

Aus der Klinik für Orthopädie im Annastift der
Medizinischen Hochschule Hannover

**Retrospektive Analyse des Einflusses der
kniegelenknahen Umstellungsosteotomie auf den
ischiofemorale Raum der Hüfte**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

in der Medizinischen Hochschule Hannover

vorgelegt von
Vincent-Louis Kerber

Pfullingen 2024

Angenommen vom Senat der Medizinischen Hochschule am 28.11.2024

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Hochschule Hannover.

Präsident: Prof. Dr. med. Michael P. Manns

Betreuer/in der Arbeit: PD Dr. med. Sufian S. Ahmad

1. Referent/in: Prof. Dr. med. Sven Ostermeier

2. Referent/in: PD Dr. med. Markus Oszwald

Tag der mündlichen Prüfung: 28.11.2024

Prüfungsausschuss

Vorsitz: Prof. Dr. med. Torsten Witte

1. Prüfer/in: Prof. Dr. med. Bernhardt Schmidt

2. Prüfer/in: Prof. Dr. med. Bettina Wedi

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Anatomie der unteren Extremität	2
1.2 Anatomie des Kniegelenks	3
1.3 Mechanik des Kniegelenks	5
1.4 Achsverhältnisse der unteren Extremität	7
1.5 Achsenfehlstellungen	8
1.5.1 Ursachen und Folgen von Achsenfehlstellungen	8
1.5.2 Diagnostik von Achsenfehlstellungen	10
1.5.3 Genu varum	12
1.5.4 Genu valgum	13
1.6 Definition ischiofemoraler Abstand	13
1.7 Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit	14
2 Material und Methoden	15
2.1 Studiendesign	15
2.2 Ethikvotum	15
2.3 Patientenkollektiv	15
2.3.1 Einschlusskriterien	15
2.3.2 Ausschlusskriterien	15
2.4 Operatives Vorgehen	16
2.5 Umstellungsosteomien	16
2.5.1 Geschichte und Arten	16
2.5.2 HTO – Hohe tibiale Osteotomie	17
2.5.3 DFO – Distal femorale Osteotomie	21
2.5.4 Doppelosteotomie	25
2.6 Erstellung der Röntgenbilder	28
2.7 Untersuchte Parameter	29
2.8 Statistische Auswertung	36
3 Ergebnisse	42

3.1	Überblick über das Gesamtkollektiv und den Auswahlprozess _____	42
3.2	Demographische Merkmale der Patienten _____	43
3.2.1	Altersverteilung des Gesamtkollektivs _____	43
3.2.2	Geschlechterverteilung des Gesamtkollektivs _____	43
3.2.3	Art der durchgeführten Osteotomien des Gesamtkollektivs _____	43
3.3	Ergebnisübersicht _____	44
3.3.1	Ergebnisse des HKA bei Valgisierungs- und Varisierungsosteotomie _____	47
3.3.2	Ergebnisübersicht des mMPTA _____	49
3.3.3	Ergebnisübersicht des mL DFA _____	51
3.3.4	Ergebnisübersicht des JLCA _____	53
3.3.5	Ergebnisübersicht des mLPFA _____	56
3.3.6	Vergleich von IFD und HKA _____	58
3.3.7	Vergleich von IFD und mMPTA _____	59
3.3.8	Vergleich von IFD und LDFA _____	60
3.3.9	Vergleich von FAA und HKA _____	61
3.3.10	Vergleich von IFD und FAA _____	62
4	Diskussion _____	63
4.1	Ergebnisse der Arbeit im Kontext der Literatur _____	71
4.2	Der IFD als prognostischer Faktor für IFI _____	73
4.3	Kontroversen gegenüber dem IFD als Prognosefaktor für IFI _____	78
4.4	Pathogenetische Risikofaktoren für Reduktion des IFD in der Literatur _____	81
4.5	Diskussion möglicher Schwächen und Fehlerquellen der Arbeit _____	85
4.6	Schlussfolgerung, klinische Relevanz und Ausblick _____	87
5	Zusammenfassung _____	89
6	Literaturverzeichnis _____	92
7	Erklärung zum Eigenanteil _____	102
8	Lebenslauf _____	103
9	Danksagung _____	105
10	Anhang _____	106

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Gelenkachsenwinkel der unteren Extremität	33
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Femoralen Adduktionswinkels (FAA)	34
Abbildung 3: Darstellung des Messverfahrens des IFD, aus der publizierten Version der Arbeit.....	36
Abbildung 4: Flussdiagramm zur Darstellung des Auswahlprozesses	42
Abbildung 5: Übersicht Geschlechterverteilung	43
Abbildung 6: Vergleich des HKA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie	47
Abbildung 7: Vergleich des HKA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie	48
Abbildung 9: Vergleich des mMPTA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie	49
Abbildung 10: Vergleich des mMPTA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie	50
Abbildung 12: Vergleich des mL DFA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie	51
Abbildung 13: Vergleich des mL DFA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie	52
Abbildung 14: Vergleich des JLCA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie	53
Abbildung 15: Vergleich des JLCA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie	54
Abbildung 16: Vergleich des mL PFA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie	56
Abbildung 17: Vergleich des mL PFA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie	57
Abbildung 18: Verhältnis von IFD und HKA.....	58
Abbildung 19: Verhältnis von IFD und mMPTA.....	59

Abbildung 20: Verhältnis von IFD und LDFA.....	60
Abbildung 21: Verhältnis von FAA und HKA	61
Abbildung 22: Verhältnis von IFD zu FAA	62
Abbildung 23: Veränderung der Femuradduktion nach Valgisierungsosteotomie	69
Abbildung 24: Veränderung der Femuradduktion nach Varisierungsosteotomie	69
Abbildung 25: Darstellung des IFD bei bestehender Valgusdeviation des linken Beins (a) und nach varisierender HTO (b).....	70

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messergebnisse der Winkelmaße prä- und postoperativ bei Valgisierungsosteotomie	45
Tabelle 2: Messergebnisse der Winkelmaße prä- und postoperativ bei Varisierungsosteotomie	45

Abkürzungsverzeichnis

a.p.	anterior-posterior
Abb	Abbildung
aFTW	anatomischer femorotibialer Winkel, anatomischer femorotibialer Winkel
aMFW	anatomisch-mechanischer Femurwinkel
BG	Berufsgenossenschaft
BMI	Body-Mass-Index
bzw.	beziehungsweise
CAM	CAM-Impingement (engl. cam = Nockenwelle)
cm	Zentimeter
CT	Computertomografie
DFO	Distale Femurosteotomie
et al.	und andere (et alii)
FAA	Femoraler Adduktionswinkel
FAI	femoroacetabuläres Impingement
HKA	Hüft-Knie-Knöchel-Winkel (hip-knee-ankle angle)
HTO	Hohe tibiale Osteotomie
IA	Inklinationswinkel (inclination angle)
IFD	Ischiofemoraler Abstand (ischiofemoral distance)
IFI	Ischiofemorales Impingement
JLCA	Gelenköffnungswinkel (joint line convergence angle)
Lig.	Ligamentum
M.iliopsas	Musculus iliopsoas
MAD	mechanische Achsendeviation (Main Axis deviation)
MGL	Mittlere Gelenklinie
mLDFA	mechanisch lateral-distaler Femurwinkel
mLPFA	mechanisch lateral-proximaler Femurwinkel
mm	Millimeter
mMPTA	mechanisch medial-proximaler Tibiawinkel
MQF	Musculus quadratus femoris
MRT	Magnetresonanztomographie
mTFW	mechanischer tibiofemoraler Winkel
NSAR	Nicht-steroidale Antirheumatika
OSG	Oberes Sprunggelenk
p	p-Wert
s	siehe
SD	Standardabweichung (standard deviation)
sog.	sogenannt
α	Signifikanzniveau
β	Regressionskoeffizient β

*Aus Gründen der vereinfachten Lesbarkeit wird in der vorliegenden Dissertationsschrift das generische Maskulinum bei personenbezogenen Pronomen sowie Substantiven verwendet. Hiermit wird ausdrücklich keine Benachteiligung oder Herabwürdigung des weiblichen Geschlechts oder inter- sowie transsexueller Identitäten beabsichtigt. Dies dient einzig dem Sinne der sprachlichen Vereinfachung und ist ausdrücklich als geschlechtsneutral zu verstehen.

1 Einleitung

Unsere Beine tragen uns ab den frühen Kindheitsjahren bis in das hohe Erwachsenenalter- unser Leben lang. Sie sind damit neben ihrer Stützfunktion für den Körper auch die Grundlage unseres aufrechten Ganges und heben uns gerade deshalb von anderen Spezies dieser Erde sinnbildlich ab.

Durch den aufrechten Gang resultiert eine zeitlebens starke axiale Belastung der Beine und damit der Gelenke der unteren Extremität. Diese anatomisch gegebene Beanspruchung wird durch weitere Faktoren in der heutigen Gesellschaft verstärkt.

So führt vor allem die steigende Lebenserwartung in der Gesellschaft zu einer Zunahme des Belastungszeitfensters und erhöht die Lebensdauer in der sich die Beine einer extremen mechanischen Beanspruchung ausgesetzt sehen. Dies geht mit einem altersproportionalen Verschleiß der Gelenke einher und resultiert in einer steigenden Prävalenz an Gelenksarthrosen, was die Arthrose zur weltweit häufigsten Gelenkerkrankung macht. (Felson 1988)

Zum anderen verstärkt auch die steigende Rate der an Übergewicht leidenden Menschen in der heutigen Gesellschaft die gewichtsbedingte Abnutzung der Gelenke. So hat sich seit 1975 der weltweite Anteil der Adipositas-kranken nahezu verdreifacht (Schienkiewitz et al. 2022) und auch in Deutschland steigt der Anteil seit 1990 kontinuierlich an. (Finger et al. 2016; Mensink et al. 2013) Die somit vermehrte, gewichtsbedingte, axiale Druckbelastung der Beine und ihrer Gelenke führt zu einem verfrühten Verschleiß sowie unphysiologisch hoher Abnutzung der Gelenkflächen. Übergewicht konnte daher in Studien als ein primärer Risikofaktor für die Entstehung von Kniegelenksarthrose identifiziert werden. (Lee und Kean 2012)

Darüber hinaus spielen aber auch anatomische und mechanische Achsenfehlstellungen im Bereich der Beine eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung von Arthrose. Speziell pathologische Achsenverhältnisse von Tibia und Femur in der Frontalebene in Form der „Varus-Valgus-Deformität“ sind mit

einer Prävalenz von 12% besonders häufig und haben daher bedeutende klinische Relevanz. (Toporowski et al. 2020)

Durch die unphysiologische Achsstellung resultiert eine ungleichmäßige Kraftübertragung im Kniegelenk, die mit einer unphysiologischen Lastenverteilung zwischen dem medialen und lateralen Kniegelenkkompartiment einhergeht. Daraus ergibt sich eine, je nach Art der zugrundeliegenden Fehlstellung, einseitige Überlastung eines der beiden Kompartimente. Diese Überlastung korreliert dabei mit der Knorpeldicke und dem Knorpelverschleiß des überlasteten Gelenks. (Cicuttini et al. 2004)

Der durch die Überlastung bedingte Knorpelverschleiß begünstigt seinerseits die Entstehung einer Arthrose oder kann eine bereits bestehende Gelenksarthrose verstärken. (Cerejo et al. 2002)

Aufgrund dieses Zusammenhangs werden Fehlstellungen der Beinachse auch als „präarthrotische Deformitäten“ bezeichnet.

1.1 Anatomie der unteren Extremität

Anatomisch betrachtet, bestehen unsere Beine im Wesentlichen aus drei großen Gelenken, die über große Röhrenknochen in Verbindung stehen und schließlich über die Füße Bodenkontakt erhalten. Die Verbindung der Beine mit dem restlichen Rumpf erfolgt im Bereich des Hüftgelenks. Dieses besteht aus einer knöchernen Verschmelzung der Beckenknochen Os pubis (Schambein), Os ilium (Darmbein) und dem Os ischii (Sitzbein). Diese sind durch eine Y-förmige Wachstumsfuge voneinander getrennt, die etwa ab dem 15. Lebensjahr verknöchert und zum Os coxae (Hüftbein) zusammenwächst. Diese drei Knochenanteile formen ihrerseits die Gelenkpfanne des Hüftgelenks in Form des Acetabulums. Über dieses steht der Femur (Oberschenkelknochen) mit seinem Caput femoris artikulierend, im Sinne eines Kugelgelenks, in Verbindung. In Kombination mit den umgebenden Muskeln, dem Bandapparat und der faserknorpeligen Gelenkklippe- dem Labrum acetabuli- ergibt sich das die Beine mit dem Rumpf verbindende Hüftgelenk.

Der Femur läuft als größter und kaliberstärkster Röhrenknochen weiter nach distal um zusammen mit der Tibia (Schienbein) im gemeinsamen Kniegelenk den artikulativen Übergang zum Unterschenkel zu bilden. Das Kniegelenk stellt somit gewissermaßen das zentrale Gelenk und den Dreh- und Angelpunkt zwischen Ober- und Unterschenkel dar.

Ausgehend vom Kniegelenk setzt sich der knöcherne Unterschenkel fort, welcher aus den beiden Röhrenknochen Tibia (Schienbein) und Fibula (Wadenbein) besteht. Die mediale Tibia und die laterale Fibula sind über das proximale Tibiofibulargelenk sowie über zwei Syndesmosen, der Membrana interossea cruris und der Syndesmosis tibiofibularis, miteinander verbunden. Letztere verbindet die distalen Enden von Tibia und Fibula, den Malleolus medialis (tibialis) und Malleolus lateralis (fibularis) zur Malleolengabel, die den Talus (Sprungbein) umfasst und mit ihm das obere Sprunggelenk bildet, welches die artikulierende Verbindung zu den Füßen darstellt.

1.2 Anatomie des Kniegelenks

Das Kniegelenk liegt zentral als mittleres Gelenk der unteren Extremität am Übergang von Femur zu Tibia, und bildet den artikulativen Übergang zwischen Ober- und Unterschenkel. Es gilt dabei als das größte Gelenk des Menschen mit den längsten Hebelarmen. (Lobenhoffer et al. 2014)

Das Kniegelenk ist trikompartimentell aufgebaut, d.h. es besteht aus drei zu differenzieren Gelenk-Kompartimenten bzw. drei Teilgelenken, die in ihrer Gesamtheit das Kniegelenk bilden. Dies ist zum einen das hauptsächlich an der Bildung des Kniegelenks beteiligte Femorotibialgelenk, das ausgehend von den hier artikulierenden Femurkondylen in ein laterales und ein mediales Kompartiment unterteilt werden kann und das Femoropatellargelenk.

Innerhalb des Femorotibialgelenks artikulieren medialer und lateraler Femurkondylus mit dem Tibiaplateau, welches sich seinerseits aus einem medialen und lateralen Tibiakondylus zusammensetzt, miteinander. Im

Femoropatellargelenk sind hingegen die Patella und die Facies patellaris des Femur als artikulierende Gelenkkörper zu identifizieren. (Aumüller et al. 2017)

Durch seinen Aufbau handelt es sich beim Kniegelenk funktionell um ein Drehscharniergelenk (auch Trochogynglimus), dessen hauptsächlicher Freiheitsgrad in der Flexion und Extension in der Frontalebene besteht. Darüber hinaus ist über das Kniegelenk aber auch eine axiale Längsrotation sowie antero-posteriore Translationsbewegung möglich. (Lobenhoffer et al. 2014) Das Kniegelenk ist gekennzeichnet durch einen großen Bewegungsumfang vor allem in der Flexion bei gleichzeitig geringer knöcherner Führung der Gelenkanteile. Dies steht in Diskrepanz zu den großen Belastungsmomenten, die im Kniegelenk realisiert werden und Druckkräfte zwischen dem 3,4-fachen des Körpergewichts (beim Gehen auf ebenem Untergrund) bis zum 4,3-fachen Körpergewicht (beim Treppensteigen) umfassen. (Masouros et al. 2010) Daher sind zusätzliche Stabilisatoren notwendig, die die Gelenkführung verstärken und der notwendigen Belastung standhalten. Hierbei werden aktive und passive Stabilisatoren unterschieden. Den aktiven Stabilisator bildet dabei die Gesamtheit der Muskulatur im Bereich des Kniegelenks. Unter den passiven Stabilisatoren werden hingegen die Bänder, Menisken und die Gelenkkapsel subsummiert. (Niethard et al. 2022) Die ligamentäre Führung umfasst dabei im Wesentlichen die beiden Seitenbänder (Lig. collaterale mediale und laterale bzw. tibiale und fibulare) sowie die beiden Kreuzbänder (Lig. cruciatum anterius und posterius) sowie die Gelenkkapsel. Im Unterschied zu den Menisken führen die ligamentären Stabilisatoren zu einer Stabilisierung des Gelenks von außen, wohingegen die Menisken innerhalb des Gelenks als Bestandteil der artikulierenden Gelenkflächen halbmondförmig auf dem Tibiaplateau liegen und hierdurch die Gelenkfläche vergrößern und als eine Art Stoßdämpfer gegenüber der axialen Druckbelastung dienen. Sie dienen gewissermaßen als knorpelige Ergänzung der geringen knöchernen Kontaktfläche zwischen Femur und Tibia und schienen die artikulierenden Gelenkflächen und sorgen dadurch für eine gleichmäßige Druckverteilung zwischen Femurcondylen und den tibialen Gelenkflächen. (Aumüller et al. 2017)

1.3 Mechanik des Kniegelenks

Wie bereits eingangs erwähnt ist das Kniegelenk mechanisch als Drehscharniergelenk aufgebaut. Der hauptsächliche Bewegungsgrad erfolgt in Richtung der Scharnierbewegung in Form der Flexion und Extension entlang der Transversalachse. Nach der Neutral-Null-Methode umfasst der Bewegungsumfang von Flexion/Extension $150^{\circ}/0/0^{\circ}$. Die Flexion ist dabei theoretisch uneingeschränkt möglich, wird aber durch die aktive Insuffizienz der ischiokruralen Beugemuskulatur bei 150° limitiert. (Aumüller et al. 2017) Im Zuge der Extension kommt es hingegen zu einer zunehmenden Anspannung und Verwindung der Kreuzbänder, welche zu einer Außenrotation des Unterschenkels von $5-10^{\circ}$ führen, bevor die volle Streckung erreicht ist. Dieses Phänomen wird als Schlussrotation bezeichnet und sorgt dafür, dass das Kniegelenk in der endständigen Streckstellung stabil einrastet. (Aumüller et al. 2017) Bei Frauen und Kindern kann eine Extension von $5-10^{\circ}$ möglich sein. Höhere Werte gelten hingegen als pathologisch und werden als Genu recurvatum bezeichnet. (Aumüller et al. 2017)

Als weiterer Bewegungsgrad besteht die Möglichkeit der Rotation der Tibia gegenüber dem Femur. Da Gelenkkapsel und die Seitenbänder im gestreckten Zustand jedoch eine Rotation vermeiden und dadurch den aufrechten Stand des Menschen stabilisieren, ist die Rotation nur im gebeugtem Zustand durch die dabei relaxierten Seitenbänder und Gelenkkapsel möglich. Die Bewegungsumfänge betragen nach der Neutral-Null-Methode für die Innen-/Außenrotation am 90° gebeugten Knie $10^{\circ}/0/30^{\circ}$. (Aumüller et al. 2017)

Aus dem anatomischen Aufbau der Beine und seiner Gelenke und der Einflussnahme der verschiedenen Komponenten auf die resultierende Beinachse wird bereits ersichtlich, dass die untere Extremität kein starres Konstrukt ist, sondern ein über viele Achs- und Bewegungspunkte miteinander verbundenes Ganzes darstellt.

Dies führte nicht zuletzt zu der in dieser Arbeit behandelten Forschungsfrage inwieweit operative Korrekturen einer Achsfehlstellung im Bereich des Kniegelenks mithilfe von kniegelenknahen Osteotomien zu einer Beeinflussung

der Achsstellung im Bereich des Hüftgelenkes führen. Denn betrachtet man neutral die Anatomie des Beins, so erscheint es annehmbar, dass die Veränderung der Ausrichtung eines der Gelenke des Beins auch einen Einfluss auf die benachbarten Gelenke hat. Speziell im Falle von Korrekturen am Kniegelenk als größtem und komplexestem und dazu noch zentral im Bereich der unteren Extremität gelegenen Gelenk.

Das Wissen und die Erkenntnis um diese etwaigen Einflüsse und Wechselwirkungen scheint gerade im Zeitalter der Subspezialisierungen in der Medizin und speziell der Orthopädie unerlässlich, wo Hüft- und Knieexperten womöglich nicht mit den Konzepten des jeweils anderen vertraut sind und das Bein folglich weniger als das zusammenhängende Ganze betrachtet wird, das es anatomisch aber darstellt und somit letztlich vermeidbare Veränderungen und Negativeinflüsse auf die jeweils benachbarten Gelenkregionen des Beines entstehen.

Ob und inwieweit dies im Falle der kniegelenksnahen Umstellungsosteotomien Einfluss auf das Hüftgelenk nimmt, gemessen Anhand der Veränderung des ischiofemoralen Abstandes, war der Bestandteil dieser Arbeit und soll im Weiteren erläutert werden.

Doch bevor dies dargelegt wird, soll zunächst ein Einblick in den physiologischen Aufbau der Beinachse, ihrer Definition sowie der Definition des ischiofemoralen Abstandes erfolgen.

Um zu klären, ob kniegelenknahe Osteotomien Einfluss auf den ischiofemoralen Abstand der Hüfte nehmen, muss zunächst betrachtet werden, wie sich die physiologische Beinachse definiert, welche Achsenverhältnisse physiologischerweise bestehen, wie Abweichungen von denselbigen entstehen und wann und wie die Umstellungsosteotomien erfolgen. Darüber hinaus muss geklärt werden, wie sich der ischiofemorale Abstand definiert.

1.4 Achsverhältnisse der unteren Extremität

Betrachtet man die Achsenverhältnisse der unteren Extremität, so werden hier im Wesentlichen zwei Hauptachsen differenziert: die anatomische Beinachse und die mechanische Beinachse.

Die anatomische Beinachse bildet sich aus den beiden Schaftmittellinien von Femur und Tibia, die mittig durch die Diaphysen der beiden Röhrenknochen verlaufen. Aufgrund des abgewinkelten Ansatzes des Femurs über den Schenkelhals am Hüftgelenk, laufen die Schaftmittellinien von Femur und Tibia nicht geradlinig ineinander über, sondern bilden einen nach lateral offenen Winkel, den femorotibialen Winkel (aFTW). Dieser beträgt physiologischerweise 173-175°. (Lobenhoffer et al. 2014)

Die mechanischen Achsen des Beines bilden sich im Unterschied zu den anatomischen Achsen aus den Verbindungslinien zwischen den Mittelpunkten der angrenzenden Gelenke. Definiert werden die mechanische Femurachse, die mechanische Tibiaachse sowie die gesamte mechanische Beinachse.

Die mechanische Femurachse verläuft vom Mittelpunkt des Femurkopfes zum Mittelpunkt des Kniegelenks und bildet dabei mit der anatomischen Femurachse einen Winkel von etwa 6° ($\pm 1^\circ$), den sogenannten anatomisch-mechanischen Femurwinkel (aMFW). (Lobenhoffer et al. 2014)

Die mechanische Tibiaachse läuft vom Zentrum des Kniegelenks zum Zentrum des Sprunggelenks an der distalen Tibiagelenkfläche. Sie verläuft nahezu identisch zu ihrer anatomischen Achse, die nur wenige Millimeter medial von der mechanischen Tibiaachse verläuft.

Die gesamte mechanische Beinachse hingegen, auch „Mikulicz-Linie“ genannt, ist nicht die Zusammensetzung der beiden mechanischen Achsen von Femur und Tibia, sondern definiert sich als Verbindungslinie zwischen Mittelpunkt des Femurkopfes und dem Zentrum des oberen Sprunggelenks. Damit verläuft sie unter physiologischen Achsverhältnissen im Schnitt etwa 4 (± 2) Millimeter medial des Kniegelenkszentrums. (Lobenhoffer et al. 2014)

Eine über dieses Maß weiter nach medial abweichende mechanische Beinachse und damit ein lateral der mechanischen Achse gelegenes Kniezentrum, führt zu einem Genu varum („O-Bein“). Zeigt die mechanische Beinachse hingegen eine stärkere Abweichung nach lateral, liegt also das Kniezentrum medial der mechanischen Achse, besteht ein Genu valgum („X-Bein“).

1.5 Achsenfehlstellungen

Achsenfehlstellungen beschreiben Abweichungen der Beinachse von den physiologisch üblichen Maßen. Die Achsenfehlstellungen können dabei unterschiedlich auftreten und auch in komplexer Form kombiniert vorliegen. Grundsätzlich sind Achsabweichungen in allen 3 Ebenen, also in der frontalen, sagittalen als auch transversalen Ebene möglich. Zusätzlich können auch Veränderungen der Achsendrehung der femoralen und tibialen Diaphysen bestehen, was dann als „Torsionsdeformität“ bezeichnet wird. Die Prävalenz des Genu varum und Genu valgum, als die beiden häufigsten Achsfehlstellungen im Bereich des Kniegelenks, liegt bei etwa 12%. (Toporowski et al. 2020)

1.5.1 Ursachen und Folgen von Achsenfehlstellungen

Die Art und Weise, in der Achsenfehlstellungen auftreten können, sind ebenso vielfältig, wie die möglichen Ursachen für Fehlstellungen der Beine. Grundsätzlich kann zwischen primären und sekundären Achsendeformitäten unterschieden werden.

Primäre Deformitäten (sog. primärer Vagus oder Valgus) sind Achsenfehlstellungen, die durch eine knöcherne Deformität bedingt sind. Durch die knöcherne Deformität resultiert dann eine unphysiologische, meist einseitige Fehlbelastung des Kniegelenks mit konsekutiver Degeneration des überbelasteten Gelenkabschnitts und dadurch weiterer Verstärkung der Fehlstellung. (Lobenhoffer et al. 2014) Primäre Fehlstellung können sich daher häufig schon im Kindesalter manifestieren. Ursächlich sind beispielsweise Wachstumsfehler oder vorzeitige Epiphysenverschlüsse. Zudem kommen

metabolische Erkrankungen mit Einfluss auf den Knochenstoffwechsel, wie Rachitis oder renale Osteopathie, als auch myopathische und neurogene Systemerkrankungen infrage.

Sekundäre Deformitäten weisen hingegen zunächst einen an sich physiologischen Beinachsenverlauf auf, können aber sekundär durch Knorpel- und Meniskusschäden sowie durch rheumatoide Arthritis, Knochentumore oder Knochennekrosen als auch beispielsweise durch nicht achsgerechte Frakturheilung zur Achsabweichung führen. (Lobenhoffer et al. 2014; Bonnin und Chambat 2004)

Die insgesamt häufigste und daher auch bekannteste Achsenfehlstellung ist die „Varus-Valgus-Deviation“ mit Abweichungen der physiologischen Beinachse in der Frontalebene. Ihr kommt aufgrund der Häufigkeit eine besondere klinische Bedeutung zu. (Lobenhoffer et al. 2014)

Liegt eine Varus- oder Valgusfehlstellung vor, so resultiert eine unphysiologische und ungleichmäßige Kraftübertragung und Lastenverteilung des Körpergewichts auf das Kniegelenk mit einseitiger Überlastung des je nach Fehlstellung medialen oder lateralen Kompartiments.

Diese einseitige Überlastung geht mit einem vermehrten Verschleiß des überlasteten Gelenkareals einher. Tatsächlich lässt sich nach Cicuttini et al. 2004 eine Korrelation zwischen der veränderten Gelenkachse und der daraus resultierenden Knorpeldicke und dem Knorpelverschleiß nachweisen. (Cicuttini et al. 2004). Aufgrund dieser Fehlbelastung und dem daraus resultierenden Verschleiß der Knorpelflächen gehen Varus- und Valgusfehlstellungen mit einem erhöhten Arthroserisiko einher bzw. begünstigen die Progression bei bestehender Arthrose. (Cerejo et al. 2002; Lobenhoffer et al. 2014)

1.5.2 **Diagnostik von Achsenfehlstellungen**

Bevor nun einzelne Achsenfehlstellungen genauer beleuchtet werden und die Einflussnahme etwaiger Achsenkorrekturen auf die benachbarten Gelenke untersucht wird, stellt sich zunächst einmal die Frage, wie die Achsenfehlstellungen überhaupt diagnostiziert werden.

Die Normwerte der Achsenverhältnisse wurden bereits eingehend beschrieben. Um nun Abweichungen hiervon festzustellen und ausgehend davon die Achsenfehlstellung zu diagnostizieren, dienen heute einheitlich und standardmäßig angefertigte Röntgenaufnahmen. Die Vereinheitlichung bei der Anfertigung der Röntgenaufnahmen ist essenziell, da nur hierdurch sichergestellt werden kann, dass dieselbe Achsabweichung unabhängig vom Untersucher sicher diagnostiziert wird und falsche Diagnosen und nicht indizierte Umstellungsosteotomien durchgeführt werden. Hinzu kommt, dass die Thematik der Achsenfehlstellungen durch den standardisierten Ansatz vergleichbar wird und bleibt. Denn um, wie oben bereits dargelegt, die verschiedenen Achsabweichungen zum Teil anhand definierter Winkel und Achsenabweichungen diagnostizieren zu können, muss eine korrekte Achsenaufnahme der Beine erfolgen.

Standard ist dabei die „Ganzbeinstandaufnahme“. Wie der Name bereits suggeriert, handelt es sich dabei um eine Röntgenaufnahme beim stehenden und damit beidseits die Beine voll belastenden Patienten. Abgelichtet wird dabei das gesamte Bein ausgehend vom Hüftgelenk bis zum oberen Sprunggelenk. Der Fokus des Röntgenstrahls wird dabei auf Höhe des Kniegelenks projiziert. Die Patella sollte zudem streng nach ventral ausgerichtet sein. Im Falle ausgeprägter Fehlstellungen müssen eventuell mehrere Aufnahmen vorgenommen werden, um das Bein in ganzer Länge abzubilden. Um Vergrößerungsartefakte oder Verzerrungen, speziell bei digitalisierten Aufnahmen zu vermeiden, sollte eine Referenz beispielsweise in Form einer Referenzkugel verwendet werden. "Die höchste Präzision bietet die Referenzkugel, die auf Höhe des Zentralstrahlengangs platziert wird." (Lobenhoffer et al. 2014b, 42)

Um nun ausgehend von der standardisiert angefertigten Röntgenaufnahme auf die Art der Fehlstellung einerseits zu schließen und dann aber auch andererseits zu identifizieren, wo im Verlauf des Beins die Ursache für die Achsdeviation begründet liegt (femoral, tibial oder beides und in welcher Ebene), gibt es verschiedene Testverfahren und Messungen. Im Falle der beiden häufigsten und auch im Rahmen dieser Arbeit behandelten Achsendeviationen, der Varus- und Valgus-Deformität, handelt es sich, wie bereits erwähnt, um Achsfehlstellungen innerhalb der Frontalebene.

Diese werden nach Paley mithilfe des `Malalignment-Test` analysiert und diagnostiziert. (Lobenhoffer et al. 2014; Paley und Pfeil 2000) Ein Malalignment (= Fehlstellung) setzt dabei eine zugrundeliegende, signifikante mechanische Achsendeviation (MAD) voraus. Die jeweilige Ursache für die vorliegende MAD, also ob eine femorale, tibiale oder kombinierte Fehlstellung vorliegt, wird dann durch den Malalignment-Test identifiziert.

Malalignment-Test

Im Rahmen des Malalignment-Tests werden der LDFA, der MPTA sowie der JLCA gemessen. Zeigt sich nun eine Abweichung in einem oder mehreren dieser Winkel kann auf den ursächlich zugrundeliegenden Ort der Fehlstellung geschlossen werden. Liegt beispielsweise ein veränderter MPTA vor, so ist die Tibia die Quelle der Fehlstellung und die Korrektur mittels Osteotomie sollte tibial erfolgen. Weist hingegen der LDFA einen abnormalen Wert auf, kann auf eine femorale Achsfehlstellung geschlossen werden. Sind sowohl der MPTA als auch der LDFA verändert, liegt eine kombinierte femorotibiale Achsfehlstellung vor und es bietet sich eine Doppelosteotomie an. Die Bestimmung des JLCA im Rahmen des Malalignment-Tests dient zur Überprüfung der Ausrichtung der Gelenkflächenlinien von Tibia und Femur. Sollte der JLCA Abweichungen seiner Norm zeigen, kann dies auf Bandlaxizität der Seitenbänder sowie bestehende Knorpel- oder Knochenverluste im Bereich des Kniegelenks hindeuten und diese Faktoren als mögliche weitere Ursachen für die Achsfehlstellung identifizieren. (Paley und Pfeil 2000)

1.5.3 *Genu varum*

Das Genu varum (von lateinisch „Genu“ = das Knie und „varus“ = auseinandergebogen, krummbeinig) oder auch umgangssprachlich die „O-Bein-Fehlstellung“ ist zusammen mit dem Genu valgum die häufigste Achsenfehlstellungen im Bereich der unteren Extremität. Sie stellt dabei eine Abweichung der Beinachse in der Frontalebene dar, wobei die mechanische Beinachse (Mikulicz-Linie) weiter medial vom Kniegelenkszentrum verläuft als physiologischerweise der Fall. Sprich das Kniegelenk liegt seinerseits lateraler der Mikulicz-Linie. Das Ausmaß der Achsabweichung wird nach Paley auch anhand der „mechanische Achsendeviation“ (mechanical axis deviation, MAD) definiert, die sich wiederum als die Entfernung der mechanischen Achse vom Kniegelenkszentrum ergibt. Hiernach besteht eine signifikante Varusfehlstellung wenn die MAD mehr als 15 Millimeter medial des Kniegelenkzentrums liegt. (Paley und Pfeil 2000)

Im Zuge der Varusfehlstellung kommt es zudem zu einer Vergrößerung des „anatomischen femorotibialen Winkel“ (kurz aFTW). Dieser ergibt sich als ein nach lateral offener Winkel zwischen anatomischer Femurachse und anatomischer Tibiaachse bedingt durch den nicht ganz geradlinigen Übergang der anatomischen Schaftachse des Femurs in die anatomische Tibiaachse. Er beträgt physiologischerweise 173-175°. Durch die Medialisierung der mechanischen Beinachse bei Varusfehlstellung kommt es entsprechend auch zu einer Zunahme des aFTW über die normalen Werte hinaus. (Lobenhoffer et al. 2014)

Neben der MAD und dem aFTW wird jedoch die Verwendung des „mechanischen femorotibialen Winkels“ (kurz mFTW) empfohlen, da dieser im Vergleich zur MAD-Bestimmung skalierungsunabhängig ist und somit auch bei digitalen Röntgenbildern einfach angewendet werden kann. Der mFTW stellt das „mechanische Pendant“ zum aFTW dar und bildet sich als Winkel zwischen mechanischer Femurachse und mechanischer Tibiaachse. Sein Normwert liegt bei etwa -1,2°. Dabei gilt nomenklatorisch ein mFTW von $< -2^\circ$ (negativer Wert) als Varusabweichung und ein mFTW von $> 0^\circ$ als Valgusabweichung. (Hsu et al. 1990; Lobenhoffer et al. 2014)

1.5.4 ***Genu valgum***

Das Genu valgum (von lateinisch „valgus“ = schief, krummbeinig) oder auch umgangssprachlich „X-Beinfehlstellung“ bildet zusammen mit dem bereits erwähnten Genu varum die beiden häufigsten Entitäten der Achsenfehlstellungen der unteren Extremität. Das Genu valgum stellt dabei wie sein spiegelbildlicher Verwandter eine Achsabweichung der mechanischen Achse in der Frontalebene dar. Während dem Genu varum eine Medialisierung der mechanischen Achse zugrunde liegt, handelt sich beim Genu valgum um eine Lateralisierung derselbigen. Mit anderen Worten: die Mikulicz-Linie liegt beim Genu valgum lateral des Kniegelenkszentrums. Definiert nach der mechanischen Achsendeviation (MAD, nach Paley 2000) ist diese bei einer signifikanten Valgusfehlstellung mehr als 10 mm lateral vom Kniegelenkszentrum gelegen. (Lobenhoffer et al. 2014; Paley und Pfeil 2000)

1.6 **Definition ischiofemorale Abstand**

Der ischiofemorale Abstand (ischiofemoral distance, IFD) definiert sich als der „kleinste messbare Abstand zwischen der lateralen Kortikalis des Sitzbeinhöckers (Tuberositas des Os ischium) und der posteromedialen Kortikalis des Trochanter minor“. (Hujazi et al. 2016, 197)

Der ischiofemorale Abstand gewinnt zunehmend für seine Rolle in der Pathogenese von extraartikulärem Hüftschmerz an Bedeutung. (Tosun et al. 2012) Eine Verminderung des ischiofemorale Abstandes geht mit einer zunehmenden Enge im ischiofemorale Raum einher, eine Pathologie, die auch als „ischiofemorale Impingement“ bezeichnet wird. (de Sa et al. 2014; Siebenrock et al. 2013; Bredella et al. 2015)

Während die Einflussnahme von kniegelenknahen Umstellungsosteotomien auf den ischiofemorale Abstand im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wird, konnte durch Ahmad et al. 2023 bereits gezeigt werden, dass es anatomische Unterschiede in der Größe des ischiofemorale Raums im Vergleich von Frauen und Männern gibt. So haben Frauen im Rahmen der geburtshilflichen Anpassungen ein anatomisch breiteres Becken, welches mit einem vergrößerten

subpubischen Winkel einhergeht, was dadurch den zur Verfügung stehenden ischiofemoralen Abstand im Vergleich zum männlichen Becken verringert und so das Risiko für ischiofemorale Konflikte, wie beispielsweise einem Impingement, erhöht. (Ahmad et al. 2023)

1.7 Fragestellung und Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit zielt darauf ab, zu untersuchen ob und inwieweit kniegelenknahe Umstellungsosteotomien, die im Rahmen von Beinachsenfehlstellung zur Korrektur angewandt wurden, Einfluss auf die benachbarten Gelenke, speziell das Hüftgelenk nehmen. Gemessen und interpretiert wurde dies in Bezug auf etwaige Veränderungen im Bereich des Ischiofemoralen Raums der Hüfte, der über den ischiofemoralen Abstandes (IFD) definiert wurde. Zum Zeitpunkt der klinischen Erhebung dieser Arbeit war bereits bekannt, dass Veränderungen des ischiofemoralen Raums der Hüfte im Sinne einer Verringerung des ischiofemoralen Abstandes mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit für ein ischiofemorales Impingement einhergehen. Es liegt vielfache Literatur zur Untersuchung des ischiofemoralen Impingements vor. (Ganz et al. 2013; Gollwitzer et al. 2017; Kivlan et al. 2017; Konrads et al. 2022; Stafford und Villar 2011; Siebenrock et al. 2013; Torriani et al. 2009; Tosun et al. 2012) Keine dieser Arbeiten untersuchte jedoch bisher inwieweit hüftferne Faktoren, wie die kniegelenknahen Umstellungsosteotomien, einen Einfluss auf den ischiofemoralen Abstand nehmen. Die Arbeitshypothese dieser Arbeit bestand in der Annahme, dass kniegelenknahe Umstellungsosteotomien signifikanten Einfluss auf den ischiofemoralen Raum der Hüfte - gemessen am ischiofemoralen Abstand - nehmen und speziell valgisierende Umstellungsosteotomien mit einer Verringerung eben dieses Abstandes einhergehen.

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign

Ausgewertet wurden die Daten von insgesamt 154 Patienten der Berufsgenossenschaftlichen Klinik Tübingen, die sich von Januar bis einschließlich Dezember 2017 einer kniegelenknahen Osteotomie unterzogen.

2.2 Ethikvotum

Die Genehmigung zur Durchführung der Studie mit der Studiennummer 421/2020BO erfolgte am 08.06.2020 durch die Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Universität Tübingen. Der entsprechende Ethikantrag hierfür wurde am 10.04.2020 fertiggestellt und ging am 28.05.2020 bei der Ethik-Kommission ein.

2.3 Patientenkollektiv

2.3.1 *Einschlusskriterien*

Eingeschlossen wurden all jene Patienten, geschlechtsunabhängig, im Alter von mindestens 18 Jahren, bei welchen eine kniegelenknahe Osteotomie durchgeführt worden war und präoperative und postoperative Röntgenaufnahme angefertigt worden waren, um so die postoperative Situation mit der präoperativen Situation vergleichen zu können.

2.3.2 *Ausschlusskriterien*

Ausschlusskriterien waren demgegenüber das Fehlen einer Referenzkugel in den Röntgenaufnahmen, die Durchführung einer operativen Korrektur in mehreren Ebenen sowie eine schlechte Bildqualität der postoperativen Röntgenaufnahme.

Unter Berücksichtigung der oben genannten Kriterien wurden somit schließlich 154 von insgesamt 175 operierten Patienten in die zu untersuchende Kohorte eingeschlossen.

2.4 Operatives Vorgehen

Alle durchgeführten und hier nachfolgend bewerteten Osteotomien wurden präoperativ mithilfe einer landmarken-basierten Deformitätsanalyse geplant. Die durchgeführten Osteotomien umfassten dabei zum einen die „hohe tibiale Osteotomie“ (HTO), die distale femorale Osteotomie (DFO) sowie die zweistufige Osteotomie. Die HTO wurde dabei nach der Methode von Staubli und Lobenhoffer mittels TomoFix™ MHT Plattenfixator (DePuySynthes, Solothurn, Schweiz) durchgeführt. (Galla und Lobenhoffer 2007; Galla und Lobenhoffer 2004; Lobenhoffer und Agneskirchner 2003; Staubli et al. 2003) Die DFO wurde nach Lobenhoffer durchgeführt (Lobenhoffer et al. 2017) und die Doppelosteotomie gemäß der Beschreibung von Schröter et al. (Schröter et al. 2019) Insgesamt wurde bei 47,4 % (n=73) der untersuchten Patienten eine HTO durchgeführt, bei 35,1% (n=54) erfolgte eine DFO und in 17,5% (n=27) Fällen eine Doppelosteotomie.

2.5 Umstellungsosteomien

2.5.1 *Geschichte und Arten*

Die Umstellungsosteotomien nehmen heute zur Behandlung vieler Pathologien rund um das Kniegelenk eine ebenso zentrale Rolle im orthopädischen Handwerk ein, wie das Kniegelenk seinerseits anatomisch selbst. Die Ursprünge der knienahen Osteotomien gehen bis in die Antike zurück. Und auch im Mittelalter finden sich einzelne Dokumentationen. (Lobenhoffer et al. 2014) Die letztlich Wegbereiter zur verbreiteteren Durchführung der Osteotomien waren die Einführung von Anästhesie, Asepsis, Blutungsmanagement und Radiologie im 19. Jahrhundert. (Lobenhoffer et al. 2014) Die damaligen Indikationen zu deren Durchführung waren vor allem Fehlstellungen, bedingt durch die damals weitverbreitete Rachitis aber auch posttraumatische Fehlstellungen sowie Kontrakturen wurden durch die Osteotomien behoben. (Lobenhoffer et al. 2014; Sir William Macewen)

Durch die seit Anfang des 21. Jahrhunderts eingeführten, winkelstabilen Plattenfixateure erfolgte eine weitere, sehr viel jüngere Neuerung in der

Anwendung der Osteotomien, die heute eine sehr viel genauere und stabilere Ausrichtung und Fixierung der Osteotomie ermöglicht. Darüber hinaus wurde hierdurch das Einbringen eines Beckenspans bei öffnenden Osteotomien (open-wedge Verfahren), um hierdurch den Osteotomiespalt aufzufüttern, bis zu einem gewissen Öffnungsgrad obsolet. (Lobenhoffer et al. 2014; Staubli et al. 2003) Heutzutage gilt die valgisierend, biplanar mediale open-wedge Tibiaosteotomie mit winkelstabilem Plattenfixateur als Standardverfahren bei (tibialer) Varusfehlstellung.

2.5.2 HTO – Hohe tibiale Osteotomie

2.5.2.1 Grundprinzip

Bei der hohen tibialen Osteotomie (HTO) handelt es sich um ein operatives Verfahren, das primär bei medial betonter Kniegelenksarthrose aufgrund einer Varusfehlstellungen angewandt wird. „Ziel der HTO ist es dabei, durch Verlagerung der mechanischen Tragachse (Mikulicz-Linie) nach lateral eine Korrektur der Achsfehlstellung und mit ihr eine Entlastung des medial überlasteten Kompartiments zu erreichen“. (Lobenhoffer et al. 2014) Durch die HTO wird also letztlich die Varusfehlstellung durch eine „Valgisierung“ korrigiert. Besonders wirksam ist die HTO bei primärer Varusfehlstellung. (Beard et al. 2007)

2.5.2.2 Durchführungsarten der HTO

Insgesamt können verschiedene Verfahrensweisen bei der Durchführung einer HTO differenziert werden. So werden einmal die mediale und laterale HTO differenziert, bezogen auf die Seite der Tibia, an der die Schnittführung erfolgt. Neben der Zugangsseite wird zudem zwischen der „schließenden“ oder „closed-wedge“- und „öffnenden“ oder „open-wedge“- Technik differenziert. Bei der in der Regel von lateral durchgeführten valgisierenden closed-wedge Technik wird ein lateral basierter Knochenkeil (Wedge) aus der Tibia ausgeschnitten und die Tibia anschließend um das Ausmaß des resezierten Knochenkeils entlang der entstandenen Schnittkanten „zugeklappt“, daher closing-wedge. Diese Methode

galt lange Zeit als Goldstandard. Sie birgt aber durch den lateralen Zugang zur Tibia, der anatomisch durch die hier ansetzende Fibula sowie die Unterschenkelextensoren versperrt ist, einige Risiken wie beispielsweise die Notwendigkeit einer Fibulaosteotomie oder einer Disartikulation des proximalen Tibiofibulargelenks. Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit einer Ablösung der Unterschenkelextensoren sowie eine, aufgrund der anatomischen Lagebeziehung, Gefahr der Verletzung des N. peroneus. (Hinterwimmer et al. 2012)

Im Unterschied dazu wird die Tibia bei der open-wedge-Technik typischerweise medial osteotomiert und dann valgisierend aufgeklappt. Die somit erreichte neue Achsstellung wird dann mithilfe von Plattenfixateuren arretiert und stabilisiert und der erzeugte Bruchspalt somit durch die Plattenosteosynthese überbrückt, bis der Spalt über die Zeit mit Knochenkallus aufgefüttert wird und die Tibia in der gewünschten Stellung achskorrigiert verwächst. Durch den medialen Zugangsweg bei der open-wedge HTO bleiben die zuvor genannten Nachteile des lateralen Zugangswegs aus. Dennoch war auch die open-wedge HTO nicht risikofrei. Speziell die Gefahr von sekundären Korrekturverlusten war in der Vergangenheit ein Problem. Doch seit Einführung moderner winkelstabiler Plattenfixateure wie z.B. TomoFix™ der Firma Synthes oder PEEKPower Plate™ der Firma Arthrex gilt dieses Risiko als mehr oder weniger obsolet und kann als sehr sicher angesehen werden weshalb es heute gegenüber der closed-wedge Methode favorisiert wird. (Hinterwimmer et al. 2012; Brinkman et al. 2008; Lobenhoffer und Agneskirchner 2003) Ein weiterer Vorteil der open-wedge Methode besteht zudem in der Möglichkeit zur intraoperativen Anpassung der Korrektur. (Agneskirchner et al. 2004)

Weiter kann bei der HTO neben den genannten Arten zusätzlich auch noch die „uniplanare“ von der „biplanaren“ HTO unterschieden werden. Hierbei handelt es sich um die Art der Schnittführung. Während bei der uniplanaren HTO eine Osteotomie entlang der axialen Ebene (entsprechend der Horizontalen) erfolgt wird die Osteotomie bei biplanarem Ansatz um eine weitere Osteotomie in der Frontalebene erweitert. Diese erfolgt typischerweise entweder als ein nach proximal gerichteter Schnitt auf die Tuberositas tibiae zu, in sogenannter

„aufsteigender“ Schnittführung, oder nach distal und damit entsprechend „absteigend“. (Hinterwimmer et al. 2012; Pape et al. 2014)

Mittlerweile wird vor allem die mediale open-wedge HTO mit biplanarer Schnittführung als Goldstandard favorisiert. Grund hierfür ist mitunter der durch Pape et al. 2014 in ihrer Arbeit zu kniegelenknahen Osteotomien erbrachte Nachweis der besseren Knochenheilung, welche sich durch die bei biplanarer Schnittführung resultierende „Kombination aus kleinen Keilvolumina und großen knöchernen Kontaktflächen“ (Pape et al. 2014, 966) ergibt.

Letztendlich bleibt jedoch die jeweilig anzuwendende Methode eine individuelle Einzelentscheidung, die sich aus der Art sowie dem Ort und Ursache der jeweiligen Achsfehlstellung und aus der zur Behebung durchgeführten präoperativen Korrekturplanung ergibt. Letzteres erfolgt heute typischerweise computerbasiert, wobei an einem zuvor angefertigten Röntgenbild der Beine, das als Ganzbeinaufnahme im Stehen in anteroposteriorem Strahlengang erfolgt, das angestrebte Korrekturziel mitsamt den Korrekturwinkeln berechnet werden kann. Häufig verwendete Programme sind dabei z. B. mediCAD der Firma HECTEC. (Hinterwimmer et al. 2012; Pape et al. 2004)

2.5.2.3 Indikationen und Kontraindikationen

Für die Durchführung der HTO gibt es verschiedene Indikationen. Klassischerweise erfolgt sie vor allem bei der unikompartimentellen medialen Gonarthrose und einer Varusfehlstellung der unteren Extremität. Nach Hinterwimmer et al. 2012 werden konkret vor allem 4 wesentliche Hauptindikationen genannt:

1. mediale Gonarthrose Grad II–IV,
2. andauernde schmerzhafte mediale Überlastung,
3. mediale Knorpelersatztherapie,
4. chronische laterale/posterolaterale Bandinstabilität.

(Hinterwimmer et al. 2012, 184)

Betrachtet man hingegen die Arbeit von Galla und Lobenhoffer zur Open-wedge HTO mit dem TomoFix™-Plattenfixateur als auch die genannten Indikationen bei Lobenhoffer et al. im Buch „Kniegelenknahe Osteotomien“ von 2014, werden die Indikationen um folgende Punkte erweitert: „Bestehende unikompartimentelle mediale Gonarthrose, Varusfehlstellung der unteren Extremität, Korrektur einer Varusstellung vor rekonstruktiven Maßnahmen im medialen Kompartiment, VKB-Ersatzplastik mit Varusfehlstellung (valgisierendextendierende Osteotomie), Posterolaterale Kniegelenkinstabilität bei Varusmorphotyp (valgisierend-flektierende Osteotomie)“. (Galla und Lobenhoffer 2004, 397; Lobenhoffer et al. 2014)

Als Kontraindikationen werden hingegen „dritt- bis viertgradige Knorpelschäden des lateralen Gelenkabschnittes, Außenmeniskusverlust, starkes Übergewicht sowie auch unzureichende Weichteilverhältnisse an der proximal medialen Tibia und Streckdefizite über 10°“ genannt. (Galla und Lobenhoffer 2004, 397; Lobenhoffer et al. 2014)

2.5.2.4 Operationsprinzip in diesem Patientenkollektiv

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Patientenkollektiv erfolgte die Durchführung der hohen tibialen Osteotomien bei Varusfehlstellungen als mediale biplanare open-wedge HTO mithilfe des TomoFix™-Plattenfixateur. (Galla und Lobenhoffer 2007; Galla und Lobenhoffer 2004; Lobenhoffer und Agneskirchner 2003; Staubli et al. 2003) Hierbei erfolgte eine axial-horizontale Osteotomie in den dorsalen zwei Dritteln der Tibia von medial. Diese wurde so weit nach lateral erweitert, bis ein etwa 10mm dicker Knochensteg am lateralen Ende der Tibia übrigblieb. Im Sinne des biplanaren Vorgehens erfolgte eine weitere vollständige Osteotomie in der Frontalebene von ventral hinter der Tuberositas tibiae aufsteigend in einem Winkel von 135°. Nun erfolgte das langsame Aufspreizen des Osteotomiespaltes unter Schonung der lateralen Knochenbrücke. War das notwendige Ausmaß an Eröffnung des Osteotomiespaltes erreicht, so wurde die neue Achsstellung der Tibia mithilfe des TomoFix™-Plattenfixateur fixiert. Betrug die resultierende Öffnungshöhe des

Osteomiespaltes mehr als 13 Millimeter, wurde der Spalt mit patienteneigener Spongiosa aufgefüllt. Für genauere Hinweise zur operativen Durchführung sowie den genauen Zugangswegen wird auf die zugrundeliegende Literatur verwiesen. (Staubli et al. 2003; Galla und Lobenhoffer 2004)

2.5.3 DFO – Distal femorale Osteotomie

2.5.3.1 Grundprinzip

Als gewissermaßen zu verstehendes Pendant zur HTO handelt es sich bei der distalen Femurosteotomie (kurz DFO) um ein Osteotomieverfahren, welches korrelierend zur HTO typischerweise bei lateral betonter Gonarthrose mit Valgusfehlstellung angewandt wird. Ziel ist entsprechend komplementär zur HTO statt einer Valgisierung die Varisierung der abweichenden Beinachsenstellung. Durch die DFO soll das durch die Valgusdeformität überlastete laterale Kompartiment des Knies entlastet werden, indem die mechanische Tragachse (Mikulicz-Linie) nach medial verlagert wird. Im Zuge der varisierenden DFO wird also eine bestehende Valgusfehlstellung durch Varisierung der Beinachse korrigiert.

Darüber hinaus kann die DFO aber auch als valgisierendes Verfahren bei Varusfehlstellungen alternativ zur HTO angewandt werden, speziell wenn die Ursache für die Varusdeviation femoral bedingt ist.

2.5.3.2 Durchführungsarten

Die DFO kann ähnlich wie auch die HTO je nach Art und Lokalisation der Achsfehlstellung auf verschiedene Arten durchgeführt werden.

Differenziert wird auch hier einmal der Zugangsweg von medial oder lateral und weiter, ob ein schließendes (closed-wedge) oder öffnendes (open-wedge) Verfahren vollzogen wird. Weiter kann, anlehnend an die HTO, auch anhand der Schnittführung weiter in uniplanare (mit nur einer Schnittebene) und biplanare Verfahren (mit Schnittführung in zwei Ebenen) differenziert werden.

Zusätzlich kann die DFO sowohl in varisierender Technik- bei vorliegender Valgusfehlstellung- als auch in valgisierender Technik (bei Varusfehlstellung) durchgeführt werden.

Anwendungsbezogen kann also grundlegend zwischen der varisierenden DFO und der valgisierenden DFO differenziert werden. Da es sich bei dem hier untersuchten Patientenkollektiv um ausschließlich varisierende DFOs bei Valgusfehlstellung gehandelt hat, soll die valgisierende DFO hier nur kurz und der Vollständigkeit halber Erwähnung finden.

Die varisierende DFO hat das Ziel bei einer Valgusfehlstellung, das durch die Valgusdeviation überlastete, laterale Kniekompartiment zu entlasten. Dies kann beispielsweise durch Resektion eines medialen Knochenkeils und anschließendes „Zuklappen“ des Femurs um das Maß des resezierten Keils nach medial erfolgen. Diese als medial schließende oder mediale closed-wedge Technik bezeichnete Methode steht der zweiten Methode, in Form der lateral öffnenden bzw. lateral open-wedge Technik, gegenüber. Bei dieser wird komplementär zur medialen closed-wedge Variante eine laterale Osteotomie vollzogen und der Femur entlang dieser „aufgeklappt“. Hierdurch entsteht ebenfalls eine „Medialisierung“ bzw. „Varisierung“ und folglich Entlastung des lateralen Kompartiments. Allgemein gilt dabei heute die Durchführung der varisierenden DFO als mediale closed-wedge Osteotomie mit biplanarer Technik als bevorzugtes Verfahren, auch wenn nach einer systematischen Analyse von Wylie et al. kein signifikanter Vorteil für eines der beiden Verfahren gefunden werden konnte. (Lobenhoffer et al. 2017; Lobenhoffer et al. 2014; Wylie et al. 2016) Die valgisierende DFO hingegen wird typischerweise als biplanare laterale closed-wedge Osteotomie durchgeführt.

2.5.3.3 Indikationen und Kontraindikationen der varisierenden DFO

Eine der wichtigsten Indikationen der varisierenden DFO ist die lateral unikompartimentelle Gonarthrose mit Valgusfehlstellung der unteren Extremität mit hauptsächlich femoraler Ursache. Liegt eine begleitende proximal tibiale Fehlstellung vor, sollte die Option einer Doppelosteotomie überlegt werden.

Zusätzlich sollte der betroffene Patient nicht älter als 65-70 Jahre und körperlich aktiv sein. (Lobenhoffer et al. 2014; Rosso und Margheritini 2014)

Als Kontraindikation gelten demgegenüber ähnliche sowie teilweise gleiche Faktoren wie bereits bei der HTO. Hierbei sind vor allem „Übergewicht (definiert als das 1,32-fache des normalen Körpergewichts oder einem BMI > 30kg/m²) (Rosso und Margheritini 2014) sowie ein Streckdefizit von über 20° zu nennen. Des Weiteren gelten ein Innenmeniskusverlust, drittgradige Knorpelschäden im lateralen Kniekompartiment oder manifeste Arthrose sowie unzureichende Weichteilverhältnisse am distalen Femur, akute oder chronische Entzündung, erhebliche Bewegungseinschränkung im Kniegelenk und eine überwiegend tibiale Valgusdeformität“ als Kontraindikationen. (Lobenhoffer et al. 2017; Lobenhoffer et al. 2014; Rosso und Margheritini 2014)

2.5.3.4 Durchführung der DFO beim untersuchten Patientenkollektiv

Die Patienten des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Patientenkollektivs, die einer DFO unterzogen wurden (n=54), erhielten allesamt eine varisierende DFO in Form einer biplanaren, medialen closed-wedge Osteotomie mit Plattenfixateur. Die Durchführung erfolgte wie nach Lobenhoffer et al. 2017 beschrieben. (Lobenhoffer et al. 2017) Hierbei wurde zunächst ein Zugang über der medialen Femurmetaphyse im Bereich des Epicondylus medialis mit einem initialen Hautschnitt von etwa 5cm bis nach proximal gewählt. Anschließend erfolgte die Vorpräparation bis auf das Femurperiost. Nun erfolgte die Markierung der Osteotomie. Die Osteotomie beginnt etwa 2cm oberhalb des femoralen Kondylenmassivs und endet mit der Keilspitze innerhalb der lateralen Kondyle. Zur Überprüfung der präoperativen Planung kann auch der geplante Plattenfixateur eingebracht werden und die Lage überprüft werden. Dabei sollte der geplante Osteotomiespalt unter dem soliden Anteil der Platte zu liegen kommen, damit später keine Schrauben in den Osteotomiespalt eingedreht werden. Nun erfolgte das Einbringen von zwei Bohrdrähten im vorgeplanten Abstand und Winkel bezogen auf den gewünschten zu entnehmenden Knochenkeil. Dies kann auch unter Zuhilfenahme von einstellbaren Winkellehren

erfolgen. Dadurch entsteht praktisch eine Art Schablone oder Markierung des Areals für die posteriore Osteotomie durch die eingebrachten Drähte. Die Spitze des Knochenkeils wurde dabei so gewählt, dass sie etwa 5mm vor der lateralen Kortikalis innerhalb des lateralen Kondylenmassivs aber oberhalb der radiologisch sichtbaren Knorpelgrenze des lateralen Kondylus zu liegen kam.

Nach erfolgter Markierung des Keilareals durch die eingebrachten Drähte, erfolgten die beiden posterioren Osteotomieschnitte mithilfe einer Säge entlang der drahtmarkierten Ebenen bis 5mm vor die laterale Gegenkortikalis, wo beide Schnitte schließlich in der Keilspitze konvergierten.

Nach Abschluss der beiden posterioren Schnitte, erfolgte der ergänzende biplanare Schnitt in der Frontalebene. Der Startpunkt wurde im Bereich zwischen mittlerem und vorderem Drittel des medialen Durchmessers des Femurs und dabei auf Höhe der posterioren Osteotomie gewählt. Anschließend wurde ausgehend von diesem Punkt ein, in einem Winkel von 90-95° nach proximal zielender, aufsteigender Schnitt durchgeführt, der im Verlauf die ventrale Kortikalis etwa 3cm weiter proximal durchtrennte.

Im Anschluss erfolgte das Schließen der Osteotomie durch Ausübung einer axialen Kompression vom Fuß nach proximal. Nach Kontrolle der richtigen Ausrichtung, erfolgte das Einbringen des Plattenfixateurs von medial und die vorläufige Fixierung desselben mittels Bohrdrähten. Nach radiologischer Lagekontrolle, bei der darauf geachtet wurde, dass alle distalen Bohrlöcher auch unterhalb der Osteotomielinie zu liegen kamen und die Lage des Plattenfixateurs korrekt war, erfolgte das Vorbohren der Schraubenlöcher anhand der vorgefertigten Bohrlöcher auf der Platte, die anschließende Größenbestimmung der Schrauben und schließlich das Einbringen der einzelnen Schrauben in die vorgesehenen Löcher. Nach erneuter Lagekontrolle erfolgte der schrittweise Wundverschluss. (Lobenhoffer et al. 2017)

Im Nachgang wurden das operierte Bein elastisch gewickelt und postoperativ mit Kühlbehandlung und Schmerztherapie nach dem WHO-Schema symptomgerecht behandelt. Ab dem 1. postoperativen Tag erfolgte der Verbandswechsel mit Wundkontrolle und Physiotherapie sowie Lymphdrainage.

Es erfolgte zudem eine Teilbelastung für 6 Wochen unter Thromboseprophylaxe. Für eine detaillierte und schrittweise Beschreibung der Operationstechnik wird auf die zugrundeliegende Literatur verwiesen. (Lobenhoffer et al. 2017)

2.5.4 *Doppelosteotomie*

2.5.4.1 Grundprinzip

Neben den bereits beschriebenen, klassischen Einzelosteotomien des Femurs oder der Tibia in Form von DFO oder HTO gibt es auch die Option einer Doppelosteotomie. Diese wurde bei insgesamt 17,5% (n=27) der untersuchten Kohorte durchgeführt. Die Doppelosteotomie stellt gewissermaßen die Kombination aus den beiden Einzelosteotomien HTO und DFO dar und erfolgt typischerweise bei besonders komplexen Fehlstellungen der unteren Extremität.

Korrekturen durch Doppelosteotomien sind je nach zugrundeliegender Fehlstellung in der Frontal-, Sagittal- und Transversalebene durchführbar. Da es sich, wie der Name bereits suggeriert, um eine doppelte, also gleichzeitig durchgeführte Osteotomie auf zwei unterschiedlichen Höhen, einmal femoral und tibial, handelt, stellt die Doppelosteotomie einen größeren operativen Eingriff dar, weshalb die Indikation zu deren Durchführung sorgfältig gestellt werden sollte.

2.5.4.2 Indikationen und Kontraindikationen

Die Indikationen und Kontraindikationen für die Durchführung einer Doppelosteotomie sind im Wesentlichen dieselben, wie sie bereits bei den monofokalen Osteotomien erwähnt wurden. Durchgeführt werden Doppelosteotomien vorwiegend bei schwerwiegender Valgus- oder Varusfehlstellung, die bei Korrektur durch eine Einzelosteotomie nicht ausreichend oder nur unter Veränderung der mittleren Gelenklinie des Kniegelenks realisierbar wären. Zudem erfolgen Doppelosteotomien bei bereits bestehender, pathologisch veränderter, mittlerer Gelenklinie des Kniegelenks und nur geringer oder gar fehlender Achsfehlstellung des Beins. (Hofmann und Pietsch 2007)

Hieraus wird deutlich, dass bei der Doppelosteotomie vor allem die mittlere Gelenklinie des Kniegelenks eine elementare Rolle in der Planung und Indikationsstellung spielt. Diese wird heute dennoch häufig vernachlässigt was dazu führt, dass die klassische Verfahrensweise mit Behebung einer Varusfehlstellung durch tibiale und Valgusfehlstellung durch femorale Osteotomie in bis zu 50% der Fälle nicht korrekt bzw. unzureichend ist. (Lobenhoffer et al. 2014)

Die mittlere Gelenklinie (MGL) des Kniegelenks ist die Linie, die mittig zwischen den Gelenkflächenlinien von Femur und Tibiaplateau liegt. Sie wird dabei durch den konvergierenden Gelenkwinkel (joint line convergence angle, JLCA) in ihrer Ausrichtung bestimmt. Bei physiologischer Achsstellung nimmt sie eine horizontale, zur Sprunggelenkebene parallele Ausrichtung an. Sie bildet mit der mechanischen Beinachse (Mikulicz-Linie) einen Winkel von $87^{\circ} \pm 3^{\circ}$, sowohl femorolateral als auch mediotibial. (Lobenhoffer et al. 2014)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Doppelosteotomie vor allem dann Anwendung findet, wenn im Rahmen der präoperativen Korrekturplanung einer schwerwiegenden Varus- oder Valgusfehlstellung durch eine Einzelosteotomie zwar eine Korrektur der Gesamtbeinachse erreicht werden kann, diese jedoch zu einer pathologischen Abweichung der Gelenklinie (MGL) des Knies führen würde. Gleiches gilt, wenn pathologische Veränderung der Gelenklinie und (damit des JLCA) bereits vorbestehen und nicht erst durch die Korrektur mittels Einzelosteotomie zu resultieren drohen.

Konkret wurde bei dem hier untersuchten Patientenkollektiv eine Doppelosteotomie nach den Kriterien von Schröter et al. dann durchgeführt, wenn sich bei der präoperativen Planung zur Korrektur einer schwerwiegenden Varusdeformation durch eine medial öffnende (open-wedge) Osteotomie ein MPTW (medial proximaler Tibiawinkel) von $>94^{\circ}$ ergab oder in der präoperativen Deformitätsanalyse ein mLDFW (mechanisch lateral distaler Femurwinkel) $>90^{\circ}$ in Kombination mit einem MPTW von $<87^{\circ}$ bestand. Die präoperative Deformitätsanalyse sowie die Korrektursimulation wurden dabei mithilfe der

mediCAD-Software (Hectec, Landshut, Deutschland) vollzogen. (Schröter et al. 2019)

2.5.4.3 Durchführungsarten

Grundsätzlich stellt die Doppelosteotomie eine Kombination von femoraler und tibialer Umstellungsosteotomie dar. Daher kann theoretisch jede Kombination der oben erwähnten Formen von HTO und DFO miteinander kombiniert werden.

Für die klinische Praxis haben sich jedoch im Wesentlichen zwei Arten der Doppelosteotomie etabliert, jeweils ein Standardverfahren für Varus- und Valgusfehlstellung.

Für die Varusfehlstellung wird die Doppelosteotomie typischerweise als Kombination aus lateral schließender Femurosteotomie (closed-wedge DFO) und medial öffnender Tibiaosteotomie (open-wedge HTO) durchgeführt. Regelhaft wird dabei mit der schließenden Osteotomie begonnen. Zum einen kann der hierbei resezierte Knochenkeil zur Auffütterung des Osteotomiespaltes der nachfolgenden öffnenden Osteotomie genutzt werden und zum anderen lassen sich Achskorrekturen an der öffnenden Osteotomie besser nachjustieren, sodass zum Ende die korrekte Achsstellung erfolgen kann.

Die schwere Valgusfehlstellung hingegen wird mittels Kombination aus medial schließender Femurosteotomie und medial schließender Tibiaosteotomie korrigiert. (Lobenhoffer et al. 2014)

Weitere Konstellationen sind denkbar und möglich, bleiben aber individuellen Einzelfällen vorbehalten.

Die Patienten in der hier untersuchten Kohorte wurden nach Schröter et al. in den genannten obigen Kombinationen operiert. (Schröter et al. 2019)

2.6 Erstellung der Röntgenbilder

Die Basis der retrospektiven Auswertung innerhalb dieser Arbeit war der Vergleich der prä- zu postoperativen Verhältnisse der Beinachsen und des ischiofemorales Abstandes anhand von röntgenologischen Ganzbeinaufnahmen.

Diese wurden in Anlehnung an Paley et al. (Paley und Pfeil 2000) standardisiert als Ganzbeinaufnahmen unter beidseitiger axialer Belastung am stehenden Patienten durchgeführt. Unter Verwendung einer 1,3mm Kassette (Global Imaging Baltimore, MD), erfolgten die Aufnahmen in anterior-posteriorer Ausrichtung des im bipedalen Stand im Strahlengang vor der Filmkassette positionierten Patienten.

Die Röntgenröhre war dabei in einer Entfernung von 305 cm positioniert. Die verwendete Filmkassette war in einer ausreichenden Länge gewählt, um neben den Beinen auch die Hüften, Knie und Knöchel der Patienten ausreichend mit abzubilden, was für die Beurteilung der anatomischen und mechanischen Beinachsen im Sinne der präoperativen Planung und postoperativen Verlaufskontrolle sowie für die Beurteilung des ischiofemorales Abstandes essenziell war.

Der resultierende Vergrößerungsfaktor bei den so erfolgten, digitalisierten Aufnahmen betrug etwa 5%. Zur Skalierung und späteren Vergleichbarkeit der Röntgenaufnahmen wurde als Referenz eine 250mm Referenz-Stahlkugel verwendet. Der Fokus des Röntgenstrahls wurde so eingestellt, dass er auf Höhe der Kniegelenke zentriert war. (Paley und Pfeil 2000)

Die die Aufnahmen anfertigenden radiologisch-technischen Assistenten waren angewiesen, beide Beine für die Aufnahmen so zu positionieren, dass die Patella mittig zwischen den beiden Femurkondylen in streng frontaler Ausrichtung zu liegen kam. Dies war von elementarer Bedeutung, um ein standardisiertes Vorgehen bei den Aufnahmen und damit eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Bilder und gemessenen Achsen und Winkel zu gewährleisten.

Die Anfertigung der Röntgenbilder erfolgte in genannter Weise einmal präoperativ zur Diagnose und Planung der operativen Korrektur der bestehenden Achsdeformität und wurde postoperativ wiederholt, sobald es zu einem Verwachsen des Osteotomiespaltes gekommen und eine hinkfreie Gewichtsbelastung möglich war.

2.7 Untersuchte Parameter

Die röntgenologischen Parameter wurden mithilfe der mediCAD® Software (Hectec, Landshut, Deutschland) bestimmt. Die Genauigkeit der Parameter betrug dabei 0,1mm oder 0,1°. (Ahmad et al. 2021) Gemessen wurden die nachfolgend beschriebenen Parameter, wie nach Paley definiert. (Paley und Pfeil 2000) Hierbei gilt für die nachfolgend beschriebenen Gelenkwinkel nomenklatorisch: „Die Gelenkwinkel werden, abhängig von welcher Seite der anatomischen oder mechanischen Achslinie sie gemessen werden, benannt (anterior, posterior, medial oder lateral) und ob sich der Winkel am proximalen oder distalen Ende des Knochens befindet. Für jedes Knochenende in einer bestimmten Ebene liegen 2 mögliche Winkel vor (z.B. medialer oder lateraler proximaler Tibiawinkel). (...) Das Präfix „a“ (anatomisch) oder „m“ (mechanisch) wird hinzugefügt, um zwischen ähnlichen anatomischen und mechanischen Winkeln, die weniger als 90 betragen, zu unterscheiden (z. B. aLDFA und mLDFA).“ (Paley und Pfeil 2000, 18)

Hieraus ergibt sich letztlich ein 5-stelliger Buchstabencode mithilfe dessen die Gelenkwinkel beschrieben werden. Der erste Buchstabe gibt dabei Auskunft darüber, ob der Winkel in Bezug auf die mechanische („m“) oder anatomische („a“) Achse betrachtet wird. Der zweite Buchstabe definiert die Position des Winkels zur vorher gewählten Achse. Hierbei steht „M“ für „medial“ und „L“ für „lateral“ sowie „A“ für „anterior“ und „P“ für „posterior“. Die dritte Stelle codiert, an welchem metaphysären Ende des beteiligten Knochens der Winkel gemessen wird. Hierbei wird in „proximal“ („P“) und „distal“ („D“) differenziert. Der vierte Buchstabe gibt den jeweilig betroffenen Knochen an. Im Falle des Kniegelenks also Femur („F“) Tibia („T“). Beim letzten Buchstaben handelt es sich um ein „A“,

ausgehend von der englischen Bezeichnung für Winkel („Angle“). Teilweise wird für den deutschsprachigen Raum auch alternativ ein „W“ für Winkel verwendet.

Mechanisch medial-proximaler Tibiawinkel (mMPTA/mMPTW):

Dieser bezeichnet den Winkel zwischen der mechanischen Achse der Tibia und der Tibiaplateaulinie (= Tangente an das Tibiplateau). Der mMPTA misst physiologischerweise $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$.

Grundsätzlich kann entsprechend auch noch der aMPTA als anatomischer medial-proximaler Tibiawinkel zwischen Tibiaplateaulinie und anatomischer Tibiaachse differenziert werden. Da im Falle der Tibia jedoch anatomische und mechanische Achse nahezu identisch sind und die anatomische Achse nur wenige Millimeter medial der mechanischen Achse verläuft, werden mMPTA und aMPTA häufig gar nicht abgegrenzt, sondern als ein gemeinsamer Winkel, dann als MPTA bezeichnet, verstanden. (Lobenhoffer et al. 2014; Paley und Pfeil 2000)

Eine isolierte Abweichung des mMPTA von seinen Normwerten weist auf eine tibiale Ursache als Grund für die Achsfehlstellung hin.

Mechanisch lateral distaler Femurwinkel (mLDFA/mLDFW):

Dies ist der Winkel zwischen der mechanischen Femurachse und der Kniebasislinie in der Frontalebene. Die Kniebasislinie definiert sich dabei als Tangente an die Femurkondylen. (Lobenhoffer et al. 2014) Der mLDFA misst normalerweise $87,5^\circ \pm 2,5^\circ$. (Paley und Pfeil 2000)

Ein Abweichen des mLDFA bei normwertigem mMPTA ist ein Hinweis für eine femorale Fehlstellung als Ursache für die bestehende Achsfehlstellung. Durch den Vergleich von mMPTA und mLDFA lässt sich somit eine bestehende Achsendeviation weiter differenzieren und ergründen, ob eine isolierte tibiale (veränderter mMPTA) oder femorale (veränderter mLDFA) oder kombinierte Fehlstellung beider Knochen (sowohl mMPTA und mLDFA sind verändert) als Quelle der insgesamt vorliegenden Achsfehlstellung besteht. Dies ist

entscheidend im Hinblick für die Wahl des richtigen operativen Verfahrens bei geplanter chirurgischer Korrektur der Achsenfehlstellung. Dadurch wird sichergestellt, dass beispielsweise eine HTO als primäres Verfahren gewählt wird, wenn durch einen veränderten mMPTA eine nachweisliche tibiale Fehlstellung besteht und somit eine kausale Therapie der bestehenden Achsendeviation erfolgt.

Mechanisch lateraler proximaler Femurwinkel (mLPFA/mLPFW):

Der mLPFA bildet sich als Winkel zwischen einer Tangente von der Spitze des Trochanter major hin zum ipsilateralen Hüftkopfbereich und der mechanischen Femurachse. Anschaulich ist er der Winkel zwischen der Gelenkstellung der Hüfte in der Frontalebene (repräsentiert durch die Tangente von der Spitze des Trochanter major zum Hüftkopfbereich) und der mechanischen Femurachse. Sein Normwert beträgt $90^\circ \pm 5^\circ$. Er wird vor allem bei sehr weit proximal gelegenen, femoralen Achsfehlstellungen als Alternative zum mLDFW angewendet. (Paley und Pfeil 2000)

Gelenköffnungswinkel (joint line convergence angle, JLCA):

Dieser Winkel bildet sich zwischen den beiden Gelenkflächenlinien des Kniegelenks aus, also zwischen der Kniebasislinie, als Tangente entlang der Femurkondylen in der Frontalebene und der Tibiaplateaulinie, als Tangente entlang des Tibiaplateaus. Sofern keine Achsabweichung vorliegt, beträgt der JLCA physiologischerweise $0-1^\circ$. (Paley und Pfeil 2000)

Ein medial vergrößerter JLCA kann dabei Resultat einer medialen Bandlaxizität oder eines lateralen Knorpelverlustes sein. Umgekehrt geht ein lateral vergrößerter JLCA auf laterale Bandlaxizität oder medialen Knorpelverlust zurück. Durch die Erhebung und Interpretation des JLCA lassen sich somit etwaige chondrale oder ligamentäre Ursachen für die Achsfehlstellung identifizieren und von ossären Deformitäten differenzieren. (Paley und Pfeil 2000; Lobenhoffer et al. 2014)

Hüft-Knie-Knöchel-Winkel (hip-knee-ankle angle, HKA):

Der HKA definiert sich als medialer Schnittwinkel zwischen der mechanischen Achse des Femurs und der mechanischen Achse der Tibia. Er wird auch alternativ als mechanischer femoro-tibialer Winkel bezeichnet. Die Normwerte liegen bei $175^\circ \pm 5^\circ$. (Degen et al. 2019) Auffallend ist, dass der HKA somit physiologisch unter 180° beträgt, was Ausdruck des nicht geradlinigen sondern leicht varischen Übergangs zwischen mechanischer Femurachse und mechanischer Tibiaachse ist. Folglich liegt bei den meisten Menschen mit normwertigem HKA eine gewisse konstitutionelle Varusstellung vor, die physiologisch ist. (Moser et al. 2022)

Eine Verringerung des HKA geht mit einer Varisierung des Kniegelenks und damit einer Medialdeviation der Mikulicz-Linie einher und wird durch ein negatives Vorzeichen gekennzeichnet. Eine Vergrößerung des HKA hingegen trägt ein positives Vorzeichen und kommt einer Valgisierung der Beinachse mit Lateralabweichung der Mikulicz-Linie gleich.

Zusammenfassend kann also anhand des HKA bereits das Vorliegen einer mechanischen Varus- oder Valgusfehlstellung erkannt werden. Trägt der HKA ein negatives Vorzeichen und ist folglich verringert, entspricht dies einer Varisierung der mechanischen Beinachse. Ist der HKA hingegen vergrößert (positives Vorzeichen), so entspricht dies einer Valgisierung der mechanischen Beinachse.

Die nachfolgende Abbildung 1 dient der Veranschaulichung der oben genannten Winkel.

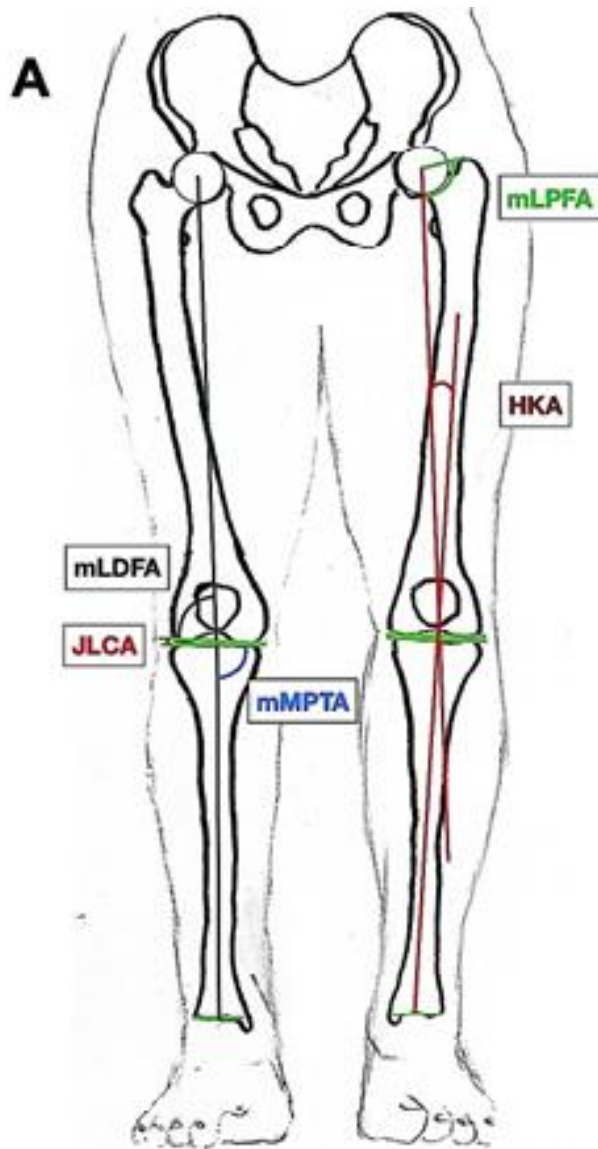


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Gelenkachsenwinkel der unteren Extremität, *mit freundlicher Genehmigung von PD Dr.med. Sufian S. Ahmad*

Darüber hinaus wurden zwei weitere radiologische Maße verwendet und definiert, um die primäre Forschungsfrage dieser Dissertation bezüglich der Einflussnahme auf den ischiofemorale Raum der Hüfte zu beantworten. Diese sind:

Femoraler Adduktionswinkel (FAA)

Zum einen war dies der „Femorale Adduktionswinkel“ (FAA). Dieser definiert sich als Winkel zwischen der anatomischen Femurachse und der Orthogonalen zur horizontalen Beckenachse. (Abb.1) (Ahmad et al. 2021)

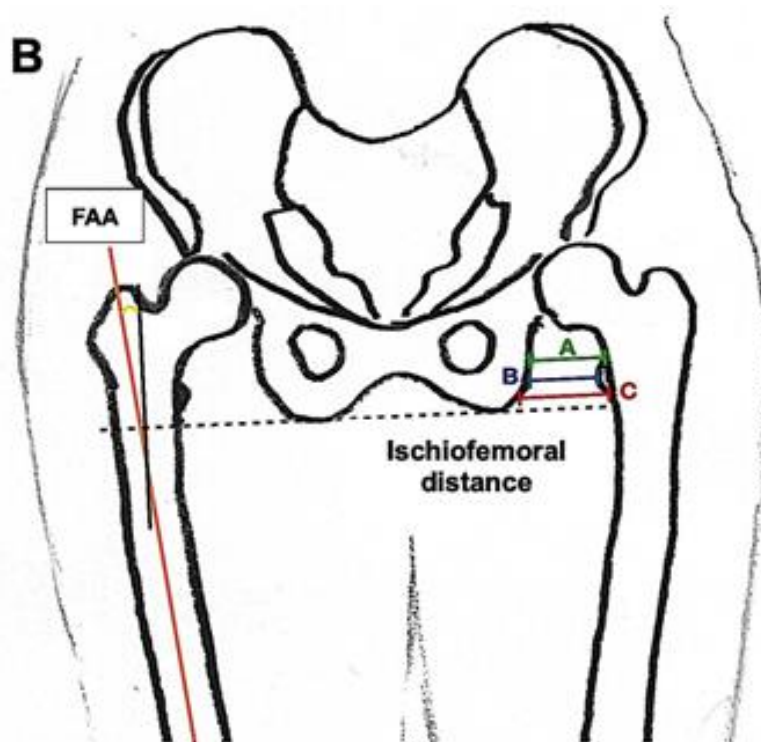


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Femoralen Adduktionswinkels (FAA), mit freundlicher Genehmigung von S. Ahmad

Ischiofemorale Abstand (IFD)

Zum anderen wurde der zu untersuchende Hauptparameter in Form des „frontalen ischiofemorale Abstandes“ (ischiofemoral distance, IFD) definiert. Dabei orientierte sich die Bestimmung an der von Hujazi et al. erwähnten Definition des ischiofemorale Abstandes wonach der ischiofemorale Abstand den „kleinste(n) messbare(n) Abstand zwischen der lateralen Kortikalis des Sitzbeinhöckers (Tuberositas des Os ischium) und der posteromedialen Kortikalis des Trochanter minor“ darstellt. (Hujazi et al. 2016, 197)

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde der ischiofemorale Abstand (IFD) als Mittelwert von je drei einzelnen, zwischen dem Os ischium und dem Trochanter minor gemessenen Abständen, die parallel zur horizontalen Beckenausrichtung bestimmt wurden, ermittelt.

Der erste Abstand (A) wurde dabei ausgehend von der lateralen Kortikalis des Os ischium bis zum oberen Ansatzpunkt bzw. Schnittpunkt des Trochanter minor mit der medialen Femurschaftkortikalis gemessen.

Der zweite Abstandspunkt (B) war definiert, als die Distanz von der lateralen Kortikalis des Os ischium zum am weitesten nach medial reichenden Ausläufer des Trochanter minor, gewissermaßen also dessen Spitze, und wurde parallel zum Abstand A angelegt. Der Abstand B entsprach somit der Definition von Hujazi et al. als kürzeste messbare Distanz. (Hujazi et al. 2016)

Die dritte und unterste Abstandsmessung (C) verlief analog parallel zu den beiden erst genannten Messlinien, dabei ausgehend von der lateralen Kortikalis des Os ischium bis zum unteren Ansatzpunkt bzw. Schnittpunktes des Trochanter minor mit der medialen Femurschaftkortikalis. (Abb. 2) (Ahmad et al. 2021)

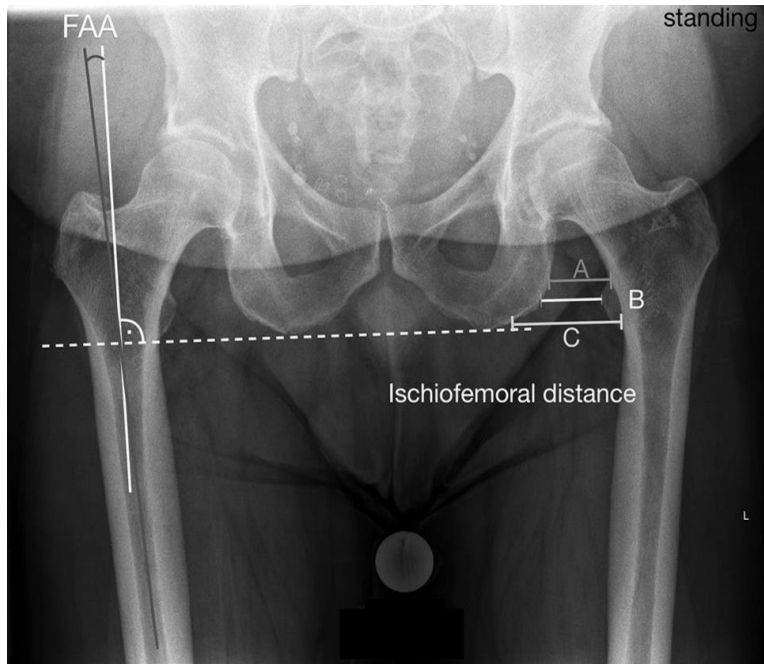


Abbildung 3: Darstellung des Messverfahrens des IFD, aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags (Ahmad et al. 2021, 2448)

Das arithmetische Mittel aus den drei Messwerten A, B und C wurde dann als ischiofemorale Abstand (IFD) definiert.

2.8 Statistische Auswertung

Die Datenerhebung erfolgte ausgehend von der Patientendatenbank der BG Klinik Tübingen. Die Röntgenbilder der dort gelisteten Patienten wurden mithilfe der mediCAD® Software vermessen und die erhaltenen Ergebnisse mittels Microsoft Excel in der Version 2307 tabellarisch festgehalten. Diese Arbeit wurde anschließend mithilfe von Microsoft Word in der Version 2307 verfasst.

Die statistische Auswertung erfolgte unter Zuhilfenahme des Statistikprogramms SPSS® Version 24 (IBM, Armonk, New York). Die innerhalb dieser Arbeit verwendeten Diagramme und Abbildungen zu statistischen Sachverhalten wurden ebenfalls hiermit sowie mithilfe von Microsoft Excel in der Version 2307 erstellt.

Für die erfolgte Auswertung wurde bezüglich der statistischen Signifikanz ein empirisches Signifikanzniveau mit $p < 0,05$, was einem α von 5% entspricht, festgelegt. Dies entspricht folglich einem Konfidenzintervall von 95%.

Die einzelnen Messwerte wurden je nach Art des Messparameters nach ihrer Erhebung anhand der Kennwerte Mittelwert, Minimum und Maximum ausgewertet. Um die erhobenen Mittelwerte der Messungen zu vergleichen, wurde der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test durchgeführt.

Die konstanten Variablen wurden anschließend mit ihrem Mittelwert sowie den gängigen Streumaßen Standardabweichung (SD, standard deviation) und Spannweite (Range) angegeben. Die Bestimmung der Streumaße ist nötig, um die Variabilität der einzelnen Daten zu quantifizieren. Durch die Bestimmung des Mittelwerts wird zwar erkennbar, in welchem Bereich sich die Messwerte konzentrieren, lässt jedoch keine Aussage über die Einzelwerte und deren Lage in Bezug zum Mittelwert zu. Daher werden Streumaße wie die Standardabweichung bestimmt. Die Standardabweichung ist dabei mathematisch definiert als die Wurzel aus der Varianz. Da sie die mittlere Abweichung der einzelnen Messwerte vom rechnerischen Mittelwert der Stichprobe angibt, ist sie letztlich ein Maß für die Homo- bzw. Heterogenität der Stichprobe. (Weiß 2013)

Um im weiteren Verlauf das Vorhandensein und das Ausmaß einer etwaigen Einflussnahme der verschiedenen gemessenen Variablen auf den ischiofemorale Abstand zu ermitteln, wurde eine lineare Regressionsanalyse der Messwerte durchgeführt.

Eine abschließend durchgeführte post-hoc-Power-Analyse der Studie ergab bei einer Stichprobengröße von $n = 154$ Patienten und einem festgelegten Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ eine Teststärke (Power) von 95% hinsichtlich der Prä- und Postadduktion des Femur als primäre Forschungsfrage.

Lineare Regressionsanalyse

Bei der linearen Regressionsanalyse handelt es sich um ein statistisches Verfahren das vielfach für Ursachen- und Wirkungsanalysen angewandt wird. Der Begriff der Regression oder auch „Rückschritt zum Mittelwert“ geht vorwiegend auf den englischen Naturforscher Francis Galton (1822-1911) zurück, der ein Cousin Charles Darwins war und die Beziehung zwischen der Körpergröße von Vätern und ihren Söhnen untersuchte. (Weiß 2013)

Ziel der Regressionsanalyse ist es, die Art eines angenommenen Zusammenhangs zwischen zwei quantitativen Größen mathematisch herzuleiten und folgend optimal zu beschreiben. Hierzu wird eine Regressionsgleichung ermittelt, anhand derer dann von einem bekannten x-Merkmal auf das zugehörige y-Merkmal prognostisch geschlossen werden kann. (Weiß 2013)

Im Falle der linearen Regressionsanalyse handelt es sich um eine spezielle Form der Regressionsanalyse, bei der ein lineares Modell angenommen wird. Hierbei wird der vermutete lineare Zusammenhang durch eine Gerade dargestellt, die so durch die einzelnen Messwerte (Punktwolke) verläuft, dass das durchschnittliche Abstandsquadrat der einzelnen Messwerte zur Geraden möglichst minimal ist. Die Gerade wird als Regressionsgerade bezeichnet und definiert sich als:

$$y = \alpha + \beta x_i$$

Hierbei entspricht α dem y-Achsenabschnitt der Geraden und stellt letztlich die Konstante der Regressionsgeraden dar. Sie bemisst sich mit

$$\alpha = \bar{y} - \beta \bar{x}$$

Dabei ist $\bar{y}$ der Mittelwert der y-Werte, β der Regressionskoeffizient der Regressionsgeraden (siehe unten) und $\bar{x}$ der Mittelwert der x-Werte.

Der Parameter β entspricht hingegen dem sog. Regressionskoeffizienten und stellt letztlich die Steigung der Regressionsgeraden dar. Der Regressionskoeffizient definiert sich seinerseits als

$$\beta = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

Hierbei stellt s_{xy} die Kovarianz und s_x^2 die Varianz (= Standardabweichung) dar. Somit ergibt sich die Steigung der Regressionsgeraden als Quotient aus Kovarianz und Varianz.

Die Kovarianz stellt im statistischen Kontext ein Maß für einen Zusammenhang zwischen zwei zufälligen Variablen mit identischer Wahrscheinlichkeitsverteilung dar. Im Unterschied zur Varianz erfasst sie das durchschnittliche Produkt der Abweichungen der einzelnen x- und y- Messwerte von ihren Mittelwerten und ist letztlich ein Maß für das „Miteinander-Variieren“ zweier Merkmale. (Weiß 2013)

Die Kovarianz kann dabei sowohl positive als auch negative Dimensionen annehmen. Eine positive Kovarianz signalisiert einen gleichsinnigen Zusammenhang zwischen den untersuchten Messwerten, eine negative hingegen einen gegensinnigen Zusammenhang. Ist die Kovarianz 0, sind x- und y-Werte voneinander unabhängige Variablen. (Weiß 2013)

Die Varianz s_x^2 hingegen ist ein statistisches Streuungsmaß, welches sich als die quadrierte mittlere Abweichung der Messwerte vom Mittelwert definiert. Sie muss von der Standardabweichung, als rein durchschnittliche Abweichung der Messwerte vom Mittelwert abgegrenzt werden. Die Standardabweichung stellt somit die Wurzel aus der Varianz dar.

Die Varianz S_x^2 definiert sich wie folgt:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^k (x_i - \mu)^2 \cdot p_i$$

Hierbei entspricht X_i den einzelnen Messwerten, μ dem Erwartungswert, p_i der Wahrscheinlichkeit der Messwerte und σ der Standardabweichung.

Wilcoxon-Mann-Whitney-Test

Der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test (auch Mann-Whitney-U-Test, U-Test oder Wilcoxon-Rangsummentest) stellt ein statistisches Testverfahren für zwei unabhängige Stichproben dar. Er dient der Überprüfung, ob ein signifikanter Unterschied zwischen zwei unabhängigen Stichproben besteht. Der Test verwendet dafür nicht die Originaldaten aus den beiden Stichproben, sondern deren Rangsummen (Rangsummentest). Er stellt seinerseits eine nicht-parametrische Alternative zum t-Test für unabhängige Stichproben dar. Aufgrund der schwächeren Voraussetzungskriterien im Vergleich zum t-Test hat der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test ein breiteres Anwendungsspektrum.

Post-hoc-power-Analyse

Die Post-hoc-Power-Analyse (auch post-hoc-Teststärkeanalyse) dient der Abschätzung der Teststärke nach Durchführung einer quantitativ empirischen Studie anhand des festgelegten Signifikanzniveaus, der Stichprobengröße und der interessierenden Populationseffektgröße. Sie ermöglicht damit die Interpretation von Signifikanzergebnissen. Sie ist von der A-priori-Analyse abzugrenzen, welche vor Durchführung der empirischen Untersuchung erfolgt, und die Stichprobengröße berechnet, die nötig ist, um einen bedeutsamen Populationseffekt aufzudecken. Beide Teststärke-Analyseverfahren gehen dabei auf Cohen (1988) zurück. (Prof. Dr. Edgar Erdfelder 2022)

Die im Rahmen der Analyse ermittelte Teststärke (auch Power) gibt ihrerseits die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein signifikantes Ergebnis gefunden wird, sofern ein Populationseffekt einer bestimmten Größe vorliegt. Sie entspricht $1-\beta$ und damit der Wahrscheinlichkeit, mit der eine richtige Alternativhypothese auch als solche identifiziert wird. Die Kenntnis der Teststärke ist essenziell, um das erhaltene Testergebnis eines statistischen Tests oder einer Studie sicher interpretieren zu können. Dabei ist es irrelevant, ob ein signifikantes oder insignifikantes Ergebnis zustande kam. Die Teststärke liefert unabhängig vom Signifikanzergebnis Hinweise über die Aussagekraft des Test- bzw. Studienergebnisses.

Bei einem insignifikanten Ergebnis dient die post-hoc-Analyse zur Identifikation einer mangelnden Teststärke bzw. einer nicht aussagekräftigen Studie. Bei einem signifikanten Ergebnis ist die Analyse der Teststärke hingegen wichtig, um übermäßige Teststärke zu identifizieren bzw. ein signifikantes Ergebnis als ggf. theoretisch oder praktisch bedeutungslos zu identifizieren. Denn ein signifikantes Studienergebnis lässt nicht zwangsläufig auch auf einen bedeutsamen Effekt, bezogen auf die Population, schließen. Zur Bestimmung der praktischen Relevanz kommen dann Effektgrößenmaße zum Einsatz.

Zusammenfassend wird durch die Bestimmung der Teststärke (Power) ermittelt, wie sicher ein im Rahmen eines statistischen Tests oder einer Studie gefundener Effekt auch tatsächlich in der Population besteht (richtige Annahme der Alternativhypothese) oder umgekehrt ein nicht gefundener Effekt auch tatsächlich nicht innerhalb der Population vorliegt (berechtigtes Verwerfen der Alternativhypothese).

3 Ergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse dieser Arbeit wurden bereits im Rahmen einer Mitautorschaft der Publikation mit dem Titel „The ischiofemoral space of the hip is influenced by the frontal knee alignment“ am 5. Mai 2021 im Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy Journal des Springer Verlags veröffentlicht. Die Bildrechte der in dieser Arbeit verwendeten Grafiken wurden beim Verlag erfragt. Die Bewilligung ist im Anhang einsehbar.

3.1 Überblick über das Gesamtkollektiv und den Auswahlprozess

Von den ursprünglich 175 Patienten innerhalb der Datenbank, die im Jahr 2017 einer kniegelenknahen Osteotomie unterzogen wurden, konnten nach Anwendung der Ein- bzw. Ausschlusskriterien insgesamt 154 Patienten in der Analyse berücksichtigt werden. Während des Auswahlprozesses erfüllten 11 Patienten die Einschlusskriterien nicht. Die Daten von 10 weiteren Patienten konnten im Verlauf aufgrund zu schlechter Qualität der Röntgenbilder ebenfalls nicht ausgewertet werden. (Abb.4).

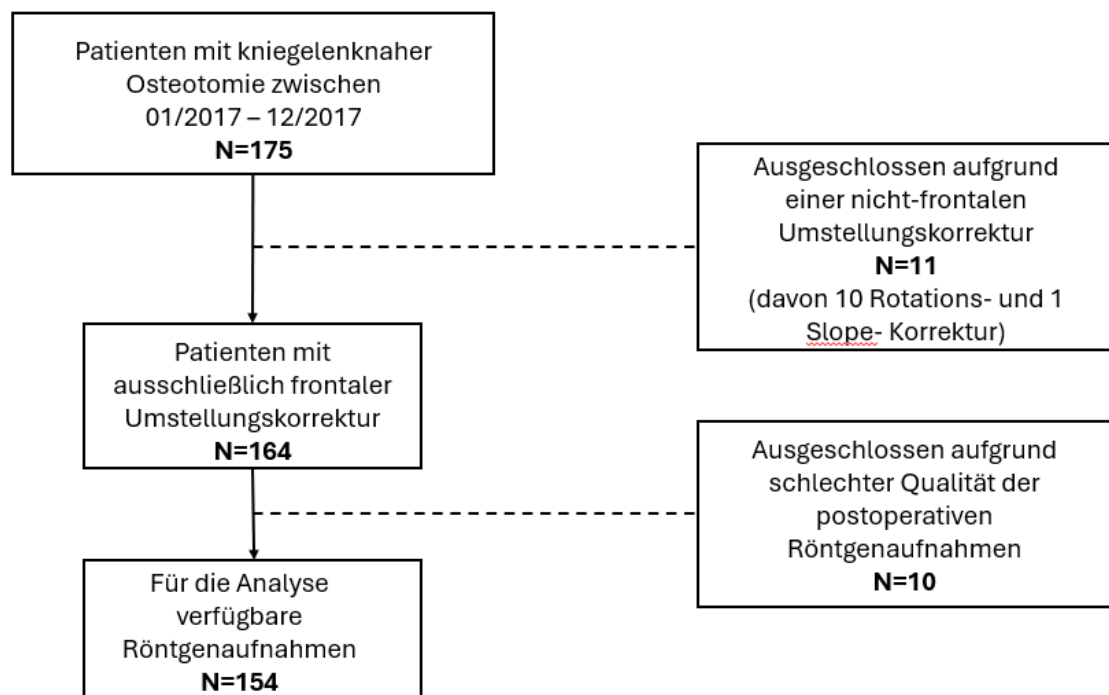


Abbildung 4: Flussdiagramm zur Darstellung des Auswahlprozesses

3.2 Demographische Merkmale der Patienten

3.2.1 Altersverteilung des Gesamtkollektivs

Das mittlere Alter in der untersuchten Kohorte betrug 51 ± 11 Jahre. Der jüngste untersuchte Patient war 40 Jahre alt, der älteste 62 Jahre alt.

3.2.2 Geschlechterverteilung des Gesamtkollektivs

Die Auswahl der Patienten erfolgte anhand der durchgeführten Operationen und hierbei geschlechtsunabhängig. Dennoch zeigte die Verteilung des Gesamtkollektivs (n=154) bezogen auf das Geschlecht eine deutliche männliche Dominanz bei 62,33% (n=96) männlichen und 37,66 % (n=58) weiblichen Patienten.

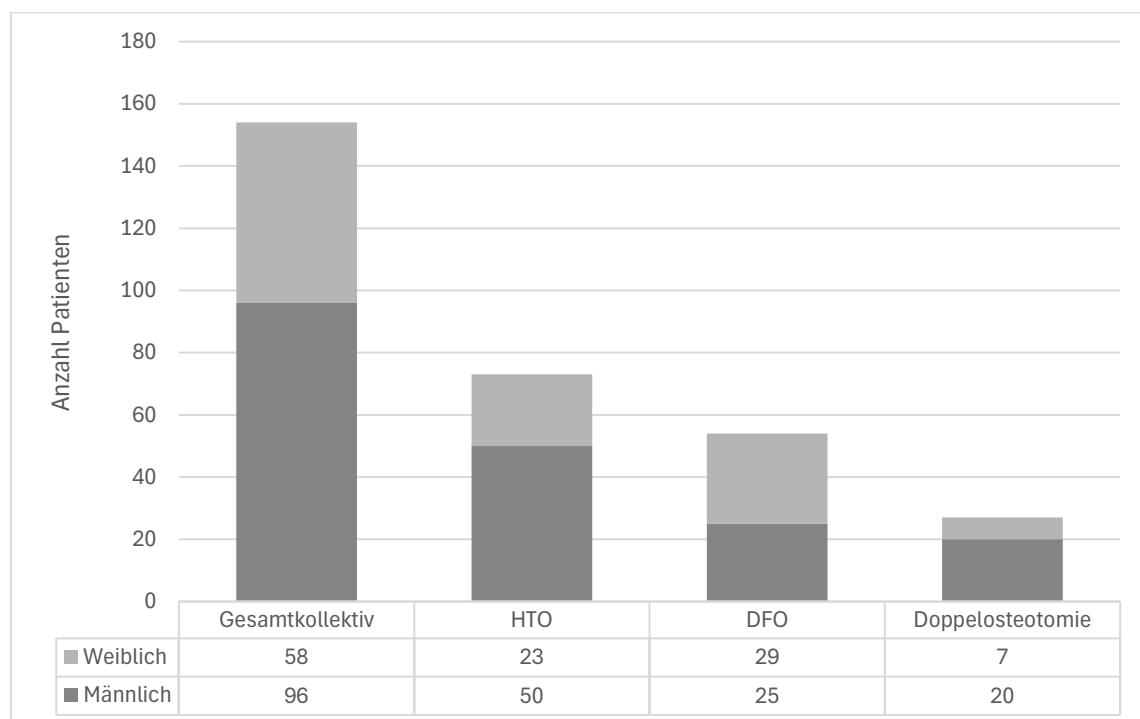


Abbildung 5: Übersicht Geschlechterverteilung

3.2.3 Art der durchgeführten Osteotomien des Gesamtkollektivs

Bei allen eingeschlossenen und in dieser Arbeit untersuchten Osteotomien handelte es sich um kniegelenknahe Osteotomien. Diese umfassten 73 hohe

tibiale Osteotomien (HTO), 54 distale femorale Osteotomien (DFO) sowie 27 Doppelosteotomien. Von allen 154 erfassten Osteotomien waren die überwiegende Anzahl, nämlich 76,62% (n=118) Valgisierungsosteotomien und 23,37% (n=36) Varisierungsosteotomien.

3.3 Ergebnisübersicht

Die eingeschlossenen 154 Osteotomien wurden dann in zwei Untersuchungsgruppen kategorisiert: Zum einen die Patienten mit Varusfehlstellung und erhaltener Valgisierungsosteotomie in der ersten Gruppe. Zum anderen alle Patienten mit Valgusfehlstellung und durchgeführter Varisierungsosteotomie in der zweiten Gruppe. Wie bereits eingangs unter 2.5 Umstellungsosteotomien erläutert, beziehen sich die Bezeichnungen der Osteotomien primär auf den Ort der Durchführung. Dabei können aber je nach zugrundeliegender Fehlstellung (Varus oder Valgus) und Lokalisation dieser (femoral, tibial oder kombiniert) die Osteotomien valgisierend oder varisierend durchgeführt werden, sodass HTO als auch DFO sowohl varisierend als auch valgisierend durchführbar sind. Aus diesem Grund lässt die Bezeichnung keinen Schluss auf die Richtung der Achskorrektur zu, weshalb bewusst auf eine weitere Unterteilung in HTO, DFO oder Doppelosteotomie innerhalb der beiden Gruppen verzichtet wurde und eine Unterteilung in Valgisierungs- und Varisierungsosteotomie erfolgte.

Von den 154 osteotomierten Beinen wurden dann präoperativ und postoperativ Röntgenbilder als a.p.-Ganzbeinstandaufnahmen angefertigt (wie bereits im Methodenteil unter Abschnitt 2 erwähnt) und die Beinachsen vermessen und hinsichtlich ihrer Veränderungen ausgewertet.

Hierzu wurden in den Röntgenaufnahmen zunächst die Gelenk- und Achsenwinkel HKA, mMPTA, mL DFA, JLCA und mL PFA sowie für jedes prä- und postoperative Bild auch der ischiofemorale Abstand (IFD) und der Femorale Adduktionswinkel (FAA) gemessen. Auf die Bedeutung, Aussagekraft und Hintergründe der verwendeten Winkel wird nachfolgend im Diskussionsteil eingegangen.

Anschließend wurden die einzelnen Messwerte jedes Patienten zusammengetragen und für jede der einzelnen Messvariablen (HKA, mMPTA, mL DFA, JLCA und mLPFA sowie IFD und FAA) der arithmetische Mittelwert (mean) sowie Standardabweichung (SD) und die Spannweite (Range) ermittelt.

Die Ergebnisse wurden für die präoperative und postoperative Situation innerhalb der jeweiligen OP-Gruppen nachfolgend tabellarisch zusammengetragen. (s. Tab. 1 und 2)

Tabelle 1: Messergebnisse der Winkelmaße prä- und postoperativ bei Valgisierungsosteotomie

Winkel-Mittelwert in Grad± Standardabweichung und (Spannweite)	präoperativ	postoperativ
HKA°	-5,8 ± 3 (-17,0 - 0,4)	0,7 ± 3,0 (-9,8 – 6,0)
mMPTA°	86,5 ± 2,6 (78,9 -92,4)	90 ± 3,2 (79,4 – 97,3)
mL DFA°	89,2 ± 2,3 (84,5 – 99,3)	87,4 ± 2,2 (81,6 – 97,7)
JLCA°	3,1 ± 2,2 (-2,1 – 10,3)	2,7 ± 2,1 (-1,6 – 11,3)
mLPFA°	89,1 ± 5,7 (72,9 -106,5)	87,9 ± 5,5 (71,2– 101,9)

Tabelle 2: Messergebnisse der Winkelmaße prä- und postoperativ bei Varisierungsosteotomie

Winkel-Mittelwert in Grad± Standardabweichung und (Spannweite)	präoperativ	postoperativ
HKA°	5,4 ± 2,9 (1,1 -11,5)	-0,7 ± 2,0 (-4,2 – 3,6)
mMPTA°	90,8 ± 3,0 (85,3 – 97,8)	88,8 ± 3,0 (82,9 -96,6)
mL DFA°	85,4 ± 2,4 (78,3 -90,7)	89,5 ± 2,5 (84,4 – 94,2)
JLCA°	0 ± 2,2 (-3,8 – 7,7)	0 ± 2,9 (-6 – 10,1)
mLPFA°	86,7 ± 7,2 (70,5 – 103,0)	87,1 ± 7,0 (70,7– 103,3)

Die erhaltenen Messergebnisse wurden dann zunächst hinsichtlich ihrer prä- zu postoperativen Veränderung innerhalb ihrer jeweiligen OP-Gruppe betrachtet und ausgewertet.

Anschließend wurden die postoperativen Veränderungen jedes Winkels aus beiden OP-Gruppen einander gegenübergestellt und vergleichend ausgewertet. Um die hierbei verwendeten Mittelwerte untereinander zu vergleichen, wurde der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test durchgeführt. Im Anschluss daran erfolgte schließlich die Gegenüberstellung der einzelnen Winkelmaße mit dem gemessenen IFD. Zur Identifikation etwaiger signifikanter Korrelationen wurde für jeden dieser Vergleiche eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt.

3.3.1 **Ergebnisse des HKA bei Valgisierungs- und Varisierungsosteotomie**

Für den prä- zu postoperativen Vergleich des HKA, als Parameter für die Ausrichtung des Kniegelenks, zeigte sich innerhalb der Gruppe mit stattgehabter Valgisierungsosteotomie eine Zunahme des postoperativ zu messenden HKA. Nomenklatorisch entspricht dabei ein negativer Wert des HKA einer Varusdeviation und ein positiver Wert einer Valgusdeviation. Es konnte entsprechend der Valgisierung der frontalen Kniegelenksausrichtung somit eine postoperative Zunahme des HKA von durchschnittlich $6,5^\circ$ gegenüber dem präoperativen Wert bei Varusfehlstellung gemessen werden.

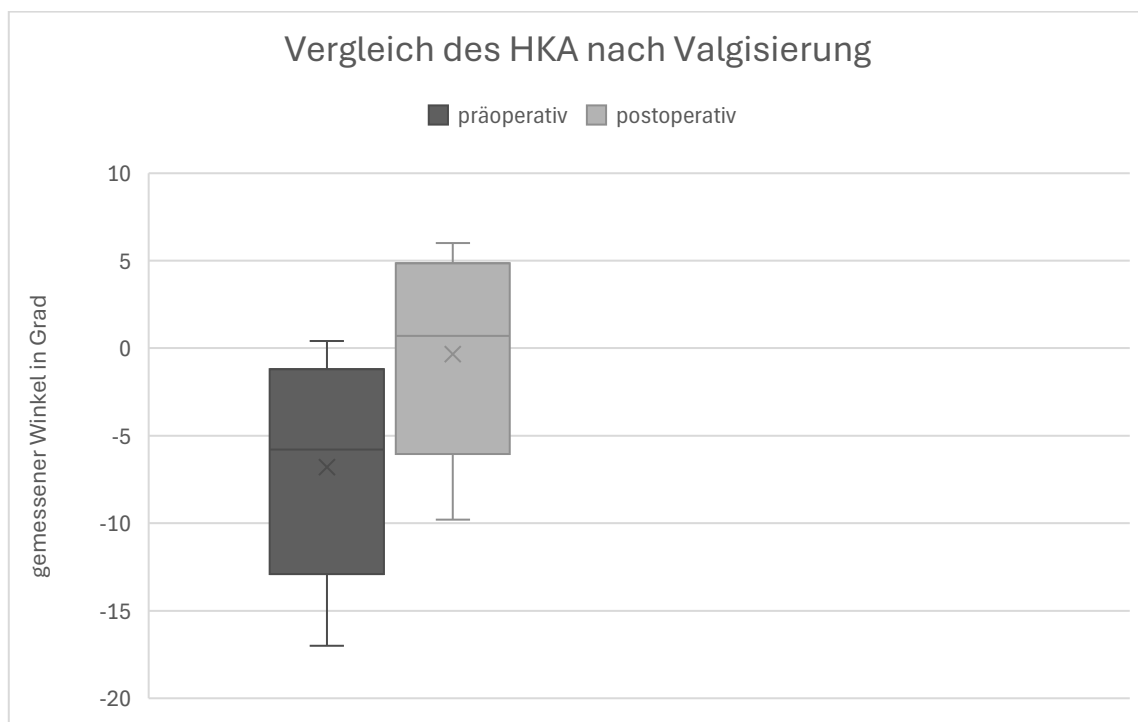


Abbildung 6: Vergleich des HKA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie

Innerhalb der Gruppe mit erhaltener Varisierungsosteotomie zeigte sich entsprechend ein umgekehrter Verlauf. Ausgehend von der präoperativ vorliegenden Valgusdeviation mit entsprechend negativem HKA ergab sich nach der operativen Varisierung eine Abnahme des postoperativ zu messende HKA von durchschnittlich $6,1^\circ$ gegenüber dem präoperativen Wert. (s. Abb. 6)

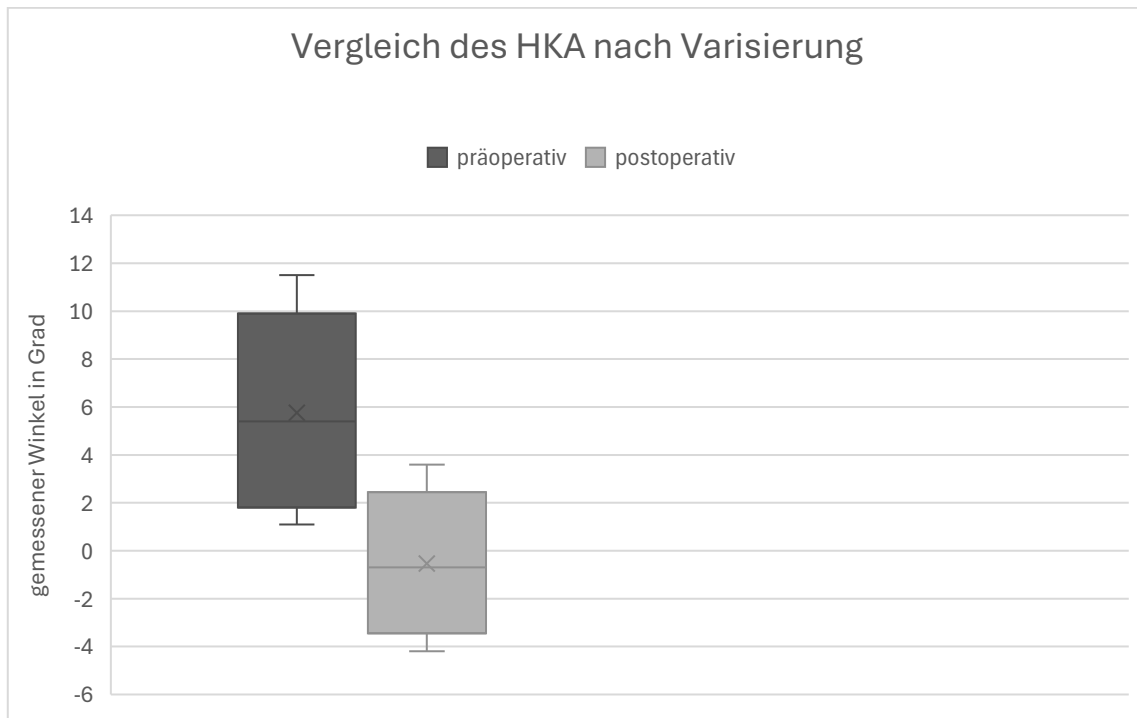


Abbildung 7: Vergleich des HKA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie

Da der HKA als medialer Winkel zwischen der mechanischen Femur- und Tibiaachse definiert ist, ist er ein direktes Maß für die Achsabweichung zwischen Femur- und Tibiaachse. Seine Veränderung im Sinne einer Zunahme bei Valgisierung und Reduktion durch Varisierung ist daher wenig überraschend, unterstreicht aber die Bedeutung für die Identifikation einer frontalen Achsendeviation durch die Bestimmung des HKA. Dies ist der Grund, weshalb er nachfolgend als Parameter und Messvariable für die Achsendeviationen herangezogen wurde.

3.3.2 Ergebnisübersicht des mMPTA

Bezüglich der Auswertung des mMPTA zeigte sich für die Gruppe der Valgisierungsosteotomie, ähnlich wie bereits für den HKA, eine postoperative Zunahme des zu messenden mMPTA um durchschnittlich 3,5°. (s. Abb. 9)

Innerhalb der Gruppe der Varisierungsosteotomie zeigte sich hingegen eine postoperative Abnahme des mMPTA um durchschnittlich 2°.

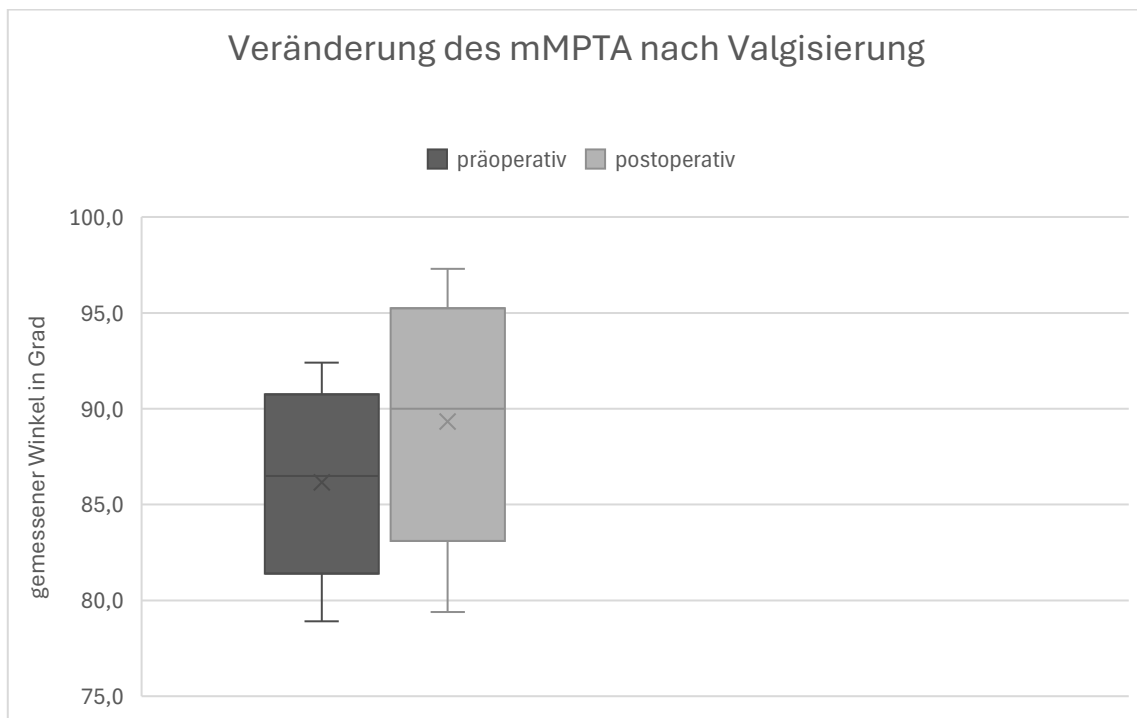


Abbildung 8: Vergleich des mMPTA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie

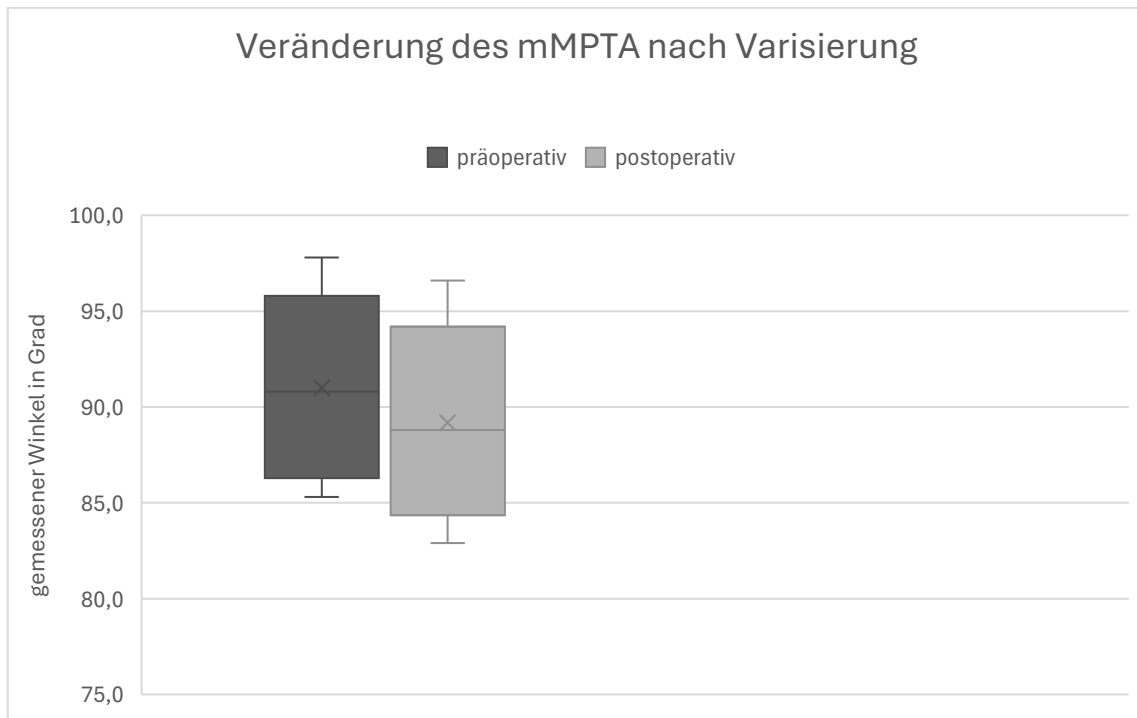


Abbildung 9: Vergleich des mMPTA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie

Als Winkel zwischen mechanischer Tibiaachse und Tibiaplateau, misst der mMPTA die tibiale Achsausrichtung und dient folglich als Messparameter für eine tibiale Fehlstellung als Ursache für eine Valgus-/Varus- Achsendeviation. Hierbei entspricht eine Abnahme unter seinen Normwert einer (tibialen) Varusfehlstellung und ein über die Norm vergrößerter Wert einer (tibialen) Valgusfehlstellung.

Die Abbildung 10 stellt die Veränderungen des mMPTA und damit der tibialen Achsausrichtung unter Varisierung nochmals grafisch dar. Entsprechend der anatomischen Verhältnisse konnte für die untersuchte Kohorte die Zunahme des mMPTA unter Valgisierung und Abnahme unter Varisierung bestätigt werden und der mMPTA als Messvariable für tibial-bedingte Achsdeviation für die weiteren Gegenübersetzungen verwendet werden.

3.3.3 *Ergebnisübersicht des mL DFA*

Aus den Messungen des mL DFA ergab sich insgesamt eine leichte Abnahme unter Valgisierung und eine Zunahme unter Varisierung.

Dabei zeigte sich ausgehend von einer Varusfehlstellung und stattgehabter Valgisierungsosteotomie für Gruppe 1 eine durchschnittliche Abnahme des mL DFA um $1,8^\circ$

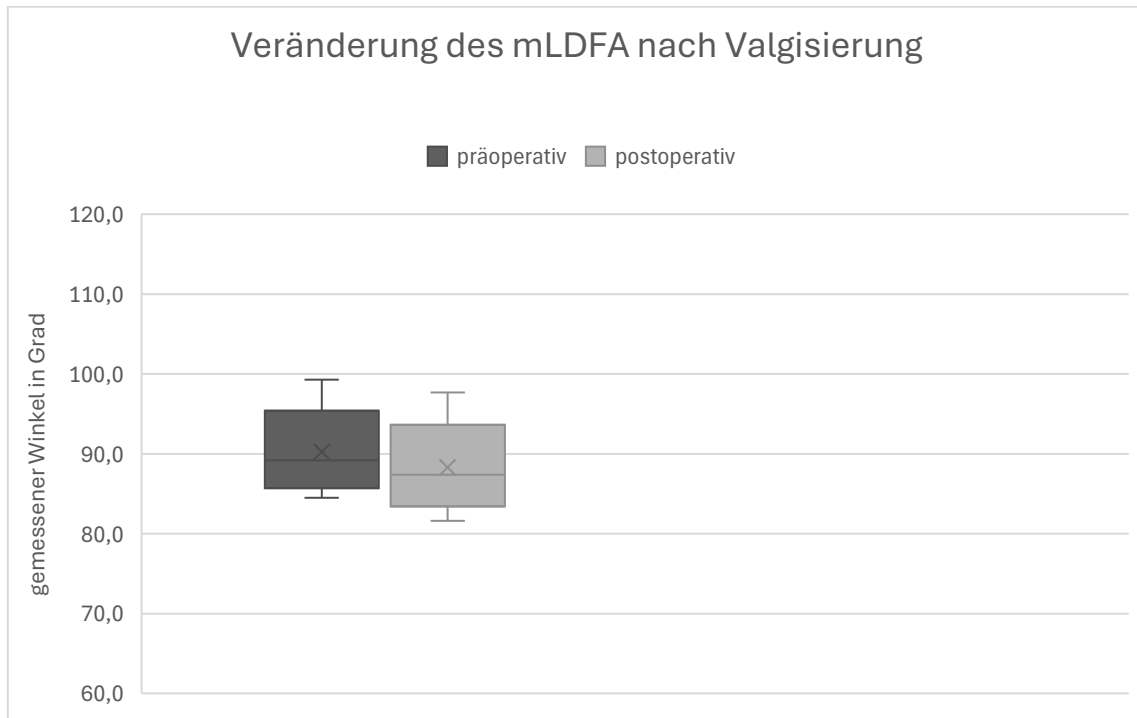


Abbildung 10: Vergleich des mL DFA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie

Innerhalb der Gruppe 2 mit erfolgter Varisierungsosteotomie zeigte sich hingegen eine Zunahme des mL DFA um durchschnittlich $4,1^\circ$ (s. Abb. 13)

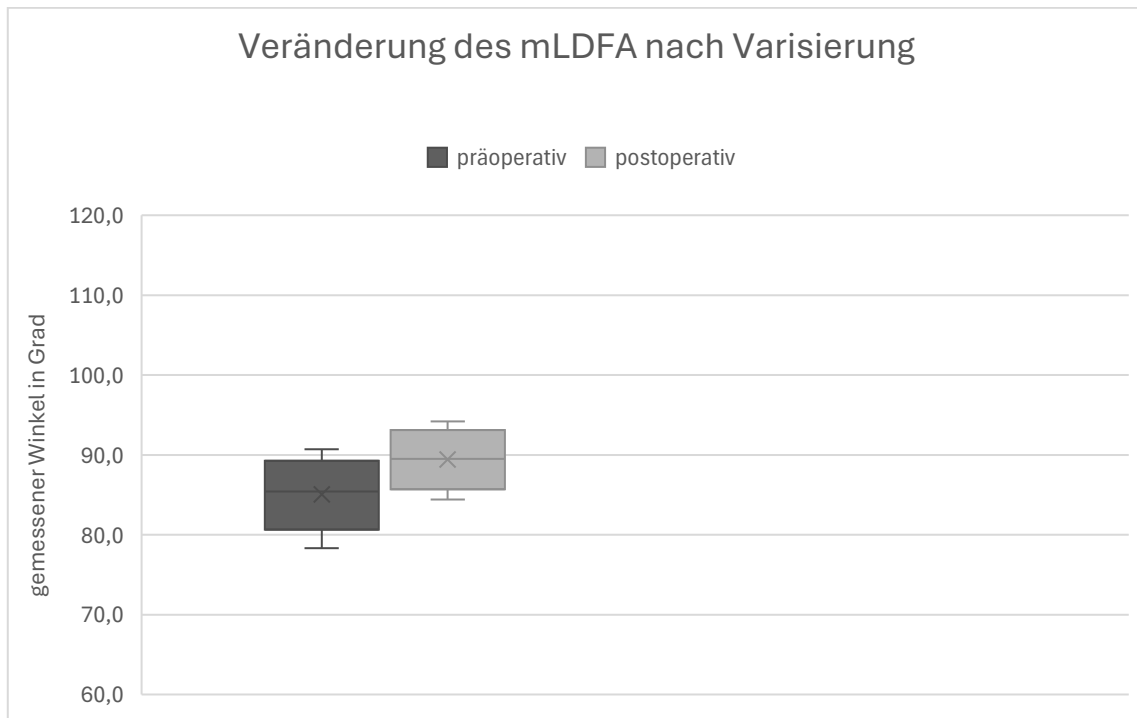


Abbildung 11: Vergleich des mLDFA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie

Der mLDFA stellt seinerseits als von lateral gemessener Winkel zwischen der mechanischen Femurachse und der Kniebasislinie einen Parameter für eine femoral-bedingte, mechanische Achsdeviation dar. Für das untersuchte Kollektiv konnte entsprechend der Nomenklatur gezeigt werden, dass eine vermehrte, frontale Valgusausrichtung mit einer Abnahme des mLDFA einhergeht und umgekehrt. Er verhält sich damit genau umgekehrt wie der von medial gemessene mMPTA der mechanischen Tibiaachse. Folglich wurden beide Winkel daher als Messvariablen für die femorale (mMLDFA) und tibiale (mMPTA) Achsabweichung verwendet, um isolierte Abweichungen gegenüber Abweichungen der mechanischen Gesamtbeinachse, dargestellt durch den HKA, darzustellen.

3.3.4 Ergebnisübersicht des JLCA

Die Auswertung des JLCA ergab eine minimale, durchschnittliche Abnahme von $0,4^\circ$ unter Durchführung einer Valgisierungsosteotomie bei gleichzeitiger Zunahme der Spannweite der einzelnen Messwerte.

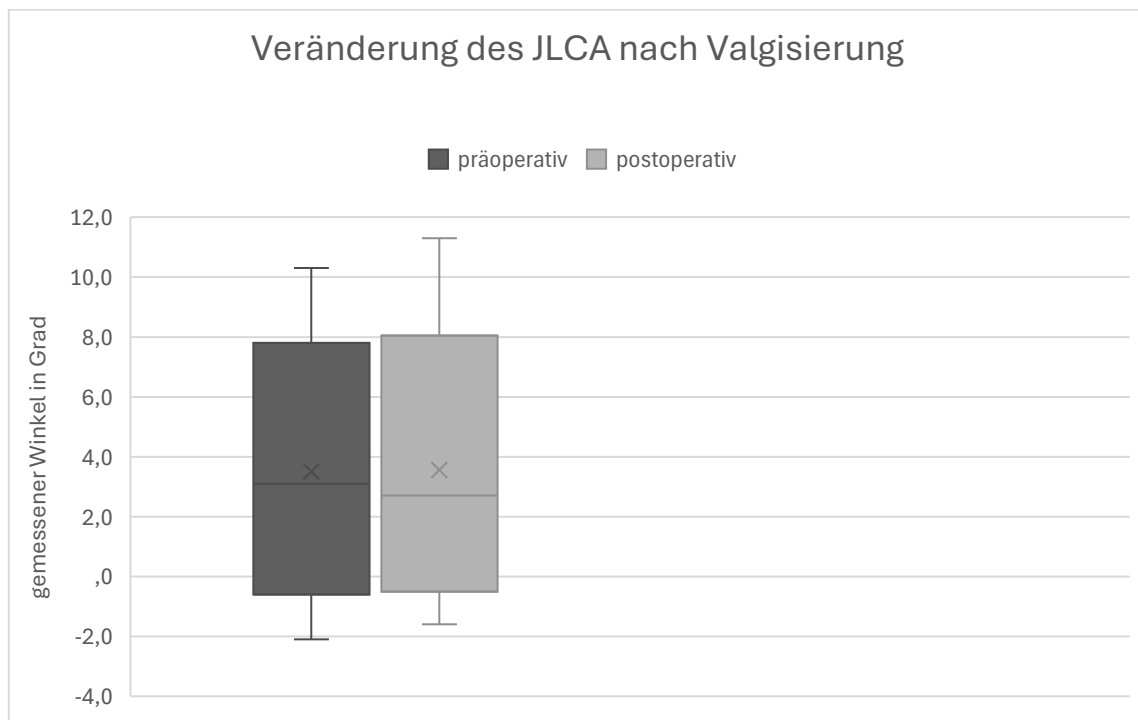


Abbildung 12: Vergleich des JLCA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie

Umgekehrt zeigte sich innerhalb von Gruppe 2 keine Veränderung des durchschnittlichen JLCA. Lediglich die Standardabweichung ($\pm 2,2$ gegenüber $\pm 2,9$) und ebenfalls die Spannweite (-3,8 bis 7,7 gegenüber -6 bis 10,1) der erhobenen Messwerte zeigten sich vergrößert in der postoperativen Erhebung.

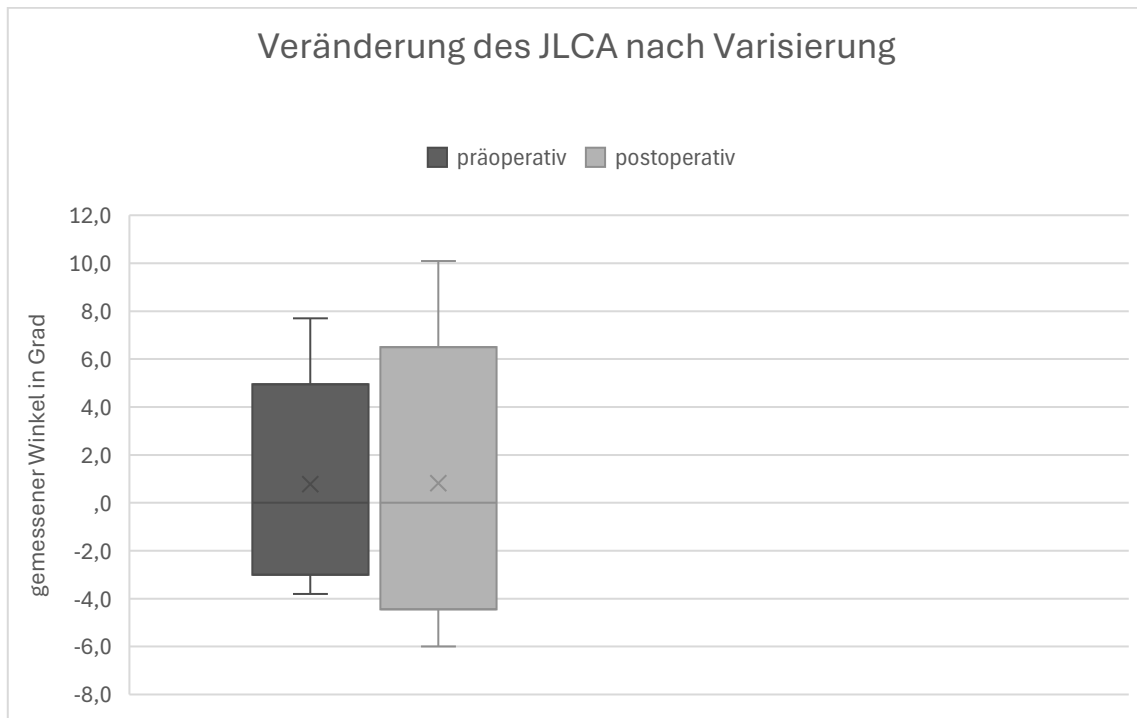


Abbildung 13: Vergleich des JLCA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie

Der JLCA stellt seinerseits den (Öffnungs-)Winkel zwischen den beiden Gelenkflächenlinien bzw. -tangente des Kniegelenks in der Frontalebene dar. Sein Normwert liegt je nach Literatur zwischen 0 – 1° bzw. 3° medialer Konvergenz. Hierbei verlaufen die beiden Gelenkflächenlinien parallel. (Lobenhoffer et al. 2014; Paley und Pfeil 2000)

Ein über die Norm veränderter JLCA kennzeichnet dabei eine entsprechende Varus- bzw. Valgusdeformität in der Größe des zu messenden JLCA. Es gilt:

Ein medial vergrößerter (und damit nach lateral offener JLCA) kennzeichnet eine Varusfehlstellung. Ein umgekehrt lateral vergrößerter (und medial offener) JLCA kennzeichnet eine Verkipfung der Gelenkflächenlinien um den lateralen Scheitelpunkt und folglich eine Valgusfehlstellung.

Nach Paley et al. ist der JLCA ein Messparameter für nicht-ossäre bedingte Achsdeviationen. Hiernach kennzeichnet ein medial vergrößerter (und damit nach lateral offener) JLCA eine laterale ligamentokapsuläre Laxizität oder

medialen Knorpelverlust als Ursache einer bestehenden Varusfehlstellung. Umgekehrt kennzeichnet ein lateral vergrößerter (und damit nach medial offener) JLCA eine mediale ligamentokapsuläre Laxizität oder lateralen Knorpelverlust. (Paley und Pfeil 2000)

Der JLCA zeigte sich für die untersuchte Kohorte in Gruppe 1 insgesamt sowohl präoperativ als auch postoperativ gegenüber den Werten in Gruppe 2 vergrößert. Unter Annahme der von Paley et al. definierten Normwerte des JLCA von 0-1° bestand somit ein vergrößerter JLCA für Gruppe 1. Folglich war die hier bestandene Varusdeformität durch nicht-ossäre Faktoren mitbegünstigt.

In Gruppe 2 hingegen zeigte sich prä- wie postoperativ ein durchschnittlich normwertiger JLCA von 0°. Die betroffenen Patienten der Gruppe 2 hatten folglich nach Interpretation von Paley eine primär knöchern bedingte Varusdeformität ohne ligamentäre oder chondrale Kofaktoren.

Geht man hingegen von dem weiter gefassten Normbereich des JLCA nach Lobenhoffer et al. mit 0-3° aus, so zeigte sich der durchschnittliche JLCA für beide Untersuchungsgruppen als nahezu physiologisch.

Insgesamt konnten in beiden Gruppen keine direkt korrelierenden Veränderungen zwischen der Operation und dem zu messenden JLCA festgestellt werden, was darauf schließen lässt, dass nicht-ossäre Einflussfaktoren für die Achsdeviationen im untersuchten Kollektiv vernachlässigbar waren.

3.3.5 Ergebnisübersicht des mLPFA

Bezüglich des mLPFA zeigte sich in Gruppe 1 eine Abnahme im Zuge der Valgisierungsosteotomie von durchschnittlich $1,2^\circ$. In Gruppe 2 zeigte sich demgegenüber eine minimale durchschnittliche Zunahme um $0,4^\circ$.

Somit ließen sich zwar leichte Veränderungen messen, der mLPFA blieb aber im Durchschnitt in beiden Gruppen innerhalb seines Normbereichs von $90^\circ \pm 5^\circ$. (Paley und Pfeil 2000)

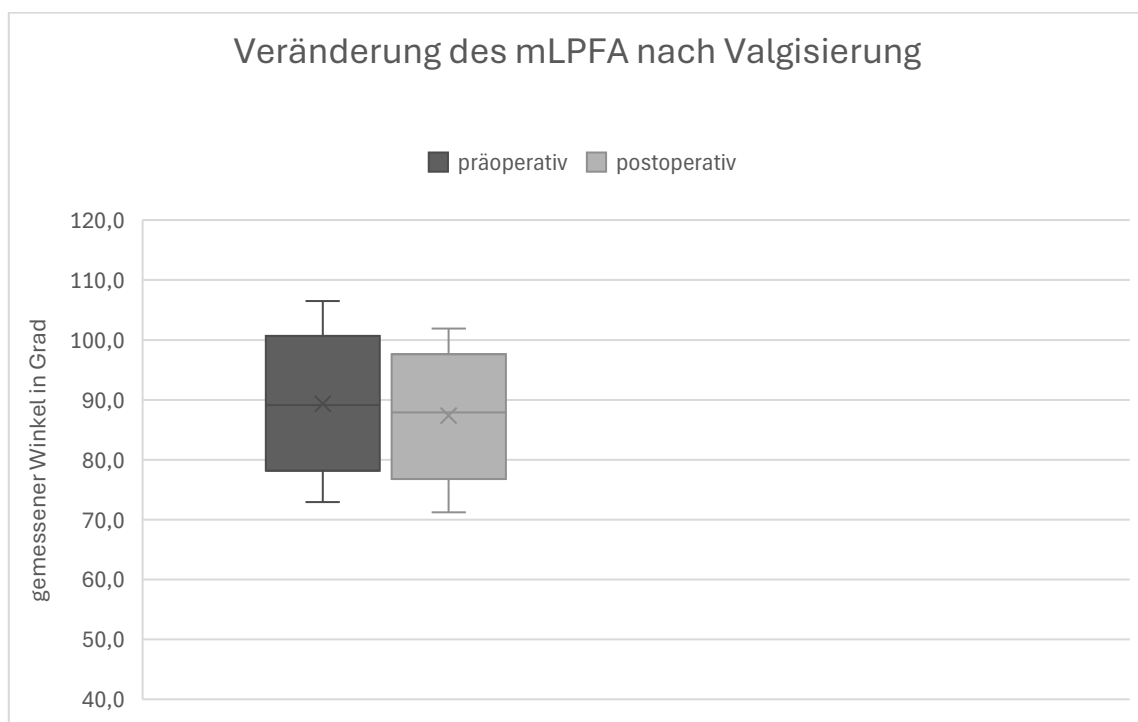


Abbildung 14: Vergleich des mLPFA präoperativ vs. postoperativ nach Valgisierungsosteotomie

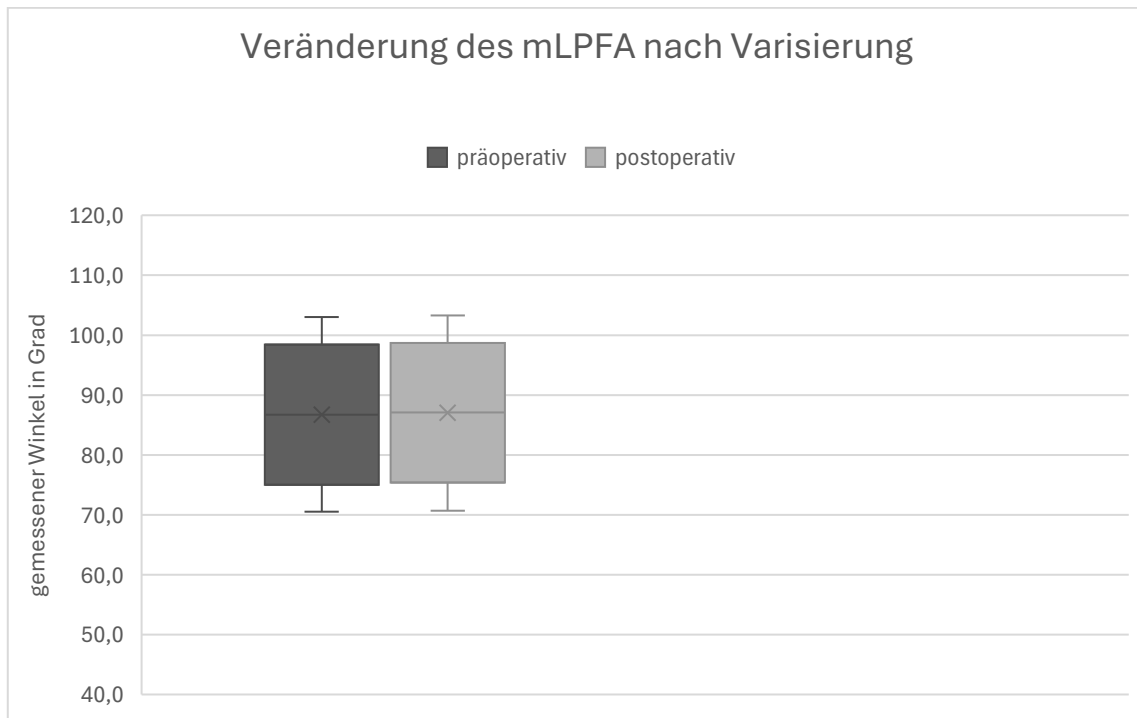


Abbildung 15: Vergleich des mLPFA präoperativ vs. postoperativ nach Varisierungsosteotomie

Nachdem die einzelnen Messwerte für sich innerhalb der beiden OP Gruppen als auch für beide Gruppen vergleichend betrachtet wurden, erfolgte die Gegenüberstellung von gemessenen Winkelmaßen mit den erhobenen Messwerten des ischiofemorales Abstandes (IFD).

Um Korrelationen zwischen den, die Achsabweichungen definierenden, Winkeln und den Veränderungen des ischiofemorales Abstandes zu identifizieren, wurden lineare Regressionsanalysen durchgeführt.

Die einzelnen Vergleiche sind nachfolgend grafisch dargestellt. Die Grafiken stammen dabei aus der bereits publizierten Version dieser Arbeit, erschienen im „Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy“- Journal des Springer Verlags im Jahr 2021. (Ahmad et al. 2021)

3.3.6 Vergleich von IFD und HKA

Für die Gegenüberstellung des IFD in Abhängigkeit des HKA zeigte sich eine insgesamt negative Korrelation mit einem Regressionskoeffizienten β von $-0,4$ und einem Konfidenzintervall CI $-0,5$ bis $-0,3$. Folglich ergab sich für einen zunehmenden HKA eine Abnahme des zu messenden IFD. Diese Korrelation erwies sich als statistisch signifikant bei einem p-Wert von $p < 0,001$ (siehe Abb. 18)

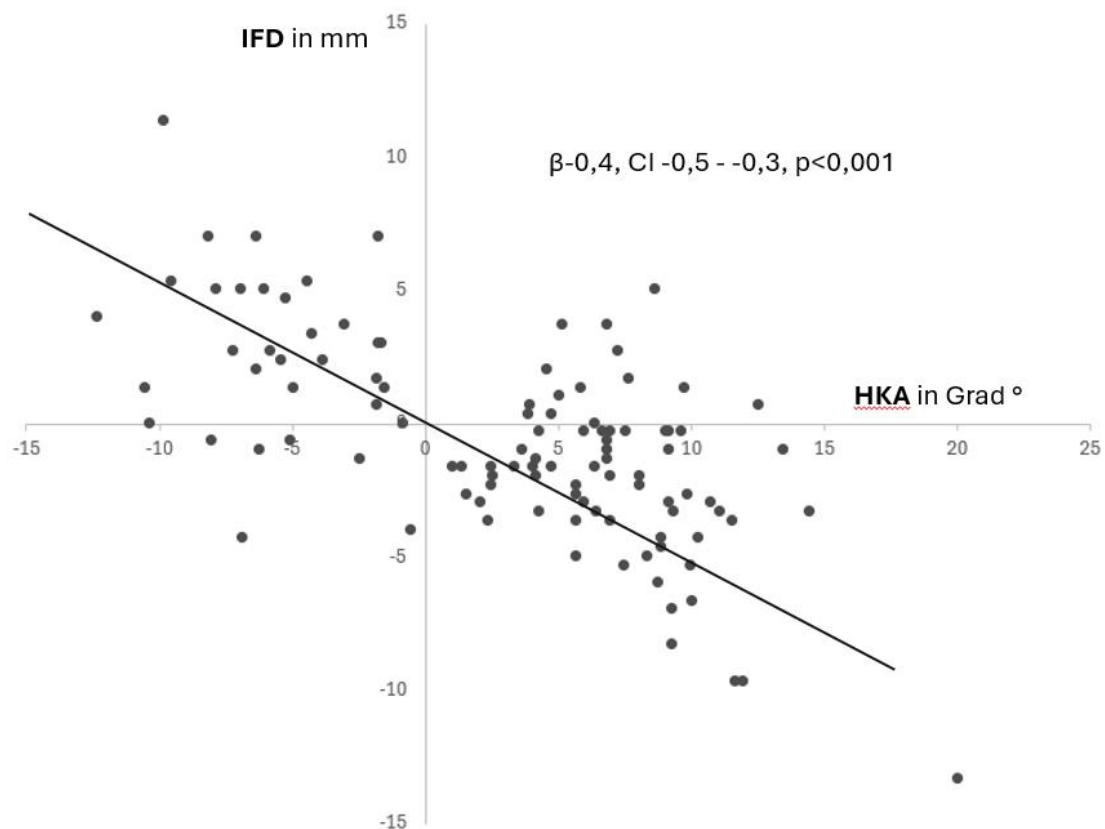


Abbildung 16: Verhältnis von IFD und HKA, aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags (Ahmad et al. 2021, 2450)

3.3.7 Vergleich von IFD und mMPTA

Bezüglich der vergleichenden Gegenüberstellung des IFD gegenüber des gemessenen mMPTA, zeigte sich ebenfalls eine negative Korrelation mit $\beta -0,5$ innerhalb eines Konfidenzintervalls von CI -0,6 bis -0,3. Für einen zunehmenden mMPTA konnte, wie bereits beim Vergleich mit dem HKA, eine Reduktion des IFD verzeichnet werden.

Auch hier erwies sich die Reduktion des IFD unter Zunahme des mMPTA als signifikant, bei einem $p < 0,001$.

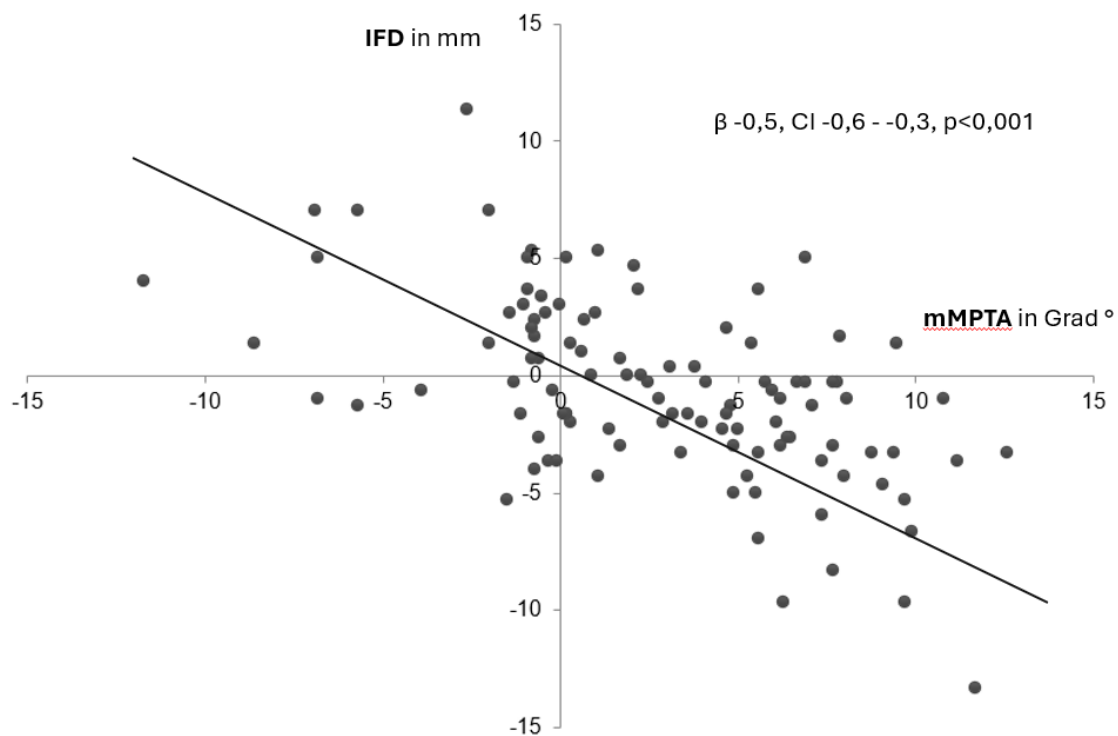


Abbildung 17: Verhältnis von IFD und mMPTA aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags (Ahmad et al. 2021, 2450)

3.3.8 Vergleich von IFD und LDFA

Der Vergleich den ischiofemorales Abstandes in Abhängigkeit des bestehenden LDFA ergab eine positive Korrelation mit einem β von 0,5 innerhalb eines Konfidenzintervalls von CI 0,3 – 0,7.

Folglich zeigte sich für einen zunehmenden LDFA auch ein vergrößert messbarer IFD. Die Korrelation erwies sich als statistisch signifikant bei einem $p < 0,001$.

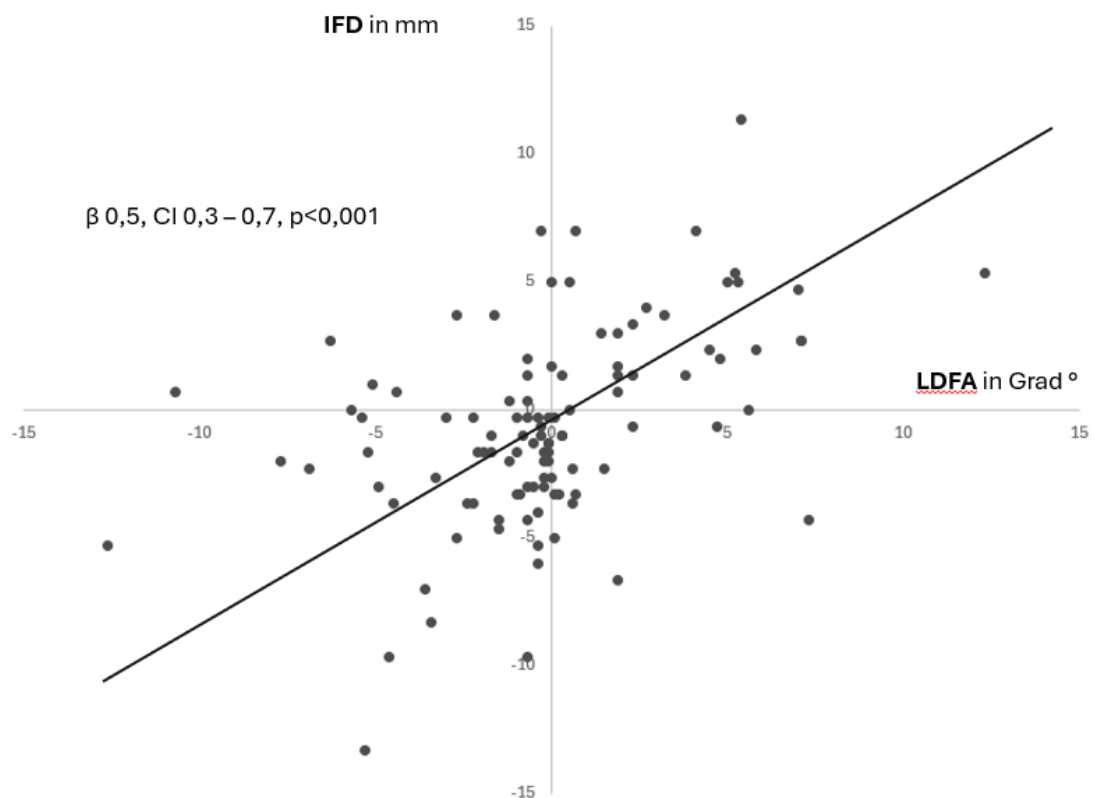


Abbildung 18: Verhältnis von IFD und LDFA, aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags (Ahmad et al. 2021, 2450)

3.3.9 Vergleich von FAA und HKA

Abschließend erfolgte der Vergleich von FAA in Abhängigkeit des HKA. Auch dieser zeigte in der Regressionsanalyse eine positive Korrelation bei einem β von 0,4 innerhalb eines Konfidenzintervalls von CI 0,3 – 0,5, wonach entsprechend ein vergrößerter HKA zu einem ebenfalls vergrößerten FAA führte. Die Zunahme des FAA bei steigendem HKA erwies sich bei einem p-Wert von $p < 0,001$ als statistisch signifikant.

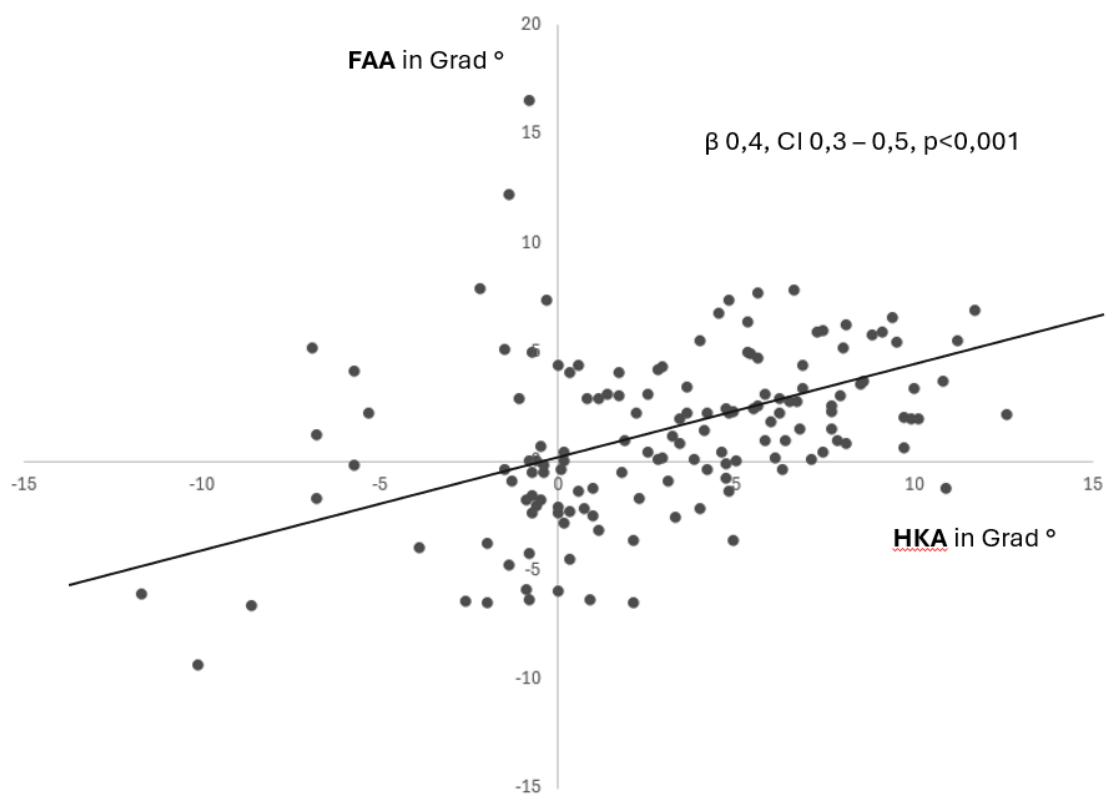


Abbildung 19: Verhältnis von FAA und HKA, aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags, (Ahmad et al. 2021, 2450)

3.3.10 Vergleich von IFD und FAA

Am Ende wurde der IFD in Abhängigkeit des FAA gegenübergestellt. Es zeigte sich eine negative Korrelation für ein β von $-0,5$ innerhalb eines Konfidenzintervalls CI von $-0,8$ bis $-0,1$. Demnach nahm der IFD unter vermehrter Femuradduktion, dargestellt durch einen zunehmenden FAA, ab. Die Abnahme des IFD unter Zunahme des FAA erwies sich als signifikant bei $p < 0,026$.

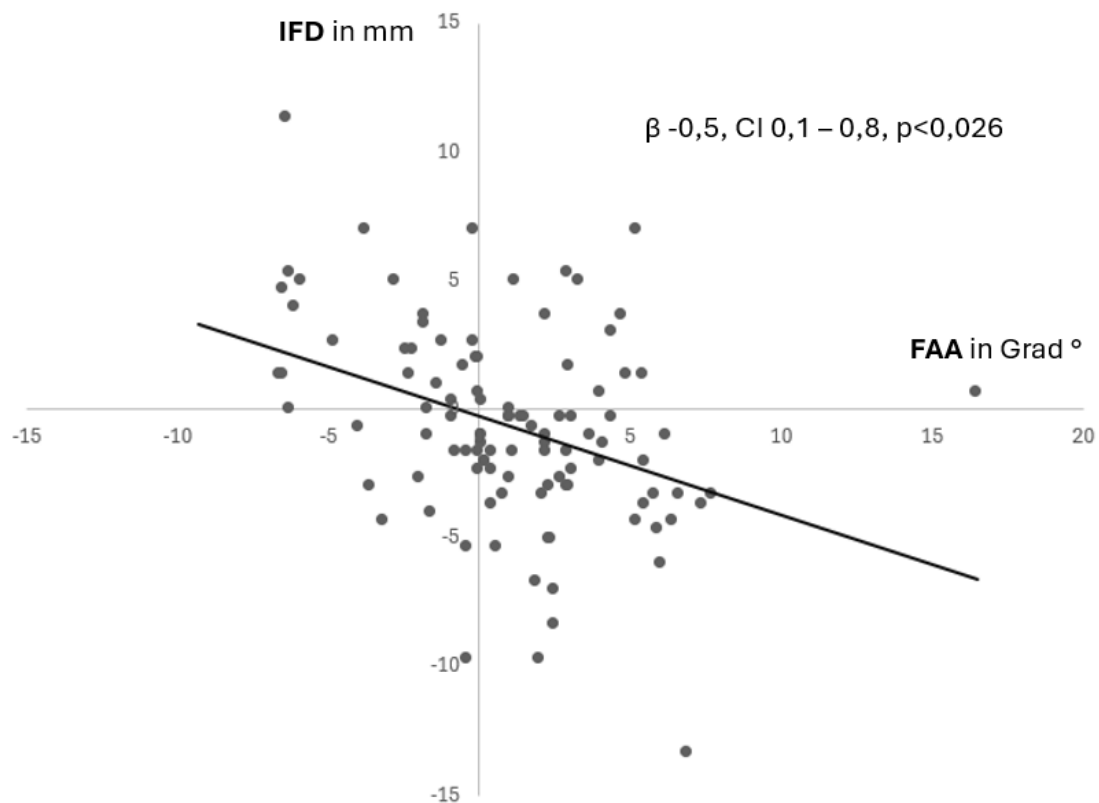


Abbildung 20: Verhältnis von IFD zu FAA

Ausgehend von der Auswertung der linearen Regression zwischen IFD und HKA sowie FAA und HKA konnte eine Steigung der Regressionsgeraden von $\beta = \pm 0,4$ ermittelt werden. Folglich betrug die Veränderung des IFD für die untersuchte Kohorte $0,4\text{mm}$ pro entsprechendem Grad Änderung der frontalen Knieausrichtung. Die abschließend durchgeführte post-hoc Poweranalyse konnte bei einer Stichprobengröße von $n=154$ und einem Signifikanzniveau α von

5% eine Teststärke von 95% für die Prä- und Postadduktion des Femurs, als primärer Forschungsfrage, aufzeigen.

4 Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, den Einfluss kniegelenksnaher Osteotomien auf den ischiofemorale Raum der Hüfte zu untersuchen und einen signifikanten Zusammenhang zwischen der dabei resultierenden Veränderung der frontalen Kniegelenksausrichtung und dem ischiofemorale Abstand nachzuweisen. Dabei wurde die Hypothese aufgestellt, dass eine Valgisierung der Beinachse zu einer signifikanten Reduktion des ischiofemorale Abstandes führt.

Hierzu wurden die Daten von insgesamt 154 kniegelenksnahen Osteotomien ausgewertet. Die Auswertung und Interpretation der gefundenen Ergebnisse sollen im Folgenden dargelegt und vor dem Kontext der bestehenden Literatur beleuchtet werden sowie die klinische Relevanz der gefundenen Ergebnisse erörtert werden.

Als wesentliche Messvariablen dienten die Gelenk- bzw. Achsenwinkel der unteren Extremität. Zur Auswertung wurden der HKA, mMPTA, mLDFA, JLCA, mLPFA sowie FAA herangezogen und dem IFD als Hauptvariable gegenübergestellt. Die Auswahl der Winkel orientierte sich dabei an der Publikation von Paley et al. über die „Prinzipien der kniegelenksnahen Deformitätenkorrektur“. (Paley und Pfeil 2000)

Hierbei fiel im Rahmen der Datenauswertung zunächst auf, dass sich beim Vergleich des HKA mit dem IFD eine negative Korrelation ergab, dergestalt, dass ausgehend von den Messdaten eine Vergrößerung des HKA mit einer Abnahme des IFD einherging, welche signifikant war.

Da sich der HKA als medial gemessener Winkel zwischen den mechanischen Achsen aus Femur und Tibia definiert, ist er ein direktes Maß für eine Achsabweichung zwischen mechanischer Femur- und Tibiaachse.

Verringert sich der HKA unter seinen Normwert von $175^\circ \pm 5^\circ$ (Degen et al. 2019; Moser et al. 2022), so entspricht dies einer Varusfehlstellung im Kniegelenk mit vermehrter Belastung des medialen Kompartiments. Ist der HKA hingegen vergrößert, liegt umgekehrt eine Valgusdeviation mit Lateralisierung der mechanischen Beinachse vor.

Betrachtet man nun vor diesem Hintergrund die Ergebnisse aus der Regressionsanalyse von HKA und IFD (s. Abb. 18), so lässt sich wie bereits erwähnt erkennen, dass die Zunahme des HKA zu einer Abnahme des IFD führt. Die Zunahme des HKA entspricht ihrerseits einer Valgisierung der Beinachse. Folglich ist die Abnahme des IFD unter Zunahme des HKA einer Abnahme des IFD unter zunehmender Valgisierung gleichzusetzen. Umgekehrt zeigt sich in Abb. 18 auch, dass eine Verringerung des HKA und somit eine Varisierung der Beinachse zu einer Zunahme des zu messenden IFD führt.

Durch diesen im Rahmen der Regressionsanalyse von HKA und IFD gefundenen Zusammenhang konnte somit die Hypothese darüber, dass eine Valgisierung der Beinachse mit einer Verringerung des ischiofemoralen Raums einhergeht, gemessen anhand des ischiofemoralen Abstandes, erstmalig untermauert und veranschaulicht werden.

Nun ist über den HKA zwar eine Varus- oder Valgusdeformität identifizierbar, allerdings wird durch ihn anatomisch bedingt nur eine Achsabweichung zwischen mechanischer Femur- und Tibiaachse und somit der mechanischen Beinachse insgesamt gemessen bzw. nachgewiesen. Daher kann durch die alleinige Bestimmung des HKA zwar die Achsabweichung an sich, nicht jedoch auf den der Achsabweichung ursächlich zugrundeliegende Ort geschlossen werden. Die Frage, ob die nachgewiesene Achsabweichung femoral oder tibial begründet ist, lässt sich folglich durch den HKA nicht beantworten. Er gibt nur Aufschluss darüber, dass eine solche vorliegt und ob es sich um eine Valgus- oder Varusfehlstellung handelt.

Um ausgehend davon die Einflussnahme auf den ischiofemoralen Raum der Hüfte nicht nur für Abweichungen der mechanischen Gesamtbeinachse - dargestellt durch den HKA - nachzuweisen, sondern auch für isolierte femorale

oder tibiale Fehlstellungen zu verifizieren, wurden auch der mMPTA und mL DFA isoliert dem IFD gegenübergestellt, wie in den Abb. 19 und 20 dargestellt.

Der mMPTA als „mechanisch medial-proximaler Tibiawinkel“ definiert sich letztlich als von medial gemessener Winkel zwischen mechanischer Tibiaachse und Tibiaplateaulinie die Achsausrichtung der Tibia bezogen auf die Kniehorizontale. Durch seine Erhebung lassen sich somit, im Unterschied zum HKA, isolierte tibial-bedingte Achsdeviationen in der Frontalebene nachweisen.

Ziel seiner Erhebung war es daher, neben der Gesamtbeinachse auch tibiale Achsabweichungen zu messen und sie dem IFD gegenüber zu stellen. Aus der linearen Regressionsanalyse zwischen mMPTA und IFD ergab sich schließlich ebenfalls eine negative Korrelation und signifikante Abnahme des IFD unter Zunahme des mMPTA.

Hieraus ließ sich zunächst folgern, dass die Veränderung des IFD nicht nur für Achsdeviationen der Gesamtbeinachse, sondern auch für tibial-bedingte Achsdeviationen signifikant ist.

Des Weiteren entspricht die Zunahme des mMPTA einer valgisierenden Achsausrichtung der Tibia gegenüber dem Femur und damit einer tibial bedingten Valgisierung der Beinachse. Durch das Ergebnis der Regressionsanalyse lässt sich somit ferner auch die bereits aus dem Vergleich von HKA und IFD gefundene Korrelation aus abnehmendem IFD unter Zunahme der Valgisierung bestätigen.

Um dies auch für femoral bedingte Achsabweichungen zu überprüfen, wurde der mL DFA erhoben. Dieser „mechanisch lateral-distale Femurwinkel“ misst gewissermaßen als „femorales Pendant“ zum mMPTA von lateral den Winkel zwischen mechanischer Femurachse und der Kniebasislinie und damit anschaulich die frontale Achsausrichtung des Femurs gegenüber der Kniehorizontalen.

Eine Zunahme des mL DFA geht dabei mit einer Varisierung der femoralen Achse gegenüber der Tibia einher und entspricht einer femoral bedingten Varisierung

der mechanischen Beinachse. Umgekehrt entspricht die Verringerung des mL DFA einer Valgisierung der Beinachse ausgehend vom Femur.

Aus der Gegenüberstellung der Messwerte des mL DFA mit den gemessenen Werten des IFD ergab sich ausgehend von der linearen Regressionsanalyse bei einem Regressionkoeffizienten von $\beta=0,5$ eine positive Korrelation. Hierbei kam es unter Zunahme des mL DFA zur einer signifikanten Vergrößerung des zu messenden IFD. Umgekehrt ergab sich entsprechend der positiven Korrelation unter Abnahme des mL DFA auch ein reduzierter IFD. (s. Abb. 20)

Folglich konnte über die Analyse des mL DFA auch für femoral verursachte Achsdeviationen eine signifikante Einflussnahme auf den IFD nachgewiesen werden. Vor dem Hintergrund, dass die Abnahme des mL DFA, wie oben erläutert, einer femoral bedingten Valgisierung der Beinachse entspricht, zeigte die Betrachtung des mL DFA darüber hinaus dieselbe, signifikante Korrelation aus abnehmendem IFD unter Valgisierung der Beinachse wie bereits bei HKA und mMPTA. Da der mL DFA, anders als der mMPTA, dem lateralen Winkel zwischen mechanischer Femurachse und der Basis der Femurkondylen entspricht, ergibt sich aus der Interpretation seiner Abweichungen ein quasi komplementäres Verhältnis in Bezug auf die resultierende Beinachse im Vergleich zum mMPTA.

Insgesamt ließ sich aus den bisherigen Ergebnissen schließen, dass eine Valgisierung insgesamt mit dem Risiko einer Reduktion des ischiofemorale n Abstandes und umgekehrt eine Varisierung mit einer Zunahme des IFD einhergeht. Dies zeigte sich dabei unabhängig davon, auf welcher Ebene der Beinachse die Achsenveränderung erfolgte oder vorbestand. Es scheint also weniger die genaue Lokalisation der Osteotomie für die Beeinflussung des ischiofemorale n Raums entscheidend zu sein, sondern vielmehr die Frage, ob die Osteotomie als valgisierende oder varisierende Umstellung erfolgte.

Als Ursache für die Korrelation zwischen einer Abweichung der Beinachse und der Beeinflussung des ischiofemorale n Abstandes, wurde die Veränderung der Femuradduktion in Bezug auf das Becken verantwortlich gemacht.

Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde der femorale Adduktionswinkel (FAA) bestimmt und in Relation zum jeweils zu messenden HKA gesetzt. Die anschließend durchgeführte lineare Regressionsanalyse ergab bei einem β von 0,4 eine positive Korrelation zwischen HKA und FAA, wonach ein zunehmender HKA mit einem vergrößerten FAA einhergeht, sowie umgekehrt ein abnehmender HKA zu einer Reduktion des FAA führte.

Anschaulich entspricht ein zunehmender HKA einer Valgisierung der mechanischen Gesamtbeinachse. Somit kann gefolgert werden, dass eine zunehmende Valgisierung der Beinachse zu einer Zunahme des FAA führt. Der FAA bemisst sich seinerseits wiederum, wie eingangs geschildert, als Winkel zwischen der anatomischen Femurachse und der Orthogonalen zur horizontalen Beckenachse und ist daher ein direktes Maß für die Femuradduktion in Bezug auf die horizontale Beckenachse.

Durch die nachgewiesene, positive Korrelation zwischen FAA und HKA konnte folglich die Hypothese einer verstärkten Femuradduktion unter Valgisierung bestätigt und bei einem $p < 0,001$ als signifikant nachgewiesen werden.

Es wurde daraus weiter geschlossen, dass die im Zuge der Valgisierung zunehmende Femuradduktion entsprechend der anatomischen Verhältnisse mit einer zunehmenden Annäherung des Trochanter minor an die Kortikalis des ipsilateralen Os ischium einhergeht, was folglich in einer Reduktion des dortig zu messenden ischiofemoralen Abstandes resultiert.

Komplementär dazu bewirkt eine Varisierung der Beinachse, dargestellt durch einen verringerten HKA, eine Reduktion der Adduktion des Femurs zum Becken und damit des messbaren FAA. Entsprechend vergrößert sich der Abstand des Trochanter minor zu den Sitzbeinhöckern, was einer Zunahme des ischiofemoralen Abstandes entspricht.

Um dies für die untersuchte Kohorte zu verifizieren wurden abschließend der FAA und IFD in Relation gestellt und auf Basis einer linearen Regressionsanalyse für eine zunehmende Adduktion, im Sinne eines sich vergrößernden FAA, eine signifikante Reduktion ($p = 0,026$) des zu messenden IFD festgestellt. (s. Abb. 22)

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass eine Valgisierungsosteotomie im Bereich des Knies mit einer signifikanten ($p < 0,001$) Zunahme der Adduktion des Femurschaftes in Relation zum Becken einhergeht (nachgewiesen durch den zunehmenden FAA). Durch die vermehrte Adduktion kam es anatomisch bedingt zu einer Annäherung des Trochanter minor an das Os ischium was wiederum zu einer statistisch signifikanten Abnahme ($p = 0,026$) es dortig zu messenden ischiofemoralen Abstandes (IFD) führte. Gleichzeitig ging eine Varisierungsosteotomie im Bereich des Knies mit einer signifikanten Abnahme des FAA ($p < 0,001$) und damit einer Abduktion des Femurschaftes mit nachfolgender Vergrößerung des ischiofemoralen Abstandes einher.

Somit konnte die Arbeitshypothese dieser Arbeit darüber, dass kniegelenksnahe Osteotomien einen relevanten und signifikanten Einfluss auf den ischiofemoralen Abstand haben durch die nachweisliche Reduktion des IFD durch Valgisierung aufgrund damit einhergehender, signifikanter Femuradduktion und folglich anatomischer Annäherung des Trochanter minor an das Os ischium mit konsekutiver Reduktion des IFD verifiziert werden.

Dabei betrug innerhalb der untersuchten Kohorte die Änderung des IFD etwa 0,4mm pro entsprechendem Grad Änderung der frontalen Knieausrichtung.

Die nachfolgenden Abbildungen 23 und 24 zeigen grafisch veranschaulicht nochmal das Verhältnis der Femuradduktion nach Valgisierung (Abb. 23) und Varisierung (Abb. 24).

Die Abbildung 25 zeigt die beschriebenen Veränderungen der prä- zu postoperativen Reduktion des IFD exemplarisch an einem Patientenbeispiel im Rahmen einer stattgehabten valgisierenden HTO.

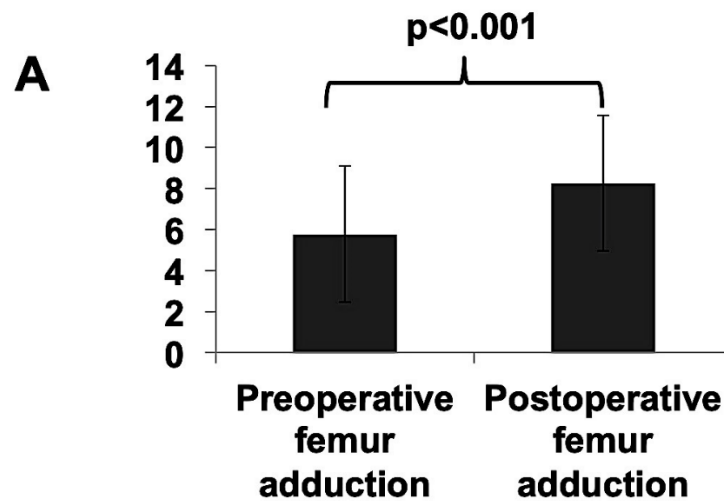


Abbildung 21: Veränderung der Femuradduktion nach Valgisierungsosteotomie, aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags (Ahmad et al. 2021, 2449)

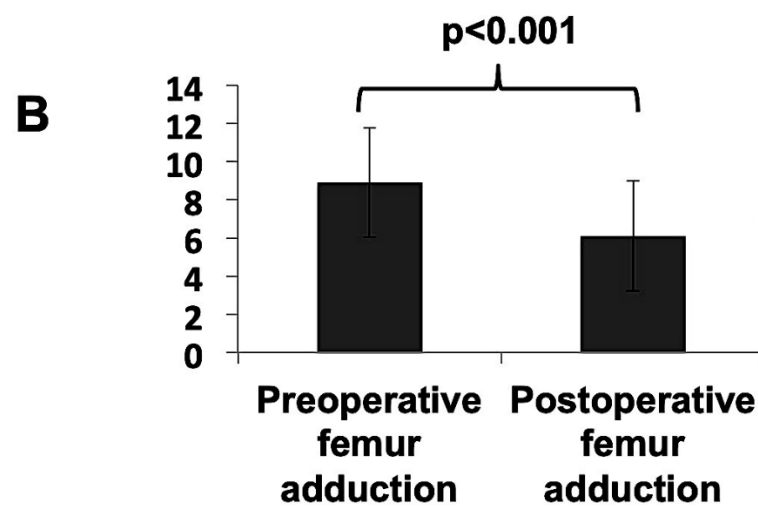


Abbildung 22: Veränderung der Femuradduktion nach Varisierungsosteotomie, aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags, (Ahmad et al. 2021, 2449)

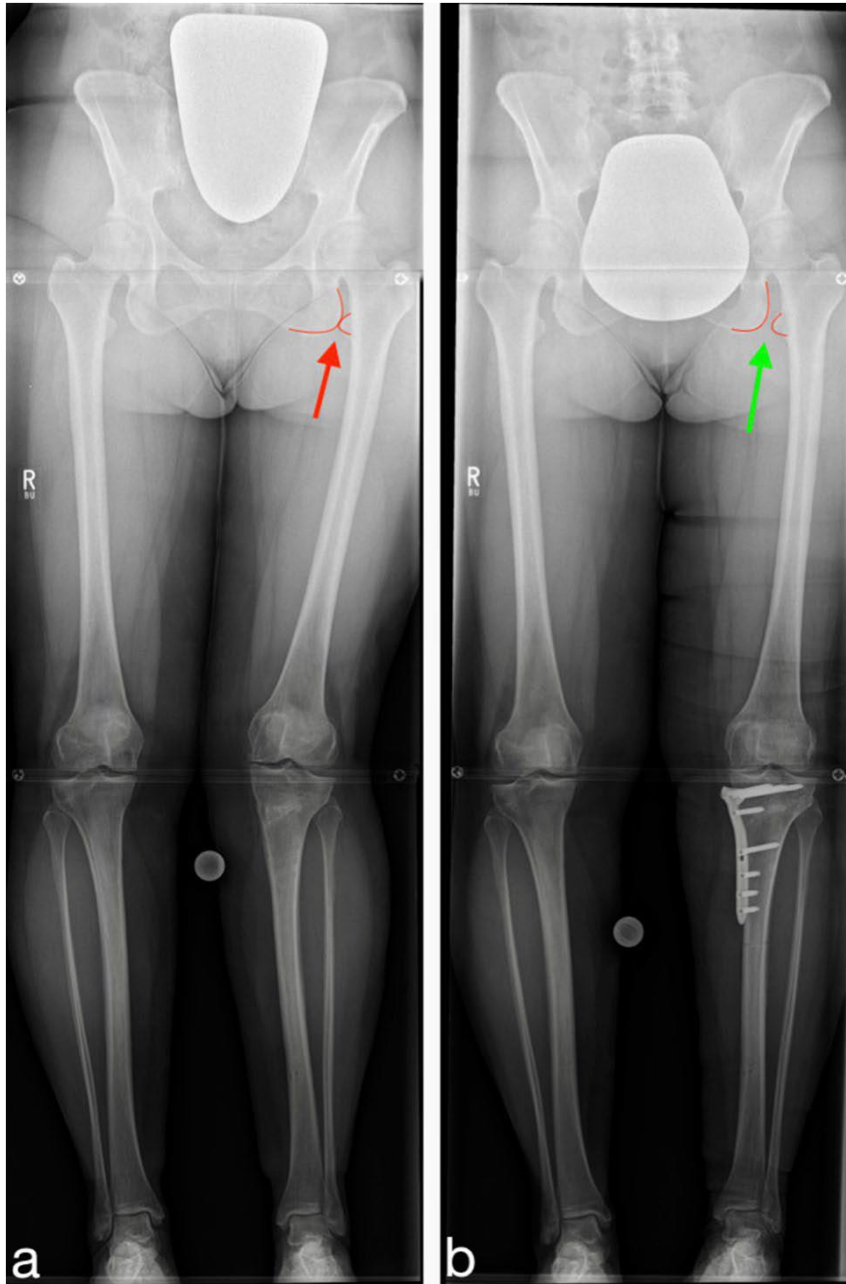


Abbildung 23: Darstellung des IFD bei bestehender Valgusdeviation des linken Beins (a) und nach varisierender HTO (b), aus der publizierten Version der Arbeit, mit freundlicher Genehmigung des Verlags (Ahmad et al. 2021, 2451)

Wie in Abb. 25 zu erkennen, besteht bei (a) eine Valgusdeformität. Diese war Folge einer stattgehabten Überkorrektur nach valgusierender HTO. Zu erkennen ist ein maximal reduzierter IFD mit zu erahnendem Knochenkontakt zwischen Trochanter minor und Os ischium (roter Pfeil). In (b) zeigt sich dann die Situation nach Gegenkorrektur mittels varisierender HTO. Es zeigt sich eine deutliche

Erweiterung des IFD, ohne Knochenkontakt (grüner Pfeil). Dieses Beispiel zeigt den Zusammenhang der veränderten frontalen Knieausrichtung und den resultierenden Einflüssen auf den ipsilateralen IFD.

4.1 Ergebnisse der Arbeit im Kontext der Literatur

Die kniegelenknahen Umstellungsosteotomien kommen als operative Therapieoption vornehmlich bei einer durch Achsenfehlstellung bedingten Gonarthrose zum Einsatz. Die bestehende Achsendeviation führt dabei im Bereich des Kniegelenks zu einer Fehlbelastung in Form einer unikompartimentellen Mehrbelastung. Hierdurch droht sich der Knorpel im überlasteten Kompartiment schneller abzunutzen und eine (unikompartimentelle) Arthrose zu entwickeln.

Ziel der Umstellungsosteotomien ist dabei, die Achsfehlstellung operativ zu beheben und so zu korrigieren, dass die betroffene Gelenkregion aus der Fehlbelastung „gekippt“ und die mechanische Traglinie in Richtung der intakten Gelenkregion verlagert wird. Dadurch soll eine nachfolgend weitestgehend physiologische Achsstellung mit gleichmäßiger Lastenverteilung über das gesamte Gelenk resultieren, um so eine Verzögerung oder bestenfalls die Vermeidung einer Kniegelenksarthrose zu erwirken. Die Umstellungsosteotomien können dabei, wie bereits im Methodenteil ausführlicher ausgearbeitet, je nach Deformität und der dieser zugrundeliegenden Ursache in frontaler, sagittaler oder transversaler Ebene erfolgen. Zudem können die Orte der Durchführung in distal femoral (DFO) oder proximal tibial (HTO) differenziert werden. Darüber hinaus wird zwischen subtraktiven oder auch zuklappenden (closed-wedge) Verfahren und additiven bzw. öffnenden (open-wedge) Verfahren unterschieden. Hieraus ergeben sich dann die heute gängigen Verfahren die einzeln oder, in Form der Doppelosteotomie, auch kombiniert angewendet werden können.

Indiziert sind die Umstellungsosteotomien gegenüber dem kompletten Gelenkersatz neben vielen anderen individuell zu berücksichtigenden Faktoren vor allem bei jüngeren, sportlich-aktiven Patienten, da ein großer Vorteil in der

geringeren Invasivität und der schnellen Wiederaufnahme von sportlichen Aktivitäten gesehen wird. (Deutscher Ärzteverlag GmbH, Redaktion Deutsches Ärzteblatt 2010)

Für das Jahr 2021 verzeichnete das statistische Bundesamt allein für Deutschland rund 30.000 durchgeführte Osteotomien. (Statistisches Bundesamt 2023) Es ist dabei anzunehmen, dass die Zahl dieser Eingriffe in den kommenden Jahren weiter steigen wird, da der demografische Wandel einerseits aber auch die verbesserte und sicherere Durchführung der Osteotomien auf der anderen Seite zu einer größeren Anwendung der Verfahren beitragen. Darüber hinaus ist das verbesserte klinische Outcome der Patienten ein weiterer wichtiger Aspekt. So konnte bereits in einem 2007 durchgeführten Cochrane Review, in welchem insgesamt 13 randomisiert kontrollierte Studien untersucht wurden, eine signifikante Verbesserung bezüglich der Kniefunktion und Schmerzreduktion als Folge durchgeführter Umstellungsosteotomien gezeigt werden. (Brouwer et al. 2007)

In einer anderen Studie mit einem Langzeit-Follow-Up nach erfolgter DFO bei Valgusdeformität wurden 45 medial schließende DFOs über einen mittleren Zeitraum von 13 Jahren nachverfolgt. In der Studienpopulation konnte eine 10-Jahresüberlebensrate von 90% verzeichnet werden. Nach Spätestens 20 Jahren war eine Versorgung mittels Knieendoprothese nötig. (Sternheim et al. 2011) Das gute Langzeitüberleben sowie die daraus resultierende, verzögerte Notwendigkeit zur operativen Versorgung mittels Gelenkersatz betonen den Nutzen der Umstellungsosteotomien in der Reduktion der Arthroseprogression bei Patienten mit achsbedingter unikompartmenteller Arthrose.

Neue Erkenntnisse in den Operationsverfahren sowie technische Fortschritte sorgten zudem über die letzten Jahrzehnte dafür, dass die Durchführung von kniegelenksnahen Osteotomien noch praktikabler und sicherer wurde. Hierbei seien die bessere präoperative Planung anhand standardisiert durchgeführten Röntgen- oder CT-Bildern einerseits als auch die Einführung und Verwendung winkelstabiler Plattenfixateure für die sicherere und genauere Durchführung der

Osteotomien, speziell bei öffnenden Verfahren, erwähnt. (Lobenhoffer et al. 2014)

Das Gebiet der kniegelenknahen Umstellungsosteotomien stellt folglich einen relevanten Tätigkeitsbereich in der Deformitätenkorrektur dar. Umso entscheidender schien es daher, die Einflüsse dieser Korrekturen auf die benachbarten Gelenke und Bereiche der unteren Extremität zu beleuchten, was Gegenstand dieser Arbeit war.

Als zentraler Untersuchungsparameter der vorliegenden Arbeit wurde dabei der ischiofemorale Abstand (IFD, ischiofemoral distance) gewählt. Dieser gewann innerhalb der letzten Jahre zunehmende Bedeutung als pathogenetischer Faktor in der Entstehung von extraartikulärem Hüftschmerz (Tosun et al. 2012) und der Ausbildung des sog. Hüftgelenks-Impingement.

4.2 Der IFD als prognostischer Faktor für IFI

Beim Hüftgelenk-Impingement handelt es sich um ein Engpass-Syndrom im Bereich der Hüfte, wobei es durch Veränderung der knöchernen Gelenkpartner zu einem biomechanischen Konflikt mit Anstoßphänomen kommt. (Wetterau 2023)

Im Wesentlichen können beim Hüft-Impingement, analog zum Schulter-Impingement, intra- und extraartikuläre Formen differenziert werden. Zu den intraartikulären Impingementformen zählen als wichtige Vertreter das femoroacetabuläre Impingement (kurz FAI), welches weiter in das CAM- und das Pincer-Impingement differenziert werden kann. Darüber hinaus werden das foveale Impingement des Ligamentum capitis femoris, das Impingement der Psoassehne sowie ferner auch Impingementbeschwerden durch freie Gelenkkörper oder Labrumrupturen zu den intraartikulären Impingementformen des Hüftgelenks gezählt. (Dienst und Lampert 2014)

Demgegenüber werden zu den extraartikulären Formen des Hüft-Impingements im Wesentlichen das subspinale Impingement mit Kontaktbildung zwischen Schenkelhals und der Spina iliaca anterior inferior sowie das ischiofemorale

Impingement (kurz IFI), als Impingement zwischen dem Trochanter minor und dem Os ischium gezählt. (Dienst und Lampert 2014; Sobau et al. 2018)

Während nicht anders zu erklärender Hüftschmerz bisher als femoroacetabuläres Impingement und damit intraartikuläres Impingement diagnostiziert wurde, gewann das IFI über die letzten Jahre als extraartikuläre Impingementform zunehmende Bedeutung in der Wissenschaft, Forschung und Klinik. Dabei war es bereits 1977 durch Johnson erstbeschrieben worden. (Johnson 1977; Stafford und Villar 2011) Er untersuchte dabei drei Fälle von Patienten mit persistierendem Hüftschmerz nach erfolgreichem komplettem Hüftgelenkersatz (n=2) bzw. nach proximaler Femurosteotomie (n=1). Er postulierte damals, dass ein verminderter Abstand zwischen Trochanter minor und dem Os ischium, hervorgerufen durch die operative Manipulation im Rahmen des Einbringens der Endoprothetik bzw. der erfolgten femoralen Osteotomie oder durch vorangegangene intertrochantäre Frakturen sowie durch Arthritis des Hüftgelenks, für die klinischen Beschwerden verantwortlich sei. Diese Hypothese wurde dadurch untermauert, dass die Beschwerden nach Lokalanästhetika-Injektion im Bereich des Trochanter minor sowie durch im Verlauf durchgeführte operativer Exzision des Trochanter minor bei allen Patienten zufriedenstellend zu lindern waren. (Johnson 1977; Stafford und Villar 2011)

Während die drei untersuchten Fälle von Johnson allesamt voroperiert waren und das IFI als Folgeerscheinung der operativen Manipulation angesehen wurde, bekam das ischiofemorale Impingement 2008 durch einen von Patti et al. veröffentlichten Fallbericht erstmals auch als eigenständige Krankheitsentität ohne zuvor stattgehabte Operation Bedeutung. Hierbei zeigten sich bei einer 43-jährigen taiwanesischen Frau ohne Voroperationen oder Traumata der unteren Extremität persistierende Schmerzen im Bereich der rechten Hüfte und Leiste mit Schmerzausstrahlung bis in das ipsilaterale Kniegelenk beim Gehen. Begleitend litt sie unter einem leichten Blockierungsgefühl sowie Krepitationen im Bereich der rechten Hüfte. Bei unauffälliger klinischer Untersuchung erfolgte die radiologische Bildgebung mittels MRT. Während hiernach Anzeichen einer degenerativen Arthritis sowie für femoroacetabuläres Impingement, posttraumatische Deformitäten oder Osteonekrose ausgeschlossen werden

konnten, fielen eine heterogene Sklerose des Trochanter minor und des Sitzbeins sowie eine unphysiologische Nähe zwischen beiden Strukturen mit einem ischiofemoralen Abstand (IFD) zwischen 0,3-0,4 cm gegenüber den sonst physiologischerweise vorliegenden 2,0 cm auf. (Johnson 1977; Patti et al. 2008; Tosun et al. 2012) Darüber hinaus konnten in der weiteren Bildanalyse zystische Veränderungen im Bereich des Os ischium mit Kontrastmittelanreicherung derselbigen sowie ein weiteres Kontrastmittel-Enhancement des Musculus quadratus femoris und den Sehnenansätzen der ischiocruralen Muskulatur (Hamstrings) festgestellt werden. (Patti et al. 2008) Ursächlich für das vermehrte Enhancement des M. quadratus femoris konnte ein Impingement desselben zwischen Trochanter minor und dem Os ischium mit konsekutivem Ödem festgestellt werden.

Wenngleich sich Patti et al. der genauen Entität nicht sicher waren, zeigten die gefundenen Veränderungen, aufbauend auf den Ergebnissen von Johnson 1977, die relevante Bedeutung der Verringerung des ischiofemoralen Abstand für die mögliche Auslösung eines extraartikulären Hüftgelenk-Impingements in Form des ischiofemoralen Impingements (IFI).

Die durch Patti et al. detektierten Auffälligkeiten im Bereich des M. quadratus femoris im Rahmen der MRT-Bildgebung wurden im nächsten Jahr durch eine Studie von Torriani et al. aufgegriffen und weitergehend untersucht. Hierzu wurden insgesamt 12 MRT-Bilder der Hüfte von 9 Patienten zwischen den Jahren 2001 bis 2008 mit Hüftschmerzen und abnormer Signalintensität des M. quadratus femoris in der MRT-Sequenz untersucht. Dabei wurden lediglich Patienten in die retrospektive Studie eingeschlossen, die keinem Trauma oder operativen Eingriff an der unteren Extremität unterlegen waren. Ausgewertet wurden die Bilder unter Vermessung des ischiofemoralen Abstandes sowie des zur Verfügung stehenden Raums für den M. quadratus femoris. Letzterer war definiert als das Areal, welches durch die superolaterale Oberfläche der Hamstring-Sehnen sowie durch die posteromediale Fläche der Sehne des M. iliopsoas bzw. des Trochanter minor begrenzt wird. Darüber hinaus wurden die Bilder auf das Vorhandensein von Ödemen oder Rissen in den lokal umgebenden Muskeln und Sehnen untersucht. Anschließend wurden die Werte mit einer

Kontrollgruppe (n=10) verglichen. Die Kontrollgruppe bestand wie die Probandengruppe ausschließlich aus Frauen und beinhaltete lediglich Patientinnen ohne vorangegangenes Trauma oder Operation der unteren Extremität.

Die Auswertung zeigte, dass bei allen betroffenen Probanden ein signifikant verringerter ischiofemoraler Abstand als auch ein signifikant geringerer zur Verfügung stehender Raum für den M. quadratus femoris im Vergleich zur Kontrollgruppe bestand. Er folgerte daraus, dass ischiofemorales Impingement mit dabei stattfindender Einklemmung des M. quadratus femoris zwischen Trochanter minor und dem Os ischium bzw. den dortig ansetzenden Sehnen der Hamstrings als eigenständige Entität für Hüftschmerzen verantwortlich sein kann (Torriani et al. 2009)

Auffallend war zudem, dass Torriani in 42% der untersuchten Fälle schwerwiegende Ödeme sowie in weiteren 17% moderate Ödembildung im Bereich des M. quadratus femoris detektieren konnte. Darüber hinaus konnte in 33% (n= 4/12) ein partieller Riss des M. quadratus femoris festgestellt werden. (Torriani et al. 2009)

Somit konnten Torriani et al. vergleichbare Befunde und Ergebnisse erzielen, wie sie bereits in der Untersuchung des Fallberichts von Patti et al. 2008 erwähnt wurden. Das gemeinsame Auftreten von (sonst nicht anders zu erklärendem) Hüftschmerz in Kombination mit Auffälligkeiten des M. quadratus femoris in der MRT-Bildgebung in Form eines Muskelödems wurde daher zu einem wichtigen diagnostischen Parameter in der Diagnosestellung des ischiofemoralen Impingements. (Torriani et al. 2009)

In der Literatur finden sich eine Vielzahl weiterer, teilweise auch erst kürzlich veröffentlichter, Fallberichte mit ähnlichen sowie zum Teil gleichen Ergebnissen hinsichtlich der Veränderungen des ischiofemoralen Abstands (IFD) als auch der begleitenden radiologischen Auffälligkeiten in Bezug auf den M. quadratus femoris wie sie bereits Patti et al. und Torriani et al. beschrieben. (Ali et al. 2011; Jeyaraman et al. 2022; Lee et al. 2013; Yanagishita et al. 2012) In den zitierten Fallberichtstudien handelte es sich um betroffene Frauen in einem Alter zwischen

17 und 48 Jahren. Dabei zeigten sich in 3 von 4 Fällen Symptome eines IFI ohne stattgehabtes Trauma oder Operation im Bereich der Hüfte oder des Femurs. Lediglich im Case report von Ali et al. wurde eine 17-Jährige nach Abduktionsverletzung der Hüfte aufgrund eines akzidentiellen Spagats untersucht. (Ali et al. 2011) Bei allen anderen handelte es sich folglich um eine nicht traumatisch bedingte Symptomentwicklung und zeigte damit dieselben Voraussetzungen, die bereits im Fallbericht von Patti et al. 2008 dargelegt worden waren. (Patti et al. 2008) Auch hier zeigte sich bei allen Patientinnen die mittlerweile charakteristisch anmutende Kombination aus Hüftschmerzen mit nachweislich reduziertem ischiofemoralem Abstand und Ödembildung im Bereich des M. quadratus femoris als Korrelat für ein ischiofemorales Impingement. Die Therapie erfolgte in 2 Fällen erfolgreich konservativ durch die Einnahme von NSAR und Physiotherapie (Lee et al. 2013; Yanagishita et al. 2012). In den beiden anderen Fallberichten konnten die Beschwerden hingegen durch operative Resektion des Trochanter minor erfolgreich behoben werden. (Ali et al. 2011; Jeyaraman et al. 2022)

Verglichen mit dem als normwertig geltenden IFD von 20 mm (Johnson 1977; Patti et al. 2008) konnte in der Arbeitsgruppe um Lee et al. ein beidseits reduzierter ischiofemoraler Abstand von 12,96 mm auf der rechten und 10,24 mm auf der linken Seite gemessen werden. Ebenso fanden sich bilateral Ödeme im M. quadratus femoris. (Lee et al. 2013) Interessanterweise gab die Patientin jedoch nur linksseitige Beschwerden an. Dies korreliert zwar gut mit dem vergleichsweise stärker reduzierten IFD auf der schmerzhaften linken Seite gegenüber rechts, wirft aber auch die Frage auf, inwieweit die beschriebenen Variablen aus reduziertem IFD und Ödem des M. quadratus femoris tatsächlich valide für eine Diagnosestellung des IFI sind und ob eine Reduktion des IFD tatsächlich ursächlich für die klinischen Beschwerden sind, wie bisher angenommen.

Dieser Fragestellung nahmen sich Tosun et al. 2011 an. Ziel ihrer Studie war es, die bisher beschriebenen Auffälligkeiten im MRT bei Patienten mit IFI auf ihre Zuverlässigkeit zu untersuchen. Hierzu erfolgte die Untersuchung der MRT-Bilder von 70 Hüften aus 50 Patienten mit Hüftschmerzen und begleitendem

Ödem des M. quadratus femoris (MQF), welche mit den Bildern einer Kontrollgruppe, bestehend aus 38 Hüftaufnahmen von insgesamt 30 Patienten, verglichen wurden. Die gemessenen Vergleichsvariablen umfassten dabei den ischiofemorale Raum (gemessen als ischiofemorale Abstand), den Raum des MQF, den Inklinationwinkel (IA, definiert als Winkel zwischen der Längsachse des Femurhalses und der Längsachse des Femurschaftes) sowie die Fläche der Hamstringsehne und das Gesamtvolumen des MQF. Die Messungen wurden von zwei verschiedenen Radiologen unabhängig zueinander durchgeführt, welche gegenüber der Patienten- und Kontrollgruppe verblindet waren. (Tosun et al. 2012)

In der Auswertung zeigten sich bezüglich der Variablen ischiofemorale Raum, Raum des MQF sowie Volumen des MQF signifikant niedrigere Werte als in der symptomlosen Kontrollgruppe. Umgekehrt waren der Inklinationwinkel (IA) und die Fläche der Hamstringsehnen in der Probandengruppe signifikant vergrößert. Hieraus schlossen Tosun et al. auf einen deutlichen Mehrwert durch die Anwendung von MRT-Bildgebung für die Diagnosestellung eines IFI. (Tosun et al. 2012)

4.3 Kontroversen gegenüber dem IFD als Prognosefaktor für IFI

In einer weiteren Studie wurde eine bezüglich Hüftschmerzen asymptomatische Stichprobenpopulation von 209 freiwilligen Probanden einer normativen Breitenmessung des ischiofemorale Raums unterzogen und der ischiofemorale Raum sowie der M. quadratus femoris zudem auf das Vorhandensein von MRT-Anomalien (im Sinne von Fettinfiltrationen und Ödemen) untersucht. (Maraş Özdemir et al. 2015) Dies stellte einen entscheidenden Unterschied zum Studiendesign von Tosun et al. dar, welche die Validität der MRT-Anomalien lediglich in symptomatischen Probanden untersuchten. Auch hier zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen einem schmalen ischiofemorale Raum und dem Auftreten von MRT-Anomalien, wenngleich aber die Anomalien nicht zwingend im schmalsten Bereich des ischiofemorale Raums auftraten. (Maraş Özdemir et al. 2015)

Weiter fiel auf, dass eine sehr große Spannweite in den zu messenden Weiten des ischiofemorale Raums bestand. So konnte bei etwa der Hälfte der untersuchten Studienpopulation eine Diskrepanz von >10% in der Breite ihres rechtsseitigen gegenüber des linken ischiofemorale Raums gemessen werden.

Besonders auffallend war zudem, dass auch bei den asymptomatischen Probanden offenbar Verringerungen des IFD sowie MRT-Signalanomalien zu finden waren, wie sie zuvor nur für symptomatische Patienten berichtet worden waren. Özdemir folgerte daraus, dass zwar eine Korrelation zwischen der Abnahme des ischiofemorale Raums und dem Auftreten von MRT-Signalanomalien in selbigem besteht, dies aber nicht zwingend mit klinischer Symptomatik vergesellschaftet sein muss. (Maraş Özdemir et al. 2015)

Ähnliches konnte bereits in früheren Studien nachgewiesen werden. (Ali et al. 2013; Papavasiliou et al. 2014) Im Rahmen einer retrospektiven Fallanalyse zeigte sich bei 5 der untersuchten Patienten kein anatomischer Zusammenhang zwischen ihrer Schmerzlokalisierung und Auffälligkeiten in der MRT-Bildgebung. (Ali et al. 2013)

In einer weiteren Studie zur Untersuchung des Auftretens von sportbedingten, skelettalen Veränderungen bei jungen, gesunden Spitzensportlern zeigte sich in 62,5% (n=15) der untersuchten Fälle der radiologische Nachweis eines IFI, davon in allen bis auf einem Fall mit bilateralem Auftreten. Der durchschnittliche ischiofemorale Abstand – standardmäßig gemessen als kürzeste Distanz zwischen der lateralen Kortikalis der Tuberositas des Os ischium und der medialen Kortikalis des Trochanter minor (Hujazi et al. 2016; Torriani et al. 2009; Papavasiliou et al. 2014) – betrug in den 15 radiologisch nachgewiesenen Fällen 15 ± 7 mm gegenüber den 23 ± 6 mm in der nicht betroffenen Kontrollgruppe. (Papavasiliou et al. 2014) Neben dem verringerten IFD konnten hauptsächlich begleitend Ödeme innerhalb des M.quadratus femoris festgestellt werden sowie in 10 der 15 Fälle Tendinopathien am Ansatzpunkt des M.iliopsas am Trochanter minor. Es konnte auch hier eine statistisch signifikante Korrelation zwischen dem (radiologischen) Nachweis eines IFI und begleitend verringertem IFD nachgewiesen werden, allerdings erneut ohne klinische Symptomatik.

(Papavasiliou et al. 2014) Auffallend war zudem das gehäuft bilaterale Auftreten eines radiologischen IFI innerhalb einer jungen Studienpopulation (mittleres Alter 18,6 Jahre).

Eine weitere Studie soll hier der Vollständigkeit halber Erwähnung finden: In der von O'Brien und Bui-Mansfield im Jahre 2007 (und damit noch vor dem Fallbericht von Patti et al. (Patti et al. 2008)) durchgeführten Fallstudie von 4 Patienten mit diagnostizierten Rissen im M. quadratus femoris, wurden die MRT-Bilder untersucht. Dabei hatten 3 der 4 Patienten einen partiellen und einer einen kompletten Muskelriss. (O'Brien und Bui-Mansfield 2007; Jeyaraman et al. 2022) Es konnten dabei charakteristische Veränderungen in Form von Flüssigkeitsansammlungen, entweder als Ödem oder Blutung, am myotendinösen Übergang des MQF nachgewiesen werden. Diese zeigten sich in axialen, T2-gewichteten, fettunterdrückten MRT-Aufnahmen im Bereich zwischen Trochanter minor und Tuberculum des Os ischium lokalisiert sowie in der sagittalen T2-Aufnahme posterior des Trochanter minor. (O'Brien und Bui-Mansfield 2007) Die Studie ist im Kontext des IFI deshalb erwähnenswert, weil die MRT-Veränderungen ohne begleitende Reduktion des IFD dokumentiert sind. Zwar wird der IFD in der ursprünglichen Studie nicht gemessen (O'Brien und Bui-Mansfield 2007), in einem späteren Artikel heißt es jedoch, dass keine Verringerung des ischiofemorale Raums bei den untersuchten Patienten vorlag. (Torriani et al. 2009; O'Brien und Bui-Mansfield 2007; Kassarian 2008; Yanagishita et al. 2012)

Folglich sollte das Ischiofemorale Impingement weiterhin als Differentialdiagnose bei Patienten mit anders nicht erklärlichen Hüftschmerzen in Betracht gezogen werden und die Verdachtsdiagnose eines IFI mittels MRT-Bildgebung verifiziert werden. Das alleinige Vorkommen eines reduzierten IFD und /oder MRT-Anomalien im Bereich des ischiofemorale Raums und des MQF ohne Symptomatik genügt jedoch nicht, um die Diagnose eines IFI zu stellen. (Maraş Özdemir et al. 2015) Die Validität der MRT-Bildgebung ergibt sich folglich primär aus dem Vorhandensein von IFI-verdächtigen Symptomen.

Dies resümiert auch eine Metaanalyse zum ischiofemorale Impingement Syndrom von Singer et al. aus dem Jahr 2015. Hiernach stellt das IFI eine mögliche Ursache für Hüftschmerzen dar, welches durch die Kombination aus MRT und klinischen Befunden präzise diagnostiziert werden kann. (Singer et al. 2015)

Dennoch bleibt die genaue Diagnosestellung schwierig. Nicht zuletzt deshalb, weil genaue Cutoff-Werte für den ischiofemorale Abstand fehlen. Zwar gilt in der Literatur der IFD von 2 cm als physiologisch (Johnson 1977; Patti et al. 2008), es existieren jedoch widersprüchliche Ergebnisse für genaue Grenzwerte zwischen einem normwertigen und pathologisch verringerten IFD. (Hujazi et al. 2016; Singer et al. 2015; Xing et al. 2023; Kivlan et al. 2017) Dies mag auch in einer großen inter- als auch intraindividuellen Schwankbreite des zu messenden IFD mitbegründet sein. (Maraş Özdemir et al. 2015)

Trotz der sich in der Literatur gleichenden Befunde bei Patienten mit IFI (Johnson 1977; Patti et al. 2008; Torriani et al. 2009; Stafford und Villar 2011; Dablan et al. 2021), konnten die gefunden Veränderungen bezüglich des IFD als auch der MRT-Anomalien im Bereich des MQF auch bei asymptomatischen Patienten nachgewiesen werden (Maraş Özdemir et al. 2015), was die Diagnosestellung als auch das pathogenetische Verständnis für das IFI erschwert. Dennoch scheint ein reduzierter IFD der insgesamt sicherste Diagnoseparameter zu sein, da er konsequent bei allen Patienten mit IFI in der Literatur nachweisbar war. (Johnson 1977; Patti et al. 2008; Torriani et al. 2009; Lee et al. 2013; Jeyaraman et al. 2022; Yanagishita et al. 2012; Tosun et al. 2012; Dablan et al. 2021; Ali et al. 2011)

4.4 Pathogenetische Risikofaktoren für Reduktion des IFD in der Literatur

Bezüglich möglicher ätiopathogenetischer Faktoren für die Verringerung des IFD und der Auslösung eines IFI werden in der Literatur verschiedene Ätiologien genannt. Diese umfassen beispielsweise eine atypische Morphologie des MQF (Torriani et al. 2009; Jeyaraman et al. 2022), einen vergrößerten femoralen Durchmesser auf Höhe des Trochanter minor, Coxarthrose mit superomedialer

Migration, Coxa valga, und Osteochondromatose der Hüfte. (Jeyaraman et al. 2022; Schubert et al. 2019; Yanagishita et al. 2012) Darüber hinaus werden auch kongenitale Faktoren, wie beispielsweise eine angeborene posteromediale Femorausrichtung, diskutiert. (Jeyaraman et al. 2022; Yanagishita et al. 2012)

Letzteres wird durch die Tatsache untermauert, dass bereits bei Kindern und Jugendlichen Fälle mit ischiofemoralem Impingement dokumentiert wurden. (Tosun et al. 2012b; Goldberg-Stein et al. 2018; Stenhouse et al. 2016; Papavasiliou et al. 2014)

Auch nach anderen Studien kann die Verengung des ischiofemoralen Raums lagebedingt, angeboren oder erworben sein. (Ali et al. 2011; Taneja et al. 2013; Papavasiliou et al. 2014)

Darüber hinaus scheint auch eine veränderte Beckenmorphologie mit einem verbreiterten und flachen Becken sowie vergrößerten Sitzbein- und Schenkelhalswinkeln für einen reduzierten IFD und damit die Entstehung eines IFI zu prädisponieren. (Bredella et al. 2015; Jeyaraman et al. 2022)

Die veränderte Beckenmorphologie als pathogenetischer Faktor spiegelt sich auch in der auffallend weiblichen Dominanz der Betroffenen wider. (Patti et al. 2008; Ali et al. 2011; Jeyaraman et al. 2022; Lee et al. 2013; Yanagishita et al. 2012; Torriani et al. 2009; Singer et al. 2015; Ali et al. 2013). Und auch in der bereits erwähnten Metaanalyse von Singer et al. zeigte sich ein Anteil von 75,94% weiblicher Probanden. (Singer et al. 2015)

Eine im Jahr 2023 erschienene Studie von Ahmad et al. griff dieses Phänomen auf und suchte eine Erklärung für die weibliche Prädisposition zur Entwicklung eines IFI. Es konnte gezeigt werden, dass im Zuge der geburtshilflichen, anatomischen Anpassungen des weiblichen Beckens ein vergrößerter subpubischer Winkel bei Frauen besteht, welcher ein Lateralisieren des Os ischium zur Folge hat. Hieraus resultiert eine Abnahme des ischiofemoralen Raums mit folglich erhöhtem Risiko für ein ischiofemorales Impingement. (Ahmad et al. 2023)

Zusammenfassend lässt sich das IFI, ausgehend von der Literaturrecherche, als die Einklemmung des Musculus quadratus femoris zwischen dem Trochanter minor des Femur und den Hamstringsehnen definieren. Es stellt eine eigene Krankheitsentität mit zunehmender Bedeutung bei klinisch präsentem Hüftschmerz dar. Betroffene Patienten klagen vornehmlich über chronische Schmerzen im Bereich der Hüfte, Leiste und Gesäß, die zum Teil bis ins Knie ausstrahlen, häufig ohne, dass ein bekanntes Trauma vorlag. Begleitend werden Blockierungsgefühle, Hüftschnappen und Krepitationen berichtet. (Torriani et al. 2009; Stafford und Villar 2011; Patti et al. 2008; Tosun et al. 2012; Taneja et al. 2013)

Wenngleich auch keine spezifischen klinischen Tests zur Diagnose der Erkrankung existieren, so gelten der Nachweis eines reduzierten ischiofemorale Abstands und die Verengung des Raums des M. quadratus femoris sowie das Vorhandensein von Fettablagerungen und Ödemen im Bereich des M. quadratus femoris in der Magnetresonanztomographie (MRT) als diagnostischer Hinweis für ein ischiofemorales Impingement.

Trotz verschiedener, in der Literatur beschriebenen Erklärungen für mögliche Risikofaktoren sowie Pathogenese als auch beschriebene Therapieansätze, bleibt die genaue Ätiologie sowie Therapie weiter ungewiss.

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Recherche der genannten Literatur auffällt, ist die Tatsache, dass bei möglichen pathogenetischen Faktoren des IFI nahezu ausschließlich hüftgelenksnahe Ursachen untersucht und beschrieben sind.

Vor diesem Hintergrund lässt sich die Bedeutung der vorliegenden Arbeit begründen. Denn nach aktuellem Wissensstand wurde im Rahmen dieser Arbeit durch die Untersuchung der Einflussnahme von kniegelenksnahen Umstellungsosteotomien auf den ischiofemorale Abstand erstmals auch ein hüftgelenksferner Faktor für die Reduktion des IFD und damit als mögliche Ursache für ein IFI untersucht.

Die grundlegende Annahme der Forschungsarbeit bestand darin, dass durch die Veränderung der frontalen Kniegelenksausrichtung im Zuge valgusierender und

varisierender Osteotomien auch eine Veränderung in den benachbarten Gelenken, speziell dem Hüftgelenk resultiert. Dies wäre insofern relevant, als dass die Umstellungsosteotomien der eigentlichen Behebung einer durch Achsfehlstellung induzierten Fehlbelastung im Kniegelenk dienen, aber durch die axiale Verbundenheit über die großen Röhrenknochen der Beine zu schädigenden Veränderungen an den benachbarten Gelenken führen könnten, was eine Einflussnahme weit über das eigentliche Op-Gebiet hinaus bedeuten würde.

Im Zuge dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Veränderung der Beinachse in der Frontalebene im Zuge von kniegelenknahen Umstellungsosteotomien und dem resultierenden ischiofemoralen Abstand besteht.

Hieraus konnte gefolgert werden, dass auch hüftgelenksferne Faktoren, wie die hier untersuchten Umstellungsosteotomien, als Einflussfaktor auf den IFD fungieren und im Falle einer Valgisierungsosteotomie eine Reduktion des IFD und somit ein erhöhtes Risiko für die Entstehung eines IFI bergen.

Dies mag zunächst wenig bedeutsam klingen, ergibt aber in Anbetracht der durchaus hohen Eingriffszahlen von knapp 30.000 Umstellungsosteotomien im Jahr 2021 in Deutschland (Statistisches Bundesamt 2023) eine nicht unerhebliche Zahl an potenziell von ischiofemoralem Impingement betroffenen Patienten. Daher sollten diese Erkenntnisse bei der kniegelenknahen Umstellungschirurgie künftig berücksichtigt werden. Für genauere Aussagen und tiefere Einblicke in die Pathogenese und Einflussfaktoren sind aus Sicht des Autors weitere Studien sinnvoll.

4.5 Diskussion möglicher Schwächen und Fehlerquellen der Arbeit

In der Literatur konnte der reduzierte IFD mehrfach als Risikofaktor für die Entwicklung eines IFI identifiziert werden (Johnson 1977; Patti et al. 2008; Torriani et al. 2009; Ali et al. 2011; Tosun et al. 2012; Yanagishita et al. 2012; Lee et al. 2013; Jeyaraman et al. 2022). Gleichwohl bedeutet die reine Reduktion nicht zwingend auch eine klinisch-symptomatische Manifestation des IFI, wie ebenfalls bei Untersuchung asymptomatischer Patienten nachgewiesen werden konnte (Ali et al. 2013; Papavasiliou et al. 2014; Maraş Özdemir et al. 2015).

Auch in dieser Arbeit konnten zwar signifikante Reduktionen des IFD ausgelöst durch valgusierende, kniegelenknahe Umstellungsosteotomien nachgewiesen werden. Inwiefern die postoperative Reduktion des IFD zu einer klinischen Symptomatik oder manifestem ischiofemoralem Impingement führte, blieb in dieser Arbeit unbeantwortet, da kein Follow-up der untersuchten Patienten erfolgte. Interessant wäre daher zu sehen, wie viele der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Patienten im Verlauf, ausgehend von der gemessenen Reduktion des IFD, tatsächlich ein klinisch-symptomatisches IFI entwickelten.

Eine weitere Limitation der vorliegenden Studie besteht in der Tatsache, dass in allen 3 Subgruppen (HTO, DFO und Doppelosteotomie) Patienten mit in die Kohorte eingeschlossen wurden, die bereits unterschiedlich voroperiert worden waren. Dies umfasste unter anderem Frakturversorgungen, Hüft-Endoprothesen, Kreuzband-Operationen und OSG-Operationen. Zwar wurden die Patienten nach dem unter Abschnitt 3 Ergebnisse einzusehenden Schema (s. Abb. 4) für die Studienkohorte ausgewählt. Allerdings wurden in den Auswahlkriterien die Voroperationen nicht berücksichtigt. Insgesamt waren bei etwa 13% (n=20) Voroperationen bekannt. Es wurde jedoch keine systematische Anamnese bezüglich Voroperationen erhoben, sodass der Anteil schätzungsweise höher liegt. Folglich kann eine etwaige Einflussnahme auf die dargestellten Ergebnisse durch vorangegangene Operationen und individuell unterschiedliche Krankheitshistorien nicht sicher ausgeschlossen werden.

Ein weiterer zentraler Punkt dieser Arbeit bestand in der Vermessung des ischiofemoralem Abstandes. Dabei erfolgten die Abstandsmessungen des IFD

ausschließlich in den standardisiert angefertigten a.p.-Ganzbein-Standaufnahmen und somit lediglich in einer Ebene, was einerseits die Aussagefähigkeit der Messungen limitiert. Zum anderen besteht nach Ganz et al. das Risiko für einen möglichen Überlappungseffekt von Trochanter minor und Os ischium durch den physiologischerweise anterior des Os ischium verlaufenden Femur, der als reduzierter IFD fehlinterpretiert worden sein könnte. (Ganz et al. 2013) Zur Vermeidung dessen wäre die Messung der Femurtorsion nötig gewesen, welche aber eine zusätzliche Strahlenbelastung bedeutet hätte und gegen die ethischen Normen dieser Studie verstoßen hätte.

Um die Messungen so genau wie möglich und untereinander vergleichbar zu machen, wurden die Ganzbeinstandaufnahmen standardisiert durchgeführt. (siehe unter 2.5 Erstellung der Röntgenbilder) Dennoch zeigten sich vereinzelt Variationen in der Qualität der Aufnahmen, die ebenfalls als mögliche Fehlerquellen, neben dem zuvor beschriebenen Überlappungseffekt erwähnt werden müssen.

Darüber hinaus hätte eine dreidimensionale Darstellung des ischiofemorale Raums eine genauere Bestimmung der Abstände ermöglicht. Dies würde jedoch eine komplexe Bildgebung in einer funktionellen Stehposition als auch dynamische Tests erfordern, die aber ausgehend von den hier verwendeten Ganzbeinstandaufnahmen in a.p.- Strahlengang nicht möglich waren und auf die im Rahmen des Studiendesigns bewusst verzichtet wurde, da das primäre Ziel dieser Arbeit vornehmlich darin bestand, die Veränderung des ischiofemorale Raums ausgehend von Veränderungen der frontalen Kniegelenksausrichtung durch Umstellungsosteotomien erstmalig aufzuzeigen. Hierfür wurden die angewandten Messmethoden als ausreichend angesehen.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle hätte ausgehend von der Literatur das weibliche Geschlecht innerhalb der untersuchten Kohorte sein können. So ist nach aktuellem Kenntnisstand von einer weiblichen Prädisposition hinsichtlich eines reduzierten IFD und der Entwicklung eines IFI auszugehen. (Patti et al. 2008; Ali et al. 2011; Jeyaraman et al. 2022; Lee et al. 2013; Yanagishita et al. 2012; Torriani et al. 2009; Singer et al. 2015; Ali et al. 2013; Ahmad et al. 2023)

Betrachtet man jedoch die Geschlechterverteilung innerhalb des in dieser Arbeit untersuchten Patientenkollektivs, so konnte insgesamt eine weibliche Dominanz vermieden werden und folglich das weibliche Geschlecht als mögliche Fehlerquelle ausgeschlossen werden.

So wurden insgesamt $n = 154$ von ursprünglich 175 Patientinnen und Patienten in die Kohorte eingeschlossen. Hiervon waren 62,3% ($n=96$) männlich und 37,6% ($n=58$) weiblich.

Betrachtet man weiter die einzelnen Operationsgruppen anhand der Art der durchgeführten Osteotomien, so wurden in 47,4% ($n=73$) eine HTO durchgeführt. Die Geschlechterverteilung in dieser Subgruppe betrug 68,5% ($n=50$) männliche und 31,5% ($n= 23$) weibliche Probanden.

Eine DFO wurde in 35,1% ($n=54$) durchgeführt. Dabei umfasste die Gruppe der Patienten mit erhaltener DFO 46,3% ($n=25$) männliche und 53,7% ($n=29$) weibliche Patienten.

Zudem erfolgte in 17,5% ($n=27$) der Fälle eine Doppelosteotomie. Hierbei zeigte sich wieder eine männliche Dominanz mit 74,1% ($n= 20$) und 25,9% ($n=7$) weibliche Patientinnen.

4.6 Schlussfolgerung, klinische Relevanz und Ausblick

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit verdeutlichen den Einfluss der frontalen Kniegelenksausrichtung auf den ischiofemorale Raum der Hüfte. Es konnte gezeigt werden, dass die Veränderung der frontalen Kniegelenksausrichtung durch kniegelenknahe Osteotomien zu einer signifikanten Beeinflussung des ischiofemorale Abstandes führt.

Hierbei kam es unter Valgisierung über die dabei hervorgerufene, verstärkte Femuradduktion zum Becken zu einer Abnahme des IFD. Demgegenüber führte eine Varisierung über eine verminderte Femuradduktion zu einer Zunahme des IFD.

Die Ergebnisse verdeutlichen damit den Einfluss der frontalen Knieausrichtung auf den ischiofemorale Raum der Hüfte und liefern mit den valgusierenden Umstellungsosteotomien in Hinblick auf pathogenetische Risikofaktoren für die Entwicklung eines ischiofemorale Impingements eine bisher nicht berücksichtigte, hüftgelenksferne Determinante, die es künftig zu berücksichtigen gilt.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse konnten neue Aspekte für das Konzept des extraartikulären Hüft-Impingement und dessen Verständnis geliefert werden.

Durch die künftige Berücksichtigung dieser Erkenntnisse im Rahmen der Diagnostik von Hüft- und Kniegelenksbeschwerden könnte die individuelle Behandlungsplanung optimiert und womöglich das Spektrum der therapeutischen Behandlungsmöglichkeiten erweitert werden.

Um die gefundenen Zusammenhänge weiter zu differenzieren und das genaue Ausmaß und die Inzidenz von durch kniegelenknahe Umstellungsosteotomien ausgelöstem Hüft-Impingement zu ermessen, bedarfs es auch Sicht des Autors weiterer Studien.

5 Zusammenfassung

Der ischiofemorale Raum der Hüfte gewinnt zunehmend an Bedeutung in der Betrachtung der Pathogenese des extraartikulären Hüftgelenksimpingement. Vor allem für die Entstehung des ischiofemoralen Impingements, als einer Unterform des extraartikulären Hüft-Impingements (Dienst und Lampert 2014; Sobau et al. 2018), wird der reduzierte ischiofemorale Abstand (IFD), definiert als der kleinste messbare Abstand zwischen der lateralen Kortikalis des Sitzbeinhöckers (Tuberositas des Os ischium) und der posteromedialen Kortikalis des Trochanter minor (Hujazi et al. 2016), als relevanter Risikofaktor diskutiert. (Johnson 1977; Patti et al. 2008; Torriani et al. 2009; Ali et al. 2011; Tosun et al. 2012; Yanagishita et al. 2012; Lee et al. 2013; Jeyaraman et al. 2022)

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, kniegelenknahe Umstellungsosteotomien als mögliche, hüftferne Einflussfaktoren auf den ischiofemorale Raum zu untersuchen und den Einfluss der Veränderung der frontalen Kniegelenksausrichtung auf den ischiofemorale Abstand zu bestimmen.

Angesichts der Tatsache, dass das Kniegelenk als zentrales Gelenk der unteren Extremität über den Femur mit der Hüfte und über die Tibia mit dem Sprunggelenk verbunden ist, erschien es plausibel, dass die Neuausrichtung des Kniegelenks auch Einfluss auf die benachbarten Gelenke haben wird.

Dabei wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Veränderung der frontalen Kniegelenksausrichtung in Form einer Valgisierung mit einer Zunahme der Femuradduktion zum Becken und folglich mit einer Reduktion des ipsilateralen IFD verbunden ist.

Hierzu wurde eine Serie aus 154 Patienten, die sich im Jahr 2017 einer kniegelenknahen Osteotomie unterzogen hatten, in die Studienkohorte aufgenommen. Zur Detektion und Beurteilung möglicher Veränderungen wurden vor und nach Durchführung der Osteotomie standardisierte Ganzbein-Röntgenaufnahmen des aufrecht stehenden Patienten angefertigt.

Anschließend wurde die jeweilige Knieausrichtung durch Messung des HKA, mMPTA, mL DFA sowie JLCA und mLPFA bestimmt. Darüber hinaus wurden der femorale Adduktionswinkel und der IFD vermessen.

Der IFD wurde dabei zwischen dem Os ischium und dem Trochanter minor auf drei verschiedenen Höhen (ausgehend von proximalem, mittlerem und distalem Rand des Trochanter minor) parallel zur Beckenhorizontalen gemessen und als arithmetischer Mittelwert aus den drei Einzelmesswerten angegeben.

Anschließend erfolgte eine lineare Regression zwischen den Winkelmesswerten und dem IFD, um den Einfluss der frontalen Knieausrichtung auf den IFD zu detektieren.

Dabei konnte nachgewiesen werden, dass es durch Valgisierungsosteotomien zu einer signifikanten Reduktion des ipsilateralen IFD kam ($p < 0,001$), wohingegen die Varisierungsosteotomie zu einer signifikanten Zunahme des gleichseitigen IFD führte ($p < 0,001$). Die Reduktion des IFD betrug dabei, ausgehend von einem im Zuge der linearen Regression von IFD und HKA ermittelten Regressionskoeffizienten von $\beta = -0,4$, entsprechend 0,4mm pro entsprechendem Grad Veränderung der frontalen Kniegelenksausrichtung.

Die Reduktion des IFD war dabei sowohl für Valgisierung der Gesamtbeinachse (HKA), als auch für tibiale (mMPTA) und femorale (mL DFA) Valgisierung signifikant.

Dies zeigte, dass nicht der Ort (tibial oder femoral) und damit auch nicht die Frage, ob die Umstellungsosteotomie als HTO, DFO oder Doppelosteotomie erfolgte, sondern vielmehr die Art (valgisierend oder varisierend) der durchgeführten Osteotomie für die Einflussnahme auf den ischiofemorale Raum entscheidend war.

Abschließend konnte ausgehend von den Ergebnissen dieser Studie gezeigt werden, dass unabhängig von der Oberschenkeltorsion und der Ausrichtung des Oberschenkelhalses im Verhältnis zum Becken auch die frontale Ausrichtung des Knies eine wesentliche Determinante des ischiofemorale Raums ist, die es künftig zu berücksichtigen gilt.

Um den genauen Einfluss der Reduktion des IFD hinsichtlich der klinischen Manifestation eines ischiofemoralen Impingements zu bewerten, sind jedoch aus Sicht des Autors weitere Studien und postoperative Follow-ups notwendig.

6 Literaturverzeichnis

1. Agneskirchner, J. D./Simoni, C. de/Staubli, A. E./Lobenhoffer, P. (2004). Open-wedge-Osteotomie: Konzept und erste Erfahrungen. *Arthroskopie* 17 (4), 246–255. <https://doi.org/10.1007/s00142-004-0267-x>.
2. Ahmad, Sufian S./Kerber, Vincent/Konrads, Christian/Ateschrang, Atesch/Hirschmann, Michael T./Stöckle, Ulrich/Ahrend, Marc D. (2021). The ischiofemoral space of the hip is influenced by the frontal knee alignment. *Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA* 29 (8), 2446–2452. <https://doi.org/10.1007/s00167-021-06589-6>.
3. Ahmad, Sufian S./Konrads, Christian/Niemann, Marcel/Stöckle, Ulrich/Windhagen, Henning/Giebel, Gregor M. (2023). The Female Pelvis Is Associated with a Lateralized Ischium and a Reduced Ischiofemoral Space. *Journal of clinical medicine* 12 (4). <https://doi.org/10.3390/jcm12041603>.
4. Ali, Adam Mohsan/Teh, James/Whitwell, Duncan/Ostlere, Simon (2013). Ischiofemoral impingement: a retrospective analysis of cases in a specialist orthopaedic centre over a four-year period. *Hip international : the journal of clinical and experimental research on hip pathology and therapy* 23 (3), 263–268. <https://doi.org/10.5301/hipint.5000021>.
5. Ali, Adam Mohsan/Whitwell, Duncan/Ostlere, Simon J. (2011). Case report: imaging and surgical treatment of a snapping hip due to ischiofemoral impingement. *Skeletal radiology* 40 (5), 653–656. <https://doi.org/10.1007/s00256-010-1085-z>.
6. Aumüller, Gerhard/Aust, Gabriela/Engele, Jürgen/Kirsch, Joachim/Maio, Giovanni/Mayerhofer, Artur/Mense, Siegfried/Reißig, Dieter/Salvetter, Jürgen/Schmidt, Wolfgang/Schmitz, Frank/Schulte, Erik/Spänel-Borowski, Katharina/Wennemuth, Gunther/Wolff, Werner/Wurzinger, Laurenz J./Zilch, Hans-Gerhard (2017). *Duale Reihe Anatomie*. Stuttgart, Georg Thieme Verlag.
7. Beard, D. J./Pandit, H./Gill, H. S./Hollinghurst, D./Dodd, C. A. F./Murray, D. W. (2007). The influence of the presence and severity of pre-existing patellofemoral degenerative changes on the outcome of the Oxford medial

- unicompartmental knee replacement. *The Journal of Bone & Joint Surgery British Volume* 89-B (12), 1597–1601. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.89B12.19259>.
8. Bonnin, M./Chambat, P. (2004). Der Stellenwert der valgisierenden, zuklappenden Tibiakopfeosteotomie bei der medialen Gonarthrose. *Der Orthopade* 33 (2), 135–142. <https://doi.org/10.1007/s00132-003-0586-z>.
 9. Bredella, Miriam A./Azevedo, Debora C./Oliveira, Adriana L./Simeone, Frank J./Chang, Connie Y./Stubbs, Allston J./Torriani, Martin (2015). Pelvic morphology in ischiofemoral impingement. *Skeletal radiology* 44 (2), 249–253. <https://doi.org/10.1007/s00256-014-2041-0>.
 10. 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. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 90 (12), 1548–1557. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.90B12.21198>.
 11. Brouwer, R. W./Raaij van, T. M./Bierma-Zeinstra, S. M. A./Verhagen, A. P./Jakma, T. S. C./Verhaar, J. A. N. (2007). Osteotomy for treating knee osteoarthritis. *The Cochrane database of systematic reviews* (3), CD004019. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD004019.pub3>.
 12. Cerejo, Rui/Dunlop, Dorothy D./Cahue, September/Channin, David/Song, Jing/Sharma, Leena (2002). The influence of alignment on risk of knee osteoarthritis progression according to baseline stage of disease. *Arthritis and rheumatism* 46 (10), 2632–2636. <https://doi.org/10.1002/art.10530>.
 13. Cicuttini, F./Wluka, A./Hankin, J./Wang, Y. (2004). Longitudinal study of the relationship between knee angle and tibiofemoral cartilage volume in subjects with knee osteoarthritis. *Rheumatology (Oxford, England)* 43 (3), 321–324. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/keh017>.
 14. Dablan, Ali/Oktay, Cemil/Çevikol, Can (2021). Ischiofemoral Impingement Syndrome: Effect of Morphological Variations on the Diagnosis. *Current medical imaging* 17 (5), 595–601. <https://doi.org/10.2174/1573405616666201118124715>.

15. Degen, Nikolaus/Sass, Jan/Jalali, Jalil/Kovacs, Lazlo/Euler, Ekkehard/Böcker, Wolfgang/Thaller, Peter H./Fürmetz, Julian (2019). 3D-Analyse der Beingeometrie – Normwerte für Gelenkwinkel und Beinachsen. <https://doi.org/10.3205/19dkou032>.
16. Deutscher Ärzteverlag GmbH, Redaktion Deutsches Ärzteblatt (2010). Epidemiologie, Ätiologie, Diagnostik und Therapie der Gonarthrose. Online verfügbar unter <https://www.aerzteblatt.de/archiv/67922/Epidemiologie-Aetiologie-Diagnostik-und-Therapie-der-Gonarthrose> (abgerufen am 05.11.2023).
17. Dienst, M./Lampert, C. (2014). Differenzialdiagnosen des Hüft-Impingements. *Arthroskopie* 27 (2), 81. <https://doi.org/10.1007/s00142-013-0776-6>.
18. Felson, D. T. (1988). Epidemiology of hip and knee osteoarthritis. *Epidemiologic reviews* 10, 1–28. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.epirev.a036019>.
19. Finger, Jonas D./Busch, Markus A./Du, Yong/Heidemann, Christin/Knopf, Hildtraud/Kuhnert, Ronny/Lampert, Thomas/Mensink, Gert B. M./Neuhauser, Hannelore K./Rosario, Angelika Schaffrath/Scheidt-Nave, Christa/Schienkiewitz, Anja/Truthmann, Julia/Kurth, Bärbel-Maria (2016). Time Trends in Cardiometabolic Risk Factors in Adults. *Deutsches Arzteblatt international* 113 (42), 712–719. <https://doi.org/10.3238/arztebl.2016.0712>.
20. Galla, M./Lobenhoffer, P. (2007). Die valgisierende proximale öffnende Tibiaosteotomie mit Plattenfixateur. *Arthroskopie* 20 (4), 291–300. <https://doi.org/10.1007/s00142-007-0423-1>.
21. Galla, Mellany/Lobenhoffer, Philipp (2004). Die öffnende valgisierende Umstellungsosteotomie der proximalen Tibia mit dem TomoFix?-Plattenfixateur. *Operative Orthopdie und Traumatologie* 16 (4), 397–417. <https://doi.org/10.1007/s00064-004-1116-9>.
22. Ganz, Reinhold/Slongo, Theddy/Turchetto, Luigino/Massè, Alessandro/Whitehead, David/Leunig, Michael (2013). The lesser trochanter as a cause of hip impingement: pathophysiology and treatment options. *Hip international : the journal of clinical and experimental research on hip*

- pathology and therapy 23 Suppl 9, S35-41.
<https://doi.org/10.5301/hipint.5000063>.
23. Goldberg-Stein, Shlomit/Friedman, Avi/Gao, Qi/Choi, Jaeun/Schulz, Jacob/Fornari, Eric/Taragin, Benjamin (2018). Narrowing of ischiofemoral and quadratus femoris spaces in pediatric ischiofemoral impingement. *Skeletal radiology* 47 (11), 1505–1510. <https://doi.org/10.1007/s00256-018-2962-0>.
 24. Gollwitzer, Hans/Banke, Ingo J./Schauwecker, Johannes/Gerdesmeyer, Ludger/Suren, Christian (2017). How to address ischiofemoral impingement? Treatment algorithm and review of the literature. *Journal of hip preservation surgery* 4 (4), 289–298. <https://doi.org/10.1093/jhps/hnx035>.
 25. Hinterwimmer, S./Feucht, M. J./Imhoff, A. B. (2012). Hohe tibiale Osteotomie bei Varusgonarthrose. *Arthroskopie* 25 (3), 184–194. <https://doi.org/10.1007/s00142-012-0697-9>.
 26. Hofmann, S./Pietsch, M. (2007). Biomechanische Grundlagen und Indikationen bei der kniegelenknahen Osteotomie. *Arthroskopie* 20 (4), 270–276. <https://doi.org/10.1007/s00142-007-0418-y>.
 27. Hsu, R. W./Himeno, S./Coventry, M. B./Chao, E. Y. (1990). Normal axial alignment of the lower extremity and load-bearing distribution at the knee. *Clinical Orthopaedics and Related Research®* (255), 215–227.
 28. Hujazi, I./Jones, T./Johal, S./Bearcroft, P./Muniz-Terra, G./Khanduja, V. (2016). The normal ischiofemoral distance and its variations. *Journal of hip preservation surgery* 3 (3), 197–202. <https://doi.org/10.1093/jhps/hnw003>.
 29. Jeyaraman, Madhan/Murugan, Jayanth/Maffulli, Nicola/Jeyaraman, Naveen/Potty, Anish G./Gupta, Ashim (2022). Ischiofemoral impingement syndrome: a case report and review of literature. *Journal of orthopaedic surgery and research* 17 (1), 393. <https://doi.org/10.1186/s13018-022-03287-y>.
 30. Johnson, K. A. (1977). Impingement of the lesser trochanter on the ischial ramus after total hip arthroplasty. Report of three cases. *JBJS* 59 (2). Online verfügbar unter

https://journals.lww.com/jbjsjournal/fulltext/1977/59020/impingement_of_the_lessor_trochanter_on_the.28.aspx.

31. Kassarian, Ara (2008). Signal abnormalities in the quadratus femoris muscle: tear or impingement? AJR. American journal of roentgenology 190 (6), W379; author reply W380-1. <https://doi.org/10.2214/AJR.07.3540>.
32. Kivlan, Benjamin R./Martin, RobRoy L./Martin, Hal D. (2017). Ischiofemoral impingement: defining the lesser trochanter-ischial space. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA 25 (1), 72–76. <https://doi.org/10.1007/s00167-016-4036-y>.
33. Konrads, Christian/Ahrend, Marc-Daniel/Beyer, Myriam Ruth/Stöckle, Ulrich/Ahmad, Sufian S. (2022). Rotation osteotomy of the distal femur influences coronal femoral alignment and the ischiofemoral space. Archives of orthopaedic and trauma surgery 142 (5), 711–720. <https://doi.org/10.1007/s00402-020-03704-z>.
34. Lee, Ryan/Kean, Walter F. (2012). Obesity and knee osteoarthritis. Inflammopharmacology 20 (2), 53–58. <https://doi.org/10.1007/s10787-011-0118-0>.
35. Lee, Soyoung/Kim, Inhwan/Lee, Sung Moon/Lee, Jieun (2013). Ischiofemoral impingement syndrome. Annals of rehabilitation medicine 37 (1), 143–146. <https://doi.org/10.5535/arm.2013.37.1.143>.
36. Lobenhoffer, P./Kley, K./Freiling, D./van Heerwaarden, R. (2017). Distale Femurosteotomie in schließender biplanarer Technik mit Stabilisierung durch spezifischen Plattenfixateur. Operative Orthopadie und Traumatologie 29 (4), 306–319. <https://doi.org/10.1007/s00064-017-0493-9>.
37. Lobenhoffer, Philipp/Agneskirchner, Jens D. (2003). Improvements in surgical technique of valgus high tibial osteotomy. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA 11 (3), 132–138. <https://doi.org/10.1007/s00167-002-0334-7>.
38. Lobenhoffer, Philipp/van Heerwaarden, Ronald Johannes/Agneskirchner, Jens D. (Hg.) (2014). Kniegelenknahe Osteotomien. Indikation - Planung - Operationstechniken mit Plattenfixateuren. 2. Aufl. Stuttgart, Thieme.

39. Maraş Özdemir, Zeynep/Aydınöz, Üstün/Görmeli, Cemile Ayşe/Sağır Kahraman, Ayşegül (2015). Ischiofemoral Space on MRI in an Asymptomatic Population: Normative Width Measurements and Soft Tissue Signal Variations. *European radiology* 25 (8), 2246–2253. <https://doi.org/10.1007/s00330-015-3625-3>.
40. Masouros, S. D./Bull, A.M.J./Amis, A. A. (2010). (i) Biomechanics of the knee joint. *Orthopaedics and Trauma* 24 (2), 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.mporth.2010.03.005>.
41. Mensink, G. B. M./Schienkiewitz, A./Haftenberger, M./Lampert, T./Ziese, T./Scheidt-Nave, C. (2013). Übergewicht und Adipositas in Deutschland: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 56 (5-6), 786–794. <https://doi.org/10.1007/s00103-012-1656-3>.
42. Moser, Lukas/Nehrer, Stefan/Dammerer, Dietmar (2022). Koronales Alignment in der totalen Knieendoprothetik JATROS *Orthopädie & Traumatologie Rheumatologie* 05, 34–37.
43. Niethard, Fritz Uwe/Pfeil, Joachim/Biberthaler, Peter (2022). *Duale Reihe Orthopädie und Unfallchirurgie*. Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG.
44. O'Brien, Seth D./Bui-Mansfield, Liem T. (2007). MRI of quadratus femoris muscle tear: another cause of hip pain. *AJR. American journal of roentgenology* 189 (5), 1185–1189. <https://doi.org/10.2214/AJR.07.2408>.
45. Paley, D./Pfeil, J. (2000). Prinzipien der kniegelenknahen Deformitätenkorrektur. *Der Orthopäde* 29 (1), 18–38. <https://doi.org/10.1007/PL00003691>.
46. Papavasiliou, A./Siatras, T./Bintoudi, A./Milosis, D./Lallas, V./Sykaras, E./Karantanas, A. (2014). The gymnasts' hip and groin: a magnetic resonance imaging study in asymptomatic elite athletes. *Skeletal radiology* 43 (8), 1071–1077. <https://doi.org/10.1007/s00256-014-1885-7>.

47. Pape, D./Seil, R./Adam, F./Rupp, S./Kohn, D./Lobenhoffer, P. (2004).
Bildgebung und präoperative Planung der Tibiakopfosteotomie. *Der Orthopäde* 33 (2), 122–134. <https://doi.org/10.1007/s00132-003-0585-0>.
48. Pape, D./van Heerwaarden, R./Haag, M./Seil, R./Madry, H. (2014).
Kniegelenknahe Osteotomietechniken. Effekt auf Keilvolumina und knöcherne Kontaktflächen. *Der Orthopäde* 43 (11), 966–975. <https://doi.org/10.1007/s00132-014-3029-0>.
49. Patti, Jay W./Ouellette, Hugue/Bredella, Miriam A./Torriani, Martin (2008).
Impingement of lesser trochanter on ischium as a potential cause for hip pain. *Skeletal radiology* 37 (10), 939–941. <https://doi.org/10.1007/s00256-008-0551-3>.
50. Prof. Dr. Edgar Erdfelder (2022). *Dorsch Lexikon der Psychologie. Teststärke*.
Online verfügbar unter <https://dorsch.hogrefe.com/stichwort/teststaerke>.
51. Rosso, Federica/Margheritini, Fabrizio (2014). Distal femoral osteotomy.
Current reviews in musculoskeletal medicine 7 (4), 302–311. <https://doi.org/10.1007/s12178-014-9233-z>.
52. Sa, Darren de/Alradwan, Hussain/Cargnelli, Stephanie/Thawer, Zoyah/Simunovic, Nicole/Cadet, Edwin/Bonin, Nicolas/Larson, Christopher/Ayeni, Olufemi R. (2014). Extra-Articular Hip Impingement: A Systematic Review Examining Operative Treatment of Psoas, Subspine, Ischiofemoral, and Greater Trochanteric/Pelvic Impingement. *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery* 30 (8), 1026–1041. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2014.02.042>.
53. Schienkiewitz, Anja/Kuhnert, Ronny/Blume, Miriam/Mensink, Gert B.M. (2022). Übergewicht und Adipositas bei Erwachsenen in Deutschland - Ergebnisse der Studie GEDA 2019/2020-EHIS. <https://doi.org/10.25646/10292>.
54. Schröter, S./Nakayama, H./Yoshiya, S./Stöckle, U./Ateschrang, A./Gruhn, J. (2019). Development of the double level osteotomy in severe varus osteoarthritis showed good outcome by preventing oblique joint line. *Archives*

- of orthopaedic and trauma surgery 139 (4), 519–527.
<https://doi.org/10.1007/s00402-018-3068-9>.
55. Schubert, Thomas/Navez, Marie/Galant, Christine/Docquier, Pierre-Louis/Acid, Souad/Lecouvet, Frédéric E. (2019). Femoral osteochondroma responsible for ischiofemoral impingement, bursitis, and secondary lipoma arborescens mimicking malignant transformation. *Acta radiologica open* 8 (12), 2058460119892409. <https://doi.org/10.1177/2058460119892409>.
 56. Siebenrock, Klaus A./Steppacher, Simon Damian/Haefeli, Pascal Cyrill/Schwab, Joseph Michael/Tannast, Moritz (2013). Valgus hip with high antetorsion causes pain through posterior extraarticular FAI. *Clinical orthopaedics and related research* 471 (12), 3774–3780.
<https://doi.org/10.1007/s11999-013-2895-9>.
 57. Singer, Adam D./Subhawong, Ty K./Jose, Jean/Tresley, Jonathan/Clifford, Paul D. (2015). Ischiofemoral impingement syndrome: a meta-analysis. *Skeletal radiology* 44 (6), 831–837. <https://doi.org/10.1007/s00256-015-2111-y>.
 58. Sir William Macewen. *Osteotomy with an Inquiry Into the Aetiology and Pathology of Knock-knee, Bow-leg, and Other Osseous Deformities of the Lower Limbs*.
 59. Sobau, Christian/Möckel, Gregor/Gollwitzer, Hans (Hg.) (2018). *Hüftarthroskopie. Praxisbuch für die gelenkerhaltende Chirurgie*. Stuttgart, Georg Thieme Verlag.
 60. Stafford, G. H./Villar, R. N. (2011). Ischiofemoral impingement. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 93 (10), 1300–1302.
<https://doi.org/10.1302/0301-620X.93B10.26714>.
 61. Statistisches Bundesamt (2023). Operationen und Prozeduren der vollstationären Patientinnen und Patienten in Krankenhäusern (4-Steller) - 2021 (Letzte Ausgabe - berichtsweise eingestellt). Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Krankenhaeuser/Publikationen/Downloads->

Krankenhaeuser/operationen-prozeduren-5231401217014.html (abgerufen am 05.11.2023).

62. Staubli, Alex E./Simoni, Carlo de/Babst, Reto/Lobenhoffer, Philipp (2003). TomoFix: a new LCP-concept for open wedge osteotomy of the medial proximal tibia--early results in 92 cases. *Injury* 34 Suppl 2, B55-62. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2003.09.025>.
63. Stenhouse, Gregor/Kaiser, Scott/Kelley, Simon P./Stimec, Jennifer (2016). Ischiofemoral Impingement in Children: Imaging With Clinical Correlation. *AJR. American journal of roentgenology* 206 (2), 426–430. <https://doi.org/10.2214/AJR.15.14909>.
64. Sternheim, Amir/Garbedian, Shawn/Backstein, David (2011). Distal femoral varus osteotomy: unloading the lateral compartment: long-term follow-up of 45 medial closing wedge osteotomies. *Orthopedics* 34 (9), e488-90. <https://doi.org/10.3928/01477447-20110714-37>.
65. Taneja, Atul K./Bredella, Miriam A./Torriani, Martin (2013). Ischiofemoral impingement. *Magnetic resonance imaging clinics of North America* 21 (1), 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.mric.2012.08.005>.
66. Toporowski, Gregor/Rödl, Robert/Gosheger, Georg/Vogt, Björn (2020). Angeborene und idiopathische Deformitäten: Immer ein Arthroserisiko? *Aktuelle Rheumatologie* 45 (01), 48–58. <https://doi.org/10.1055/a-1016-1332>.
67. Torriani, Martin/Souto, Silvio C. L./Thomas, Bijoy J./Ouellette, Hugue/Bredella, Miriam A. (2009). Ischiofemoral impingement syndrome: an entity with hip pain and abnormalities of the quadratus femoris muscle. *AJR. American journal of roentgenology* 193 (1), 186–190. <https://doi.org/10.2214/AJR.08.2090>.
68. Tosun, Ozgur/Algin, Oktay/Yalcin, Nadir/Cay, Nurdan/Ocakoglu, Gokhan/Karaoglanoglu, Mustafa (2012). Ischiofemoral impingement: evaluation with new MRI parameters and assessment of their reliability. *Skeletal radiology* 41 (5), 575–587. <https://doi.org/10.1007/s00256-011-1257-5>.

69. Tosun, Özgür/Çay, Nurdan/Bozkurt, Murat/Arslan, Halil (2012b). Ischiofemoral impingement in an 11-year-old girl. Diagnostic and interventional radiology (Ankara, Turkey) 18 (6), 571–573. <https://doi.org/10.4261/1305-3825.DIR.5728-12.1>.
70. Weiß, Christel (2013). Basiswissen Medizinische Statistik. Mit 20 Tabellen. 6. Aufl. Berlin/Heidelberg, Springer.
71. Wetterau, Elmar (2023). Hüftimpingement: Ursachen, Diagnose, Therapien. Online verfügbar unter <https://orthinform.de/lexikon/hueftimpingement> (abgerufen am 18.10.2023).
72. Wylie, James D./Jones, Daniel L./Hartley, Melissa K./Kapron, Ashley L./Krych, Aaron J./Aoki, Stephen K./Maak, Travis G. (2016). Distal Femoral Osteotomy for the Valgus Knee: Medial Closing Wedge Versus Lateral Opening Wedge: A Systematic Review. Arthroscopy : the journal of arthroscopic & related surgery : official publication of the Arthroscopy Association of North America and the International Arthroscopy Association 32 (10), 2141–2147. <https://doi.org/10.1016/j.arthro.2016.04.010>.
73. Xing, Qianchao/Feng, Xuran/Wan, Liye/Cao, Hongwei/Bai, Xuedong/Wang, Shenglin (2023). MRI measurement assessment on ischiofemoral impingement syndrome. Hip international : the journal of clinical and experimental research on hip pathology and therapy 33 (1), 119–125. <https://doi.org/10.1177/11207000211007750>.
74. Yanagishita, Carlos Massao Aramaki/Falótico, Guilherme Guadagnini/Rosário, Davi Araújo Veiga/Pugina, Gustavo Gambergi/Wever, André Azambuja Neves/Takata, Edmilson Takehiro (2012). ISCHIOFEMORAL IMPINGEMENT - AN ETIOLOGY OF HIP PAIN: CASE REPORT. Revista brasileira de ortopedia 47 (6), 780–783. [https://doi.org/10.1016/S2255-4971\(15\)30039-2](https://doi.org/10.1016/S2255-4971(15)30039-2).

7 Erklärung zum Eigenanteil

Ich erkläre nach §2 Abs. 2 Nrn. 7 und 8 der Promotionsordnung, dass ich die der Medizinischen Hochschule Hannover zur Promotion eingereichte Dissertation mit dem Titel „Retrospektive Analyse des Einflusses der kniegelenknahen Umstellungsosteotomie auf den ischiofemorale Raum der Hüfte“ in der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen und an der Universität Tübingen unter der Betreuung von Herrn PD Dr. med. Sufian S. Ahmad mit der Unterstützung durch Herrn Dr. med. Marc-Daniel Ahrend und Herrn Dr. med. Marco Haertè ohne sonstige Hilfe durchgeführt und bei der Abfassung der Dissertation keine anderen als die dort aufgeführten Hilfsmittel benutzt habe. Die Gelegenheit zum vorliegenden Promotionsverfahren ist mir nicht kommerziell vermittelt worden. Insbesondere habe ich keine Organisation eingeschaltet, die gegen Entgelt Betreuerinnen und Betreuer für die Anfertigung von Dissertationen sucht oder die mir obliegenden Pflichten hinsichtlich der Prüfungsleistungen für mich ganz oder teilweise erledigt.

Ich habe diese Dissertation bisher an keiner in- oder ausländischen Hochschule zur Promotion eingereicht. Weiterhin versichere ich, dass ich den beantragten Titel bisher noch nicht erworben habe.

Ergebnisse der Dissertation wurden am 5. Mai 2021 unter dem Titel „The ischiofemoral space of the hip is influenced by the frontal knee alignment“ im Rahmen einer Zweitautorschaft im Journal „Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy“ des Springer-Verlags veröffentlicht.

Hannover, den 27.01.2025

9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir mein Studium und die Vollendung meiner Promotion ermöglicht haben:

Zunächst gilt ein großer Dank Herrn PD Dr. med. Sufian S. Ahmad für die anspruchsvolle und interessante Promotionsthematik, sowie für seine Hilfsbereitschaft, Unterstützung und das stets offene Ohr während des gesamten Prozesses der Erstellung der Publikation sowie dieser Promotionsarbeit. Ich weiß die Unterstützung und zur Verfügung gestellte Fachkompetenz sehr zu schätzen und bin für das Ermöglichen dieser Arbeit und die gute Zusammenarbeit sehr dankbar.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Dr. med. Marc-Daniel Ahrend für die gelungene Einarbeitung in die Kliniksoftware und die nachfolgende Unterstützung in der Forschungsthematik bedanken. Ebenso gilt mein Dank Herrn Dr. med. Marco Haertè für die Unterstützung als Zweitbetreuer.

Außerdem bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern der BG Unfallklinik Tübingen sowie der Medizinischen Hochschule Hannover für die gute Kooperation.

Zuletzt gilt besonderer Dank meiner Familie, vor allem meinen Eltern, für die finanzielle Unterstützung während meines Studiums, meinen beiden Geschwistern sowie meinem Opa, für den steten Glauben an die Verwirklichung der Arbeit. Ohne euer Verständnis und euren Rückhalt wäre alles, was ich bisher erreicht habe, nicht möglich gewesen.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, speziell Johannes Betz und Daniel Stäbler, die mich stets geduldig, unterstützend und motivierend begleitet haben.

10 Anhang

Erlaubnis zur Zweitveröffentlichung

Wie bereits erwähnt, wurden die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse am 5. Mai 2021 bereits unter dem Titel „The ischiofemoral space of the hip is influenced by the frontal knee alignment“ im Journal „Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy“ (kurz „KSSTA“) des Springer-Verlags veröffentlicht. Die Arbeit wurde dabei unter der „Creative Commons Attribution 4.0 International License“ lizenziert, welche eine uneingeschränkte Nutzung, Verbreitung, Veränderung und Vervielfältigung in jedem Medium erlaubt, eine entsprechende Zitierung und Beifügung eines Links zur Creative Commons Lizenz vorausgesetzt.

Online - Link zur Creative Commons License:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

(zuletzt besucht 7.4.24, 12.15 Uhr)

Darüber hinaus erfolgte die zusätzliche Einholung einer Erlaubnis zur Wiederverwendung und Zweitveröffentlichung der Bildmaterialien beim Verlag. Die entsprechend erhaltene Bewilligung ist nachfolgend beigelegt:



Marketplace

This is a License Agreement between Vincent-Louis Kerber ("User") and Copyright Clearance Center, Inc. ("CCC") on behalf of the Rightsholder identified in the order details below. The license consists of the order details, the Marketplace Permissions General Terms and Conditions below, and any Rightsholder Terms and Conditions which are included below.

All payments must be made in full to CCC in accordance with the Marketplace Permissions General Terms and Conditions below.

Order Date	17-Jan-2024	Type of Use	Republish in a thesis/dissertation
Order License ID	1438995-1	Publisher	SPRINGER-VERLAG
ISSN	1433-7347	Portion	BERLIN/HEIDELBERG Chart/graph/table/figure

LICENSED CONTENT

Publication Title	Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy : official journal of the ESSKA	Publication Type	e-Journal
		Start Page	2446
		End Page	2452
Article Title	The ischiofemoral space of the hip is influenced by the frontal knee alignment	Issue	8
		Volume	29
Author/Editor	European Society of Sports Traumatology, Knee Surgery and Arthroscopy.	URL	http://link.springer.de/link/service/journals/00167/index.htm
Date	01/01/1993		
Language	English		
Country	Germany		
Rightsholder	John Wiley & Sons - Books		

REQUEST DETAILS

Portion Type	Chart/graph/table/figure	Distribution	Other territories and/or countries
Number of Charts / Graphs / Tables / Figures Requested	9	Enter Territories/Countries	Germany
Format (select all that apply)	Electronic	Translation	Original language plus one translation
Who Will Republish the Content?	Author of requested content	Copies for the Disabled?	No
Duration of Use	Life of current edition	Minor Editing Privileges?	Yes
Lifetime Unit Quantity	Up to 499	Incidental Promotional Use?	Yes
Rights Requested	Main product, any product related to main product, and other compilations/derivative products	Currency	EUR

NEW WORK DETAILS

Title	Retrospektive Analyse des Einflusses der Kniegelenknähen Umstellungsosteotomie auf den ischiofemorale Raum der Hüfte	Institution Name	Medizinische Hochschule Hannover
		Expected Presentation Date	2024-03-20
Instructor Name	Vincent-Louis Kerber		

ADDITIONAL DETAILS

The Requesting Person / Organization to Appear on the License	Vincent-Louis Kerber
--	----------------------

REQUESTED CONTENT DETAILS

Title, Description or Numeric Reference of the Portion(s)	Fig.1, Fig.2, Fig. 3a and b, Fig.4a,b,c,d, Fig.5	Title of the Article / Chapter the Portion Is From	The ischiofemoral space of the hip is influenced by the frontal knee alignment
Editor of Portion(s)	Ahmad, Sufian S.; Kerber, Vincent; Konrads, Christian; Ateschrang, Atesch; Hirschmann, Michael T.; Stöckle, Ulrich; Ahrend, Marc D.	Author of Portion(s)	Ahmad, Sufian S.; Kerber, Vincent; Konrads, Christian; Ateschrang, Atesch; Hirschmann, Michael T.; Stöckle, Ulrich; Ahrend, Marc D.
Volume / Edition	29	Publication Date of Portion	2021-08-01
Page or Page Range of Portion	2446-2452		

RIGHTSHOLDER TERMS AND CONDITIONS

No right, license or interest to any trademark, trade name, service mark or other branding ("Marks") of WILEY or its licensors is granted hereunder, and you agree that you shall not assert any such right, license or interest with respect thereto. You may not alter, remove or suppress in any manner any copyright, trademark or other notices displayed by the Wiley material. This Agreement will be void if the Type of Use, Format, Circulation, or Requestor Type was misrepresented during the licensing process. In no instance may the total amount of Wiley Materials used in any Main Product, Compilation or Collective work comprise more than 5% (if figures/tables) or 15% (if full articles/chapters) of the (entirety of the) Main Product, Compilation or Collective Work. Some titles may be available under an Open Access license. It is the Licensors' responsibility to identify the type of Open Access license on which the requested material was published, and comply fully with the terms of that license for the type of use specified Further details can be found on Wiley Online Library <http://olabout.wiley.com/WileyCDA/Section/id-410895.html>.

Marketplace Permissions General Terms and Conditions

The following terms and conditions ("General Terms"), together with any applicable Publisher Terms and Conditions, govern User's use of Works pursuant to the Licenses granted by Copyright Clearance Center, Inc. ("CCC") on behalf of the applicable Rightsholders of such Works through CCC's applicable Marketplace transactional licensing services (each, a "Service").

1) **Definitions.** For purposes of these General Terms, the following definitions apply:

"License" is the licensed use the User obtains via the Marketplace platform in a particular licensing transaction, as set forth in the Order Confirmation.

"Order Confirmation" is the confirmation CCC provides to the User at the conclusion of each Marketplace transaction. "Order Confirmation Terms" are additional terms set forth on specific Order Confirmations not set forth in the General Terms that can include terms applicable to a particular CCC transactional licensing service and/or any Rightsholder-specific terms.

"Rightsholder(s)" are the holders of copyright rights in the Works for which a User obtains licenses via the Marketplace platform, which are displayed on specific Order Confirmations.

"Terms" means the terms and conditions set forth in these General Terms and any additional Order Confirmation Terms collectively.

"User" or "you" is the person or entity making the use granted under the relevant License. Where the person accepting the Terms on behalf of a User is a freelancer or other third party who the User authorized to accept the General Terms on the User's behalf, such person shall be deemed jointly a User for purposes of such Terms.

"Work(s)" are the copyright protected works described in relevant Order Confirmations.

2) Description of Service. CCC's Marketplace enables Users to obtain Licenses to use one or more Works in accordance with all relevant Terms. CCC grants Licenses as an agent on behalf of the copyright rightsholder identified in the relevant Order Confirmation.

3) Applicability of Terms. The Terms govern User's use of Works in connection with the relevant License. In the event of any conflict between General Terms and Order Confirmation Terms, the latter shall govern. User acknowledges that Rightsholders have complete discretion whether to grant any permission, and whether to place any limitations on any grant, and that CCC has no right to supersede or to modify any such discretionary act by a Rightsholder.

4) Representations; Acceptance. By using the Service, User represents and warrants that User has been duly authorized by the User to accept, and hereby does accept, all Terms.

5) Scope of License; Limitations and Obligations. All Works and all rights therein, including copyright rights, remain the sole and exclusive property of the Rightsholder. The License provides only those rights expressly set forth in the terms and conveys no other rights in any Works

6) General Payment Terms. User may pay at time of checkout by credit card or choose to be invoiced. If the User chooses to be invoiced, the User shall: (i) remit payments in the manner identified on specific invoices, (ii) unless otherwise specifically stated in an Order Confirmation or separate written agreement, Users shall remit payments upon receipt of the relevant invoice from CCC, either by delivery or notification of availability of the invoice via the Marketplace platform, and (iii) if the User does not pay the invoice within 30 days of receipt, the User may incur a service charge of 1.5% per month or the maximum rate allowed by applicable law, whichever is less. While User may exercise the rights in the License immediately upon receiving the Order Confirmation, the License is automatically revoked and is null and void, as if it had never been issued, if CCC does not receive complete payment on a timely basis.

7) General Limits on Use. Unless otherwise provided in the Order Confirmation, any grant of rights to User (i) involves only the rights set forth in the Terms and does not include subsequent or additional uses, (ii) is non-exclusive and non-transferable, and (iii) is subject to any and all limitations and restrictions (such as, but not limited to, limitations on duration of use or circulation) included in the Terms. Upon completion of the licensed use as set forth in the Order Confirmation, User shall either secure a new permission for further use of the Work(s) or immediately cease any new use of the Work(s) and shall render inaccessible (such as by deleting or by removing or severing links or other locators) any further copies of the Work. User may only make alterations to the Work if and as expressly set forth in the Order Confirmation. No Work may be used in any way that is unlawful, including without limitation if such use would violate applicable sanctions laws or regulations, would be defamatory, violate the rights of third parties (including such third parties' rights of copyright, privacy, publicity, or other tangible or intangible property), or is otherwise illegal, sexually explicit, or obscene. In addition, User may not conjoin a Work with any other material that may result in damage to the reputation of the Rightsholder. Any unlawful use will render any licenses hereunder null and void. User agrees to inform CCC if it becomes aware of any infringement of any rights in a Work and to cooperate with any reasonable request of CCC or the Rightsholder in connection therewith.

8) Third Party Materials. In the event that the material for which a License is sought includes third party materials (such as photographs, illustrations, graphs, inserts and similar materials) that are identified in such material as having been used by permission (or a similar indicator), User is responsible for identifying, and seeking separate licenses (under this

Service, if available, or otherwise) for any of such third party materials; without a separate license, User may not use such third party materials via the License.

9) **Copyright Notice.** Use of proper copyright notice for a Work is required as a condition of any License granted under the Service. Unless otherwise provided in the Order Confirmation, a proper copyright notice will read substantially as follows: "Used with permission of [Rightsholder's name], from [Work's title, author, volume, edition number and year of copyright]; permission conveyed through Copyright Clearance Center, Inc." Such notice must be provided in a reasonably legible font size and must be placed either on a cover page or in another location that any person, upon gaining access to the material which is the subject of a permission, shall see, or in the case of republication Licenses, immediately adjacent to the Work as used (for example, as part of a by-line or footnote) or in the place where substantially all other credits or notices for the new work containing the republished Work are located. Failure to include the required notice results in loss to the Rightsholder and CCC, and the User shall be liable to pay liquidated damages for each such failure equal to twice the use fee specified in the Order Confirmation, in addition to the use fee itself and any other fees and charges specified.

10) **Indemnity.** User hereby indemnifies and agrees to defend the Rightsholder and CCC, and their respective employees and directors, against all claims, liability, damages, costs, and expenses, including legal fees and expenses, arising out of any use of a Work beyond the scope of the rights granted herein and in the Order Confirmation, or any use of a Work which has been altered in any unauthorized way by User, including claims of defamation or infringement of rights of copyright, publicity, privacy, or other tangible or intangible property.

11) **Limitation of Liability.** UNDER NO CIRCUMSTANCES WILL CCC OR THE RIGHTSHOLDER BE LIABLE FOR ANY DIRECT, INDIRECT, CONSEQUENTIAL, OR INCIDENTAL DAMAGES (INCLUDING WITHOUT LIMITATION DAMAGES FOR LOSS OF BUSINESS PROFITS OR INFORMATION, OR FOR BUSINESS INTERRUPTION) ARISING OUT OF THE USE OR INABILITY TO USE A WORK, EVEN IF ONE OR BOTH OF THEM HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES. In any event, the total liability of the Rightsholder and CCC (including their respective employees and directors) shall not exceed the total amount actually paid by User for the relevant License. User assumes full liability for the actions and omissions of its principals, employees, agents, affiliates, successors, and assigns.

12) **Limited Warranties.** THE WORK(S) AND RIGHT(S) ARE PROVIDED "AS IS." CCC HAS THE RIGHT TO GRANT TO USER THE RIGHTS GRANTED IN THE ORDER CONFIRMATION DOCUMENT. CCC AND THE RIGHTSHOLDER DISCLAIM ALL OTHER WARRANTIES RELATING TO THE WORK(S) AND RIGHT(S), EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. ADDITIONAL RIGHTS MAY BE REQUIRED TO USE ILLUSTRATIONS, GRAPHS, PHOTOGRAPHS, ABSTRACTS, INSERTS, OR OTHER PORTIONS OF THE WORK (AS OPPOSED TO THE ENTIRE WORK) IN A MANNER CONTEMPLATED BY USER; USER UNDERSTANDS AND AGREES THAT NEITHER CCC NOR THE RIGHTSHOLDER MAY HAVE SUCH ADDITIONAL RIGHTS TO GRANT.

13) **Effect of Breach.** Any failure by User to pay any amount when due, or any use by User of a Work beyond the scope of the License set forth in the Order Confirmation and/or the Terms, shall be a material breach of such License. Any breach not cured within 10 days of written notice thereof shall result in immediate termination of such License without further notice. Any unauthorized (but licensable) use of a Work that is terminated immediately upon notice thereof may be liquidated by payment of the Rightsholder's ordinary license price therefor; any unauthorized (and unlicensable) use that is not terminated immediately for any reason (including, for example, because materials containing the Work cannot reasonably be recalled) will be subject to all remedies available at law or in equity, but in no event to a payment of less than three times the Rightsholder's ordinary license price for the most closely analogous licensable use plus Rightsholder's and/or CCC's costs and expenses incurred in collecting such payment.

14) **Additional Terms for Specific Products and Services.** If a User is making one of the uses described in this Section 14, the additional terms and conditions apply:

a) **Print Uses of Academic Course Content and Materials (photocopies for academic coursepacks or classroom handouts).** For photocopies for academic coursepacks or classroom handouts the following additional terms apply:

i) The copies and anthologies created under this License may be made and assembled by faculty members individually or at their request by on-campus bookstores or copy centers, or by off-campus copy shops and other similar entities.

ii) No License granted shall in any way: (i) include any right by User to create a substantively non-identical copy of the Work or to edit or in any other way modify the Work (except by means of deleting material immediately preceding or following the entire portion of the Work copied) (ii) permit "publishing ventures" where any particular anthology would be systematically marketed at multiple institutions.

iii) Subject to any Publisher Terms (and notwithstanding any apparent contradiction in the Order Confirmation arising from data provided by User), any use authorized under the academic pay-per-use service is limited as follows:

A) any License granted shall apply to only one class (bearing a unique identifier as assigned by the institution, and thereby including all sections or other subparts of the class) at one institution;

B) use is limited to not more than 25% of the text of a book or of the items in a published collection of essays, poems or articles;

C) use is limited to no more than the greater of (a) 25% of the text of an issue of a journal or other periodical or (b) two articles from such an issue;

D) no User may sell or distribute any particular anthology, whether photocopied or electronic, at more than one institution of learning;

E) in the case of a photocopy permission, no materials may be entered into electronic memory by User except in order to produce an identical copy of a Work before or during the academic term (or analogous period) as to which any particular permission is granted. In the event that User shall choose to retain materials that are the subject of a photocopy permission in electronic memory for purposes of producing identical copies more than one day after such retention (but still within the scope of any permission granted), User must notify CCC of such fact in the applicable permission request and such retention shall constitute one copy actually sold for purposes of calculating permission fees due; and

F) any permission granted shall expire at the end of the class. No permission granted shall in any way include any right by User to create a substantively non-identical copy of the Work or to edit or in any other way modify the Work (except by means of deleting material immediately preceding or following the entire portion of the Work copied).

iv) Books and Records; Right to Audit. As to each permission granted under the academic pay-per-use Service, User shall maintain for at least four full calendar years books and records sufficient for CCC to determine the numbers of copies made by User under such permission. CCC and any representatives it may designate shall have the right to audit such books and records at any time during User's ordinary business hours, upon two days' prior notice. If any such audit shall determine that User shall have underpaid for, or underreported, any photocopies sold or by three percent (3%) or more, then User shall bear all the costs of any such audit; otherwise, CCC shall bear the costs of any such audit. Any amount determined by such audit to have been underpaid by User shall immediately be paid to CCC by User, together with interest thereon at the rate of 10% per annum from the date such amount was originally due. The provisions of this paragraph shall survive the termination of this License for any reason.

b) **Digital Pay-Per-Uses of Academic Course Content and Materials (e-coursepacks, electronic reserves, learning management systems, academic institution intranets).** For uses in e-coursepacks, posts in electronic reserves, posts in learning management systems, or posts on academic institution intranets, the following additional terms apply:

i) The pay-per-uses subject to this Section 14(b) include:

A) **Posting e-reserves, course management systems, e-coursepacks for text-based content**, which grants authorizations to import requested material in electronic format, and allows electronic access to this material to members of a designated college or university class, under the direction of an instructor designated by the college or university, accessible only under appropriate electronic controls (e.g., password);

B) **Posting e-reserves, course management systems, e-coursepacks for material consisting of photographs or other still images not embedded in text**, which grants not only the authorizations described in Section 14(b)(i)(A) above, but also the following authorization: to include the requested material in course materials for use consistent with Section 14(b)(i)(A) above, including any necessary resizing, reformatting or modification of the resolution of such requested material (provided that such modification does not alter the underlying editorial content or meaning of the requested material, and provided that the resulting modified content is used solely within the scope of, and in a manner consistent with, the particular authorization described in the Order Confirmation and the Terms), but not including any other form of manipulation, alteration or editing of the requested material;

C) Posting e-reserves, course management systems, e-coursepacks or other academic distribution for audiovisual content, which grants not only the authorizations described in Section 14(b)(i)(A) above, but also the following authorizations: (i) to include the requested material in course materials for use consistent with Section 14(b)(i)(A) above; (ii) to display and perform the requested material to such members of such class in the physical classroom or remotely by means of streaming media or other video formats; and (iii) to "clip" or reformat the requested material for purposes of time or content management or ease of delivery, provided that such "clipping" or reformatting does not alter the underlying editorial content or meaning of the requested material and that the resulting material is used solely within the scope of, and in a manner consistent with, the particular authorization described in the Order Confirmation and the Terms. Unless expressly set forth in the relevant Order Confirmation, the License does not authorize any other form of manipulation, alteration or editing of the requested material.

ii) Unless expressly set forth in the relevant Order Confirmation, no License granted shall in any way: (i) include any right by User to create a substantively non-identical copy of the Work or to edit or in any other way modify the Work (except by means of deleting material immediately preceding or following the entire portion of the Work copied or, in the case of Works subject to Sections 14(b)(1)(B) or (C) above, as described in such Sections) (ii) permit "publishing ventures" where any particular course materials would be systematically marketed at multiple institutions.

iii) Subject to any further limitations determined in the Rightsholder Terms (and notwithstanding any apparent contradiction in the Order Confirmation arising from data provided by User), any use authorized under the electronic course content pay-per-use service is limited as follows:

A) any License granted shall apply to only one class (bearing a unique identifier as assigned by the institution, and thereby including all sections or other subparts of the class) at one institution;

B) use is limited to not more than 25% of the text of a book or of the items in a published collection of essays, poems or articles;

C) use is limited to not more than the greater of (a) 25% of the text of an issue of a journal or other periodical or (b) two articles from such an issue;

D) no User may sell or distribute any particular materials, whether photocopied or electronic, at more than one institution of learning;

E) electronic access to material which is the subject of an electronic-use permission must be limited by means of electronic password, student identification or other control permitting access solely to students and instructors in the class;

F) User must ensure (through use of an electronic cover page or other appropriate means) that any person, upon gaining electronic access to the material, which is the subject of a permission, shall see:

- o a proper copyright notice, identifying the Rightsholder in whose name CCC has granted permission,
- o a statement to the effect that such copy was made pursuant to permission,
- o a statement identifying the class to which the material applies and notifying the reader that the material has been made available electronically solely for use in the class, and
- o a statement to the effect that the material may not be further distributed to any person outside the class, whether by copying or by transmission and whether electronically or in paper form, and User must also ensure that such cover page or other means will print out in the event that the person accessing the material chooses to print out the material or any part thereof.

G) any permission granted shall expire at the end of the class and, absent some other form of authorization, User is thereupon required to delete the applicable material from any electronic storage or to block electronic access to the applicable material.

iv) Uses of separate portions of a Work, even if they are to be included in the same course material or the same university or college class, require separate permissions under the electronic course content pay-per-use Service.

Unless otherwise provided in the Order Confirmation, any grant of rights to User is limited to use completed no later than the end of the academic term (or analogous period) as to which any particular permission is granted.

v) Books and Records; Right to Audit. As to each permission granted under the electronic course content Service, User shall maintain for at least four full calendar years books and records sufficient for CCC to determine the numbers of copies made by User under such permission. CCC and any representatives it may designate shall have the right to audit such books and records at any time during User's ordinary business hours, upon two days' prior notice. If any such audit shall determine that User shall have underpaid for, or underreported, any electronic copies used by three percent (3%) or more, then User shall bear all the costs of any such audit; otherwise, CCC shall bear the costs of any such audit. Any amount determined by such audit to have been underpaid by User shall immediately be paid to CCC by User, together with interest thereon at the rate of 10% per annum from the date such amount was originally due. The provisions of this paragraph shall survive the termination of this license for any reason.

c) ***Pay-Per-Use Permissions for Certain Reproductions (Academic photocopies for library reserves and interlibrary loan reporting) (Non-academic internal/external business uses and commercial document delivery).*** The License expressly excludes the uses listed in Section (c)(i)-(v) below (which must be subject to separate license from the applicable Rightsholder) for: academic photocopies for library reserves and interlibrary loan reporting; and non-academic internal/external business uses and commercial document delivery.

i) electronic storage of any reproduction (whether in plain-text, PDF, or any other format) other than on a transitory basis;

ii) the input of Works or reproductions thereof into any computerized database;

iii) reproduction of an entire Work (cover-to-cover copying) except where the Work is a single article;

iv) reproduction for resale to anyone other than a specific customer of User;

v) republication in any different form. Please obtain authorizations for these uses through other CCC services or directly from the rightsholder.

Any license granted is further limited as set forth in any restrictions included in the Order Confirmation and/or in these Terms.

d) ***Electronic Reproductions in Online Environments (Non-Academic-email, intranet, internet and extranet).*** For "electronic reproductions", which generally includes e-mail use (including instant messaging or other electronic transmission to a defined group of recipients) or posting on an intranet, extranet or Intranet site (including any display or performance incidental thereto), the following additional terms apply:

i) Unless otherwise set forth in the Order Confirmation, the License is limited to use completed within 30 days for any use on the Internet, 60 days for any use on an intranet or extranet and one year for any other use, all as measured from the "republication date" as identified in the Order Confirmation, if any, and otherwise from the date of the Order Confirmation.

ii) User may not make or permit any alterations to the Work, unless expressly set forth in the Order Confirmation (after request by User and approval by Rightsholder); provided, however, that a Work consisting of photographs or other still images not embedded in text may, if necessary, be resized, reformatted or have its resolution modified without additional express permission, and a Work consisting of audiovisual content may, if necessary, be "clipped" or reformatted for purposes of time or content management or ease of delivery (provided that any such resizing, reformatting, resolution modification or "clipping" does not alter the underlying editorial content or meaning of the Work used, and that the resulting material is used solely within the scope of, and in a manner consistent with, the particular License described in the Order Confirmation and the Terms.

15) Miscellaneous.

a) User acknowledges that CCC may, from time to time, make changes or additions to the Service or to the Terms, and that Rightsholder may make changes or additions to the Rightsholder Terms. Such updated Terms will replace the prior terms and conditions in the order workflow and shall be effective as to any subsequent Licenses but shall not apply to Licenses already granted and paid for under a prior set of terms.

b) Use of User-related information collected through the Service is governed by CCC's privacy policy, available online at www.copyright.com/about/privacy-policy/.

c) The License is personal to User. Therefore, User may not assign or transfer to any other person (whether a natural person or an organization of any kind) the License or any rights granted thereunder; provided, however, that, where applicable, User may assign such License in its entirety on written notice to CCC in the event of a transfer of all or substantially all of User's rights in any new material which includes the Work(s) licensed under this Service.

d) No amendment or waiver of any Terms is binding unless set forth in writing and signed by the appropriate parties, including, where applicable, the Rightsholder. The Rightsholder and CCC hereby object to any terms contained in any writing prepared by or on behalf of the User or its principals, employees, agents or affiliates and purporting to govern or otherwise relate to the License described in the Order Confirmation, which terms are in any way inconsistent with any Terms set forth in the Order Confirmation, and/or in CCC's standard operating procedures, whether such writing is prepared prior to, simultaneously with or subsequent to the Order Confirmation, and whether such writing appears on a copy of the Order Confirmation or in a separate instrument.

e) The License described in the Order Confirmation shall be governed by and construed under the law of the State of New York, USA, without regard to the principles thereof of conflicts of law. Any case, controversy, suit, action, or proceeding arising out of, in connection with, or related to such License shall be brought, at CCC's sole discretion, in any federal or state court located in the County of New York, State of New York, USA, or in any federal or state court whose geographical jurisdiction covers the location of the Rightsholder set forth in the Order Confirmation. The parties expressly submit to the personal jurisdiction and venue of each such federal or state court.

Last updated October 2022

