hohe individuelle Varianz (von -9° bis 16°) (Hinterwimmer & Feucht, 2021; Lobenhoffer, 2021). Daher sollte immer die gleiche radiologische Untersuchungsmethode angewandt und das mediale Tibiaplateau vermessen werden, da dieses die Hauptlast trägt und durch die Konkavität in der Bildgebung leicht reproduzierbar ist (Lobenhoffer, 2021). In der Literatur variieren die Normwerte (s. Tabelle 2, (Pape et al., 2004)). In unserer Arbeit legen wir als Normwert für den posterioren tibialen Slope eine Spannweite zwischen 5° und 11° fest (Akoto et al., 2020; Krause et al., 2018).

Tabelle 2: Normwerte des posterioren tibialen Slopes

Autoren	Dorsalneigung des Tibiaplateaus
Lecuire et al.	6°
Paley et al.	10°
Install et al.	10°
Dejour et al.	10° ± 3,1°
Matsuda et al.	10,7°
Chiu et al.	11,5°

Zur Vermessung des posterioren tibialen Slopes und somit des dorsalen Neigungswinkels der Tibia verwenden wir ein streng seitliches Röntgenbild. Hierfür sollte das mediale und laterale Tibiaplateau möglichst deckungsgleich übereinander projiziert werden, um die Dorsalneigung des Plateaus ohne Rotationsfehler bestimmen zu können. Die Mitte der mittleren Diaphyse der Tibia wird bestimmt, indem man in einem Abstand von 90 mm und 150 mm von der proximalen tibialen Gelenklinie jeweils eine konzentrische Kreismesslehre einzeichnet. Diese berühren die anteriore und posteriore Kortikalis des Tibiaschaftes (Krause et al., 2018; Nerhus et al., 2017). Sollte das Röntgenbild keine 150 mm der proximalen Tibia abbilden, wird der tiefste Punkt für den distalen Kreis veranschlagt. Des Weiteren

legt man eine Tangente an das Tibiaplateau. Sollte das mediale und laterale Tibiaplateau nicht direkt übereinander projiziert worden sein, so wird die Mitte hierzwischen genommen. Jedoch wird auch in der Literatur zeitweise das mediale, konkave Tibiaplateau für die Messung herangezogen. Anschließend wird der Winkel zwischen der Längsachse der Tibia, welche durch die Mitte der beiden Kreislehren verläuft, und der Tangente gemessen (s. Abbildung 7).



Abbildung 7: Messung posteriorer tibialer Slope

Der posteriore tibiale Slope kann auch in anderen bildgebenden Verfahren (Computertomographie und Magnetresonanztomographie) bestimmt werden. Gwinner et al. beschreiben, dass es hierbei jedoch zu sehr unterschiedlichen Werten für den posterioren tibialen Slope im Hinblick auf die Methodik und die Bildgebung kommt. Daher ist es beim Vergleichen von Studien notwendig, die Messung an Hand der gleichen Bildgebung und der gleichen Messmethode durchzuführen (Gwinner et al., 2021). Auch innerhalb der einzelnen bildgebenden Verfahren gibt es unterschiedliche Messtechniken (Gwinner et al., 2021; Ripcke et al., 2019; Utzschneider et al., 2011).

Bereits 2004 haben Agneskirchner et al. postuliert, dass der posteriore tibiale Slope Auswirkungen auf die Biomechanik im Kniegelenk und somit auf die Kniegelenksstabilität hat (Agneskirchner et al., 2004). Es hat sich gezeigt, dass es bei einem erhöhten posterioren tibialen Slope zu einer anterior-posterioren Translation kommen kann, welche zu einer vermehrten Belastung des vorderen Kreuzbandes führt (Krause et al., 2018). Eine Verminderung des posterioren tibialen Slopes während einer medial-öffnenden HTO kann somit die Belastung auf das vordere Kreuzband vermindern. Dies ist insbesondere bei einer vorderen Kreuzband-Plastik mitzuberücksichtigen.

Bei einer medialen Varusgonarthrose und einer zusätzlich bestehenden posterolateralen Instabilität und oder Hyperextension sollte mit der medial-öffnenden HTO zusätzlich der posteriore tibiale Slope vermehrt (steiler) werden. Rezeptiv sollte wie bereits o.g. bei einer zusätzlich bestehenden antero-medialen Instabilität und oder einem Extensionsdefizit der posteriore tibiale Slope mit der medial-öffnenden HTO vermindert (flacher) werden, um die Instabilitäten mit zu therapieren (Hinterwimmer et al., 2012). Laut Cheng et al. führt die medial-öffnende HTO häufig zu einem erhöhten posterioren tibialen Slope (Cheng et al., 2019). Dieses kann jedoch vermieden werden (Hinterwimmer et al., 2011; Petersen et al., 2020).

1.4 Indikation zur medial-öffnenden hohen tibialen Osteotomie

Bei bestehenden Kniegelenksbeschwerden erfolgt wie gewohnt die Anamnese, körperliche Untersuchung und die bildgebende Diagnostik zur Diagnosestellung. Wird anhand des Befundes eine mediale Varusgonarthrose diagnostiziert, müssen unterschiedliche Faktoren bei der Entscheidungsfindung für die unterschiedlichen Therapieoptionen berücksichtigt werden. Hierzu zählen, das Alter, das Geschlecht, der Ort der Deformität und Begleiterkrankungen des Kniegelenks (El Attal et al., 2018; Kooistra et al., 2010; Orth et al., 2016; Petersen et al., 2020; Rabenberg, 2013). Der Zustand des lateralen Kompartiments, des Außenmeniskus, des Knorpels, der Bewegungsumfang und Bandinstabilitäten spielen eine wichtige Rolle. Auch die körperliche Belastbarkeit, das Körpergewicht und gegebenenfalls ein Nikotinkonsum müssen in die Entscheidungsfindung miteinbezogen werden (El Attal et al., 2018; Cao et al., 2018). In dieser Untersuchung wird die Therapieoption der medial-öffnenden, valgusierenden HTO ausgewertet. Der Vollständigkeit halber

muss jedoch die Möglichkeit eines künstlichen Kniegelenksersatzes (Hemiprothese oder Totalendoprothese) bei fortgeschrittener Arthrose und oder hohem Alter als mögliche Therapieoption genannt werden.

Die Hauptindikation zur medial-öffnenden HTO ist die unikompartimentelle, mediale Gonarthrose (Brinkman et al., 2008). Eine mediale Gonarthrose kann schon in jungen Jahren entstehen und zu Beschwerden führen. Die medial-öffnende HTO soll zur Beschwerdelinderung und zum Hinauszögern der Notwendigkeit einer Knieendoprothese führen (Bode et al., 2015; Flörkemeier et al., 2013; Spahn et al., 2013), insbesondere bei jüngeren Patienten (Noyes et al., 1993; Petersen et al., 2020; Rossi et al., 2011). Durch die medial-öffnende HTO kommt es durch die Lateralisierung der Mikuzlicz-Linie zu einer Umverteilung der Hauptbelastungszone im Kniegelenk von medial nach weiter lateral mit Schnittpunkt bei 55 % des Tibiaplateaus (Flörkemeier et al., 2013). Eine medial-öffnende HTO kann bei einer Achsenabweichung bis zu 20° durchgeführt werden (Morgenstern, 2011), wobei es sich um eine rein tibiale und nicht femorale Fehlstellung handeln muss, welche extraartikulär bedingt ist. Bei einer intraartikulären Fehlstellung ist eine medial-öffnende HTO eher kontraindiziert. Hier wäre eher eine Endoprothese indiziert (Petersen et al., 2020).

Arthroskopische Knorpel- und Bandchirurgie können mit einer medial-öffnenden HTO kombiniert werden. Laut Bode et al. profitiert der Patient, welcher eine Knorpeltherapie erhält von einer zusätzlichen HTO (Bode et al., 2013). Einige Autoren empfehlen bei der Therapie der Meniskus(wurzel)läsionen bei Varusdeformität die Kombination mit einer HTO (Petersen et al., 2014, 2019). Auch Osteonekrosen des medialen Kniegelenkkompartiments können durch eine medial-öffnende HTO therapiert werden (Goshima et al., 2020). Dies gilt ebenso für osteochondrale Defekte im Bereich der medialen Femurkondyle (Krause et al., 2018). Weitere Indikationen für eine medial-öffnende HTO sind die posteriore Instabilität und Hyperextension (Lobenhoffer & Agneskirchner, 2003), sowie die chronische laterale oder posterolaterale Bandinstabilität beim Genu varum (Hinterwimmer et al., 2012). Eine zunehmende Bandstabilisierung kann durch die Erhöhung des posterioren tibialen Slopes während der HTO erreicht werden. Umgekehrt verhält es sich bei der anteromedialen Bandinstabilität (Krause et al., 2018). Bei einer vorderen Kreuzband-Insuffizienz mit Varus-Thrust-Phänomen mit

einem klaffenden lateralen Gelenkspalt, aufgrund der Varusdeformität und folglich lateraler Instabilität sollte daher, neben der vorderen Kreuzband-Plastik, auch eine HTO erfolgen (Petersen et al., 2020).

Die Indikation zur medial-öffnenden HTO ist jedoch auch limitiert. Genaue Grenzwerte bezüglich des Alters variieren in der Literatur. Laut den Empfehlungen von Lobenhoffer ist eine medial-öffnende HTO bei Männern bis 65 Jahren und Frauen bis 55 Jahren möglich (Lobenhoffer, 2014). Flörkemeier et al. konnten jedoch in ihrer Untersuchung keine Korrelation zwischen dem Alter und dem funktionellen Outcome finden (Flörkemeier et al., 2013). Auch in unserer Klinik erfolgt kein grundsätzlicher Ausschluss einer medial-öffnenden HTO beim Überschreiten der von Lobenhoffer genannten Altersgrenzen. Auch im höheren Alter kann - nach individueller Abwägung - die Indikationen zur medial-öffnenden HTO anstatt einer Endoprothese gestellt werden. Die körperlichen Voraussetzungen und die Aktivität des Patienten, sowie der radiologische Befund spielen hier eine entscheidende Rolle. In unserem Kollektiv wurde bis zum Alter von 71 Jahren bei Frauen und Männern eine medial-öffnende HTO mit gutem Ergebnis durchgeführt.

Das laterale Kompartiment soll laut Lobenhoffer intakt sein (Lobenhoffer, 2014). Wobei aus aktuelleren Studien hervorgeht, dass bei einem Genu varum mit konsekutivem medialen Knorpelschaden auch zusätzlich ein lateraler Knorpeldefekt vorliegen darf. Denn bei asymptomatischen Patienten, mit zusätzlich lokal begrenztem lateralen Knorpelschaden, hat dies keinen negativen Einfluss auf die valgusierende medial-öffnende HTO (Hohloch et al., 2019; Petersen et al., 2020). Der Bewegungsumfang des Kniegelenks vor einer medial-öffnenden HTO sollte nahezu uneingeschränkt sein. Ein Streckdefizit von 10° bis 20° kann korrigiert werden (Lobenhoffer, 2014). Auch sollte möglichst kein Übergewicht bestehen und der Patient nicht rauchen (El Attal et al., 2018; Petersen et al., 2020). Osteoporose und rheumatoide Arthritis gelten zusätzlich als Kontraindikation für eine HTO.

Die Indikationsstellung zur medial-öffnenden HTO ist keine einfache strenge Überprüfung einzelner Risikofaktoren und Berücksichtigung radiologischer Parameter. Es gibt viele Graubereiche, wodurch die Indikationsstellung durch den Operateur in individueller Abwägung erfolgen muss. Der Patient und seine Eignung spielen für den operativen Eingriff eine wichtige Rolle. Ein junger Kettenraucher mit

Vitamin-D Mangel ist trotz seines jungen Alters nicht geeignet. Der Patienten als Gesamtheit und unter Berücksichtigung aller Faktoren ist somit von entscheidender Bedeutung für den postoperativen Erfolg.

1.5 Entwicklung der unterschiedlichen Typen der hohen tibialen Osteotomie

Die Beinachsenkorrektur durch eine Knochenosteotomie wurde über mehrere Jahrzehnte und Jahrhunderte erforscht und entwickelt. Zunächst wurden Deformitäten aufgrund von Rachitis, Ankylosen, Kontrakturen und posttraumatischen Fehlstellungen mittels Osteotomie behandelt. Bedingt durch die fehlende Antisepsis war anfänglich insbesondere die hohe, lebensgefährliche Infektionsrate ein Problem.

Die erste subkutane Osteotomie führte Langenbeck 1852 durch. 1870 entwickelte Billroth in Zürich die Technik weiter. Die erste antiseptische Osteotomie bei einer Knieankylose wurde von Volkmann 1874 durchgeführt. Die beiden Techniken der aufklappenden und zuklappenden Osteotomien am distalen Femur wurden zum ersten Mal im Buch von Sir William McEwan um 1880 veröffentlicht (Jacobi & Jakob, 2014).

Die lateral Closed-wedge (zuklappende), kniegelenksnahe Umstellungsosteotomie nach Coventry et al. 1956 und Insall et al. 1984 galt lange Zeit als Goldstandard zur Behandlung der medialen Gonarthrose. Hierbei wurde über einen lateralen Zugang und nach einer Fibulaosteotomie ein Keil aus der proximalen Tibia entnommen, um die Beinachse zu korrigieren. Die Fixierung erfolgte mehrheitlich über Klammersysteme (Coventry, 1965). Jedoch brachte die anspruchsvolle Technik und der laterale Zugangsweg eine erhöhte Komplikationsrate mit sich. Insbesondere die Gefahr der Verletzung des Nervus fibularis und die daraus resultierenden Sensibilitätsstörungen und Fußheberschwäche gelten als Komplikationen der lateral-zuklappenden Osteotomie. Weitere Komplikationen sind eine erhöhte Pseudarthroserate, die Fraktur des Tibiaplateaus und längere Rehabilitationszeiten (Schröter et al., 2016). Auch Gefäßverletzungen, tiefe Beinvenenthrombosen, ein Kompartmentsyndrom, Osteitiden und Wundinfekte bei längeren Hautinzisionen werden beschrieben. Auch die Konvertierung auf eine Knieprothese zeigt sich problematischer aufgrund des reduzierten Knochenstocks

(Warden et al., 2005; Woodacre et al., 2016). Diese Komplikationen sowie eine Beinlängenverkürzung bei der lateral-zuklappenden HTO werden mit bis zu 27 % beschrieben (Lobenhoffer & Agneskirchner, 2003).

Die präoperative Planung der Umstellungsosteotomie wurde durch die Studien von Miniaci 1989, Coventry 1965 und Fujisawa et al. 1979 vorangetrieben und verbessert (Noyes et al., 1993).

Parallel zu den Fortschritten der Osteotomie kam es jedoch zur zunehmenden Etablierung der Knieendoprothese in den 70-iger Jahren und einem damit verbundenen Wechsel. Erst in den 2000er wurde die HTO mit der Entwicklung von winkelstabilen Plattensystemen wieder populär (Rußow et al., 2019). Durch den gewachsenen Anspruch der Menschen an einen leistungsfähigen Körper brachte nun die medial-öffnende HTO, welche unter anderem durch Hernigou et al. bereits 1987 (Hernigou et al., 1987) genauer untersucht wurde, die Möglichkeit, die mediale Gonarthrose zunächst durch eine aufklappende Osteotomietechnik und ohne Endoprothetik zu behandeln. Die winkelstabilen Plattensysteme sorgten Anfang der 2000er Jahre für die notwendige bessere Stabilität. Die lateral-zuklappende HTO wurde somit im Laufe der Zeit von der weniger komplikationsträchtigen medial-öffnenden Technik abgelöst. Durch den medialen Zugangsweg ist keine zusätzliche Osteotomie der Fibula notwendig. Bei der medial aufklappenden Technik wird die proximale Tibia osteotomiert und diese soweit geöffnet, bis die gewünschte Korrektur der Beinachse erreicht ist. Die medial-öffnende HTO gilt im Vergleich zur lateral-schließenden HTO als unkomplizierter. Sie ermöglicht eine bessere Kontrolle der Achsenkorrektur, insbesondere der anterior-posterioren Öffnung, sowie der Biomechanik und es sind kleinere und ggf. weniger Inzisionen notwendig (Warden et al., 2005).

Die hohe Tibiaosteotomie erfolgte früher monoplanar, lediglich durch eine axiale Osteotomie und Aufklappung in einer Ebene. Jedoch wurde diese Technik durch die biplanare Osteotomie abgelöst. Hierbei erfolgt die Osteotomie in axialer Ebene und frontaler Ebene. Somit wird eine bessere intraoperative Torsions-Kontrolle erreicht und die primäre Stabilität verbessert. Des Weiteren wird dadurch auch von einer schnelleren Heilung - der frontalen Osteotomie – ausgegangen (Hinterwimmer et al., 2012). Bei der medial-öffnenden HTO erfolgt die Ausleitung entweder proximal oder distal der Tuberositas tibiae (Hinterwimmer et al., 2012). Die

Ausleitung der frontalen Osteotomie nach proximal wird als aufsteigende HTO bezeichnet und klassischerweise über eine winkelstabile Plattenosteosynthese von medial fixiert. Die Ausleitung der frontalen Osteotomie nach distal wird als absteigende HTO bezeichnet. Die Fixierung der Osteotomie erfolgt ebenso über eine winkelstabile Plattenosteosynthese. Die Tuberositasosteotomie wird zusätzlich mit einer bis drei Schrauben refixiert (Chang et al., 2019; Imhoff, 2006). In aktuellen Studien wird zusätzlich zur medialen winkelstabilen Platte eine stabilisierende Schraube von lateral diskutiert (Chieh-Szu Yang et al., 2020; Khalifa et al., 2020). Das Risiko einer Komplikationen wie ein sekundären Repositionsverlust, verzögerte Knochenheilung, sowie Pseudarthrose oder Fraktur der lateralen Kortex - hinge fracture (Brosset et al., 2011; Flörkemeier et al., 2019; Seo et al., 2016) sollen durch Weiterentwicklung und Optimierung der Operationstechniken minimiert werden. Der Vergleich und die Untersuchung der beiden Operationsmethoden aufsteigende und absteigende medial-öffnende HTO ist daher von äußerster Relevanz.

1.6 Arbeitshypothese und Fragestellung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen mit Hilfe unseres Patientenkollektivs mit varischer Beinachsendiformität die Behandlungsmöglichkeit der medialen Varusgonarthrose durch die medial-öffnende hohe tibiale Umstellungsosteotomie untersucht werden. Laut den Empfehlungen der S2k-Leitlinie Gonarthrose sollte, insbesondere bei jüngeren Patienten mit varischer extraartikulärer Beinachsendiformität, die valgisierende Umstellungsosteotomie als mögliche Behandlungsoption miteingeschlossen werden (Stöve & Streubesand, 2018). Durch den hohen körperlichen Anspruch der heutigen Gesellschaft ist die Umstellungsosteotomie ein aktuelles Thema in der operativen Medizin und somit von äußerster Relevanz.

Die vorliegende Arbeit untersucht und vergleicht die beiden bei uns angewandten Operationstechniken der ascendierenden und descendierenden medial-öffnenden hohen tibialen Osteotomie zur Therapie der varischen Beinachsendiformität. Eine Untersuchung bezüglich möglicher Unterschiede und Einflüsse auf die frontale und sagittale Beinachse nach einer ascendierenden oder descendierenden medial-öffnenden HTO existieren bis heute nicht. Zudem ist bisher unklar, ob die jeweilige Osteotomietechnik einen Einfluss auf die Stabilität der Osteosynthese hat in Verbindung mit den hier beschriebenen Implantaten (AAP Platte, Firma LOQTEQ). Insbesondere sekundäre Korrekturverluste können das Ergebnis der durchgeführten Osteotomie nachhaltig beeinträchtigen.

Das Ziel dieser retrospektiven Arbeit ist der Vergleich beider Operationstechniken mittels Auswertung radiologischer und klinischer Ergebnisse nach medial-öffnender HTO.

Der *primäre Endpunkt* dieser Arbeit beinhaltet die Veränderung erhobener geometrischer Parameter (Beinachse, posteriorer tibialer Slope) im Vergleich der ascendierenden versus der descendierenden medial-öffnenden HTO-Technik.

Als *sekundärer Endpunkt* wird die knöcherne Durchbauung mit Hilfe des modifizierten RUST-Scores im Unterschied zwischen ascendierender versus descendierender medial-öffnender HTO betrachtet.

Des Weiteren soll das klinische Outcome der ascendierenden versus der descendierenden medial-öffnenden HTO mittels des Lysholm Scores untersucht werden.

2 Material und Methoden

2.1 Patientenkollektiv

In der Klinik und Poliklinik für Unfallchirurgie und Orthopädie des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf wurden im Zeitraum vom 01.08.2018 bis zum 31.12.2020 insgesamt 36 hohe tibiale Umstellungsosteotomien durchgeführt. Der Nachuntersuchungszeitraum beträgt bis maximal 28 Monate postoperativ.

Die Operationen wurden bei 34 Patienten durchgeführt, wobei zwei Patienten zeitlich versetzt beidseits (rechts und links) eine medial-öffnende HTO erhielten. Bei den 36 durchgeführten medial-öffnenden HTO kamen zwei Operationstechniken zum Einsatz, die ascendierende und die descendierende medial-öffnende HTO. In unserem Kollektiv wurden 19 ascendierende und 17 descendierende medial-öffnende HTO durchgeführt. Die Operationen wurden durch zwei Chirurgen ausgeführt, welche beide Techniken gleichermaßen beherrschen. Die Stabilisierung erfolgte mittels der winkelstabilen AAP-Platte der Firma LOGTEQ. In Abhängigkeit von der Operationstechnik erfolgte zusätzlich bei der descendierenden medial-öffnenden Umstellungsosteotomie die Refixation der Tuberositas tibiae mittels ein bis zwei Schrauben. Bei der Mehrheit der Patienten wurde der Osteotomiespalt mit einem vancomycingetränkten, individuell zugeschnittenen allogenen Spongiosablock aufgefüllt. Hierbei handelt es sich um einen allogenen Hüftkopf, welcher mittels oszillierender Säge zugeschnitten wurden.

Die Indikation zur medial-öffnenden HTO wurde in unserer ambulanten Kniesprechstunde gestellt. Führende Symptomatik war der mediale Kniegelenksschmerz und eine nachgewiesene mediale Gonarthrose. Bei Vorliegen von Begleitpathologien, wie z.B. einer vorderen Kreuzbandruptur, von Innenmeniskusläsionen oder Knorpelläsionen, wurden diese intraoperativ mitversorgt.

Über den Zeitraum von 29 Monaten wurden alle Patienten inkludiert, welche eine medial-öffnende HTO erhielten. In dieser Arbeit wurde lediglich die Umstellungsosteotomie, welche singular an der Tibia erfolgte, miteinbezogen. Patienten, die eine femorale oder gegebenenfalls eine kombinierte Umstellungsosteotomie femoral und tibial erhielten, wurden nicht miteingeschlossen. Auch Patienten, die durch eine Fraktur eine posttraumatische

Varusfehlstellung entwickelt haben wurden nicht miteingeschlossen. Präoperativ erfolgte die Anamnese, die klinische Untersuchung und die notwendige radiologische Bildgebung. Bei allen Patienten wurde eine Röntgen-Ganzbeinaufnahme präoperativ durchgeführt.

2.2 Präoperative Planung nach Miniaci

Nach durchgeführter Diagnostik und Indikationsstellung zur medial-öffnenden HTO erfolgt die präoperative Planung der Osteotomie zur Achsenkorrektur und somit auch die Festlegung der Osteotomiekeilhöhe.

Es gibt unterschiedliche Methoden wonach die Achsenkorrektur geplant und berechnet bzw. gezeichnet werden können. Die bekanntesten Studien sind von Fujisawa und von Miniaci (Fujisawa, Masuhara and Shiomi, 1979; Miniaci *et al.*, 1989). Hier wird die neue Traglinie als Schnittpunkt der Mikulicz-Linie mit dem Tibiaplateau angegeben. Wobei die Abweichung der Traglinie vom Kniegelenkszentrum als Prozentsatz der Tibiaplateaubreite beschrieben wird. Die mediale Begrenzung des Tibiaplateaus liegt bei 0 % und das laterale Tibiaplateau bei 100 %. Als „Fujisawa point“ wird der Schnittpunkt mit dem Tibiaplateau bei 62 % bezeichnet (Brinkman et al., 2008; Staubli & Jacob, 2010). Die Traglinie und somit die Last verläuft somit durch das laterale Tibiaplateau. In unterschiedlichen Studien wurden folgende Angaben zur Mikulicz-Traglinie und dem Beinachsenwinkel publiziert. Bei Miniaci schneidet die Mikulicz-Traglinie bei 60-70 % das laterale Tibiaplateau. Bei Dugdale liegt die Mikulicz-Traglinie bei 50-75 % der lateralen Tibiaplateaubreite mit einer mechanischen Beinachse von 3-5°. Weitere Angaben stammen von Noyes, wo der Schnittpunkt der Mikulicz-Traglinie mit dem Tibiaplateau bei 62 % Plateaubreite liegt. Bezüglich der Beinachse empfiehlt Conventry eine anatomische Beinachse mit einem Valguswinkel von 8° (Pape et al., 2004).

In unserer Klinik erfolgt die Planung der medial-öffnenden HTO nach Miniaci mit Hilfe des computergestützten Programms Trauma-CAD. Als Korrekturziel wird die Mikulicz-Linie auf den 55 %-Punkt der Tibiaplateaubreite geplant. Mehrere Hilfslinien werden eingezeichnet, um die Osteotomiekeilhöhe zu bestimmen und somit die Beinachse korrigieren zu können (s. Abbildung 8).

Zunächst wird eine Linie (A) vom Hüftkopfbereich durch das Tibiaplateau bei 55 % bis zur Höhe des Gelenkspalts des oberen Sprunggelenks gezogen. Dieses ist der Verlauf der neuen postoperativen Traglinie. Als nächstes wird der Drehpunkt (D) der Osteotomie festgelegt. Dieser Punkt befindet sich auf der lateralen Kortikalis der Tibia in Höhe des kranialen Drittels des Tibiofibulargelenkes. Von dort wird eine Linie (B) gezogen, die bis zum Endpunkt der ersten Linie (A) – dem Endpunkt der

neuen Traglinie - auf Höhe des oberen Sprunggelenks verläuft. Eine weitere Linie (C) verläuft vom Drehpunkt (D) bis zum Zentrum des oberen Sprunggelenks (s. Abbildung 8). Der Winkel zwischen der Linie (B) und (C) bildet den Korrekturwinkel ab. Dieser Korrekturwinkel (lila) kann nun vom Drehpunkt (D) als medial-öffnende Osteotomie eingezeichnet werden (lila). Anschließend wird die Osteotomiekeilhöhe ausgemessen. Nach erfolgter Osteotomie, kann dann die Aufklappung erfolgen. Die Osteotomiekeilhöhe, die Weite der Aufklappung, kann intraoperativ mittels Lineal an der medialen tibialen Kortikalis ausgemessen werden (Elson et al., 2015; Fujisawa et al., 1979; Miniaci et al., 1989).

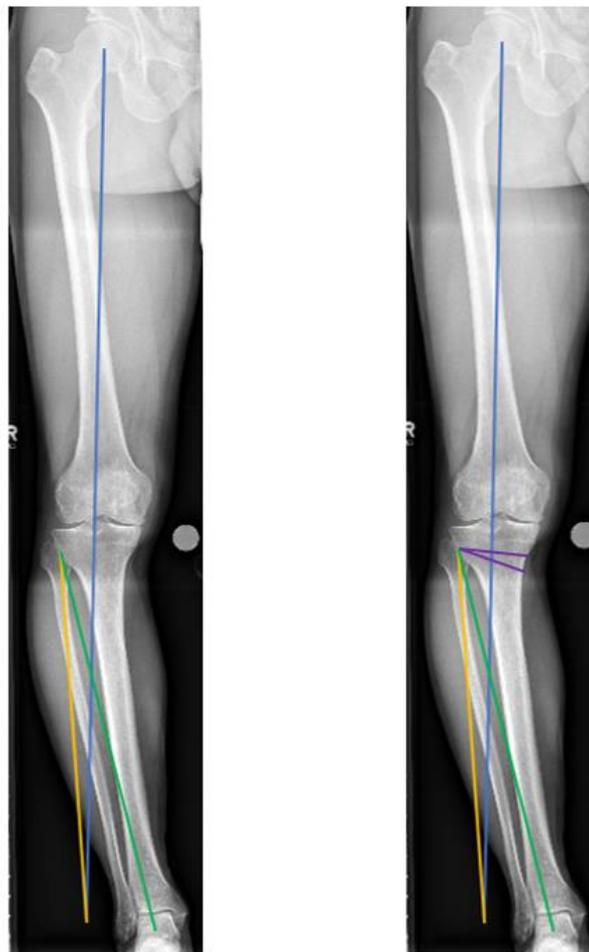


Abbildung 8: Osteotomieplanung nach Miniaci: Linie A blau, Linie B gelb, Linie C grün. Der Winkel zwischen der gelben Linie B und der grünen Linie C entspricht dem Korrekturwinkel, der die Osteotomiekeilhöhe (lila) beschreibt.

2.3 Operations-Techniken

Die präoperative Planung in unserer Klinik der medial-öffnenden HTO erfolgt wie oben beschrieben nach Miniaci. Es wird eine Korrektur der Mikulicz-Linie auf den 55 %-Punkt des lateralen Tibiaplateau geplant. Die Höhe der Aufklappung bzw. die Keilhöhe medialseitig der proximalen Tibia ist somit abhängig von der präoperativen Planung.

Es gibt zwei unterschiedliche biplanare hohe tibiale Osteotomietechniken, die hier zur Anwendung kommen: die ascendierende und die descendierende Osteotomie. Hierbei ist lediglich der zweite Schritt der biplanaren Osteotomie unterschiedlich. Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO wird die Osteotomie in der Frontalebene ohne Ablösen der Tuberositas tibiae und nach proximal auslaufend durchgeführt (Lobenhoffer & Agneskirchner, 2003). Bei der descendierenden medial-öffnenden HTO wird in der Frontalebene die Tuberositas von der Tibia gelöst und muss anschließend refixiert werden (Gaasbeek et al., 2004).

Der Osteotomiespalt wird in unserer Klinik, bei Einverständnis des Patienten, mittels allogener Spongiosa aufgefüllt. Dadurch soll mehr Stabilität und eine Unterstützung der Knochenheilung hervorgerufen werden. Hierfür wird mit der oszillierenden Säge ein Hüftkopf maßgerecht zugeschnitten und in Vancomycin getränkt - als Infektionsprophylaxe - bevor die Implantation erfolgt. Die Osteotomie wird mit einer winkelstabilen Platte stabilisiert.

Vor jeder Umstellungsosteotomie erfolgt zunächst die Stabilitätsprüfung des Kniegelenks in Narkose zur erneuten Überprüfung der Bandstabilitäten. Anschließend wird nach standardmäßiger Desinfektion und steriler Abdeckung eine Kniegelenksarthroskopie durchgeführt. Hier werden die Kniebinnenstrukturen beurteilt. Insbesondere der Knorpel und die Menisken sind von entscheidender Bedeutung. Sollten sich hier pathologische Veränderungen zeigen, wird die Therapie dementsprechend angepasst. Der Meniskus wird genäht, refixiert oder teilreseziert, sollte dies indiziert sein. Auch Knorpelschäden lassen sich in diesem Zusammenhang durch die gängigen arthroskopischen Methoden mitbehandeln. Sollte sich intraoperativ nicht nur ein vermehrter Knorpelschaden im Bereich des medialen, sondern auch im lateralen Kompartiment zeigen, beeinflusst dies die geplante Beinachsenkorrektur. Eine Überkorrektur der Beinachse ist kontraindiziert, um die laterale Säule nicht zu sehr zu belasten.

Im Folgenden werden die beiden unterschiedlichen Techniken der ascendierenden und descendierenden medial-öffnenden HTO näher erläutert.

Aszendierende Osteotomie

Die ascendierende medial-öffnende HTO wurde unter anderem durch Lobenhoffer und Agneskirchner beschrieben (Lobenhoffer & Agneskirchner, 2003). Der Patient befindet sich in Rückenlage. Zuerst erfolgt die oben erwähnte Untersuchung in Narkose und Prüfung der Bandstabilität und des Bewegungsausmaßes. Anschließend wird die standardisierte Kniegelenksarthroskopie durchgeführt zur Beurteilung des Patellalaufes, der Recessi und des medialen und lateralen Kompartiments, sowie der Menisken und des Knorpels. Die Operation kann mit oder ohne Blutsperre erfolgen. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, den Zeitraum der Blutsperre so gering wie möglich zu halten. Der Zugangsweg für die medial-öffnende hohe tibiale Osteotomie beginnt mit einem antero-medialen Hautschnitt im Bereich der proximalen Tibia. Die Faszie des Pes anserinus wird dargestellt. Die Sartorius-Faszie wird oberhalb des Musculus sartorius längs gespalten und das Innenband wird dargestellt. Dieses wird mittels stumpfem Raspatorium distal im ventralen Anteil oberflächlich gelöst. Unter Röntgendurchleuchtung in anterior-posteriorer Sicht werden zwei Kirschner-Drähte zur Markierung der Osteotomiehöhe eingebracht. Die Kirschner-Drähte werden aufsteigend in Richtung der Fibulaspitze (auf das obere Drittel des Tibiofibulargelenkes) parallel eingebracht. Ein schützender Hohmann-Haken wird unter strengem Knochenkontakt zur Schonung der dorsalen Weichteile eingestellt. Mittels einer oszillierenden Säge und stetigem Flüssigkeitsfluss - zur Vermeidung von Hitzeschäden - wird die planare Osteotomie durchgeführt. Hierbei muss auf die Durchtrennung der dorsalen 1/3 der Kortikalis geachtet werden, damit der Drehpunkt wie geplant lateral liegt und eine symmetrische Öffnung der Osteotomie möglich ist, ansonsten würde sich der posteriore tibiale Slope erhöhen (Lobenhoffer, 2021). Im Falle der ascendierenden Osteotomie erfolgt die ventrale Osteotomie aufsteigend zur Tuberositas tibiae unter Schonung der Patellasehne nach vorheriger Markierung. Nach der biplanaren Osteotomie wird der Osteotomiespalt vorsichtig unter sukzessivem Einbringen der Osteotomiemeißel geöffnet und ein Spreizer eingesetzt. Eine Veränderung des posterioren tibialen Slopes soll

verhindert werden, daher wird der Spreizer möglichst nahe des dorsalen Kortex platziert. Das Verhältnis der Spaltöffnung soll anterior zu posterior eins zu zwei betragen (Hinterwimmer et al., 2012; Krause et al., 2018), beziehungsweise anterior um ein Drittel geringer als posterior sein (Lobenhoffer, 2021). Um dies zu erreichen, ist eine korrekte partielle Ablösung des distalen Anteils des Innenbandes notwendig (Lobenhoffer, 2021). Die Öffnung der Osteotomie erfolgt anhand der präoperativen Planung nach Miniaci um die jeweils vorher bestimmte Höhe. Ein allogener Hüftkopf wird mittels oszillierender Säge für den Osteotomiespalt zugeschnitten und in Vancomycinlösung (500 mg Vancomycin auf 100 ml NaCl) inkubiert. Anschließend wird der Osteotomiespalt mit dem allogenen Knochenblock gefüllt und vorsichtig Pressfit eingeschlagen. Das Innenband wird reponiert. Abschließend fixiert eine winkelstabile Platte von medial die Osteotomie. In unserer Klinik wird hierfür die AAP-Platte von LOQTEQ verwendet. Die Fixierung der Platte erfolgt in leichter Hyperextension, damit die ascendierende Osteotomie geschlossen wird (Krause et al., 2018) und es zu keiner unbeabsichtigten Veränderung des posterioren tibialen Slopes kommt (Lobenhoffer, 2021). Mittels Röntgendurchleuchtung wird die korrekte Plattenlage kontrolliert und anschließend werden die Plattenlöcher sukzessiv mit winkelstabilen Schrauben besetzt. Die korrekte Plattenpositionierung und Schraubenlage werden mittels Röntgendurchleuchtung in mindestens zwei Ebenen verifiziert (s. Abbildung 9). Nach abschließender Kontrolle auf Bluttrockenheit und Spülung erfolgt die Einlage einer Redon-Drainage und der schichtweise Wundverschluss, sowie die elastische Wicklung des Beins.

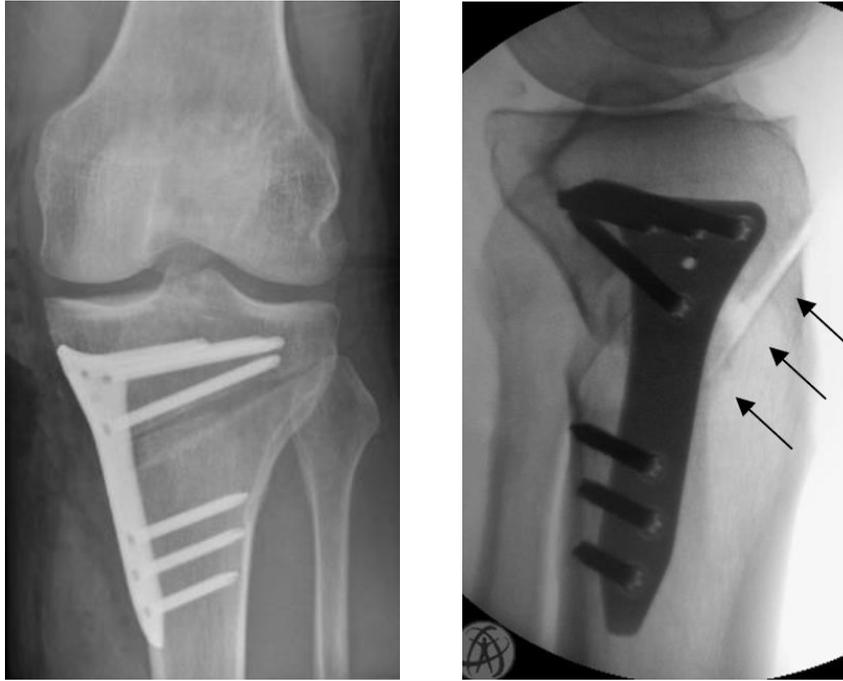


Abbildung 9: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen ascendierende medial-öffnende HTO. Die Pfeile im seitlichen Röntgen markieren die aufsteigende Schnittführung.

Deszendierende Osteotomie

Die deszendierende medial-öffnende HTO wurde unter anderem von Graasbeek beschrieben (Gaasbeek et al., 2004). Diese Technik unterscheidet sich von der ascendierenden Technik darin, dass nach der planen Osteotomie die ventrale Osteotomie in absteigend Richtung zur Tuberositas tibiae erfolgt. Alle anschließenden weiteren Schritte sind identisch zur zuvor beschriebenen ascendierenden Operationstechnik. Vor der Fixierung der Osteotomie mittels winkelstabiler AAP Platte wird die biplanare Osteotomie der Tuberositas tibiae von ventral mittels ein bis zwei Kortikaliszugschrauben geschlossen, komprimiert und refixiert. Anschließend werden die Plattenlöcher der AAP Platte sukzessiv mit winkelstabilen Schrauben besetzt (s. Abbildung 10). Das abschließende Prozedere entspricht wiederum der oben beschriebenen ascendierenden Operationstechnik.

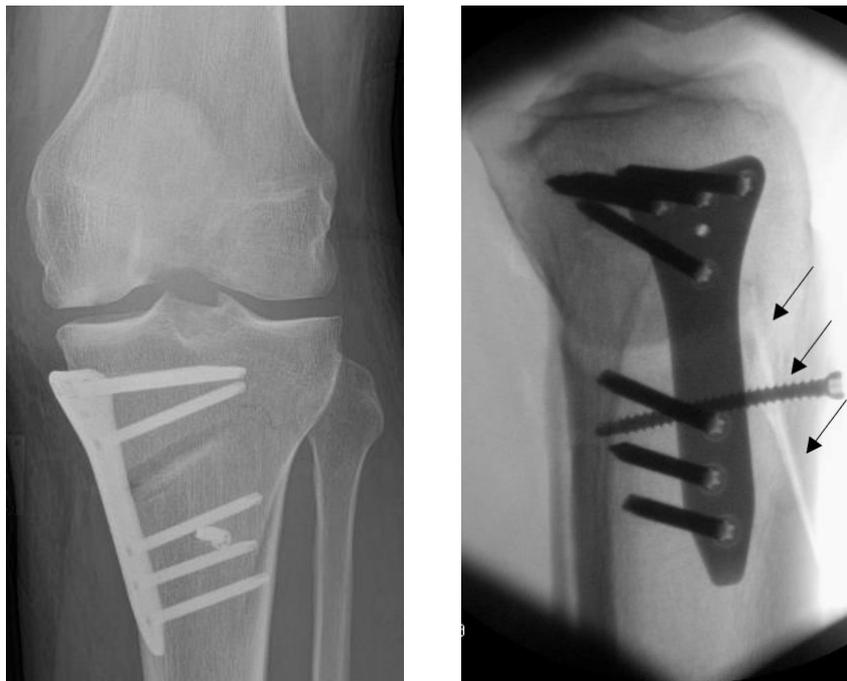


Abbildung 10: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen deszendierende medial-öffnende HTO. Die Pfeile im seitlichen Röntgen markieren die absteigende Schnitfführung.

2.4 Kombinationseingriffe

Bei der Indikationsstellung zur medial-öffnenden HTO muss die Komplexität des Kniegelenks und deren biomechanischen Eigenschaften miteinbezogen werden. Das heißt, neben der Feststellung der Beinachsendeformität im Sinne eines Genu varums, müssen die Kniebinnenstrukturen wie das vordere und hintere Kreuzband, Außen- und Innenmeniskus und Knorpelschäden mitberücksichtigt werden. Auch weitere Kniegelenksstabilisatoren wie das Innen- und Außenband werden durch die klinische Untersuchung mitberücksichtigt. Insbesondere die Anamnese der subjektiven Kniegelenksinstabilität spielt hier eine wichtige Rolle.

Aufgrund der Komplexität des Kniegelenks und den damit verbundenen Pathologien kommt es neben der primären medial-öffnenden HTO - als Therapie des Genu varums - auch häufig zu Begleitpathologien, die mitbehandelt werden sollten (Martinek & Imhoff, 2003). Zusätzlich bestehen häufig degenerativ bedingte Begleitveränderungen wie z.B. osteophytäre Anbauten im Bereich der Notch, der Patella oder den Kondylen. Diese werden bei der initialen Kniegelenksarthroskopie vor der eigentlichen medial-öffnenden HTO mittels arthroskopischer Fräse entfernt. Meniskusrisse - vornehmlich Innenmeniskusläsionen beim Genu varum - aber auch seltener Außenmeniskusrisse – werden während der Kniegelenksarthroskopie mittels Meniskusnaht therapiert, teilreseziert oder mittels Anker (Fast Fix, Firma Smith and Nephew) refixiert (Petersen et al., 2020). Bei bestehendem Genu varum und folglich medialer Gonarthrose finden sich auch häufig Knorpelläsionen in unterschiedlichen Schweregraden. Hier stehen die unterschiedlichen Therapiemöglichkeiten der arthroskopischen Knorpelchirurgie zur Verfügung. Wobei die Knorpelglättung mittels Shaver sowie die Mikrofrakturierung den geringsten Aufwand bedeuten. Die Literatur zeigt, dass Patienten mit einem Genu varum und einer Knorpelläsion von einer zusätzlichen Knorpeltherapie mittels Knorpelzelltransplantation (Autologe Chondrozyten Transplantation, ACT) (Bode et al., 2013; Kraus et al., 2015) oder einer Knorpel-Knochen-transplantation (Osteochondrale autologe Knorpel-Knochen-Transplantation, OATS) profitieren (Minzlaff et al., 2013). Im Falle einer zusätzlichen Osteochondrosis dissecans kann im Falle eines noch vorhandenen Dissekats dieses refixiert werden. Zuvor ist jedoch häufig eine Spongiosaplastik erforderlich. Weitere zusätzliche degenerative

Erscheinungen wie Sehnenverkalkungen z.B. der Quadrizepssehne können von dem Kalkdepot befreit werden, Kreuzbandzysten werden reseziert.

In unserer heutigen Gesellschaft und dem stetig steigenden Anspruch der Leistungsfähigkeit und hohen sportlichen Aktivität kommt es immer mehr zu Kombinationseingriffen mit zusätzlichen Bandrekonstruktionen und Bandplastiken bei diagnostizierter Kniegelenksinstabilität. Bei vorliegender, akuter oder chronischer vorderer oder hinterer Kreuzbandruptur bzw. Seitenbandinstabilitäten und subjektivem Instabilitätsgefühl werden somit neben der Beinachsenkorrektur die Bänder zusätzlich stabilisiert (Agneskirchner et al., 2002; Hinterwimmer et al., 2010). Auch bei vorliegendem pathologischen Slope und damit im Zusammenhang stehenden Bandinstabilitäten, kann neben der Beinachsenkorrektur auch eine Korrektur des posterioren tibialen Slopes durch die medial-öffnende HTO erfolgen (Hinterwimmer et al., 2010). Chronische Kniegelenksinstabilitäten können längerfristig zur Kniegelenksarthrose führen (Martinek & Imhoff, 2003). Erfolgte bereits eine Kreuzbandplastik, welche sich als erneut insuffizient oder rupturiert darstellt, kann mit dem Eingriff der medial-öffnenden HTO auch eine Bohrkanalauffüllung kombiniert werden, so dass im weiteren Verlauf eine erneute Bandplastik erfolgen kann. Weitere kleinere Eingriffe wie z.B. eine Resektion von Vernarbungen bei Zustand nach vorderer Kreuzbandplastik, können arthroskopisch mitbehandelt werden, ebenso wie Augmentationen und Refixationen von Muskel- und Sehnenabrissen.

2.5 Nachbehandlungsschema nach HTO

Die beiden Operationstechniken, ascendierende und descendierende medial-öffnende HTO, unterscheiden sich im Hinblick auf die Nachbehandlung nicht voneinander.

Nach erfolgreicher medial-öffnender HTO erfolgt eine standardisierte Nachbehandlung. Die Patienten erhalten nach dem WHO-Stufenschema eine individuelle angepasste Analgesie. Hierzu zählt ein zentral wirksames orales Analgetikum wie z.B.: Oxycodon, welches zweimal am Tag in retardierter Form gegeben wird. Zusätzlich wird ein peripher wirkendes orales Analgetikum z.B. Metamizol eingesetzt, welches die Patienten 3- bis 4- mal täglich erhalten. Die Gabe einer weiteren, zusätzlichen Bedarfsmedikation erfolgt in Abhängigkeit der subjektiven Schmerzen. Aufgrund der zunächst bestehenden eingeschränkten Mobilität ist eine Thromboseprophylaxe mittels niedermolekularen Heparins, z.B. Clexane, indiziert. Des Weiteren kann die postoperative Behandlung durch lokale Kryotherapie und Hochlagerung zur Prävention und Behandlung von schmerzhafter Schwellung unterstützt werden. Ab dem 1. postoperativen Tag wird mit der physiotherapeutisch unterstützen Mobilisation begonnen. Eine Ruhigstellung mittels Orthese oder Schiene ist nicht notwendig. Die Mobilisation erfolgt unter Sohlenkontakt an Unterarmgehstützen mit einer Teilbelastung von 10 bis 15 kg für zunächst 6 Wochen mit anschließendem Übergang zur Vollbelastung nach ärztlicher Kontrolle. Das Bewegungsausmaß im Kniegelenk (Range of Motion, ROM) wird nicht eingeschränkt. Der Patient erlernt mit Hilfe der Gangschule die selbständige Mobilisation an Unterarmgehstützen in 4-Punkt-Technik (Kreuzgang), sowie das Bewältigen des Treppensteigens. Auch ist darauf zu achten, dass die Beweglichkeit in den Gelenken, insbesondere im Kniegelenk, erhalten und gefördert wird. Bei Bedarf kann eine zusätzliche manuelle Therapie und Lymphdrainage erfolgen.

2.6 Modifizierter RUST-Score

Zur Beurteilung der knöchernen Durchbauung des Osteotomiespalts und der Bewertung der knöchernen Heilung der Tibia wird der modifizierte RUST-Score (Radiographic Union Score for Tibial Fractures) herangezogen.

In den Studien von Whelan et al. wurde die Heilung bei Tibiafrakturen, welche mittels Marknagelosteosynthese versorgt wurden, anhand von Röntgenbildern in 2 Ebenen beurteilt (Whelan et al., 2010). Die vier abgebildeten Kortikales (medial, lateral, anterior, posterior) - im anterior-posterior und seitlich Strahlengang - wurden herangezogen und beurteilt. Wobei im anterioren-posterioren Strahlengang die mediale und laterale Kortikalis bewertet werden kann und im seitlichen Strahlengang die Beurteilung der posterioren und anterioren Kortikalis erfolgt. Es werden Punktwerte von 1 bis 3 vergeben. Ein Punkt steht für eine sichtbare Frakturlinie ohne Kallus, zwei Punkte für eine noch sichtbare Frakturlinie bei vorhandenem Kallus und drei Punkte im Falle einer brückenbildenden Kallusbildung ohne Frakturlinie. Der endgültige Score besteht aus der Summe der einzelnen Punkte der jeweiligen Kortikalis. Der minimale RUST-Score beträgt somit 4 Punkte und repräsentiert keine Frakturheilung. Der maximale RUST-Score von 12 Punkten entspricht der Frakturheilung.

Kooistra et al. haben die Verlässlichkeit des RUST-Scores untersucht und sind der Meinung, dass dieser Score zuverlässiger sei als die reine Betrachtung und Einschätzung von Chirurgen in Bezug auf den Überbrückungskallus (Kooistra et al., 2010). In ähnlicher Weise haben van Houten et al. – in ihrer Studie zur Untersuchung der Pseudarthrose bei HTO – den RUST-Score verwendet, jedoch in einer modifizierten Weise (Van Houten et al., 2014). Da die anteriore Kortikalis aufgrund der Plattenosteosynthese nach erfolgter HTO meistens im seitlichen Röntgenbild nicht zu beurteilen ist, werden nur drei Kortikales zur Erhebung des Scores herangezogen: medial, lateral und posterior. Hieraus ergibt sich der *modifizierte RUST-Score* (s. Abbildung 11, Abbildung 12, Abbildung 13). In der dortigen Studie wurde der Score nach 6 Wochen und 3 Monaten postoperativ erhoben. Das Minimum des modifizierten RUST-Scores liegt bei 3 Punkten (s. Abbildung 11), das Maximum liegt bei 9 Punkten (s. Abbildung 12). Auch in unserer Untersuchung erfolgt die Beurteilung der knöchernen Durchbauung anhand des modifizierten RUST-Scores. Zur Unterstützung der schnelleren, knöchernen

Ausheilung und Unterstützung der Stabilität wird in unserer Klinik allogene Spongiosa in den Osteotomiespalt eingebracht.

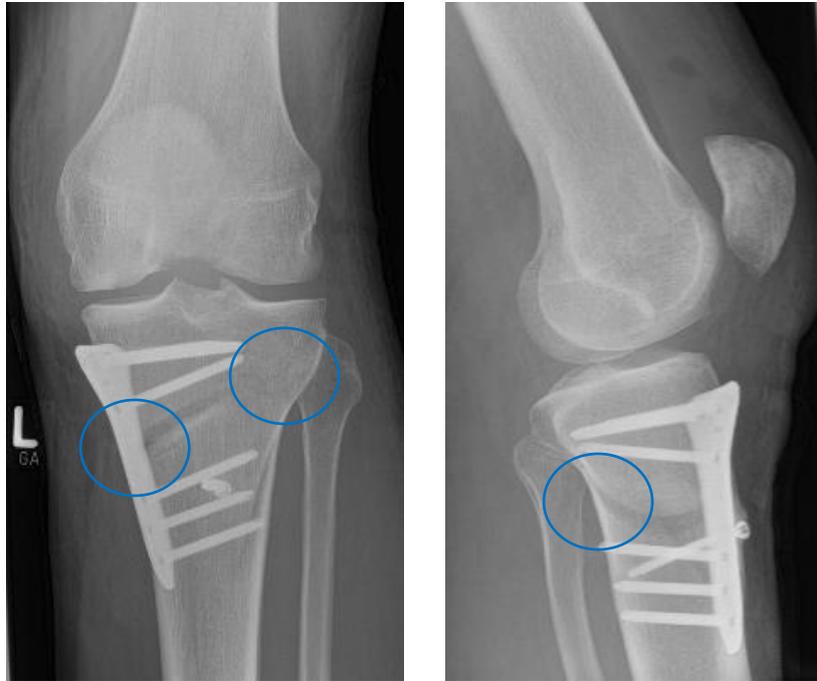


Abbildung 11: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen am 3. postoperativen Tag nach descendierender medial-öffnender HTO, modifizierter RUST-Score 1 + 1 + 1 = 3

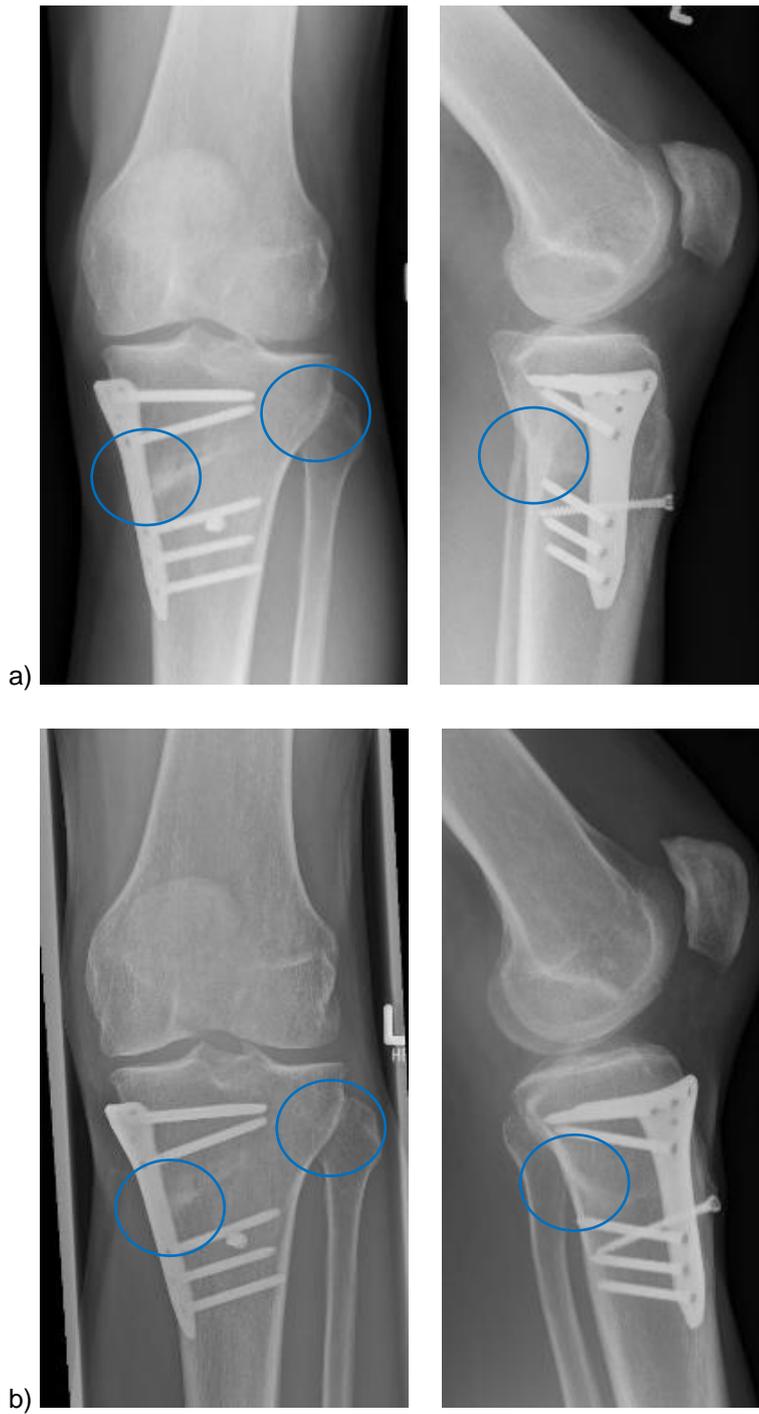


Abbildung 12: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen nach deszendierender medial-öffnender HTO a) 6,8 Monate und b) 12 Monate postoperativ, modifizierter RUST-Score 3 + 3 + 3 = 9



Abbildung 13: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen nach Materialentfernung nach 12,9 Monaten mit weiterhin vollständiger Verknöcherung

2.7 Klinisches Outcome

Lysholm Score

Zur Beurteilung des klinischen Outcomes wurden die Patienten nach erfolgter medial-öffnender HTO bezüglich ihres subjektiven Befindens befragt. Der Lysholm Score - modifiziert nach Lysholm und Gillquist wurde hierfür angewandt (Lysholm & Gillquist, 1982; Tegner & Lysholm, 1985). Hiernach erfolgt eine numerische Bewertung unterschiedlicher Parameter durch die Patienten. Sie bewerten folgende acht Parameter: Hinken, Belastung, Blockierung, Instabilität, Schmerz, Schwellung, Treppensteigen und Hocken. Bei dem Score können insgesamt 0 bis 100 Punkte vergeben werden. Je höher die Punktzahl, desto größer die subjektive Zufriedenheit.

2.8 Statistische Auswertung

Der Ausgangspunkt dieser Untersuchung ist die prä- und postoperative Röntgenbilddiagnostik. Mit dem Universal Viewer Zero Footprint und dessen integrierten Tools (Winkelmessfunktion, etc.) werden die geometrischen Parameter (Beinachse, posteriorer tibaler Slope, etc.) bestimmt. Mit Hilfe des modifizierten RUST-Scores wird die knöcherne Durchbauung beurteilt. Zudem soll untersucht werden, ob es im Verlauf zu Veränderungen der Parameter kommt. Das klinische Ergebnis wird durch die Erhebung subjektiv bewerteter Parameter mit Hilfe des Lysholm Scores beurteilt.

Die statistische Auswertung erfolgt mittels Microsoft Excel® und dem statistischen Programm SPSS® (IBM®, Chicago, IL, USA). Ergebnisse werden deskriptiv in Mittelwerten und Standardabweichung bzw. Median sowie graphisch dargestellt. Die Testung auf Normalverteilung der Daten erfolgt durch den Kolmogorov-Smirnov-Test. Die Unterschiede der erhobenen Parameter werden mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Test (nichtparametrischer Test für unabhängige Stichproben) auf Signifikanz getestet. Das statistische Signifikanzniveau beträgt $p < 0,05$.

Zur Berechnung der Korrelation quantitativer Daten wird der Korrelationstest nach Spearman und Korrelationstest nach Pearson angewandt.

3 Ergebnisse

3.1 Patientenkollektiv

Im Zeitraum vom 01.08.2018 bis zum 31.12.2020 wurden im Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf 36 medial-öffnende Umstellungsosteotomien im Bereich der proximalen Tibia durchgeführt.

In den 29 Monaten erfolgte nahezu eine gleichmäßige Verteilung der beiden Operationstechniken: 19 ascendierende medial-öffnende hohe tibiale Osteotomien und 17 descendierende medial-öffnende hohe tibiale Osteotomien wurden durchgeführt.

Insgesamt zeigte sich eine Geschlechterverteilung mehrheitlich zugunsten der Männer. Das Kollektiv besteht aus 3/4 Männern (N = 27) und 1/4 Frauen (N = 9). Eine ascendierende medial-öffnende HTO wurde bei 73,7 % (N = 14) der Männer und 26,3 % (N = 5) der Frauen durchgeführt. Eine descendierende medial-öffnende HTO erfolgte bei 76,5 % (N = 13) der Männer und 23,5 % (N = 4) der Frauen. Damit ist die Geschlechterverteilung in Bezug auf die Operationstechnik nahezu gleichmäßig.

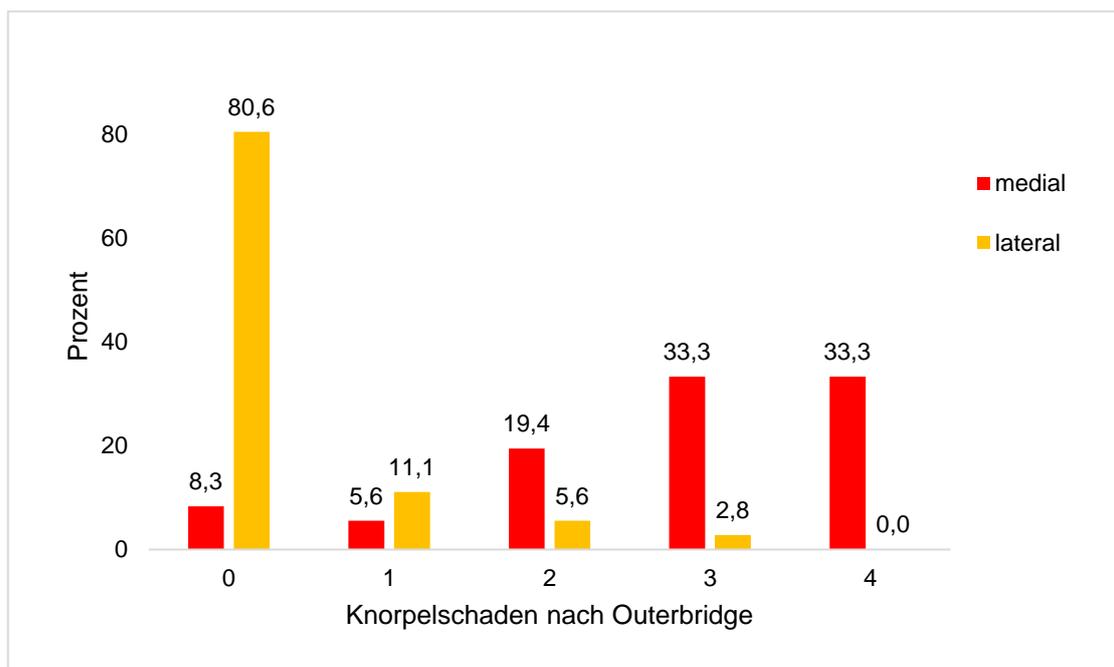
Die hohe tibiale Umstellungsosteotomie wurde im Durchschnitt in einem Alter von 49,6 Jahren durchgeführt. Der jüngste Patient war 18 Jahre alt, der Älteste 71 Jahre alt, wobei die Männer im Durchschnitt mit 49,2 Jahren etwas jünger waren als die Frauen mit 50,9 Jahren. Die männliche Altersspannweite reichte von 18 Jahren bis 71 Jahren, bei den Frauen von 24 Jahren bis 71 Jahren. Das Durchschnittsalter bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO betrug unabhängig vom Geschlecht 51,7 Jahre und bei der descendierenden 47,9 Jahre. Die Männer waren im Durchschnitt bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO 51,5 Jahre alt und bei der descendierenden medial-öffnenden HTO 46,8 Jahre alt. Die Altersverteilung war bei den Frauen ähnlich wie bei den Männern. Die Frauen waren im Durchschnitt bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO 52,4 Jahre alt und bei der descendierenden 49 Jahre alt. Somit sind die Patienten etwas älter, die eine ascendierende medial-öffnende HTO erhalten haben, unabhängig vom Geschlecht. Die Seitenverteilung zeigt, dass mit 66,7 % (N = 24) häufiger eine medial-öffnende HTO rechtseitig erfolgte im Vergleich zur linksseitigen

Umstellung (33,3 % N= 12). Bei beiden Operationstechniken - aszendierender und deszendierender medial-öffnender HTO - zeigte sich jeweils das gleiche Verhältnis für die rechte und linke Seite.

Insgesamt wurden 38,89 % (N = 14) der Platten von den insgesamt 36 implantierten AAP-Platten (LOQTEQ) im Nachuntersuchungszeitraum wieder entfernt. Wobei 2 Patienten eine Re-Osteosynthese aufgrund des Verdachtes auf eine Pseudarthrose erhielten. Mehr Materialentfernungen erfolgten nach einer deszendierenden medial-öffnenden HTO (58,8 %, N = 10). Bei der aszendierenden medial-öffnenden HTO wurden 21,1 % (N = 4) der AAP Platten wieder entfernt. Bei der deszendierenden Technik erhielten zwei Patienten eine Re-Osteosynthese mittels Doppelplatte von medial und lateral. Der Zeitpunkt der Materialentfernung bei knöcherner Konsolidierung lag durchschnittlich bei 15 Monaten; beim aszendierenden Kollektiv nach 8 Monaten und beim deszendierenden Kollektiv nach 17 Monaten durchschnittlich.

In den Operationsberichten wurden die während der Arthroskopie verifizierten Knorpelschäden dokumentiert. Hier zeigte sich in der Einteilung nach Outerbridge, dass die medialen Knorpelläsionen bei einem Mittelwert von 2,8 Grad (SD 1,2) lagen, wobei lateral lediglich ein Mittelwert von 0,3 Grad (SD 0,7) vorlag. Diese Verteilung war zu erwarten, da bei der Varusgonarthrose das mediale Kompartiment als Hauptbelastungszone mehr beansprucht wird. Das Diagramm 1 zeigt, dass der mediale Knorpelschaden mehrheitlich bei 3 bis 4 Grad nach Outerbridge liegt. Die übrigen 1/3 haben einen Knorpelschaden von 0 bis 2 Grad nach Outerbridge. Im lateralen Kompartiment sieht die Häufigkeitsverteilung, wie zu erwarten, anders aus. 80 % des Kollektivs haben lateral keinerlei Knorpelschäden Outerbridge Grad 0.

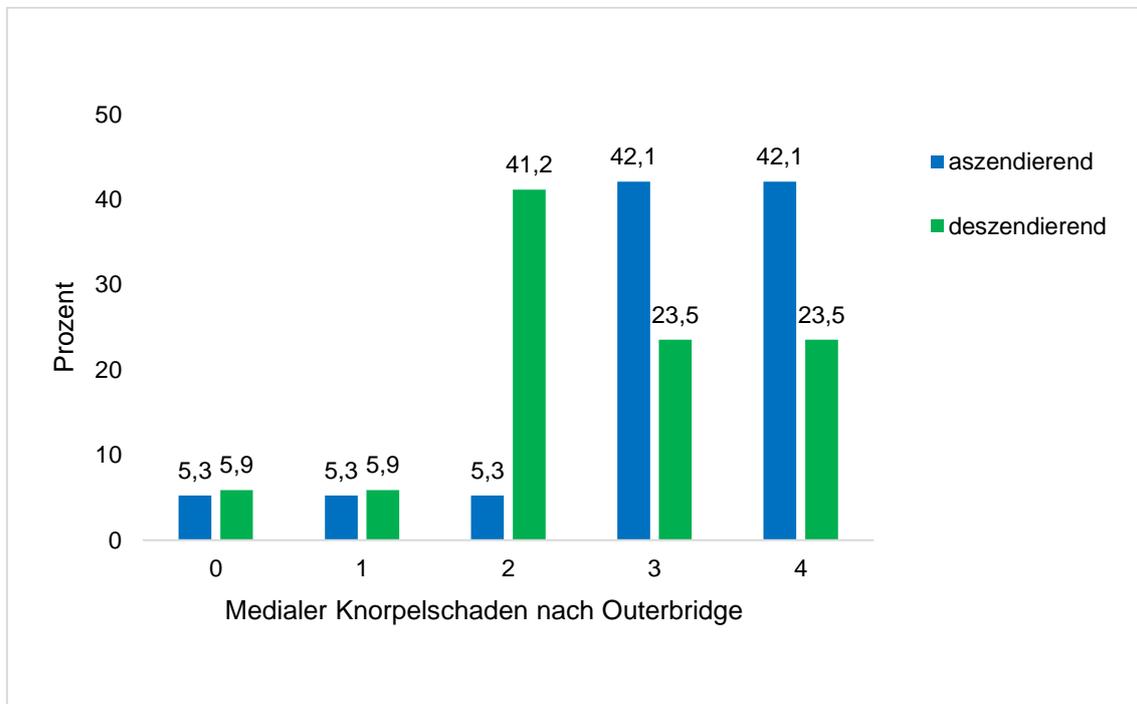
Diagramm 1: Häufigkeitsverteilung medialer und lateraler Knorpelschaden nach Outerbridge



Vergleicht man die beiden unterschiedlichen Operationstechniken, wird sichtbar, dass bei der aufsteigenden medial-öffnenden HTO die Patienten medial eine höhergradige Knorpelläsion hatten (Mittelwert 3,1 Grad nach Outerbridge, SD 1,1) als bei der absteigenden medial-öffnenden HTO. Hier lag der mediale Knorpelschaden im Mittel bei 2,5 Grad nach Outerbridge (SD 1,1). Bei 84,2 % des Kollektivs der aufsteigenden medial-öffnenden HTO lag eine mediale Knorpelläsion von 3 oder 4 Grad nach Outerbridge vor. Bei der absteigenden

medial-öffnenden HTO machten dies lediglich 47 % des Kollektivs aus (s. Diagramm 2).

Diagramm 2: Häufigkeitsverteilung medialer Knorpelschaden



Bezüglich des lateralen Knorpelschadens zeigte sich ein anderes Bild. Bei der aszendierenden Technik zeigt sich bei keinem Patienten eine laterale Knorpelläsion. Auch bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lagen mehrheitlich (58 %) lateral keinerlei Knorpelläsion vor. Der Mittelwert des lateralen Knorpelschadens betrug in diesem Kollektiv 0,7 Grad nach Outerbridge (SD 0,9).

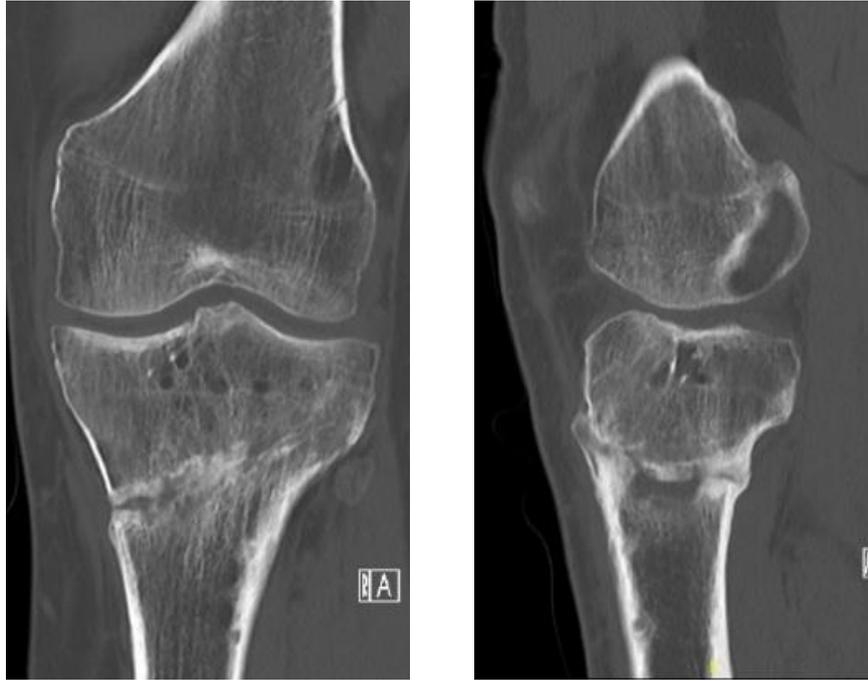
In unserem Kollektiv zeigten sich nur wenige Komplikationen. Es kam zu keiner Gefäßverletzung, keiner tiefen Beinvenenthrombose, keinem Kompartmentsyndrom, keinen anhaltenden sensomotorischen Defiziten und keiner Osteitis.

Jedoch erfolgte im Kollektiv der aszendierenden medial-öffnenden HTO eine Revisionsoperation bei einem 52-Jährigen aufgrund einer chronischen Wundheilungsstörung bei bekanntem anhaltenden Fumatorium. Daher wurde nach 5 Monaten die Revisionsoperation bei V.a. Wundinfektion und Pseudarthrose - bei im CT nachweislich verzögerter Knochenheilung - durchgeführt. Das

Osteosynthesematerial sowie die Fremdspongiosa wurden vollständig entfernt und der Knochen debridiert. Mikrobiologisch und histologisch zeigte sich jedoch kein Keimnachweis und kein Anzeichen für eine Entzündung. Zum Zeitpunkt der Materialentfernung betrug der modifizierte RUST-Score 6 (s. Abbildung 14, Abbildung 15). Die radiologischen Verlaufskontrollen zeigten eine Dynamik der geometrischen Parameter. Es kam zu einer Zunahme des tibialen Slopes von anfänglichen $10,4^\circ$ auf $10,7^\circ$ innerhalb der 5 Monate. Vor der ascendierenden medial-öffnenden HTO hatte der Patient ein Genu varum von $5,5^\circ$, welches mittels ascendierender medial-öffnender HTO auf eine Beinachse mit $1,5^\circ$ Valgus korrigiert wurde. Zum Zeitpunkt der Materialentfernung nach 5 Monaten liegt keine radiologische Röntgenkontrolle der gesamten Beinachse vor. Die radiologische Verlaufskontrolle nach 14 Monaten nach der Materialentfernung zeigte eine erneute varische Beinachse von $3,9^\circ$. Wann es zur erneuten Varisierung gekommen ist, ob noch bei einliegendem Osteosynthesematerial nach der initialen Operation, oder erst nach der vorzeitigen Materialentfernung, lässt sich anhand der vorliegenden Bildgebung nicht nachweisen.



Abbildung 14: Röntgen Kniegelenk links a.p. nach ascendierender medial-öffnender HTO nach 5 Monaten a) vor und b) nach der Materialentfernung bei chronischer Wundheilungsstörung bei Fumatorium



**Abbildung 15: Computertomographie Kniegelenk links nach 7 Monaten nach
aszendierender medial-öffnender HTO**

Bei einem weiteren Patienten, bei dem keine Fremdspongiosa implantiert wurde, zeigte sich eine verzögerte Knochenheilung, welche bisher jedoch nicht als revisionsbedürftig angesehen wurde (s. Abbildung 16). Ansonsten gab es keine weiteren Komplikationen oder Revisionsoperationen im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO.



Abbildung 16: Röntgen Kniegelenk rechts in 2 Ebenen nach ascendierender medial-öffnender HTO ohne Fremdspongiosa mit verzögerter Knochenheilung a) nach 7 Monaten, b) nach 16 Monaten

Im Kollektiv der deszendierenden medial-öffnenden HTO erfolgten zwei Revisionsoperationen. Bei einem Patienten erfolgte die Revision nach 2,6 Monaten bei Verdacht auf einen Low-grade-Infekt und verzögerter Knochenheilung, sowie Korrekturverlust der Beinachse. Das Osteosynthesematerial wurde daraufhin vollständig entfernt. Eine Revalgisierung bei Korrekturverlust erfolgte, sowie eine neue Stabilisierung mittels Doppelplatten-Osteosynthese durch eine AAP-Platte (LOQTEQ) von medial und eine LCP-Platte (Synthes) von lateral (s. Abbildung 17). Die mikrobiologische Untersuchung zeigte den Nachweis von Staphylokokkus epidermidis, welche jedoch durch unsere Mikrobiologen als Verunreinigung interpretiert wurde. Die histologischen Untersuchungen zeigten keinen Nachweis einer eitrigen Entzündung. Bei erneuter Implantation von Osteosynthesematerial erfolgte die antibiotische Abdeckung mittels eines oralen Antibiotikums (Clindamycin), welches später auf Rifampicin und Doxycyclin umgestellt wurde.



Abbildung 17: Röntgen Kniegelenk rechts in 2 Ebenen a) nach descendierender medial-öffnender HTO und b) nach der Revision mittels Doppelplattenosteosynthese

Ein weiterer Patient - aus dem Kollektiv der deszendierenden medial- öffnenden HTO - wurde erneut operiert, aufgrund des Verdachts auf eine Pseudarthrose bei nachgewiesenem Schraubenbruch. Bereits nach initialer Operation kam es in kurzer Zeit zum Korrekturverlust der Beinachse (s. Abbildung 18 a). Zwei Monate nach der Operation zeigte sich eine varische Beinachse von $3,4^\circ$. Drei Monate später zeigte sich eine Beinachse von 7° . Das Osteosynthesematerial wurde somit nach 6,1 Monaten vollständig entfernt und eine erneute Plattenosteosynthese mittels medialer und lateraler EVOS-Platte (Smith & Nephew) durchgeführt (s. Abbildung 18 b). Mikrobiologisch zeigte sich kein Keimnachweis, auch histologisch wurde keine eitrige Entzündung nachgewiesen. Die Pseudarthrose wurde am ehesten auf einen Vitamin D-Mangel bzw. eine Knochenstoffwechselstörung zurückgeführt, sowie auf einen sehr großen Korrekturwinkel und vorzeitige Vollbelastung durch den Patienten. Anschließend kam es zu einer komplikationslosen Ausheilung bei gerade Beinachse und vollständiger Beschwerdefreiheit des Patienten.

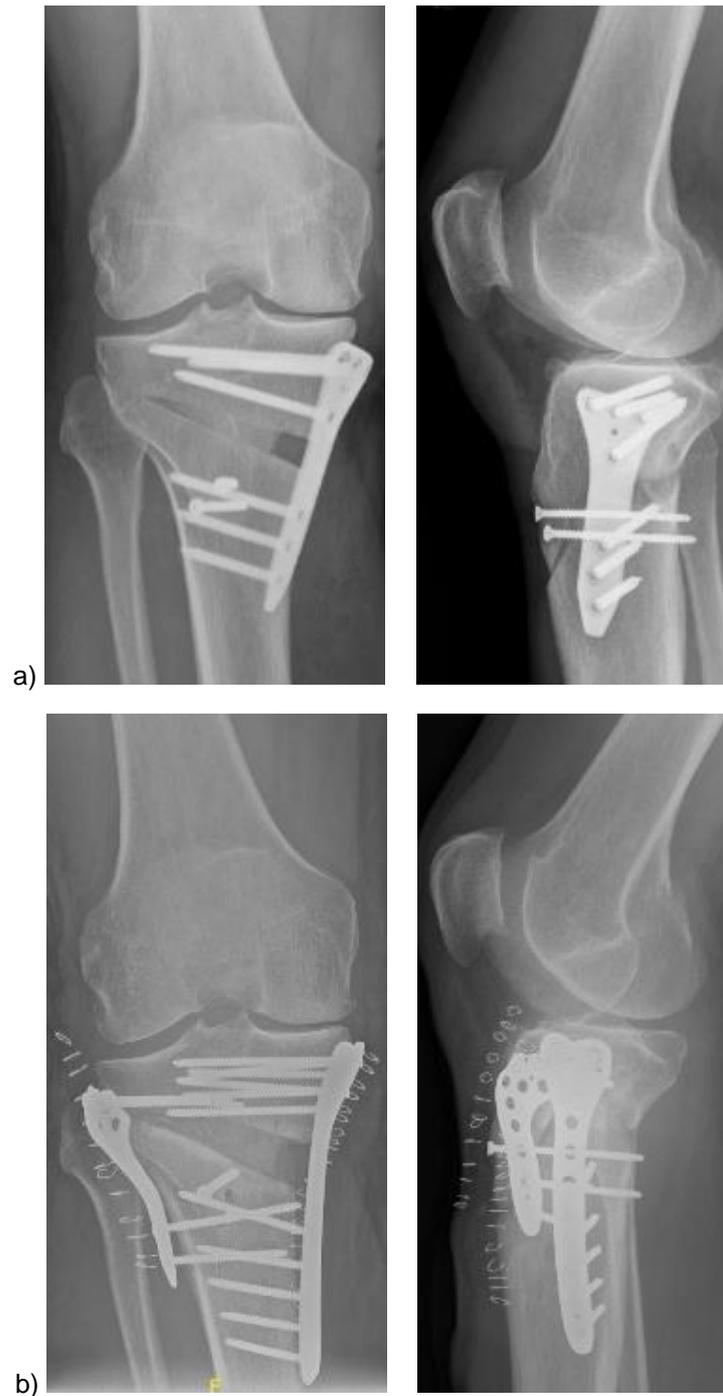


Abbildung 18: Röntgen Kniegelenk rechts in 2 Ebenen a) nach deszendierender medial-öffnender HTO und b) nach der Revision mittels Doppelplattenosteosynthese

Des Weiteren kam es im Kollektiv der deszendierenden medial-öffnenden HTO zu zwei verzögerten Knochenheilungen, welche mittels CT verifiziert wurden, ohne weitere Auffälligkeiten. In beiden Fällen kam es zur knöchernen Ausheilung und im Verlauf zur problemlosen Materialentfernung nach 13,3 Monaten und nach 25,8 Monaten.

Wie bereits erwähnt, erfolgen im Rahmen der Umstellungsosteotomie häufig weitere ergänzende Therapien und Kombinationseingriffe zusätzlich zur Umstellungsosteotomie. Häufig werden diese Maßnahmen arthroskopisch vor der offenen Umstellungsosteotomie durchgeführt.

In unserem Kollektiv wurden folgende Maßnahmen zusätzlich durchgeführt:

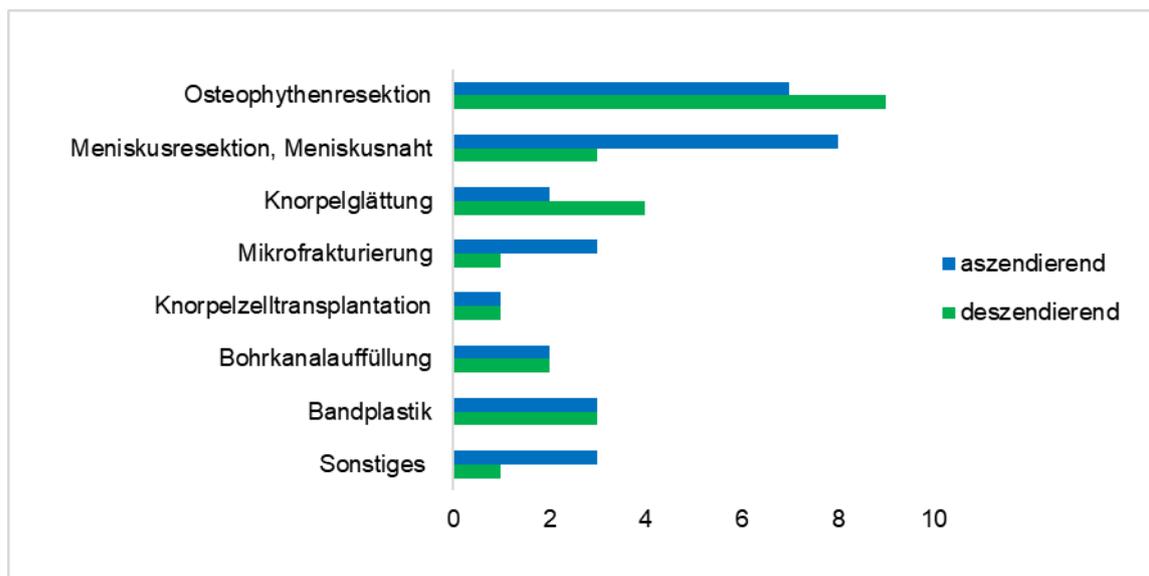
- Osteophytenresektion an Notch, Kondylen, Patella
- Partielle Meniskus(nach)resektion, Meniskusnaht
- Mikrofrakturierung
- Knorpelglättung
- Knorpelzelltransplantation
- Spongiosaplastik und Flake-Refixation bei Osteochondrosis dissecans
- Kalkdepotentfernung aus der Quadrizepssehne
- Zystenresektion des vorderen Kreuzbands
- Resektion der Vernarbung bei vorderer Kreuzbandplastik
- Bandplastiken (vorderes Kreuzband mittels Semitendinosussehne, Gracilissehne, Quadrizepssehne; Seitenbandplastik: anterolaterale Tenodese nach Lemaire)
- Augmentation und Refixation Semimembranosussehne
- Bohrkanalauffüllung

Im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO wurde bei 15 % eine reine Umstellungsosteotomie durchgeführt, ohne weitere arthroskopische Maßnahmen. Bei der descendierenden medial-öffnenden HTO sind 29 % ohne weitere Maßnahmen operiert worden.

Neben der medial-öffnenden hohen tibialen Osteotomie erfolgte bei einem Patienten eine zusätzlich geplante Slopekorrektur (von 4° präoperativ auf 10° postoperativ). Bei einer weiteren Patientin wurde der präoperative posteriore tibiale Slope von 6° auf 8° erhöht. Eine andere Patientin hatte bereits vor Jahren eine HTO in einem anderen Krankenhaus erhalten, welche jedoch nur unzureichend durchgeführt wurde, so dass wir eine erneute medial-öffnende HTO durchführten, um die Beinachse zu korrigieren. Ein Patient erhielt aufgrund einer Osteochondrosis

dissecans eine Kürettage der medialen Kondyle mit anschließender Anbohrung, Eigenspongiosaplastik aus der lateralen Femurkondyle und abschließender Refixation des chondralen Fragments mit zwei Smart Nails (Arthrex). Weitere Maßnahmen und absolute Häufigkeiten können aus der Diagramm 3 entnommen werden.

Diagramm 3: Häufigkeitsverteilung zusätzliche arthroskopische Maßnahmen bei medial-öffnender HTO



3.2 Radiologisches Outcome

In unserer retrospektiven Analyse werden zur Beurteilung des radiologischen Outcomes die geometrischen Parameter anhand der vorliegenden Röntgenbilder des Kollektivs bestimmt und ausgewertet. In den folgenden Darstellungen bedeutet ein negatives Vorzeichen ein Genu varum. Ein positiver Wert gibt eine valgische Beinachse an.

3.2.1 Beinachse

Im gesamten Kollektiv wurde im Mittel präoperativ eine varische Beinachse von $7,2^\circ$ in der Röntgen-Ganzbeinaufnahme gemessen. Der Median lag bei $6,9^\circ$ Varus (SD $3,1^\circ$). Das Maximum betrug 16° Varus, das Minimum 2° Varus. Postoperativ zeigte sich im Mittel eine valgische Beinachse von $1,1^\circ$ mit einem Median von $0,8^\circ$ Valgus (SD $2,9^\circ$). Die Extremwerte lagen bei 6° Varus und $5,3^\circ$ Valgus.

Unterscheidet man das Kollektiv in Bezug auf die durchgeführte Operationstechnik: ascendierende versus descendierende medial-öffnende HTO, zeigte sich, dass bei beiden Techniken, präoperativ wie erwartet ein Genu varum vorlag. Im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO war der Mittelwert der Varusdeformität mit $7,4^\circ$ (SD $2,8^\circ$) größer als im Kollektiv der descendierenden medial-öffnenden HTO mit $7,0^\circ$ (SD $3,5^\circ$), jedoch ohne Signifikanz. Die Extremwerte lagen bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO bei 2° und $13,7^\circ$ Varus, bei der descendierenden medial-öffnenden HTO hingegen bei 3° und 16° Varus.

Betrachtet man die postoperative Beinachse der beiden Patientenkollektive, wird deutlich, dass hier größere signifikante Unterschiede zwischen den beiden Operationstechniken bestehen. Bei der ascendierenden Operationstechnik lag die postoperative Beinachse im Mittel bei $2,5^\circ$ Valgus (SD $1,7^\circ$), wobei bei der descendierenden Technik postoperativ nahezu eine gerade Beinachse vorlag bei einem Mittelwert von $0,5^\circ$ Varus (SD $3,2^\circ$). Somit verblieb jedoch im Mittel eine Varusdeformität bei der descendierenden medial-öffnenden HTO, wobei der Median eine valgische Beinachse von $0,5^\circ$ zeigte.

Der Tag an dem die Bestimmung der postoperativen Beinachse erfolgte, unterscheidet sich jedoch in beiden Kollektiven stark voneinander. Bei der ascendierenden Technik wurde im Mittel am 101. postoperativen Tag die Röntgen-Ganzbeinaufnahme durchgeführt, bei der descendierenden medial-öffnenden HTO

am 287. postoperativen Tag.

Auch die postoperativen Extremwerte unterscheiden sich in beiden Kollektiven. Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO lag die Beinachse zwischen $0,1^\circ$ und 5° Valgus. Die descendierende Technik wies postoperativ Extremwerte zwischen $6,0^\circ$ Varus und $5,3^\circ$ Valgus auf und hatte somit eine viel größere Spannweite. Jedoch muss hier erläutert werden, dass bei einem Patienten - aufgrund eines lateralen Knorpelschadens - von einer Überkorrektur der Beinachse abgeraten wurde, so dass die Beinachse von präoperativ $12,0^\circ$ Varus auf $6,0^\circ$ Varus korrigiert wurde. Bei einem weiteren Patienten wurde aus demselben Grund auch keine Überkorrektur, sondern eine Neutralstellung der Beinachse angestrebt. Dies können somit auch Gründe sein, warum der Mittelwert der postoperativen Beinachse der descendierenden medial-öffnenden HTO im Bereich des Varus liegt. Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigte, dass es sich in beiden Kollektiven - in Bezug auf die Variable prä- und postoperative Beinachse - um eine Normalverteilung handelt.

3.2.2 Osteotomiespaltgröße

Die angestrebte postoperative Beinachse wird mit Hilfe der präoperativen Planung nach Miniaci geplant. In den Operationsberichten wurde die sich daraus ergebende Größe der medialen Öffnung des Osteotomiespalts dokumentiert.

In der Auswertung des gesamten Kollektivs der medial-öffnenden HTO zeigt sich, dass der Osteotomiespalt zwischen 5 mm und 18 mm aufgeklappt wurde. Der Mittelwert betrug 9,6 mm (SD 3,4 mm).

Betrachtet man die beiden Kollektive getrennt voneinander zeigten sich nur geringe Unterschiede bezüglich der Osteotomiespalthöhe. Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO betrug die Öffnung des Osteotomiespalts im Mittel 9,9 mm (SD 3,4 mm) und bei der descendierenden medial-öffnenden HTO 9,3 mm (SD 3,6 mm). Im Durchschnitt erfolgte somit eine geringgradig größere Aufklappung des Osteotomiespalts bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO. Die Aufklappung der ascendierenden medial-öffnenden HTO lag zwischen 6 mm und 18 mm, bei der descendierenden medial-öffnenden HTO lag eine Spannweite von 5 mm bis 16 mm vor.

3.2.3 Posteriorer tibialer Slope

In unserer Arbeit legen wir als Normwert für den posterioren tibialen Slope einen Wertebereich zwischen 5° und 11° fest (Akoto et al., 2020; Krause et al., 2018).

In 47 % lag ein präoperatives seitliches Röntgenbild des Kniegelenks vor, anhand dessen der posteriore tibiale Slope bestimmt wurde. Betrachtet man den posterioren tibialen Slope des gesamten Kollektivs präoperativ lag der Mittelwert bei $9,5^\circ$ und der Median bei $8,8^\circ$ (SD $2,7^\circ$). Die Extremwerte lagen präoperativ zwischen $5,5^\circ$ und $14,5^\circ$. In 35 % lag der posteriore tibiale Slope präoperativ außerhalb des Normwertbereiches von 5° und 11° . Wobei alle pathologischen Werte über 11° lagen und somit eine vermehrte Neigung nach caudal zeigten. Es gab keinen posterioren tibialen Slope, der unter 5° lag und somit zu flach war. Die pathologischen Werte kamen doppelt so häufig im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO im Vergleich zur descendierenden medial-öffnenden HTO vor.

Postoperativ lag der Mittelwert des gesamten Kollektivs für den posterioren tibialen Slope bei $8,6^\circ$ (SD $1,5^\circ$). Die mittlere Differenz – und somit die Veränderung zwischen prä- und postoperativ – lag bei $-0,5^\circ$, was bedeutet, dass der posteriore tibiale Slope flacher geworden war im Vergleich zum präoperativen Wert. Die postoperativen Extremwerte lagen zwischen $4,9^\circ$ und $14,4^\circ$ für den posterioren tibialen Slope und somit nicht alle im Normwertbereich.

Bei der differenzierten Betrachtung der beiden Kollektive zeigte sich im Vergleich des posterioren tibialen Slopes, dass bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO der präoperative Mittelwert $9,1^\circ$ (SD $2,9^\circ$) betrug und somit um $1,0^\circ$ geringer (flacher) war, als bei der descendierenden medial-öffnenden HTO (Mittelwert $10,1^\circ$, SD $2,5^\circ$), jedoch nicht signifikant. Die postoperativen Mittelwerte lagen im ähnlichen physiologischen Bereich: ascendierende medial-öffnende HTO $8,7^\circ$ (SD $1,9^\circ$), descendierende medial-öffnende HTO $8,5^\circ$ (SD $0,8^\circ$).

Betrachtet man die prä- und direkt postoperativen Werte des posterioren tibialen Slopes der ascendierenden medial-öffnenden HTO, war der posteriore tibiale Slope durch die Operation um $0,4^\circ$ kleiner und somit flacher geworden. Bei der descendierenden medial-öffnenden HTO ist die Differenz der prä- und postoperativen Mittelwerte größer. Auch hier ist der Slope postoperativ kleiner und somit flacher als präoperativ. Im Vergleich prä- zu postoperativ ist der posteriore

tibiale Slope somit bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO tendenziell flacher geworden als bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO.

Im weiteren Verlauf kam es bei beiden Techniken zur Zunahme des posterioren tibiale Slope und somit zum Absinken nach caudal.

Im Zeitraum 6 Wochen postoperativ wurden Patienten mit einer ascendierenden medial-öffnenden HTO und Patienten mit deszendierender medial-öffnender HTO mittels seitlichen Röntgenbild nachuntersucht (ausgenommen die direkt postoperative radiologische Kontrolle am zweiten postoperativen Tag). In diesem Zeitraum ergab sich für das ascendierende Kollektiv ein Mittelwert von $8,9^\circ$ (SD $0,8^\circ$) für den posterioren tibialen Slope. Die Differenz im Vergleich zum postoperativen Wert dieses Kollektivs zeigte, dass im Mittel der posteriore tibiale Slope um $0,4^\circ$ nach caudal abgesunken war.

Für das deszendierende Kollektiv ergab sich ein Mittelwert von $8,5^\circ$ (SD $0,6^\circ$) für den posterioren tibialen Slope in diesem Zeitraum. Der Mittelwert hatte sich im Vergleich zum vorherigen, postoperativen Wert um $0,6^\circ$ nach caudal verändert. Der durchschnittliche Tag der Bestimmung lag bei 35 Tagen und war somit früher als bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO (Mittelwert 41 Tage).

Es liegt somit tendenziell eine größere Absenkung bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO als bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO in den ersten 6 Wochen in Bezug auf den posterioren tibialen Slope vor. In diesem Zeitraum soll noch keine Vollbelastung des operierten Beins stattfinden.

Auch in den beiden Kollektiven bei denen der posteriore tibiale Slope im Zeitraum zwischen 6 und 12 Wochen postoperativ bestimmt wurde, zeigte sich, dass der Slope weiter nach caudal abgefallen war und somit steiler geworden war. Im dem Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO lag der Mittelwert des posterioren tibialen Slopes für diesen Zeitraum bei $9,9^\circ$ (SD $2,9^\circ$). Die Slopendifferenz zum vorherigen Wert lag bei 1° und der durchschnittliche Bestimmungszeitpunkt lag bei 8 Wochen postoperativ.

Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der Mittelwert des posterioren tibialen Slopes bei $9,3^\circ$ (SD $0,5^\circ$). Die mittlere Slopendifferenz zum vorherigen Wert lag bei $0,3^\circ$ und war somit tendenziell geringer als bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO. Der durchschnittliche Bestimmungszeitpunkt lag bei 7,4 Wochen postoperativ.

Im Zeitraum von 3 Monaten bis 6 Monate postoperativ zeigt sich bei der aszendierenden medial-öffnenden Technik eine geringere Dynamik bei der Veränderung des posterioren tibialen Slopes. Der Mittelwert lag bei $8,9^\circ$ (SD $1,1^\circ$) und somit weiterhin im physiologischen Bereich. Der mittlere Bestimmungzeitpunkt lag bei 4,1 Monaten. Die Differenz zum vorherig bestimmten Wert des posterioren tibialen Slopes betrug lediglich $0,1^\circ$ und zeigte somit nahezu kein weiteres Absinken.

Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der durchschnittliche posteriore tibiale Slope in diesem Zeitraum bei $9,2^\circ$ (SD $0,6^\circ$). Die mittlere Slopendifferenz lag im Vergleich zur vorherigen Bestimmung bei $0,4^\circ$. Der Slope fiel in diesem Zeitraum somit tendenziell stärker ab als bei der aszendierenden Technik. Der mittlere Bestimmungzeitpunkt lag bei 4,2 Monaten.

3.2.4 Modifizierter RUST-Score

Der modifizierte RUST-Score wird zur Beurteilung der knöchernen Durchbauung des tibialen Osteotomiespalts herangezogen.

Da es sich um eine retrospektive Analyse handelt und die Röntgenverlaufskontrollen nicht zu regelmäßigen, geplanten Zeitpunkten erfolgten, wurden zeitliche Abschnitte gewählt und in Gruppen zusammengefasst. Die direkte postoperative Röntgenkontrolle am 2. postoperativen Tag wurde in der anschließenden Analyse zur Bewertung der Ossifikation sinnvollerweise nicht mitherangezogen.

Modifizierter RUST-Score in Abhängigkeit des postoperativen Bestimmungszeitpunktes:

3. postoperativer Tag bis 6 Wochen postoperativ

Im Zeitraum zwischen dem 3. und 42. postoperativen Tag, und somit in den ersten 6 Wochen postoperativ, zeigt sich im Röntgen des Kollektivs der ascendierenden medial-öffnenden HTO ein Mittelwert des modifizierten RUST-Scores von 3,8 Punkten. Ein modifizierter RUST-Score von fast 4 Punkten zeigt die Tendenz, dass somit bereits in einer der herangezogenen Kortikales eine Kallusbildung begonnen hat. Der durchschnittliche Bestimmungszeitpunkt dieses Kollektivs war der 41. postoperative Tag. Die mittlere Osteotomiespalthöhe lag bei 9,2 mm.

Bei der Betrachtung der descendierenden medial-öffnenden HTO in diesem Zeitraum lag der durchschnittliche Bestimmungszeitpunkt etwas früher (35. postoperativer Tag). Der Mittelwert des modifizierten RUST-Scores lag auch hier bei 3,8 Punkten. Die Aufklapphöhe des Osteotomiespalts war mit 6,8 mm im Durchschnitt tendenziell kleiner als bei dem Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO.

6 bis 12 Wochen postoperativ

Im Zeitraum zwischen der 6. bis 12. postoperativen Woche lag der Mittelwert des modifizierten RUST-Scores beim Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO bei 4,6 Punkten. Im Durchschnitt erfolgt die Bestimmung nach 8,3 Wochen. Der Mittelwert der Osteotomiespaltöffnung lag bei 12,6 mm.

Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der Mittelwert des modifizierten RUST-Scores in diesem Zeitraum bei 4,3 Punkten und war somit etwas geringer, wobei die Bestimmung im Mittel schon nach 7,6 Wochen erfolgte. Die durchschnittliche Öffnung der Osteotomie war mit 10,0 mm sogar tendenziell kleiner als im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO. Der modifizierte RUST-Score von 4 bis 5 Punkten repräsentiert den Beginn der Verknöcherung, welcher im Zeitraum 6 bis 12 Wochen postoperativ beginnt.

3 bis 6 Monaten postoperativ

Im Zeitraum zwischen dem 3. bis 6. Monat postoperativ lag der Mittelwert des modifizierten RUST-Scores des Kollektivs der ascendierenden medial-öffnenden HTO bei 6 Punkten, wobei der mittlere Bestimmungszeitpunkt bei 4,5 Monaten lag. Die durchschnittliche Öffnungshöhe des Osteotomiespalts lag bei 9,8 mm.

Beim Kollektiv der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der modifizierte RUST-Score - im Zeitraum zwischen einem viertel und halben Jahr postoperativ - bei 5,9 Punkten und somit nahezu identisch wie bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO. Der mittlere Bestimmungszeitpunkt lag etwas später, bei 4,7 Monaten. Die durchschnittliche Öffnung des Osteotomiespalts war etwas größer und lag bei 10,2 mm.

Nach 6 Monate bis 12 Monate postoperativ

Im Zeitraum 6 bis 12 Monate postoperativ lag der Median des modifizierten RUST-Scores des Kollektivs der ascendierenden medial-öffnenden HTO bei 9 Punkten. Der Mittelwert lag bei 7,7 Punkten, was durch die verzögerte Knochenheilung eines Patienten bedingt ist. Der durchschnittliche Bestimmungszeitpunkt erfolgte nach 8,5 Monaten.

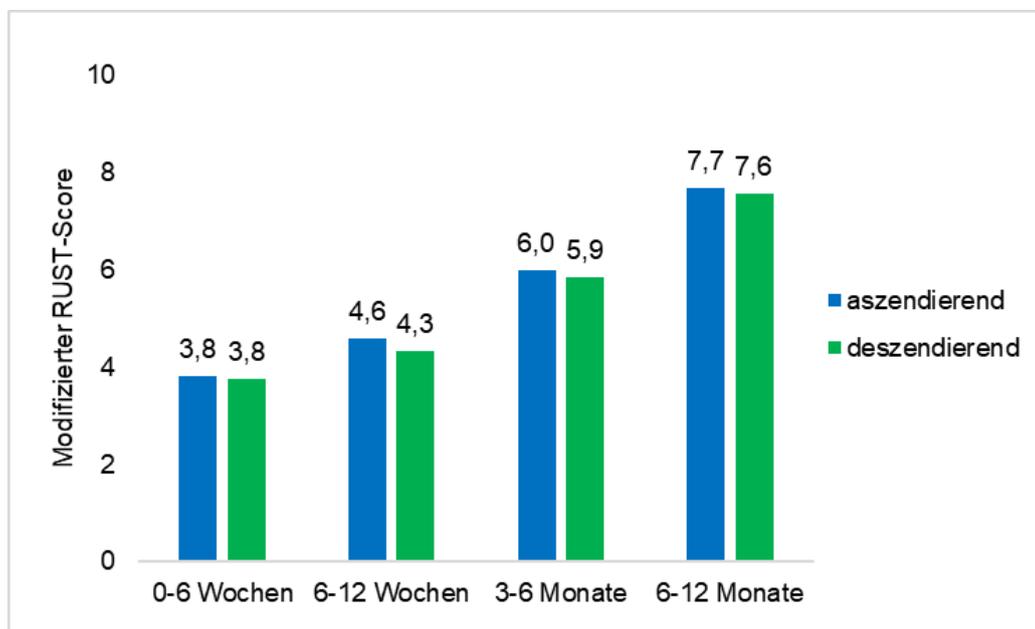
Im Kollektiv der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der Median des modifizierten RUST-Scores bei 8 Punkten und der Mittelwert geringfügig niedriger, bei 7,6 Punkten. Die Bestimmung erfolgte durchschnittlich nach 9,6 Monaten und somit tendenziell später als beim Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO.

Der hier jeweils fast erreichte modifizierte RUST-Score von 8 Punkten bedeutet eine nahezu vollständige Verknöcherung. Alle drei zu bewertenden Kortikales haben

Kallus gebildet und nur bei einer Kortikalis ist der Frakturspalt im Röntgenbild zu sehen. Dieses wurde bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO im Mittel tendenziell früher erreicht als bei der descendierenden medial-öffnenden HTO.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass der modifizierte RUST-Score und somit die knöcherne Ausheilung der Osteotomie in beiden Operationstechniken im Zeitverlauf ähnlich verläuft. Jedoch sind die Mittelwerte des modifizierten RUST-Scores im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO in den oben genannten Zeiträumen geringfügig höher und können somit auf eine schnellere Verknöcherung hinweisen (s. Diagramm 4), jedoch ohne Signifikanz.

Diagramm 4: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte des modifizierten RUST-Scores



Modifizierter RUST-Score in Abhängigkeit des Punktwertes:

Der modifizierte RUST-Score lässt Rückschlüsse auf den Grad der Verknöcherung bzw. der Durchbauung des Osteotomiespalts zu. Zu welchem Zeitpunkt welcher Punktwert des modifizierten RUST-Score erreicht wurde wird in den folgenden Gruppierungen verdeutlicht.

RUST-Score 3

Ein modifizierter RUST-Score von 3 Punkten entspricht dem Minimum und ist somit der kleinste Wert, der keinerlei Ossifikation repräsentiert und immer direkt nach der Operation besteht. Alle drei zu bewertenden Kortikales zeigen eine Frakturlinie ohne Kallusbildung. Bei der Auswertung wurden die Röntgenbilder, die direkt am 1. bis 3. postoperativen Tag erfolgten, nicht miteinbezogen, da es hier noch zu keinerlei Kallusbildung gekommen sein kann.

Im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO lag der Mittelwert des Bestimmungszeitpunktes, bei dem ein modifizierter RUST-Score von noch 3 Punkten festgestellt wurde, bei 40 Tagen. Im Kollektiv der descendierenden medial-öffnenden HTO lag der durchschnittliche Bestimmungszeitpunkt bei 67 Tagen. Es lag somit tendenziell deutlich länger kein Anzeichen einer Ossifikation vor. Das könnte daran liegen, dass durch einen Patienten mit verzögerter Knochenheilung und durch einen Patienten mit einer Pseudarthrose der Durchschnittswert des Kollektivs mit einer descendierenden medial-öffnenden HTO erhöht wurde. Bei beiden Techniken wurde die Osteotomie um 8,0 mm (SD ascendierend 1,4 mm, descendierend 2,6 mm) im Durchschnitt aufgeklappt.

RUST-Score 4

Bei einem modifizierten RUST-Score von 4 Punkten lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt der ascendierenden medial-öffnenden HTO bei 48 Tagen und die Osteotomiespaltöffnung bei 10,5 mm (SD 3,0 mm). Bei der descendierenden medial-öffnenden HTO lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt bei 43 Tagen. Die Osteotomiespaltöffnung bei 9,5 mm (SD 2,1 mm). Der modifizierte RUST-Score von 4 Punkten ist somit durchschnittlich knapp eine Woche früher bei der descendierenden Technik erreicht worden.

RUST-Score 5

Bei einem modifizierten RUST-Score von 5 Punkten lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt des Kollektivs mit einer aszendierenden medial-öffnenden HTO bei 54 Tagen und die Ostetomiespaltöffnung bei 12 mm (SD 8,5 mm). Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt bei 65 Tagen. Die Ostetomiespaltöffnung bei 9,6 mm (SD 4,0 mm).

RUST-Score 6

Bei einem modifizierten RUST-Score von 6 Punkten lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt der aszendierenden medial-öffnenden HTO bei 3,8 Monaten und die Ostetomiespaltöffnung bei 11,8 mm (SD 3,2 mm). Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt bei 4,9 Monaten. Die Ostetomiespaltöffnung bei 8,8 mm (SD 1,7 mm).

RUST-Score 7

Es gibt keinen Patienten aus dem Kollektiv der aszendierenden medial-öffnenden HTO bei dem ein modifizierter RUST-Score von 7 Punkten bestimmt wurde. Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt für einen modifizierten RUST-Score von 7 Punkten bei 14,8 Monaten.

RUST-Score 8

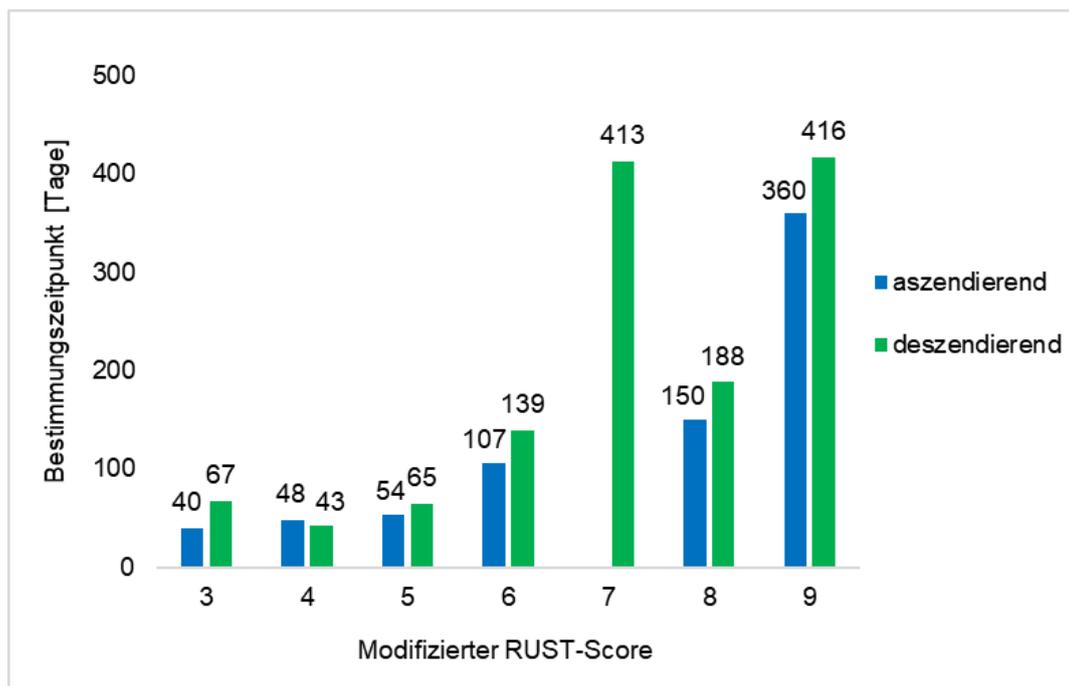
Im Kollektiv der aszendierenden medial-öffnenden HTO wurde nach 5,4 Monaten ein modifizierter RUST-Score von 8 Punkten erreicht. Die Ostetomiespalthöhe betrug 9 mm. Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO lag der mittlere Bestimmungszeitpunkt bei 6,7 Monaten und die Ostetomiespaltöffnung bei 10,3 mm (SD 3,9 mm).

RUST-Score 9

Bei einem modifizierten RUST-Score von 9 Punkten liegt der mittlere Bestimmungszeitpunkt der aszendierenden medial-öffnenden HTO bei 12,8 Monaten und die Ostetomiespaltöffnung bei 8,3 mm (SD 2,1 mm). Bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO liegt der mittlere Bestimmungszeitpunkt bei 14,8 Monaten. Die Ostetomiespaltöffnung bei 7,9 mm (SD 2,3).

Insgesamt wird deutlich, dass bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO tendenziell ein höherer modifizierter RUST-Score früher erreicht wird, als bei der descendierenden medial-öffnenden HTO. Die Verknöcherung nach einer descendierenden medial-öffnenden HTO dauert im Durchschnitt in unserem Kollektiv somit länger (s. Diagramm 5). Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

Diagramm 5: Modifizierter RUST-Score in Abhängigkeit des durchschnittlichen Bestimmungzeitpunktes



3.2.5 Korrelationen

Die folgenden Korrelationsanalysen zeigen auf, inwieweit die unterschiedlich erhobenen Parameter miteinander korrelieren (s. Diagramm 6).

Hierbei beschreibt der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson (r) den Zusammenhang und der p -Wert die Signifikanz. Ist die Korrelation der zu untersuchenden Parameter signifikant, muss dennoch beurteilt werden, ob der Zusammenhang groß genug ist, um als bedeutend beurteilt werden zu können. Die Einteilung von Cohen (Cohen, 1992) beschreibt dieses als Angabe der Effektstärke (Schwarz & Bruderer Enzler, 2021).

$r = 0,10$ entspricht einem schwachen Effekt

$r = 0,30$ entspricht einem mittleren Effekt

$r = 0,50$ entspricht einem starken Effekt

Korrelationsanalyse der Beinachsenveränderung und Veränderung des posterioren tibialen Slopes präoperativ zu postoperativ

Die präoperativen zu postoperativen Veränderungen der Beinachse und des posterioren tibialen Slopes wurden daraufhin untersucht, ob diese miteinander korrelieren (s. Diagramm 6 a).

Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO ist ersichtlich, dass zwischen der Beinachsenveränderung (präoperativ zu postoperativ) und der Veränderung des posterioren tibialen Slopes ein Zusammenhang besteht, jedoch ohne statistische Signifikanz ($r = 0,1$; $p = 0,7$). Das bedeutet tendenziell: Je größer die Veränderung der Beinachse ist, desto größer ist die Slopeveränderung.

Auch bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO besteht ein nicht signifikanter Zusammenhang zwischen der Beinachsenveränderung und der Veränderung des posterioren tibialen Slopes ($r = 0,4$; $p = 0,5$). Die Slopeveränderung bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO ist tendenziell geringer als bei der deszendierenden Operationstechnik.

Korrelationsanalyse der Beinachsenveränderung präoperativ zu postoperativ und der Höhe des Osteotomiespalts

Die präoperativen zu postoperativen Veränderungen der Beinachse und Höhe der Aufklappung der Osteotomie werden daraufhin untersucht, ob diese miteinander korrelieren (s. Diagramm 6 b). Wir gehen davon aus, dass eine Korrelation besteht und die Effektstärke hoch ist, denn das Ziel der Aufklappung ist die Veränderung der Beinachse.

Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO besteht ein Zusammenhang zwischen der Beinachsenveränderung und der Höhe der Aufklappung der tibialen Osteotomie. Die Korrelation ist mit $p = 0,003$ signifikant. Die Effektstärke nach Cohen zeigt bei einem Korrelationskoeffizienten nach Pearson von 0,7 einen starken Effekt.

Auch bei der descendierenden medial-öffnenden HTO besteht ein positiver Zusammenhang zwischen der Beinachsenveränderung und der Höhe des Osteotomiespalts ($r = 0,7$; $p = 0,01$). Auch hier zeigt die Effektstärke nach Cohen - bei einem identischen Korrelationskoeffizienten nach Pearson von 0,7 - einen starken, statistisch hochsignifikanten Effekt.

Korrelationsanalyse der Höhe des Osteotomiespalts und des modifizierten RUST-Score

Die Korrelation zwischen der Höhe der Aufklappung der Osteotomie und die zeitliche Dauer bis ein modifizierter RUST-Score von mindestens 7 Punkten erreicht ist, wird untersucht (s. Diagramm 6 c). Bei einem modifizierten RUST-Score von mindestens 7 Punkten kann davon ausgegangen werden, dass in mindestens zwei der drei Kortikales Kallus vorhanden ist und dort keine Frakturlinie mehr zu sehen ist. Hier wird davon ausgegangen, dass ein stabiles Knochengüst entsteht. Der Korrelationskoeffizient wurde nach Spearman berechnet, da im Streudiagramm kein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Variablen festgestellt wurde und daher die Methode nach Pearson nicht so geeignet erscheint (Schwarz & Bruderer Enzler, 2021).

Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO besteht ein negativer nicht signifikanter Zusammenhang zwischen der Höhe der Aufklappung und der zeitlichen Dauer bis ein modifizierter RUST-Score von mindestens 7 Punkten

erreicht wird ($r = -0,2$; $p = 0,8$). Der negative Zusammenhang - je größer die Aufklapphöhe, desto kürzer ist die Dauer bis ein modifizierter RUST-Score von mindestens 7 Punkten erreicht wird – erscheint unerwartet.

Auch bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO zeigt sich ein nicht signifikanter negativer Zusammenhang zwischen der Höhe der Osteotomieaufklappung und der Dauer bis zum Erreichen eines modifizierten RUST-Scores von mindestens 7 Punkten ($r = -0,2$; $p = 0,6$). Weitere Untersuchungen zur Beurteilung der Ossifikationsdauer in Korrelation zur Höhe des Osteotomiespalts sollten folgen.

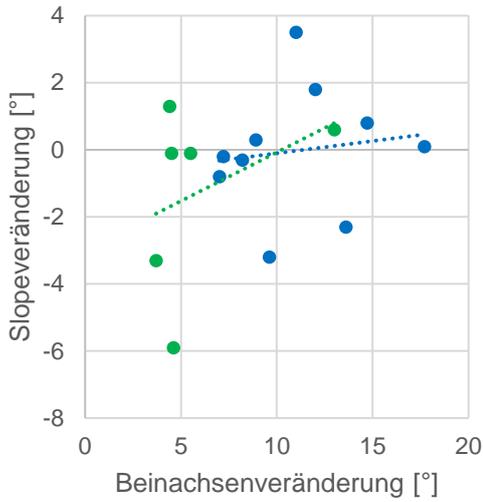
Korrelationsanalyse der Veränderung des posterioren tibialen Slopes präoperativ zu postoperativ und der Höhe des Osteotomiespalts

Die Veränderungen des posterioren tibialen Slopes präoperativ zu postoperativ und die Höhe des Osteotomiespalts werden daraufhin untersucht, ob diese miteinander korrelieren (s. Diagramm 6 d).

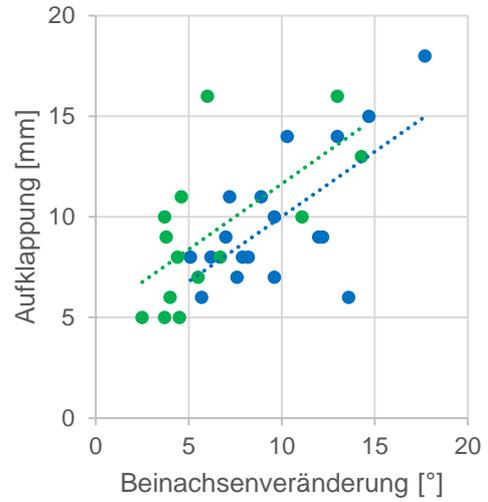
Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO besteht zwischen der Slopeveränderung und der Höhe der Osteotomieaufklappung ein positiver Zusammenhang, jedoch ohne statistische Signifikanz ($r = 0,5$; $p = 0,2$). Das bedeutet tendenziell: Je größer die Aufklappung der Osteotomie ist, desto größer ist die Slopeveränderung.

Auch bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO besteht zwischen der Slopeveränderung und der Höhe des Osteotomiespalts ein positiver, nicht signifikanter Zusammenhang ($r = 0,1$, $p = 0,9$).

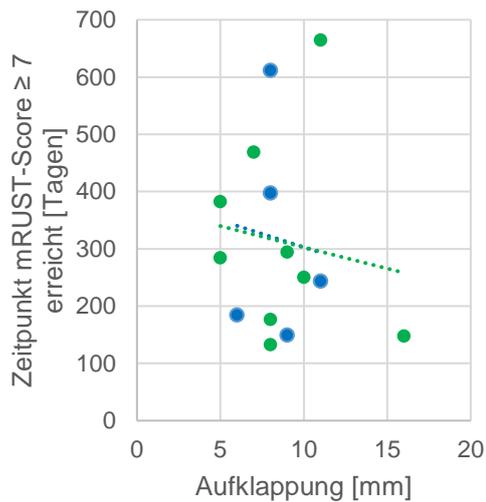
Diagramm 6: Korrelationsanalysen aszendierende und deszendierende medial-öffnende HTO mit Trendlinie



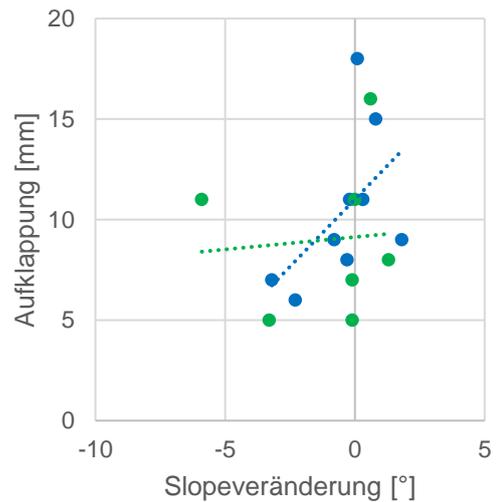
a)



b)



c)



d)

a) Korrelationsanalyse der Beinachsenveränderung und Veränderung des posterioren tibialen Slopes präoperativ zu postoperativ

b) Korrelationsanalyse der Beinachsenveränderung und der Aufklapphöhe

c) Korrelationsanalyse der Aufklapphöhe und mRUST-Score ≥ 7

d) Korrelationsanalyse der Slopeveränderung und der Aufklapphöhe

3.3 Klinisches Outcome

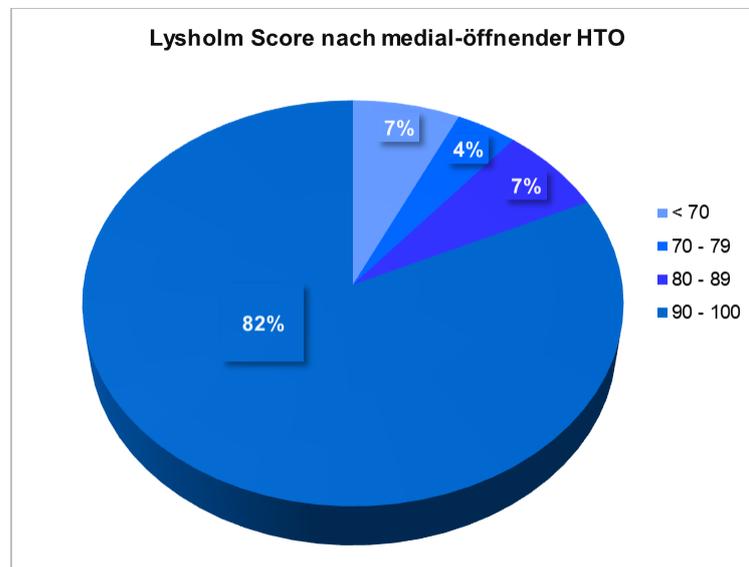
Gesamtes Kollektiv

Mit Hilfe des Lysholm Scores wurde das subjektive Befinden der Patienten nach erfolgter medial-öffnender HTO erfasst. Der maximale Punktwert von 100 Punkten gibt die größte subjektive Zufriedenheit wieder.

Betrachtet man das gesamte Kollektiv unabhängig von der Operationsmethode zeigte sich eine sehr hohe subjektive Zufriedenheit. Eine deutliche Mehrheit der Patienten war sehr zufrieden laut der abgefragten Kriterien (Hinken, Belastung, Blockierung, Instabilität, Schmerz, Schwellung, Treppensteigen und Hocken).

Der Median des Lysholm Scores lag bei 100 Punkten, der Mittelwert lag bei 94 Punkten. 61 % des gesamten Kollektivs gaben 100 Punkte an. Bei 82 % des Kollektivs ergab sich ein Punktwert von 90 Punkten oder mehr (s. Diagramm 7). Die minimal vergebene Punktzahl des Lysholm Scores lag im gesamten Kollektiv bei 54 Punkten. Das Maximum war die volle Punktzahl von 100 Punkten.

Diagramm 7: Häufigkeitsverteilung Lysholm Score gesamtes Kollektiv nach medial-öffnender HTO



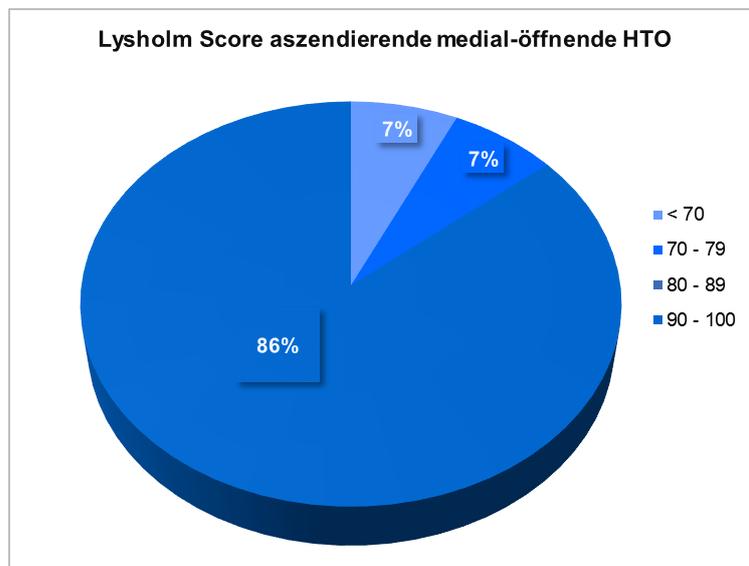
Zu berücksichtigen ist jedoch, dass es sich nicht immer um reine medial-öffnende HTO gehandelt hatte. Häufig wurden zusätzlich noch andere Eingriffe wie z.B. eine Operation am Meniskus durchgeführt. Dadurch können Angaben zur Blockierungserscheinung, Hocken und weitere, nicht auf die reine Operation der

medial-öffnenden HTO zurückgeführt werden. Betrachtet man die acht - mit dem Lysholm Score abgefragten - Parameter getrennt voneinander zeigte sich, dass alle Patienten, unabhängig von der Operationstechnik, das Bein vollständig belasten konnten. Kein Patient gab an zu Hinken. Keine Schmerzen (25 Punkte) oder unregelmäßige und geringe Schmerzen während schwerer Anstrengung (20 Punkte) wurden von 82 % der befragten Patienten angegeben. Ständige Schmerzen wurden von keinem Patienten angegeben. Hieraus lässt sich ableiten, dass eine sehr hohe Zufriedenheit im Patientenkollektiv nach erfolgter medial-öffnender HTO besteht.

Aszendierende medial-öffnende HTO

Das Diagramm 8 zeigt das Kollektiv der aszendierenden medial-öffnenden HTO und die anteilige Verteilung der vergebenen Punkte. Es wird deutlich, dass die Mehrheit der Patienten einen hohen bis sehr hohen Lysholm Score angegeben hatten. 86 % geben einen Punktwert von 90 bis 100 Punkten an. Die subjektive Zufriedenheit war somit sehr groß. Im Durchschnitt wurden 94 Punkte vergeben. Der Median lag sogar bei 100 Punkten. Als minimaler Lysholm Score wurden 54 Punkte vergeben. Auch gaben 86 % des Kollektivs an, keine Schmerzen oder nur unregelmäßig und geringe Schmerzen während schwerer Anstrengung zu verspüren.

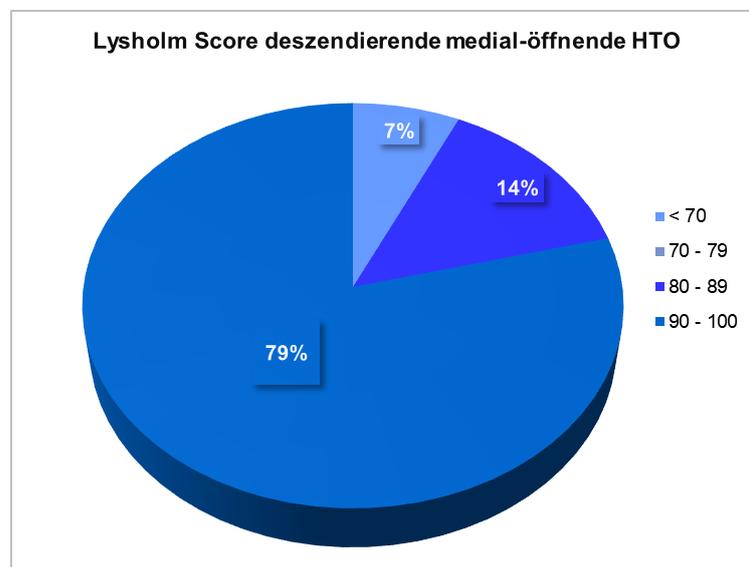
Diagramm 8: Häufigkeitsverteilung Lysholm Score nach aszendierender medial-öffnender HTO



Deszendierende medial-öffnende HTO

Auch bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO zeigte der Lysholm Score, dass die Patienten nach der Operation subjektiv zufrieden waren. Der Median lag in diesem Kollektiv bei 100 Punkten (Mittelwert 94 Punkte). Einen gesamten Lysholm Score von 90 oder mehr Punkten vergaben 79 % der Patienten (s. Diagramm 9). Das Minimum lag bei 61 Punkten. Keine Schmerzen oder nur unregelmäßige oder geringe Schmerzen während schwerer Anstrengung wurden von 79 % des Kollektivs angegeben.

Diagramm 9: Häufigkeitsverteilung Lysholm Score nach deszendierender medial-öffnender HTO



Die Patienten, die eine deszendierende medial-öffnende HTO erhielten, waren somit - laut Lysholm Score - insgesamt etwas weniger zufrieden als bei der aszendierenden Operationstechnik. Generell besteht aber eine hohe Zufriedenheit bei den Patienten nach der aszendierenden und deszendierenden medial-öffnenden HTO.

4 Diskussion

In der Fachliteratur wird bisher mehrheitlich nicht zwischen den beiden unterschiedlichen Operationstechniken der aufsteigenden medial-öffnenden HTO und der absteigenden medial-öffnenden HTO unterschieden. Häufig wurden bisher nur die Operationstechniken der lateral-schließenden HTO mit der allgemeinen medial-öffnenden HTO - ohne weitere Spezifizierung und Differenzierung - verglichen.

Im Allgemeinen kann das insgesamt positive und zufriedenstellende Ergebnis der medial-öffnenden hohen tibialen Umstellungsosteotomie hervorgehoben werden. Insbesondere in Bezug auf die gelenkerhaltende Chirurgie ist dieses von großer Bedeutung.

Die differenzierte Betrachtung der beiden unterschiedlichen Operationstechniken - aufsteigende medial-öffnende HTO und die absteigende Technik der medial-öffnenden HTO - ist für die weitere Entwicklung und Verbesserung der Umstellungsosteotomie von hoher Bedeutung und wurde daher in dieser Arbeit untersucht.

Die nachfolgende Diskussion unserer Ergebnisse gliedert sich wie folgt:

- Zielwert der Valgisierung
- Posteriorer tibialer Slope nach medial-öffnender HTO
- Ossifikation im postoperativen Zeitverlauf
- Zeitpunkt der Materialentfernung
- Umgang mit der Osteotomielücke
- Einflussfaktoren auf die Ossifikation
- Korrelationen geometrischer Parameter
- Objektivierung der Patientenzufriedenheit
- Limitationen der Arbeit

Zielwert der Valgisierung

In unserer Untersuchung und Auswertung konnte nachgewiesen werden, dass es durch die medial-öffnende HTO zur Valgisierung der Beinachse bei Varusdeformität kommt. Das Ziel der medial-öffnenden HTO, die Entlastung der medialen Gelenkkomponente, wurde mit beiden Operationstechniken erreicht. Die Analyse

der radiologischen Parameter zeigt im Hinblick auf die Beinachse, dass präoperativ im Durchschnitt eine Varusdeformität von $7,2^\circ$ vorlag. Es lagen dabei nur geringe Unterschiede im Hinblick auf die beiden Kollektive der ascendierenden ($7,4^\circ$) und der descendierenden medial-öffnenden HTO ($7,0^\circ$) vor. Postoperativ zeigten sich größere Unterschiede bei den beiden Operationstechniken. Bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO lag ein Median mit einer valgischen Beinachse von $2,3^\circ$ vor, wohingegen bei der descendierenden medial-öffnenden HTO postoperativ nur ein geringgradigeres Genu valgum von $0,5^\circ$ vorlag. Es muss jedoch erwähnt werden, dass der Zeitpunkt der Röntgen-Ganzbeinaufnahme in den beiden Gruppen stark variierte. Auch die Extremwerte fallen aufgrund der beschränkten Größe des Kollektivs stärker ins Gewicht.

Einen einheitlichen Zielwert für die Beinachsenkorrektur bei einem Genu varum gibt es bisher nicht. In der Literatur variiert das Korrekturziel. Bei Hinterwimmer und Feucht liegt die Korrektur der Beinachse zwischen $1,7^\circ$ und $3,3^\circ$ Valgus in Abhängigkeit des Arthrosegrades (Hinterwimmer & Feucht, 2021). Der Arbeitskreis Knie der österreichischen Gesellschaft für Unfallchirurgie legt eine Beinachse von 3° Valgus als Zielwert fest (El Attal et al., 2018). In Zukunft sollten die Zielwerte für die Beinachsenkorrektur weiter analysiert und wenn erforderlich auch genauer definiert werden.

Die Größe des Osteotomiespalts und die damit verbundene Öffnung der Osteotomie steht im Zusammenhang mit dem Ausmaß der geplanten Beinachsenkorrektur. In unserer Klinik erfolgt die Planung der Beinachsenkorrektur nach Miniaci. Die Osteotomiespaltöffnung lag in unserem Kollektiv zwischen 5 mm und 18 mm. Der Median der beiden Operationstechniken lag bei 9 mm. Die durchschnittliche Öffnung bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO lag bei 9,9 mm und 9,3 mm im Kollektiv der descendierenden medial-öffnenden HTO. In der Literatur variiert die maximale Größe des Osteotomiespalts. Häufiger zur Diskussion steht jedoch, ob oder ab welcher Osteotomiespaltgröße, die entstandene Knochenlücke mit Ersatzmaterial gefüllt werden sollte. Auch dabei gehen die Meinungen in der Fachliteratur häufig auseinander und wird untenstehend weiter diskutiert. In unserer Klinik wird nahezu bei jeder medial-öffnenden HTO die entstandene Knochenlücke mit allogener Fremdspongiosa gefüllt, um eine größere Stabilität und schnellere Heilung zu erzielen, es sei denn, es wird von dem Patienten abgelehnt.

Posteriorer tibialer Slope nach medial-öffnender HTO

Der posteriore tibiale Slope bekommt immer mehr Beachtung und Bedeutung in Fachkreisen, insbesondere in der Bandchirurgie. Somit ist auch bei der medial-öffnenden HTO der posteriore tibiale Slope zu beachten. Durch das Wissen über die biomechanischen Gegebenheiten, weiß man, dass bei einem pathologisch vergrößerten Slope chronische Instabilitäten aufrechterhalten werden können. Der Normwert für den posterioren tibialen Slope variiert jedoch weiterhin in der Literatur (Pape et al., 2004). Auch ist nicht bekannt, ob ein pathologischer posteriorer tibialer Slope und somit ein zu stark nach caudal abfallendes Tibiaplateau - bei ansonsten gesunden Kniegelenken, insbesondere intakten Bandstrukturen - eine Relevanz hat. In der Fachliteratur hat der posteriore tibiale Slope bisher lediglich im Zusammenhang mit der Bandchirurgie vermehrt Beachtung erhalten, da es bei erhöhtem posterioren tibialen Slope ($> 13^\circ$) zur Auslockerung des vorderen Kreuzband-Transplantats kommen kann (Agneskirchner, Burkart and Imhoff, 2002). In unserer Untersuchung zeigte sich, dass bei 35 % des Kollektivs bereits präoperativ der posteriore tibiale Slope außerhalb unserer genannten Normwerte von 5° bis 11° lag. Wobei berücksichtigt werden muss, dass lediglich bei 47 % des gesamten Kollektivs ein präoperativer Slope untersucht wurde. Der präoperative Mittelwert lag bei $9,5^\circ$, der postoperative Mittelwert bei $8,6^\circ$ und somit lagen beide Werte im Normbereich. Die Patienten mit einem präoperativ pathologischen posterioren tibialen Slope erhielten doppelt so häufig eine ascendierende medial-öffnende HTO. Postoperativ war der posteriore tibiale Slope im Kollektiv der descendierenden medial-öffnenden HTO flacher (postoperativ $8,5^\circ$) - und somit weniger nach caudal abfallend - als bei der ascendierenden Technik (postoperativ $8,7^\circ$). Durch die medial-öffnende HTO war jedoch der posteriore tibiale Slope bei beiden Operationstechniken postoperativ flacher - weniger nach caudal abfallend – als präoperativ. Die weitere Dynamik und der zeitliche Verlauf - im Sinne eines nach caudal absinkenden Tibiaplateaus - war in beiden Kollektiven unterschiedlich. Nach einer medial-öffnenden HTO findet zunächst für 6 Wochen eine Teilbelastung unter Sohlenkontakt statt. Die Aufbelastung nach einer medial-öffnenden HTO zum Erreichen der vollen Belastung beginnt ab der 6. postoperativen Woche nach ärztlicher Kontrolle. Bei der descendierenden medial-öffnenden HTO kam es in den ersten 6 Wochen postoperativ zu einer größeren Veränderung des posterioren tibialen Slopes als bei der ascendierenden Operationstechnik, obwohl in dieser Zeit

noch nahezu keine Belastung stattgefunden hat. Im Zeitraum 6 bis 12 Wochen postoperativ kam es hingegen bei der ascendierenden medial-öffnenden-Technik zum tendenziell stärkeren Absinken des posterioren tibialen Slopes - im Vergleich zur descendierenden medial-öffnenden HTO. Man könnte daraus schließen, dass die Aufbelastung nach 6 Wochen bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO einen größeren Einfluss habe, als bei der descendierenden Operationstechnik. Im Zeitraum zwischen 3 bis 6 Monaten nach der medial-öffnenden HTO zeigten sich dann wiederum - im Vergleich der beiden Operationstechniken - ein tendenziell stärkeres Absinken des posterioren tibialen Slopes im Kollektiv der descendierenden medial-öffnenden HTO. Der Unterschied zum vorherigen postoperativen Wert betrug hier jedoch lediglich $0,4^\circ$, was klinisch als nicht relevant angesehen wird und auch einer gewissen Messungenauigkeit unterliegt.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die Kollektive im Hinblick auf die Revisionsbedürftigkeit unterscheiden. Bei der descendierenden medial-öffnenden HTO kam es zu zwei Revisionen, wohingegen im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO nur ein Patient revidiert werden musste. In diesen drei Fällen war es jedoch nie zu einer starken Veränderung des posterioren tibialen Slopes gekommen. Die Patienten, bei denen der posteriore tibiale Slope im Verlauf der Zeit stärker nach caudal abgesunken war, lagen auch weiterhin im physiologischen Bereich. Auch wurden sie klinisch nicht auffällig und wurden somit auch nicht revidiert.

In der Literatur herrscht mehrheitlich die Meinung vor, dass es durch die medial-öffnende HTO zu einer Zunahme des posterioren tibialen Slopes kommt (Brouwer et al., 2005; LaPrade et al., 2010; Nerhus et al., 2017; Nha et al., 2016). Laut Hinterwimmer und Feucht verändert sich der posteriore tibiale Slope um ca. $3 - 4^\circ$, wobei dies nicht mit der Veränderung in der Frontalebene korreliert (Hinterwimmer & Feucht, 2021). Hierbei wird jedoch nicht zwischen den beiden hier untersuchten unterschiedlichen Operationstechniken der medial-öffnenden HTO differenziert. Lediglich die chinesische Arbeitsgruppe um Xu et al. unterscheiden zwischen zwei Operationsmethoden, erstens der „Open-wedge-HTO“, die mit der ascendierenden medial-öffnenden HTO am ehesten übereinstimmt und zweitens der „modified distal tibial tubercle-high tibial osteotomy“, die vergleichbar mit der descendierenden medial-öffnenden HTO erscheint. Hier wird beschrieben, dass bei

der erstgenannten Technik der posteriore tibiale Slope zunimmt und bei der „modified distal tibial tubercle-high tibial osteotomy“ abnimmt (Xu et al., 2021).

Laut Hinterwimmer und Feucht kommt es bei der Closed-wedge Technik (schließenden Technik) zu einer Verminderung des posterioren tibialen Slopes (Hinterwimmer & Feucht, 2021). Auch Lobenhoffer berichten, dass bisher in der Literatur behauptet wurde, dass bei der Closed-wedge-HTO es zu einer Verminderung des posterioren tibialen Slopes kommt und umgekehrt. Er ist jedoch der Meinung, dass bei korrekter Technik und Stabilisierung der HTO, es zu keiner Veränderung kommt (Lobenhoffer, 2021). Auch Krause et al. kamen zu dem Ergebnis, dass bei regelrechter Operationstechnik es zu keiner Veränderung des posterioren tibialen Slopes kommt (Krause et al., 2018).

Es ist somit festzuhalten, dass in Zukunft bei der differenzierten Betrachtung der medial-öffnenden HTO - auch im Hinblick auf die Biomechanik - weiter ein Augenmerk auf den posterioren tibialen Slope gesetzt werden muss.

Ossifikation im postoperativen Zeitverlauf

Der Beurteilung der Ossifikation und deren Zeitverlauf ist auch hohe Priorität beizumessen. Der modifizierte RUST-Score dient in unserer Analyse zur Beurteilung der Verknöcherung des Osteotomiespalts. Bereits direkt nach der Umstellungsosteotomie ist eine Teilbelastung und einige Wochen später der Übergang zur Vollbelastung möglich. Die verwendeten winkelstabilen Plattensysteme ermöglichen die frühzeitige Belastung. In der Untersuchung von Lobenhoffer et al. kommt es durch das einliegende Osteosynthesematerial (Tomofix Platte, Fa. Synthes) zu keinem Repositionsverlust (Lobenhoffer et al., 2002). Die Beurteilung der Ossifikation und die Dauer bis zur Verknöcherung sollte unter Berücksichtigung der Belastung und des langfristigen Verlaufs nach einer medial-öffnenden HTO erfolgen, sowie unter Beachtung der unterschiedlichen Operationstechniken – der ascendierenden und descendierenden medial-öffnenden HTO.

In unserer Untersuchung stellte sich heraus, dass der Punktwert des modifizierten RUST-Scores - zu unterschiedlichen Bestimmungszeitpunkten - bei beiden Operationstechniken sich leicht unterscheidet. In beiden Kollektiven wurde im Zeitraum 6 bis 12 Wochen postoperativ bereits eine beginnende Verknöcherung gesehen. Im Mittel lag der modifizierte RUST-Score bei 4,6 Punkten bei der

aszendierenden medial-öffnenden HTO und bei 4,3 Punkten bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO. Auch nach 3 bis 6 Monaten gibt es leichte Unterschiede. Im Mittel betrug hier der modifizierte RUST-Score bei der aszendierenden Technik 6,0 Punkte im Vergleich zur deszendierenden Technik mit 5,9 Punkten. Nach 6 bis 12 Monaten lag der RUST-Score bei der aszendierenden medial-öffnenden HTO bei 7,8 Punkten und bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO bei 7,6 Punkten. Auch die umgekehrte Betrachtungsweise unter Gruppierung des modifizierten RUST-Score verdeutlicht, dass es in unserer Untersuchung bei der aszendierenden medial-öffnenden HTO zu einer früheren Verknöcherung des tibialen Osteotomiespalts kommt als nach einer deszendierenden medial-öffnenden HTO. Ein modifizierter RUST-Score von 8,0 Punkten - und somit eine nahezu vollständige Verknöcherung - wurde bei der aszendierenden Operationstechnik bereits nach 5,4 Monaten erreicht, bei der deszendierenden Operationstechnik nach 6,7 Monaten. Die beiden medial-öffnenden Osteotomietechniken unterscheiden sich somit bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Verknöcherung. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass in unserem Kollektiv der deszendierenden medial-öffnenden HTO mehr Röntgenbefunde eingeschlossen wurden als bei der aszendierenden Technik. Des Weiteren kam es bei der deszendierenden Technik, wie bereits erwähnt, zu zwei Revisionsoperationen und bei der aszendierenden Technik nur zu einer Revisionsoperation.

Bei der aszendierenden medial-öffnenden HTO kommt es trotz einer größeren Aufklappung des Osteotomiespalts (Mittelwert 9,9 mm) zu einer früheren knöchernen Heilung als bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO mit einer mittleren Öffnung der Osteotomie um 9,3 mm. Dies bedeutet auch die Möglichkeit zu einer früheren Materialentfernung.

Zeitpunkt der Materialentfernung

Es muss außerdem die Frage geklärt werden, ab wann - und bei welchem Wert - des modifizierten RUST-Scores die medial-öffnende Umstellungsosteotomie als geheilt und vollständig verknöchert gilt. Folglich muss geklärt werden, ab wann eine Materialentfernung möglich ist, ohne das Risiko eines Repositionsverlusts einzugehen.

In der Fachliteratur gibt es bisher wenige Untersuchungen, die eine Analyse der Ossifikation im Zeitverlauf bei medial-öffnender HTO durchgeführt haben. Vor allem gibt es bisher keinen einheitlich verwendeten Score zur Beurteilung der Verknöcherung. Häufig fußt die Beurteilung auf subjektiven Empfindungen der Autoren und nicht auf vergleichbaren Kriterien. Der modifizierte RUST-Score macht dies jedoch gut möglich. Die Anwendung eines einheitlichen Score-Systems zur Beurteilung der Verknöcherung - und somit zum internationalen Vergleich von Studien - ist in Zukunft notwendig und wünschenswert.

In unserer Klinik wurden mehr Materialentfernungen nach der deszendierenden medial-öffnenden HTO durchgeführt als nach einer ascendierenden medial-öffnenden HTO. Mehrere Ursachen für diese Unterschiede kommen hierfür in Frage. Man könnte vermuten, dass bei der deszendierenden Operationsmethode eher eine Materialentfernung durch den Patienten gewünscht wird, da neben der medialen winkelstabilen Platte unter anderem auch die Refixierung der Tuberositas tibiae mittels Schraube erfolgte, welche zusätzlich als Fremdmaterial wahrgenommen und als störend empfunden werden kann. Gegebenenfalls wurden noch weitere Materialentfernungen durchgeführt, die uns nicht bekannt sind. Im Durchschnitt erfolgte die Materialentfernung bei der ascendierenden Operationstechnik nach 8 Monaten und somit früher als bei der deszendierenden Technik, wo die Materialentfernung durchschnittlich nach 17 Monaten erfolgte. Zu berücksichtigen ist, dass es bei der deszendierenden Operationstechnik zu zwei verzögerten Knochenheilungen kam, weswegen die Plattenosteosynthese länger bis zur Ausheilung belassen wurde und dadurch die durchschnittliche Zeit bis zur Entfernung des Osteosynthesematerials sich verlängerte. Das Osteosynthesematerial kann auch länger auf Wunsch des Patienten oder aufgrund von anderen Ursachen länger belassen worden sein. Es ist jedoch festzuhalten, dass bei der ascendierenden Operationstechnik eine Materialentfernung bereits nach 8 Monaten möglich ist. Unserer Untersuchung zeigt, dass es im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO zu einer frühzeitigeren Verknöcherung bzw. höheren modifizierten RUST-Score kam als nach einer deszendierenden medial-öffnenden HTO.

Von Yokoyama et al. wird eine Heilung nach 6 Monaten postoperativ beschrieben, wobei hier lediglich ein Score ohne radiologische Kriterien angewendet wird und nur die Mobilität und Schmerzen der Patienten berücksichtigt (Yokoyama et al., 2016).

Auch Goshima et al. stellen fest, dass es bisher wenige Daten darüber gibt, ab wann eine Materialentfernung erfolgen kann, ohne dass es zu einem Repositionsverlust kommt. In deren Studie wurde das Osteotomiedreieck im anterior-posterioren Röntgenbild zur Beurteilung der Verknöcherung in 4 Zonen eingeteilt: lateral Zone 1, medial Zone 4, Zone 2 zwischen 25 % bis 50 % des lateralen Abschnitts. Eine Materialentfernung ohne Korrekturverlust sei möglich, sobald die Osteotomielücke mindestens Zone 2 erreicht hat und somit 25 % bis 50 % des lateralen Osteotomiespalts gefüllt sind (Goshima et al., 2019). Brinkmann et al. hingegen empfehlen eine Materialentfernung erst nach 1,5 Jahren, da häufig die Verknöcherung im Röntgenbild überschätzt werden würde, wenn man diese mittels Computertomographie nachkontrolliert (Brinkman et al., 2008). Dieser Aspekt sollte weiter untersucht werden. Staubli und Jacob sagen, dass 75 % der Osteotomielücke (5 - 20 mm) nach 6 bis 18 Monaten durchbaut ist (Staubli & Jacob, 2010). Brosset et al. berichten über eine Knochenheilung nach 4,5 Monaten (Brosset et al., 2011).

Van Houten et al. benutzen den modifizierten RUST-Score nach 6 Wochen und 3 Monaten als Vorhersagewert. Die Entwicklung des modifizierten RUST-Scores zwischen 6 Wochen und 3 Monaten sei entscheidend, ob und wie in diesem Zeitraum der modifizierte RUST-Score weiter ansteigt. Ein Anstieg um 1 Punkt verringert die Gefahr einer Non-union um 0,19 (Van Houten et al., 2014). Es wird jedoch nicht erläutert, ab welchem Punktwert des modifizierten RUST-Scores die knöcherne Heilung als Delay-union oder Non-union bezeichnet wird.

In einem „Meeting Abstract“ von Dornacher et al. vom Deutschen Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie und einer weiteren Veröffentlichung von Dornacher et al. 2021 wird von einer „verzögerten Heilung“ bei einem modifizierten RUST-Score von kleiner 7 Punkten im Zeitraum von 12 – 18 Monaten gesprochen (Dornacher et al., 2017). Dementsprechend sind 2 von 3 zu beurteilenden Kortikales nicht durchbaut.

Die unterschiedlichen Ergebnisse zeigen, dass die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen im Hinblick auf eine objektive, vergleichbare Beurteilung der Ossifikation und somit mögliche Empfehlung einer Materialentfernung besteht.

Umgang mit der Osteotomielücke

Es herrschen unterschiedliche Ansichten bezüglich des Umgangs mit der Osteotomielücke. Van Houten et al. empfehlen „Bone grafting“ im Falle eines RUST-Scores von 3 Punkten nach 3 Monaten (Van Houten et al., 2014). Eine Empfehlung bezüglich präventiver Anwendung von Spongiosa wird nicht erwähnt. Jung et al. haben in ihrer Studie nachgewiesen, dass es zu einer schnelleren Heilung der Osteotomie kommt, wenn der Osteotomiespalt mit Spongiosa gefüllt wird (Jung et al., 2019). Goshima et al. postulieren, dass es bei einer Osteotomielücke über 13 mm ohne Spongiosa zu einer verzögerten Knochenheilung kommt (Goshima et al., 2019). Auch Brinkmann et al. empfehlen bei der Verwendung von winkelstabilen Platten allogenen Knochen zu verwenden, wenn der Osteotomiespalt größer als 20 mm ist. Generell dauere die knöcherne Heilung zwischen 3 bis 12 Monaten (Brinkman et al., 2008). Jung et al. untersuchten unterschiedliche Materialien und deren Effekt auf die Heilungsdauer. Sie kamen zu dem Schluss, dass allogener Fremdknochen und β -Tricalciumphosphat zu einer schnelleren Knochenheilung und besseren klinischen Ergebnissen führen (Jung et al., 2019). Auch Nakamura et al. und Zhao et al. weisen in ihrer Studie nach, dass es bei Verwendung von Bone graft zu einer höheren Stabilität und besseren Ergebnissen kommt (Nakamura et al., 2022; Zhao et al., 2022).

In der systematischen Übersichtsarbeit von Slevin et al. wird berichtet, dass bei einem Osteotomiespalt von unter 10 mm eine Auffüllung des Osteotomiespalts nicht notwendig sei. Sollte jedoch die Indikation zum Auffüllen des Spaltes bestehen, sei allogener Knochen die beste Wahl (Slevin et al., 2016). Brosset et al. raten eher davon ab, den Osteotomiespalt mit Fremdmaterial zu füllen (Brosset et al., 2011). Laut Lobenhoffer et al. ist bis 12,5 mm Osteotomiehöhe keine Auffüllung des Osteotomiespalts notwendig, wenn sorgfältig operiert wurde und ein stabiles Implantat verwendet wurde (Lobenhoffer et al., 2002). Staubli und Jacob berichten über gute Ergebnisse der medial-öffnenden HTO mit winkelstabilen Plattensystemen, unabhängig davon, ob der Osteotomiespalt gefüllt wurde oder nicht (Staubli & Jacob, 2010). Zorzi et al. zeigen in ihrer Studie, dass die Zeitdauer der Knochenheilung sich nicht signifikant unterscheidet, egal ob eine Spongiosaplastik erfolgte oder nicht (Zorzi et al., 2011). Auch die Metaanalyse von Han et al. arbeitet heraus, dass es nicht nachweisbar ist, ob die Auffüllung des Osteotomiespalts mit Knochenersatzmaterial - unabhängig in welcher Form - für

den radiologischen Nachweis einer Knochenheilung besser sei, als ohne Auffüllung des Osteotomiespalts (Han et al., 2015).

Die Studie von Woodacre et al. sagt aus, dass die Verwendung von Bone-graft keine Vorteile bringe, jedoch auch keine höhere Assoziation mit der Non-union-Rate habe. Vor allem gäbe es keinen negativen Effekt auf die Heilungsrate, wenn kein Knochen oder künstlicher Knochen verwendet würde. Eher habe die Auswahl des Implantats einen Einfluss auf die Non-union-Rate (Woodacre et al., 2016).

Einflussfaktoren auf die Ossifikation

Auch sollten bei einer hohen tibialen Umstellungsosteotomie Kofaktoren zur Beurteilung der Verknöcherung miteinbezogen werden, die Einfluss auf den Knochenstoffwechsel und damit auf die Knochenheilung haben.

Hinterwimmer et al. zeigten in ihrer Studie, dass Nikotin, Übergewicht und eine Fraktur der lateralen Kortex Risikofaktoren für eine Pseudarthrose sind. Alter, Korrekturausmaß und Begleiterkrankungen hingegen hatten keinen Einfluss (Hinterwimmer et al., 2012). Flörkemeier et al. hingegen konnten keine Korrelation zwischen Übergewicht und verzögerter Knochenheilung bei der hohen tibialen Osteotomie nachweisen (Flörkemeier et al., 2014). Bei der distalen Femurosteotomie wurde jedoch in einer anderen Studie wiederum eine Korrelation diesbezüglich nachgewiesen (Liska et al., 2018). Ähnlich waren in den beiden Studien die Ergebnisse bezüglich der Korrelation zwischen Rauchen und verzögerter Knochenheilung. Hier muss kritisch hinterfragt werden, warum Liska et al. bei der Femurosteotomie Korrelationen zwischen verzögerter Knochenheilung und Rauchen, sowie Übergewicht herausgefunden haben (Liska et al., 2018) und Flörkemeier et al. bei der Tibiaosteotomie nur Korrelationen im Hinblick auf eine Raucheranamnese und verzögerter Knochenheilung nachweisen (Flörkemeier et al., 2014). Man sollte meinen, die unterschiedliche Lokalisation - distaler Femur und proximale Tibia - sollte keinen gravierenden Unterschied bezüglich des Einflusses von Übergewicht aufweisen.

Choi et al. weisen einen positiven Einfluss auf die Zufriedenheit nach einer HTO in Abhängigkeit des Vitamin-D-Serumspiegels nach (Choi et al., 2020). Gerade in unseren Breitengraden ist der Vitamin-D-Spiegel im Hinblick auf die Beurteilung des Knochenstoffwechsels von hoher Bedeutung.

Korrelationen geometrischer Parameter

Da in der Literatur bisher die ascendierende und die descendierende medial-öffnende HTO nicht differenziert betrachtet werden, sondern unter der allgemeinen medial-öffnenden HTO zusammengefasst werden, liegen bisher auch keine Untersuchungen in Hinblick auf eine Korrelation zwischen geometrischen Parametern vor.

Bei unserer Untersuchung zeigt sich - wie zu erwarten - im Kollektiv der ascendierenden medial-öffnenden HTO und im Kollektiv der descendierenden medial-öffnenden HTO eine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Stärke der Veränderung der Beinachse und der Höhe der Aufklappung der Osteotomie. Die Effektstärke nach Cohen zeigt einen starken Effekt. Alle übrigen untersuchten Korrelationen in den jeweiligen Kollektiven sind statistisch nicht signifikant. Es besteht jedoch bei der ascendierenden medial-öffnenden HTO und bei der descendierenden Technik ein positiver Zusammenhang zwischen der Veränderung der Beinachse und des posterioren tibialen Slopes, sowie der Slopeveränderung und der Höhe der Osteotomieaufklappung.

Objektivierung der Patientenzufriedenheit

In unserer Untersuchung zeigt sich eine große postoperative Zufriedenheit nach erfolgter medial-öffnender HTO unabhängig davon, ob diese mittels ascendierender oder descendierender Operationstechnik durchgeführt wurde. Die Ergebnisse wurden mit dem Lysholm Score ermittelt. Hier zeigte sich ein Punktwert im Durchschnitt von 94 Punkten bei beiden Operationstechniken. Jedoch waren mehr Patienten, die mit der ascendierenden Operationstechnik operiert wurden, „hoch zufrieden“. 84 % der Patienten gaben eine Gesamtpunktzahl zwischen 90 und 100 Punkten an. Bei der descendierenden medial-öffnenden HTO waren es lediglich 74 %, die „hoch zufrieden“ waren, was aber auch einen hohen Anteil an subjektiver Zufriedenheit bedeutet.

In der Fachliteratur werden nur wenige Ergebnisse veröffentlicht, die die subjektive Zufriedenheit der Patienten miteinbeziehen. Die subjektive Zufriedenheit über das Operationsergebnisses nach erfolgter medial-öffnender HTO kann jedoch objektiv und gut vergleichbar mit Hilfe des Lysholm Scores untersucht werden. Vereinzelte Veröffentlichungen zeigen ähnliche Punktwerte wie in unserem Kollektiv, gegebenenfalls geringfügig niedriger als in unserem Kollektiv. Im Review von

Webb et al. werden unterschiedliche Studien aus dem Zeitraum von 2010 bis 2015 aufgeführt, in denen der Lysholm Score angewandt wurde. Auch hier zeigt sich eine hohe subjektive Zufriedenheit mit einem Punktwert zwischen 65 Punkten und 100 Punkten (Webb et al., 2018). Auch bei Bode et al. liegt der Lysholm Score postoperativ zwischen 76 und 86 Punkten (Bode et al., 2015). Die subjektive Zufriedenheit nach einer medial-öffnenden HTO wird somit in mehreren Studien nachgewiesen.

Limitationen der Arbeit

Bei der Betrachtung der Ergebnisse müssen die Limitationen dieser Arbeit und des untersuchten Kollektivs berücksichtigt werden. Das Patientenkollektiv war - zwar was die jeweilige Gruppengröße (aszendieren, deszendierend), sowie Alters- und Geschlechtsverteilung angeht - relativ homogen, wobei gesundheitliche Kofaktoren nicht betrachtet wurden. Die Fallzahl der beiden eher kleinen Kollektive ist ein limitierender Faktor für unsere Ergebnisse. Des Weiteren konnte bei den Röntgenverlaufskontrollen innerhalb der Zeitintervalle kein exakt gleicher Zeitpunkt eingehalten werden, was die Vergleichbarkeit beeinflusst. Auch das klinische Outcome könnte variieren, da die Erhebung der Patientenzufriedenheit mittels Lysholm Score ebenfalls nicht zu einem exakt gleichen Zeitpunkt erhoben werden konnte.

5 Zusammenfassung

In unserer Arbeit erfolgt erstmalig die differenzierte Betrachtung der aszendierenden und deszendierenden medial-öffnenden hohen tibialen Osteotomie in Bezug auf die geometrischen Parameter Beinachse und posteriorer tibialer Slope, sowie auf die Verknöcherung des Osteotomiespalts und das klinische Outcome. Im Zeitraum von 01.08.2018 bis zum 31.12.2020 wurden 36 medial-öffnende HTO (19 aszendierende und 17 deszendierende) in unserer Klinik durchgeführt.

Bei der aszendierenden medial-öffnenden HTO lag der Mittelwert der Beinachse präoperativ bei $7,4^\circ$ Varusstellung und bei der deszendierenden medial-öffnenden HTO bei $7,0^\circ$. Der Median der postoperativen Beinachse bei der aszendierenden Technik lag mit einer valgischen Beinachse von $2,3^\circ$ im oberen Normbereich. Die aszendierende medial-öffnende Technik führte zu einer statistisch signifikant größeren Valgisierung, denn bei der deszendierenden Technik wurde nur eine Beinachse von $0,5^\circ$ Varum erreicht.

Der posteriore tibiale Slope wurde bei beiden Techniken durch die Operation flacher. Im Verlauf kam es dann jedoch zum Absinken des Slopes nach caudal.

Der modifizierte RUST-Score war im Verlauf bis zur vollständigen Ossifikation im Kollektiv der aszendierenden medial-öffnenden HTO stets höher als bei der deszendierenden HTO. Es kam also bei der aszendierenden HTO früher zur vollständigen Verknöcherung, obwohl hier sogar die durchschnittliche Öffnung des Osteotomiespalts um 0,6 mm größer war.

In beiden Kollektiven bestätigte der durchschnittliche Lysholm Score die hohe postoperative Zufriedenheit der Patienten, wobei die aszendierenden medial-öffnenden HTO etwas vorteilhafter erscheint.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass beide Operationstechniken der medial-öffnenden HTO in der Behandlung der Varusgonarthrose zu einer sehr hohen Zufriedenheit führen und sie sollten daher die Kniegelenksprothese in individueller Abwägung zumindest im jüngeren Alter vollständig ersetzen.

Unsere Untersuchungen haben aufgrund der besseren Ergebnisse bezüglich der geometrischen Parameter sowie der Dauer bis zur vollständigen Ossifikation die Vorrangstellung der aszendierenden medial-öffnenden HTO herausarbeiten können, wenn auch statistisch nicht signifikant angesichts der kleinen Kollektive.

Abstract:

This study differentiates, for the first time, between ascending and descending open-wedge HTO and analyzes similarities and differences between the two surgical techniques with regard to the geometric parameters of leg axis and posterior tibial slope as well as to the ossification of the osteotomy gap and the clinical outcome. In the period from 01.08.2018 to 31.12.2020, 36 open-wedge HTO were performed in our clinic, 19 of them ascending and 17 descending.

With regard to ascending open-wedge HTO, the average leg axis was 7.4° varus malalignment prior to surgery, and in descending open-wedge HTO 7.0° . The median leg axis correction for ascending open-wedge HTO was in the upper range of normal values with a valgus leg axis of 2.3° , whereas the descending open-wedge technique had a nearly straight leg axis with only 0.5° varum. Therefore, the ascending open-wedge HTO led to significantly greater valgisation.

After surgery, the posterior tibial slope became flatter with both techniques. As things developed, there was an increase in posterior tibial slope with both techniques, resulting in a caudal descent.

The period to complete ossification showed that in the group of the ascending open-wedge HTO the modified RUST-score was always higher than after the descending open-wedge HTO. It follows that complete ossification occurred earlier in the ascending open-wedge HTO although the average opening of the osteotomy gap was even 0,6 mm larger.

In both collectives, the average Lysholm score confirmed the high postoperative satisfaction of the patients. Therefore, the ascending open-wedge HTO even seem to be more favorable.

This work shows that both surgical techniques of open-wedge HTO result in very high satisfaction in the treatment of varus gonarthrosis. After considering the individual circumstances, these joint-preserving operations ought to replace completely the knee joint prosthesis, at least in younger age.

Our studies demonstrated the superiority of the ascending open-wedge HTO due to better results in terms of geometric parameters as well as concerning the duration until complete ossification, although not statistically significant given the small collectives.

6 Literaturverzeichnis

- Agneskirchner, J. D., Burkart, A. & Imhoff, A. B. (2002). Achsenfehlstellung, Knorpelschaden und Kreuzbandruptur - Begleiteingriffe bei der VKB-Plastik. *Unfallchirurg*, 105 (3), 237–245.
- Agneskirchner, J. D., Hurschler, C., Stukenborg-Colsman, C., Imhoff, A. B. & Lobenhoffer, P. (2004). Effect of high tibial flexion osteotomy on cartilage pressure and joint kinematics: A biomechanical study in human cadaveric knees. *Arch Orthop Trauma Surg*, 124 (9), 575–584.
- Agneskirchner, J. D., Hurschler, C., Wrann, C. D. & Lobenhoffer, P. (2007). The Effects of Valgus Medial Opening Wedge High Tibial Osteotomy on Articular Cartilage Pressure of the Knee: A Biomechanical Study. *Arthroscopy*, 23 (8), 852–861.
- Akoto, R., Alm, L., Drenck, T. C., Frings, J., Krause, M. & Frosch, K. H. (2020). Slope-Correction Osteotomy with Lateral Extra-articular Tenodesis and Revision Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Is Highly Effective in Treating High-Grade Anterior Knee Laxity. *Am J Sports Med*, 48 (14), 3478–3485.
- El Attal, R., Benedetto, K.-P., Fink, C., Hofbauer, M., Janousek, A., Mandl, J., Marlovits, S., Schabus, R., Schneiderbauer, A., Schultz, A., Smekal, V. (2018). Gelenkserhalt durch valgusierende Umstellungsosteotomien. *JATROS Orthop Trauma Rheumat*, 5.
- Bode, G., von Heyden, J., Pestka, J., Schmal, H., Salzmann, G., Südkamp, N., Niemeyer, P. (2015). Prospective 5-year survival rate data following open-wedge valgus high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 23 (7), 1949–1955.
- Bode, G., Schmal, H., Pestka, J. M., Ogon, P., Südkamp, N. P. & Niemeyer, P. (2013). A non-randomized controlled clinical trial on autologous chondrocyte implantation (ACI) in cartilage defects of the medial femoral condyle with or without high tibial osteotomy in patients with varus deformity of less than 5. *Arch Orthop Trauma Surg*, 133 (1), 43–49.

- Brinkman, J. M., Lobenhoffer, P., Agneskirchner, J. D., Staubli, A. E., Wymenga, A. B. & Van Heerwaarden, R. J. (2008). Osteotomies around the knee: Patient selection, stability of fixation and bone healing in high tibial osteotomies. *J Bone Joint Surg*, 90 (12), 1548–1557.
- Brosset, T., Pasquier, G., Migaud, H. & Gougeon, F. (2011). Opening wedge high tibial osteotomy performed without filling the defect but with locking plate fixation (TomoFix™) and early weight-bearing: Prospective evaluation of bone union, precision and maintenance of correction in 51 cases. *Orthop Traumatol Surg Res*, 97 (7), 705–711.
- Brouwer, G. M., Tol, A. W. Van, Bergink, A. P., Belo, J. N., Bernsen, R. M. D., Reijman, M., Pols, H. A. P., Bierma-Zeinstra, S. M. A. (2007). Association between valgus and varus alignment and the development and progression of radiographic osteoarthritis of the knee. *Arthritis Rheum*, 56 (4), 1204–1211.
- Brouwer, R. W., Bierma-Zeinstra, S. M. A., van Koeveeringe, A. J. & Verhaar, J. A. N. (2005). Patellar height and the inclination of the tibial plateau after high tibial osteotomy. The open versus the closed-wedge technique. *J Bone Joint Surg*, 87 (9), 1227–1232.
- Brown, G. A. & Amendola, A. (2012). Radiographic Evaluation and Preoperative Planning for High Tibial Osteotomies. *Oper Tech Sports Med*, 20 (1), 93–102.
- Cao, Z., Mai, X., Wang, J., Feng, E. & Huang, Y. (2018). Unicompartamental Knee Arthroplasty vs High Tibial Osteotomy for Knee Osteoarthritis: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Arthroplasty*, 33 (3), 952–959.
- Chang, C. W., Chen, Y. N., Li, C. T., Chung, C. R., Chang, C. H. & Peng, Y. Te. (2019). Finite element study of the effects of fragment shape and screw configuration on the mechanical behavior of tibial tubercle osteotomy. *J Orthop Sci*, 27 (3), 1–9.
- Cheng, X., Liu, F., Xiong, F., Huang, Y. & Paulus, A. C. (2019). Radiographic changes and clinical outcomes after open and closed wedge high tibial osteotomy: A systematic review and meta-analysis. *J Orthop Surg Res*, 14 (1), 1–15.

- Chieh-Szu Yang, J., Chen, C. F. & Lee, O. K. (2020). Benefits of opposite screw insertion technique in medial open-wedge high tibial osteotomy: A virtual biomechanical study. *J Orthop Translat*, 20 (155), 31–36.
- Choi, W., Kim, J. H., Byun, S. E., Ryu, H. S. & Rojas, D. (2020). Effect of preoperative vitamin D deficiency on functional outcomes after high tibial osteotomy: A retrospective case control study. *BMC Musculoskelet Disord*, 21 (1), 1–7.
- Cicuttini, F., Ding, C., Wluka, A., Davis, S., Ebeling, P. R. & Jones, G. (2005). Association of cartilage defects with loss of knee cartilage in healthy, middle-age adults: A prospective study. *Arthritis Rheum*, 52 (7), 2033–2039.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychol Bull*, 112 (1), 155–159.
- Coventry, M. B. (1965). Osteotomy of the Upper Portion of the Tibia for Degenerative Arthritis of the Knee. a Preliminary Report. *J Bone Joint Surg*, 47, 984–990.
- Dornacher, D., Leitz, F., Faschingbauer, M., Reichel, H. & Kappe, T. (2017). *Die medial öffnende, valgusierende Tibiaosteotomie: Eine Analyse präoperativer Risikofaktoren für eine verzögerte Knochenheilung*. DKOU - Berlin.
- Elson, D. W., Petheram, T. G. & Dawson, M. J. (2015). High reliability in digital planning of medial opening wedge high tibial osteotomy, using Miniaci's method. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 23 (7), 2041–2048.
- Flörkemeier, S., Kley, K. & Lobenhoffer, P. (2019). Kniegelenknahe Umstellungsosteotomie im Erwachsenenalter. *Orthop Unfallch up2date*, 14 (1), 95–109.
- Flörkemeier, S. & Lobenhoffer, P. (2014). Ergebnisse der kniegnahen Osteotomie, zukünftige Entwicklung. In P. Lobenhoffer, R. van Heerwaarden & J. D. Agneskirchner (Hrsg.), *Kniegelenknahe Osteotomien* (S. 275). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Flörkemeier, S., Staubli, A. E., Schroeter, S., Goldhahn, S. & Lobenhoffer, P. (2013). Outcome after high tibial open-wedge osteotomy: A retrospective evaluation of 533 patients. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 21 (1), 170–180.

- Fujisawa, Y., Masuhara, K. & Shiomi, S. (1979). The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. An arthroscopic study of 54 knee joints. *Orthop Clin of North Am*, 10 (3), 585–608.
- Gaasbeek, R. D. A., Sonneveld, H., Van Heerwaarden, R. J., Jacobs, W. C. H. & Wymenga, A. B. (2004). Distal tuberosity osteotomy in open wedge high tibial osteotomy can prevent patella infera: A new technique. *Knee*, 11 (6), 457–461.
- Goshima, K., Sawaguchi, T., Shigemoto, K., Iwai, S., Fujita, K. & Yamamuro, Y. (2020). Open-wedge high tibial osteotomy for spontaneous osteonecrosis of the medial tibial plateau shows excellent clinical outcomes. *J Exp Orthop*, 7(1).
- Goshima, K., Sawaguchi, T., Shigemoto, K., Iwai, S., Nakanishi, A., Inoue, D., Shima, Y. (2019). Large opening gaps, unstable hinge fractures, and osteotomy line below the safe zone cause delayed bone healing after open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 27 (4), 1291–1298.
- Gwinner, C., Weiler, A. & Plachel, F. (2021). Normalwerte – Wie bestimme ich den tibialen Slope richtig? *Arthroskopie*, 34 (1), 10–13.
- Hackenbroch, M. H. (2007). Periphere Arthrosen. In H.-P. Bischoff, J. Heisel & H. Locher (Hrsg.), *Praxis der konservativen Orthopädie* (S. 478–480). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Halder, A., Kutzner, I., Graichen, F., Heinlein, B., Beier, A. & Bergmann, G. (2012). Influence of Limb Alignment on Mediolateral Loading in Total Knee Replacement. *J Bone Joint Surg*, 94 (11), 1023–1029.
- Han, J. H., Kim, H. J., Song, J. G., Yang, J. H., Bhandare, N. N., Fernandez, A. R., Park, H. J., Nha, K. W. (2015). Is Bone Grafting Necessary in Opening Wedge High Tibial Osteotomy? A Meta-Analysis of Radiological Outcomes. *Knee Surg Relat Res*, 27 (4), 207–220.
- Hannan, M. T., Felson, D. T. & Pincus, T. (2000). Analysis of the discordance between radiographic changes and knee pain in osteoarthritis of the knee. *J Rheumatol*, 27 (6), 1513–1517.
- Hernigou, P., Medevielle, D., Debeyre, J. & Goutallier, D. (1987). Proximal tibial osteotomy for osteoarthritis with varus deformity. A ten to thirteen-year follow-up study. *J Bone Joint Surg*, 69 (3), 332–54.

- Hinterwimmer, S., Beitzel, K., Paul, J., Kirchhoff, C., Sauerschnig, M., von Eisenhart-Rothe, R., Imhoff, A. B. (2011). Control of Posterior Tibial Slope and Patellar Height in Open-Wedge Valgus High Tibial Osteotomy. *Am J Sports Med*, 39 (4), 851–856.
- Hinterwimmer, S. & Feucht, M. (2021). Biomechanik der Sagittalebene des Kniegelenks - Bedeutung des tibialen „slope“ für die Kniechirurgie. *Arthroskopie*, 34 (1), 2–9.
- Hinterwimmer, S., Feucht, M. J. & Imhoff, A. B. (2012). Hohe tibiale Osteotomie bei Varusgonarthrose - Indikation, Technik, Ergebnisse. *Arthroskopie*, 25 (3), 184–194.
- Hinterwimmer, S., Rauch, A., Kohn, L. & Imhoff, A. B. (2010). Hohe tibiale Osteotomie bei anteromedialer oder posterolateraler Knieinstabilität. *Arthroskopie*, 23 (1), 14–22.
- Hohloch, L., Kim, S., Eberbach, H., Izadpanah, K., Mehl, J., Niemeyer, P., Südkamp, N. P., Bode, G. (2019). Improved clinical outcome after medial open-wedge osteotomy despite cartilage lesions in the lateral compartment. *PLoS One*, 14 (10), 1–10.
- Van Houten, A. H., Heesterbeek, P. J. C., Van Heerwaarden, R. J., Van Tienen, T. G. & Wymenga, A. B. (2014). Medial open wedge high tibial osteotomy: Can delayed or nonunion be predicted? *Clin Orthop Relat Res*, 472 (4), 1217–1223.
- Hunter, D. J. & Bierma-Zeinstra, S. (2019). Osteoarthritis. *Lancet*, 393 (10182), 1745–1759.
- Imhoff, A. (2006). Der laterale Zugang zum Kniegelenk in Kombination mit einer Osteotomie der Tuberositas tibiae. In J. Jerosch, J. Heisel & A. Imhoff (Hrsg.), *Knie - Fortbildung Orthopädie, Traumatologie* (S. 83). Heidelberg: Steinkopff Verlag.
- Jacobi, M. & Jakob, R. P. (2014). Geschichte der knienahen Osteotomie. In P. Lobenhoffer, R. van Heerwaarden & J. D. Agneskirchner (Hrsg.), *Kniegelenknahe Osteotomien* (S. 19). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Jung, W. H., Takeuchi, R., Kim, D. H. & Nag, R. (2019). Faster union rate and better clinical outcomes using autologous bone graft after medial opening wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 28 (5), 1380–1387.

- Kapandji, I. A. (1987). *The Physiology of the Joints, Volume 2: Lower Limb*. Churchill Livingstone (5.). Edinburgh, London, Melbourne, New York: Elsevier.
- Kellgren, J. H. & Lawrence, J. S. (1957). Radiological assessment of osteoarthrosis. *Ann Rheum Dis*, (4), 494–502.
- Khalifa, A. A., Fadle, A. A., Alzohiry, M. A., Elsherif, M. E. & Refai, O. (2020). Medial Wedge Opening High Tibial Osteotomy with an Extra Screw Fixation. *Int J Recent Surg Med Sci*, 6 (01), 45–48.
- Kooistra, B. W., Dijkman, B. G., Busse, J. W., Sprague, S., Schemitsch, E. H. & Bhandari, M. (2010). The radiographic union scale in tibial fractures: Reliability and validity. *J Orthop Trauma*, 24 (SUPPL. 1), 81–86.
- Kraus, T. M., Imhoff, A. B., Ateschrang, A., Stöckle, U. & Schröter, S. (2015). Druckentlastung (Unloading) im Kniegelenk in Kombination mit knorpelchirurgischen Eingriffen. *Z Orthop Unfall*, 153 (1), 75–759.
- Krause, M., Drenck, T. C., Korthaus, A., Preiss, A., Frosch, K. H. & Akoto, R. (2018). Patella height is not altered by descending medial open-wedge high tibial osteotomy (HTO) compared to ascending HTO. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 26 (6), 1859–1866.
- Kummer, B. (1987). 38. Anatomie und Biomechanik des Kniegelenksmeniscus. *Langenbecks Arch Chir*, 372 (1), 241–246.
- LaPrade, R. F., Barrera Oro, F., Ziegler, C. G., Wijdicks, C. A. & Walsh, M. P. (2010). Patellar height and tibial slope after opening-wedge proximal tibial osteotomy: A prospective study. *Am J Sports Med*, 38 (1), 160–170.
- Lobenhoffer, P. (2014). Indikation zur knienahen Osteotomie: Differenzialindikation zur unikondylären Prothese und zur Totalprothese. In P. Lobenhoffer, R. van Heerwaarden & J. D. Agneskirchner (Hrsg.), *Kniegelenknahe Osteotomien* (S. 97). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Lobenhoffer, P. (2021). Hohe Tibiakopfoosteotomie: Geplante und akzidentelle Slopeveränderungen. *Arthroskopie*, 34 (1), 26–32.
- Lobenhoffer, P. & Agneskirchner, J. D. (2003). Improvements in surgical technique of valgus high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 11 (3), 132–138.

- Lobenhoffer, P., De Simoni, C. & Staubli, A. E. (2002). Open-Wedge High-Tibial Osteotomy With Rigid Plate Fixation. *Techn Knee Surg*, 1 (2), 93–105.
- Lysholm, J. & Gillquist, J. (1982). Evaluation of knee ligament surgery results with special emphasis on use of a scoring scale. *Am J Sports Med*, 10 (3), 150–154.
- Martinek, V. & Imhoff, A. B. (2003). Tibiale Umstellungsosteotomie am Kniegelenk - Renaissance eines klassischen Verfahrens? *Dtsch Z Sportmed*, 54 (6), 229–232.
- Mina, C., Garrett, W. E., Pietrobon, R., Glisson, R. & Higgins, L. (2008). High Tibial Osteotomy for Unloading Osteochondral Defects in the Medial Compartment of the Knee. *Am J Sports Med*, 36 (5), 949–955.
- Miniaci, A., Ballmer, F. T., Ballmer, P. M. & Jakob, R. P. (1989). Proximal tibial osteotomy. A new fixation device. *Clin Orthop Relat Res*, (246), 250–259.
- Minzlaff, P., Feucht, M. J., Saier, T., Schuster, T., Braun, S., Imhoff, A. B., Hinterwimmer, S. (2013). Osteochondral autologous transfer combined with valgus high tibial osteotomy: Long-term results and survivorship analysis. *Am J Sports Med*, 41 (10), 2325–2332.
- Morgenstern, M. (2011). *Hohe tibiale Umstellungsosteotomie in open wedge-Technik: Radiologische Beurteilung der Beinachse, des tibialen slopes und frühe klinische Ergebnisse. Med. Dissertation.* Technischen Universität München.
- Nakamura, R., Komatsu, N., Fujita, K., Kuroda, K., Takahashi, M., Okano, A., Katsuki, Y. (2022). Anteromedial plating without filling the gap in open wedge high tibial osteotomy may increase the risk of screw breakage, which can be reduced by medial plating and bone-substitute insertion. *J Orthop Sci*, (22).
- Nerhus, T. K., Ekeland, A., Solberg, G., Sivertsen, E. A., Madsen, J. E. & Heir, S. (2017). Radiological outcomes in a randomized trial comparing opening wedge and closing wedge techniques of high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 25 (3), 910–917.
- Nha, K. W., Kim, H. J., Ahn, H. S. & Lee, D. H. (2016). Change in Posterior Tibial Slope after Open-Wedge and Closed-Wedge High Tibial Osteotomy. *Am J Sports Med*, 44 (11), 3006–3013.

- Noyes, F. R., Barber, S. D. & Simon, R. (1993). High tibial osteotomy and ligament reconstruction in varus angulated, anterior cruciate ligament-deficient knees. *Am J Sports Med*, 21 (1), 2–12.
- Orth, P., Kohn, D. & Madry, H. (2016). Degenerative Kniegelenkerkrankungen – Gonarthrose. *Orthop Unfallch up2date*, 11 (02), 81–98.
- Paley, D., Herzenberg, J. E., Tetsworth, K., McKie, J. & Bhave, A. (1994). Deformity planning for frontal and sagittal plane corrective osteotomies. *Orthop Clin of North Am*, 25 (3), 425–465.
- Paley, D. & Tetsworth, K. (1992). Mechanical axis deviation of the lower limbs. Preoperative planning of uniapical angular deformities of the tibia or femur. *Clin Orthop Relat Res*, (280), 48–64.
- Pape, D., Seil, R., Adam, F., Rupp, S., Kohn, D. & Lobenhoffer, P. (2004). Bildgebung und präoperative Planung der Tibiakopffosteotomie. *Orthopäde*, 33 (2), 122–134.
- Petersen, W., Bierke, S. & Häner, M. (2020). Kniegelenknahe Osteotomie bei unikompartimenteller Gonarthrose Wo stehen wir heute? *Arthroskopie*, 33 (4), 244–255.
- Petersen, W., Forkel, P., Feucht, M. J., Zantop, T., Imhoff, A. B. & Brucker, P. U. (2014). Posterior root tear of the medial and lateral meniscus. *Arch Orthop Trauma Surg*, 134 (2), 237–255.
- Petersen, W., Hees, T. & Harrer, J. (2019). Korrektur knöcherner Deformitäten bei vorderer Instabilität: „Slope“ und „Varus thrust“. *Knie J*, 1 (1), 7–16.
- Platzer, W. (2009). Kniegelenk. In W. Platzer (Hrsg.), *Taschenatlas Anatomie - Bewegungsapparat* (9., S. 206–215). Stuttgart: Georg Thieme Verlag.
- Rabenberg, M. (2013). *Arthrose - Gesundheitsberichterstattung des Bundes. Robert Koch-Institut* (Band 54). Berlin: Robert Koch-Institut.
- Rippke, J., Ellermann, A. & Mengis, N. (2019). Physiologische Achsverhältnisse und Auswirkung von Achsenfehlstellungen der unteren Extremität. *Orthop Unfall Praxis*, 8, 462–467.
- Rossi, R., Bonasia, D. E. & Amendola, A. (2011). The Role of High Tibial Osteotomy in the Varus Knee. *J Am Acad Orthop Surg*, 19 (10), 590–599.

- Rußow, G., Schütz, M. & Berner, A. (2019). Winkelstabile Plattenosteosynthese. *OP-JOURNAL*, 35 (01), 20–26.
- Schiebler, T. H. (2005). Oberschenkel und Kniegelenk. In T. H. Schiebler (Hrsg.), *Anatomie* (9. Auflage., S. 330–340). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schröter, S., Stöckle, U. & Ateschrang, A. (2016). Operative Methoden zur Entlastung des Kniegelenks. *OUP*, 5 (10), 568–575.
- Schwarz, J. & Bruderer Enzler, H. (2021). Universität Zürich - Methodenberatung. [Online im Internet] URL: <https://www.methodenberatung.uzh.ch/de.html> [Stand: 12.09.2022]
- Schwarze, M., Bartsch, L. P., Block, J., Wolf, S. I. & Alimusaj, M. (2020). Insoles, knee braces and ankle-foot orthoses in the treatment of medial gonarthrosis: A literature review. *Orthopäde*, 49 (5), 449–459.
- Seo, S. S., Kim, O. G., Seo, J. H., Kim, D. H., Kim, Y. G. & Lee, I. S. (2016). Complications and short-term outcomes of medial opening wedge high tibial osteotomy using a locking plate for medial osteoarthritis of the knee. *Knee Surg Relat Res*, 28 (4), 289–296.
- Slevin, O., Ayeni, O. R., Hinterwimmer, S., Tischer, T., Feucht, M. J. & Hirschmann, M. T. (2016). The role of bone void fillers in medial opening wedge high tibial osteotomy: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 24 (11), 3584–3598.
- Spahn, G., Hofmann, G. O., von Engelhardt, L. V., Li, M., Neubauer, H. & Klinger, H. M. (2013). The impact of a high tibial valgus osteotomy and unicondylar medial arthroplasty on the treatment for knee osteoarthritis: A meta-analysis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 21 (1), 96–112.
- Staubli, A. E. & Jacob, H. A. C. (2010). Evolution of open-wedge high-tibial osteotomy: Experience with a special angular stable device for internal fixation without interposition material. *Int Orthop*, 34, 167–172.
- Stöve, J. & Streubesand, N. (2018). S2k-Leitlinie Gonarthrose. *Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie (DGOOC)*. [Online im Internet] URL: <https://www.awmf.org/leitlinien/detail/II/033-004.html> [Stand: 03.04.2022]

- Tegner, Y. & Lysholm, J. (1985). Rating systems in the evaluation of knee ligament injuries. *Clin Orthop Relat Res*, 198, 43–49.
- Utzschneider, S., Goettinger, M., Weber, P., Horng, A., Glaser, C., Jansson, V., Müller, P. E. (2011). Development and validation of a new method for the radiologic measurement of the tibial slope. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 19 (10), 1643–1648.
- Warden, S. J., Morris, H. G., Crossley, K. M., Brukner, P. D. & Bennell, K. L. (2005). Delayed- and non-union following opening wedge high tibial osteotomy: Surgeons' results from 182 completed cases. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*, 13 (1), 34–37.
- Webb, M., Dewan, V. & Elson, D. (2018). Functional results following high tibial osteotomy: a review of the literature. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 28 (4), 555–563.
- Whelan, D. B., Bhandari, M., Stephen, D., Kreder, H., Mckee, M. D., Zdero, R., Schemitsch, E. H. (2010). Development of the radiographic union score for tibial fractures for the assessment of tibial fracture healing after intramedullary fixation. *J Trauma*, 68 (3), 629–632.
- Woodacre, T., Ricketts, M., Evans, J. T., Pavlou, G., Schranz, P., Hockings, M., Toms, A. (2016). Complications associated with opening wedge high tibial osteotomy - A review of the literature and of 15 years of experience. *Knee*, 23 (2), 276–282.
- Xu, K., Tong, Y., Zhao, P., Zhou, Y. & Shi, S. (2021). Comparison of two osteotomies in the treatment of medial compartment osteoarthritis. *Chin J Repar Reconstr Surg*, 35 (11), 1440–1448.
- Yokoyama, M., Nakamura, Y., Onishi, T., Hirano, K. & Doi, M. (2016). Healing period after open high tibial osteotomy and related factors: Can we really say that it is long? *SpringerPlus*, 5 (1), 1–6.
- Zhao, X.-W., Fan, Z.-R., Ma, J.-X., Ma, X.-L., Wang, Y., Bai, H.-H., Lu, B., Sun, L. (2022). Reinforcement strategy for medial open-wedge high tibial osteotomy: a finite element evaluation of the additional opposite screw technique and bone grafts. *Comput Method Programs Biomed*, 213.

Zorzi, A. R., da Silva, H. G. P. V., Muszkat, C., Marques, L. C., Cliquet, A. & de Miranda, J. B. (2011). Opening-Wedge High Tibial Osteotomy With and Without Bone Graft. *Artif Organs*, 35 (3), 301–307.

7 Anhang

7.1 Abkürzungsverzeichnis

Anterior-posterior:	a.p.
Hohe tibiale Osteotomie:	HTO
Modifizierter RUST-Score	mRUST-Score

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Circulus vitiosus der medialen Gonarthrose	7
Abbildung 2: Kaskade der Beinachsenfehlstellung und deren Folgen im Kniegelenk	9
Abbildung 3: Arthrostadien im Kniegelenk nach Kellgren and Lawrence.....	11
Abbildung 4: Beinachsen.....	14
Abbildung 5: Abweichung der Traglinie vom Kniegelenkszentrum als Prozentsatz der Tibiaplateaubreite.....	15
Abbildung 6: Neue Mikulicz-Linie mit dem Schnittpunkt bei 55 % des Tibiaplateaus	16
Abbildung 7: Messung posteriorer tibialer Slope	18
Abbildung 8: Osteotomieplanung nach Miniaci.....	29
Abbildung 9: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen ascendierende medial-öffnende HTO.....	33
Abbildung 10: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen descendierende medial-öffnende HTO.....	34
Abbildung 11: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen am 3. postoperativen Tag nach descendierender medial-öffnender HTO, modifizierter RUST-Score $1 + 1 + 1 = 3$	39
Abbildung 12: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen nach descendierender medial-öffnender HTO a) 6,8 Monate und b) 12 Monate postoperativ, modifizierter RUST-Score $3 + 3 + 3 = 9$	40
Abbildung 13: Röntgen Kniegelenk links in 2 Ebenen nach Materialentfernung nach 12,9 Monaten mit weiterhin vollständiger Verknöcherung	41
Abbildung 14: Röntgen Kniegelenk links a.p. nach ascendierender medial-öffnender HTO nach 5 Monaten a) vor und b) nach der Materialentfernung bei chronischer Wundheilungsstörung bei Fumatorium	47
Abbildung 15: Computertomographie Kniegelenk links nach 7 Monaten nach ascendierender medial-öffnender HTO	48
Abbildung 16: Röntgen Kniegelenk rechts in 2 Ebenen nach ascendierender medial-öffnender HTO ohne Fremdspongiosa mit verzögerter Knochenheilung a) nach 7 Monaten, b) nach 16 Monaten	49

Abbildung 17: Röntgen Kniegelenk rechts in 2 Ebenen a) nach deszendierender medial-öffnender HTO und b) nach der Revision mittels Doppelplattenosteosynthese	51
Abbildung 18: Röntgen Kniegelenk rechts in 2 Ebenen a) nach deszendierender medial-öffnender HTO und b) nach der Revision mittels Doppelplattenosteosynthese	53

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Normwerte der anatomischen und mechanischen Beinachse	15
Tabelle 2: Normwerte des posterioren tibialen Slopes	17

7.4 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Häufigkeitsverteilung medialer und lateraler Knorpelschaden nach Outerbridge	45
Diagramm 2: Häufigkeitsverteilung medialer Knorpelschaden	46
Diagramm 3: Häufigkeitsverteilung zusätzliche arthroskopische Maßnahmen bei medial-öffnender HTO	55
Diagramm 4: Zeitlicher Verlauf der Mittelwerte des modifizierten RUST-Scores..	63
Diagramm 5: Modifizierter RUST-Score in Abhängigkeit des durchschnittlichen Bestimmungszeitpunktes	66
Diagramm 6: Korrelationsanalysen aszendierende und deszendierende medial-öffnende HTO mit Trendlinie	70
Diagramm 7: Häufigkeitsverteilung Lysholm Score gesamtes Kollektiv nach medial-öffnender HTO	71
Diagramm 8: Häufigkeitsverteilung Lysholm Score nach aszendierender medial-öffnender HTO	72
Diagramm 9: Häufigkeitsverteilung Lysholm Score nach deszendierender medial-öffnender HTO	73

8 Danksagung

Mein größter Dank gebührt meinem Doktorvater Herrn PD Dr. Matthias Krause für die vielfältige Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit. Er hat nicht nur den Impuls für das innovative, spannende Thema gesetzt, sondern meine Arbeit stets mit seinen wertvollen Anregungen begleitet.

Ganz besonders danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Frosch für die langjährige, engagierte Förderung meiner medizinischen Weiterbildung, für die Möglichkeit meine Promotionsarbeit am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf durchführen zu können und für die weiterhin gute Zusammenarbeit.

Herr Prof. Dr. Karl-Heinz Frosch und Herr PD Dr. Matthias Krause haben darüber hinaus durch ihre überragende chirurgische Expertise und exzellente Durchführung der hier untersuchten Operationstechniken der ascendierenden und descendierenden medial-öffnenden HTO wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Es erfüllt mich mit Stolz, mit Ihnen zusammenarbeiten zu dürfen.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Jannik Frings für seine Hilfe bei der Einarbeitung in die Datenanalyse und statistischen Methoden insbesondere zu Beginn dieser Arbeit.

Mein tiefster Dank gilt meiner Familie für Ihre unendliche Unterstützung. Ihnen sei diese Arbeit gewidmet.

9 Lebenslauf

Lebenslauf wurde aus datenschutzrechtlichen Gründen entfernt.

10 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe.

Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.

Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung von Plagiaten überprüft werden kann.

.....

Christine Ackermann