

**Langfristige Effekte der hohen tibialen Umstellungsosteotomie  
auf die posturale Stabilität und Regulation**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Medizin (Dr. med.)

vorgelegt  
der Medizinischen Fakultät  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

von Wiebke Kadler

Betreuer: Univ.-Prof. Dr. med. Karl-Stefan Delank  
apl. Prof. Dr. phil. René Schwesig

Gutachter: Prof. Dr. Maren Witt, Leipzig  
apl. Prof. Dr. Alexander Zeh, Halle (Saale)

Datum der Verteidigung: 06.11.2024

## Referat

**Hintergrund:** Die hohe tibiale Osteotomie (HTO) ist bei medialer Gonarthrose infolge einer Varusfehlstellung eine etablierte Behandlungsmethode. Ziel dieser Untersuchung war es, die posturale Stabilität und Regulation, die Schmerzintensität, -häufigkeit und Lebensqualität von Patienten nach HTO langfristig zu beurteilen. Besondere Beachtung fanden dabei der Einfluss sowohl einer beidseitig durchgeführten HTO als auch der postoperativen Materialentfernung. **Methoden:** Zu sechs Messzeitpunkten (MZP 1: präoperativ; MZP 2: 6 Wochen, MZP 3: 12 Wochen, MZP 4: 6 Monate, MZP 5: 1 Jahr, MZP 6: 2 Jahre postoperativ) wurden 25 männliche Patienten posturographisch mittels des Interaktiven Balance System (IBS), sowie klinisch mittels des Short Form Gesundheitsfragebogens (SF-36), einer Visuellen Analogskala (VAS) und einem Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit untersucht. **Ergebnisse:** Der Stabilitätsindikator (ST) zeigte sich über den gesamten Messzeitraum unverändert ( $p=0,848$ ,  $\eta_p^2=0,01$ ), jedoch signifikant erhöht im Vergleich zur Referenzgruppe (MZP 6:  $p<0,001$ ,  $\eta_p^2=0,30$ ). Die posturalen Subsysteme zeigten mit Ausnahme des cerebellären Systems (F7-8; MZP 6:  $p=0,004$ ,  $\eta_p^2=0,16$ ) verglichen mit der Referenz über den gesamten Messzeitraum keine signifikanten Mittelwertdifferenzen. Seitens des Gewichtsverteilungsindex (WDI) präsentierte sich eine signifikante Abnahme im Studienverlauf ( $p=0,004$ ,  $\eta_p^2=0,15$ ). Die präoperative Entlastung der betroffenen Seite bei nur einseitig operierten Patienten nahm im Studienverlauf zugunsten einer ausgeglicheneren mediolateralen Gewichtsverteilung ab. Bei beidseitiger HTO konnte verglichen mit nur einseitiger HTO keine ausbalanciertere Gewichtsverteilung festgestellt werden. Der Zeitpunkt der Materialentfernung wies keine nennenswerte Korrelation mit posturographischen oder klinischen Parametern auf. Die präoperativ deutlich gegenüber der Referenzgruppe herabgesetzte körperliche Summenskala (PCS) des SF-36 zeigte im Studienverlauf eine signifikante Zunahme ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,52$ ). Die Schmerzintensität reduzierte sich langfristig ( $p<0,001$ ,  $\eta_p^2=0,30$ ). Der Anteil der Patienten mit Dauerschmerzen nahm deutlich ab (MZP 1: 48% vs. MZP 6: 12%), während der Anteil der Patienten mit Schmerzattacken (MZP 1: 52%, MZP 6: 64%) oder Schmerzfreiheit (MZP 1: 0%, MZP 6: 24%) zunahm. **Schlussfolgerung:** Durch die HTO kann die mediolaterale Gewichtsverteilung der Patienten langfristig verbessert werden, während die posturale Stabilität gegenüber gesunden Probanden konsistent verringert ist. Die auf die körperliche Gesundheit bezogene subjektive Lebensqualität der Patienten kann gesteigert, Schmerzintensität und -häufigkeit können durch HTO gesenkt werden.

Kadler, Wiebke: Langfristige Effekte der hohen tibialen Umstellungsosteotomie auf die posturale Stabilität und Regulation, Halle (Saale), Univ., Med. Fak., Diss., 63 Seiten, 2024

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Indikation der Umstellungsosteotomie .....	1
1.2	Operationstechniken und präoperative Planung .....	2
1.3	Posturale Stabilität und Gewichtsverteilung nach HTO.....	6
2	Zielstellung .....	9
3	Material und Methoden.....	11
3.1	Untersuchungsstichprobe.....	11
3.2	Untersuchungsablauf .....	13
3.3	Assessments.....	14
3.3.1	Interaktives Balance System (IBS) .....	14
3.3.2	Short Form Gesundheitsfragebogen (SF-36) .....	17
3.3.3	Visuelle Analogskala (VAS).....	19
3.3.4	Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit.....	19
3.4	Statistik .....	20
4	Ergebnisse .....	21
4.1	Posturale Stabilität und Regulation.....	21
4.2	Einfluss der Materialentfernung.....	27
4.3	Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit.....	28
5	Diskussion.....	37
5.1	Ergebnisdiskussion .....	37
5.2	Limitationen der Arbeit .....	46
5.3	Ausblick .....	48
6	Literaturverzeichnis .....	49
7	Thesen .....	63

Anlagen

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Erklärungen

Danksagung

## Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

Abb.	Abbildung
AGES	allgemeine Gesundheitswahrnehmung
BMI	Body-Mass-Index
bzw.	beziehungsweise
COP	Druckmittelpunkt
CW	Closed-wedge
DOUW	Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
EMRO	Emotionale Rollenfunktion
F	Frequenzbereich
FFT	Fast-Fourier-Transformation
GVER	Veränderungen der Gesundheit
h	Stunde
HB	Augen geschlossen, Reklination des Kopfes, Untergrund fest
Heel	Anteriorposteriore Gewichtsverteilung
HF	Augen geschlossen, Anteversion des Kopfes, Untergrund fest
HL	Augen geschlossen, Kopf 45° nach links rotiert, Untergrund fest
HR	Augen geschlossen, Kopf 45° nach rechts rotiert, Untergrund fest
HTO	hohe tibiale Osteotomie
Hz	Hertz
IBS	Interaktives Balance System
IKDC	International Knee Documentation Committee
ISAKOS	Internationale Gesellschaft für Arthroskopie, Kniechirurgie und orthopädische Sportmedizin
kg	Kilogramm
kg/m <sup>2</sup>	Kilogramm pro Quadratmeter
KI	Konfidenzintervall
KÖFU	körperliche Funktionsfähigkeit
KÖRO	körperliche Rollenfunktion
KTEP	Knietotalendoprothese
Left	Mediolaterale Gewichtsverteilung
m	Meter
mm	Millimeter
M.	Musculus
MCID	minimale klinisch wichtiger Unterschied
MCS	Psychische Summenskala

MW	Mittelwert
MZP	Messzeitpunkt
n	Grundgesamtheit
NC	Augen geschlossen, Kopf gerade, Untergrund fest
NO	Augen offen, Kopf gerade, Untergrund fest
OSG	Oberes Sprunggelenk
OW	Open-wedge
p	p-Wert
PC	Augen geschlossen, Kopf gerade, Untergrund weich
PCS	Körperliche Summenskala
PO	Augen offen, Kopf gerade, Untergrund weich
PSYCH	psychisches Wohlbefinden
r	Korrelationskoeffizient
SCHM	körperliche Schmerzen
SD	Standardabweichung
SF-36	Short Form Gesundheitsfragebogen
SOFU	Soziale Funktionsfähigkeit
ST	Stabilitätsindikator
Synch	Synchronisation
Tab.	Tabelle
TPB	Tibiaplateaubreite
VAS	Visuelle Analogskala
VITAL	Vitalität
WDI	Gewichtsverteilungsindex
z.B.	zum Beispiel
$\Delta$	Differenz
%	Prozent
$\eta_p^2$	partielltes eta-Quadrat
<	kleiner
>	größer
$\pm$	plus minus
=	gleich

# 1 Einleitung

## 1.1 Indikation der Umstellungsosteotomie

Die weltweit häufigste Gelenkerkrankung ist die Arthrose. In einer aktuellen Studie des Robert Koch-Instituts (RKI) betrug die 12-Monats-Prävalenz von Arthrose in Deutschland bei Erwachsenen 17,1% (Heidemann et al. 2021). Dabei zeigten frühere Daten des RKI, dass bei mehr als der Hälfte der Personen mit Arthrose in Deutschland das Kniegelenk betroffen war (Fuchs et al. 2013). Auch weltweit stellt die Gonarthrose eine der Hauptursachen für krankheitsbedingte Beeinträchtigungen dar (Cross et al. 2014). Bedeutende Risikofaktoren sind Alter, weibliches Geschlecht, Verletzungen und Übergewicht. Zudem nehmen Achsenfehlstellungen im Sinne eines Genu varum oder valgum eine bedeutende Rolle in der Ätiologie sekundärer Gonarthrosen ein (Michael et al. 2010). Diese bedingen eine verstärkte unikompartimentelle Belastung, was mit dem Voranschreiten einer Gonarthrose einhergeht (Sharma et al. 2001; Tanamas et al. 2009). Zudem gibt es Hinweise, dass eine varische Beinachse das Risiko für die Entstehung einer Gonarthrose erhöht (Sharma et al. 2013). Vor allem bei Patienten mit Übergewicht zeigt sich eine Assoziation zwischen Genu varum und der Entwicklung einer Gonarthrose (Brouwer et al. 2007). Die Gonarthrose geht mit bedeutenden Funktionseinschränkungen und Schmerzen, sowie einer damit verbundenen Einschränkung der Lebensqualität einher (Alkan et al. 2014). Die wichtigsten Ziele der Behandlung orthopädischer Erkrankungen sind im Allgemeinen die Verbesserung oder Wiederherstellung der Funktion und die Linderung von Schmerzen (Katz et al. 2015). Neben konservativen Therapiemethoden und teil- oder vollständig gelenkersetzender Intervention empfiehlt die S2k-Leitlinie Gonarthrose der Deutschen Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie von 2018 bei Achsendeformitäten auch gelenkerhaltende Operationsverfahren, wie die gelenknahen valgusierenden oder varusierenden Osteotomien (Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie 2018). Bei Patienten mit medialer Gonarthrose hat sich dabei die valgusierende hohe tibiale Umstellungsosteotomie (HTO) bewährt, um das Schmerzniveau zu senken und die Kniefunktion zu verbessern (Brouwer et al. 2014). Zudem konnten mehrere Studien eine klinisch relevante Verbesserung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität bei Patienten nach HTO zeigen (Saier et al. 2017; Bastard et al. 2017; Herbst et al. 2020).

Für ein gutes postoperatives Ergebnis ist jedoch die korrekte Indikationsstellung wichtig. Die Internationale Gesellschaft für Arthroskopie, Kniechirurgie und orthopädische Sportmedizin (ISAKOS) hat 2004 Kriterien bezüglich des idealen Patienten für HTO

aufgestellt. Zu den Kriterien zählten: Patientenalter zwischen 40 und 60 Jahren, Body-Mass-Index (BMI)  $<30 \text{ kg/m}^2$ , Fehlstellung  $<15^\circ$ , volles Bewegungsausmaß des Kniegelenks, tibialer Varuswinkel von  $>5^\circ$  und International Knee Documentation Committee-Score B-D (IKDC-Score) oder Ahlbäck-Klassifikation I-IV und normale ligamentäre Strukturen (Brinkman et al. 2008). Auch weiter gilt der junge Patient mit isolierter medialer Gonarthrose, gutem Bewegungsausmaß und ohne Bänderinstabilität als idealer Patient (Rossi et al. 2011; Bonasia et al. 2014). Vor allem sportlich aktive Patienten profitieren von der Operation, da die Rückkehr zu einem gleichen oder höheren Level an körperlicher Aktivität verglichen mit dem Ausgangsniveau möglich ist. Während traditionellerweise ein niedrigerer BMI als Voraussetzung für die Operation galt, ist auch Patienten mit hohem BMI eine Rückkehr zu einem guten Aktivitätslevel möglich (Belsey et al. 2021). Die HTO hat unter anderem das Ziel, die Notwendigkeit einer Knieendoprothese (KTEP) hinauszuzögern oder aber komplett abzuwenden (Khakha et al. 2021). Dem systematischen Review von Ollivier et al. (2021) zufolge, konnte bei der Mehrzahl der Patienten die Notwendigkeit einer Endoprothese für mehr als 15 Jahre verschoben werden.

## **1.2 Operationstechniken und präoperative Planung**

Das Ziel der hohen tibialen Umstellungsosteotomie ist, das überbeanspruchte Kniekompartiment zu entlasten und die physiologische Beinachse wiederherzustellen (Brouwer et al. 2014). Prinzipiell stehen verschiedene Operationstechniken zur Auswahl, unter anderem die medial öffnende ("open-wedge" (OW)) und die lateral schließende ("closed-wedge" (CW)) Osteotomie (Martinek und Imhoff 2003).

Lange galt die CW-HTO, bei der aus dem lateralen Tibiakopf ein knöcherner Keil entnommen wird und durch Schließen des Spaltes die Beinachse nach lateral korrigiert wird, als der Goldstandard. Mit der Einführung winkelstabiler Plattenfixateure hat die OW-HTO an Bedeutung hinzugewonnen (Martinek und Imhoff 2003; Murray et al. 2021). Hinterwimmer et al. (2012) beschrieben die Operationstechnik, der von ihnen bevorzugt verwendeten medialen OW-HTO: Die Osteotomie wird grundsätzlich biplanar, sowohl in frontaler als auch in axialer Ebene, durchgeführt. Der Zugang erfolgt mit einem circa 8-10 cm langen anteromedialen Hautschnitt knapp oberhalb der Tuberositas tibiae. Nach Präparation wird die Sartoriusfaszie, sowie das darunter liegende Periost entlang des Oberrandes der Grazilissehne bis zu den ventralen Fasern des oberflächlichen Innenbands inzidiert. Die Semitendinosussehne, Grazilisehne und die distal der Osteotomie liegenden Fasern des oberflächlichen Innenbands werden mobilisiert. Zunächst wird der Ausgangszustand durch zwei in axialer und sagittaler Ebene parallele Kirschnerdrähte zwecks intraoperativer Torsions- und Slope-Kontrolle, sowie die frontale

Osteotomie markiert. Diese kann entweder distal oder proximal der Tuberositas tibiae erfolgen. Für die Markierung der axialen Osteotomie werden zwei parallele Drähte entlang der axialen Osteotomieebene bis zur lateralen Kortikalis eingebracht. Entlang der vorgelegten Markierungen erfolgt nun zunächst die frontale und dann die axiale Osteotomie. Es ist darauf zu achten die laterale Kortikalis intakt zu lassen, um eine möglichst stabile Osteotomie zu erreichen. Anschließend wird der Osteotomiespalt schrittweise bis zum Korrekturziel eröffnet. Nach radiologischer Kontrolle erfolgt die Fixation mit einer winkelstabilen Platte (Hinterwimmer et al. 2012).

Brouwer et al. (2014) konnten keine Evidenz für Unterschiede zwischen den verschiedenen Osteotomiemethoden finden. Bei der Analyse von neueren Studien im Review von Liu et al. (2019) zeigten sich jedoch diverse Vorteile der OW-HTO gegenüber der CW-HTO, unter anderem eine höhere Genauigkeit der Korrektur, sowie eine höhere Überlebensrate nach 10 Jahren, ein größerer Bewegungsumfang, weniger Dissektion vom Weichteilgewebe und mehr Erhalt des proximalen tibiofibularen Gelenks. Das Review von He et al. (2021) konnte die höhere Überlebensrate nach OW-HTO verglichen mit CW-HTO bestätigen und weiterhin niedrigere Frakturraten der OW-HTO gegenüber der CW-HTO beobachten. Auf der anderen Seite vergrößert die OW-HTO jedoch den hinteren Neigungswinkel und die Gliedmaßenlänge und verringert die Patellahöhe (Liu et al. 2019).

Bei bilateraler Gonarthrose kann ein beidseitiger Eingriff gerechtfertigt sein. Hierbei besteht durch verbesserte Technologie und damit einhergehender Möglichkeit der direkten postoperativen Vollbelastung auch die Option einer simultanen Operation beider Seiten (Hernigou et al. 2020). Ähnliche klinische Ergebnisse wie bei einer unilateralen Operation konnten hier erreicht werden. Zudem wurde die Zeit bis zum Erreichen dieser Ergebnisse nicht verlängert (Neiryneck et al. 2021). Vorteile der simultanen HTO lagen in dem einmaligen Krankenhausaufenthalt, dem nur einmalig einzugehenden Anästhesierisiken, einer beschleunigten Rehabilitation, sowie einer früheren Rückkehr zum erwarteten Lebensstatus und einer reduzierten Gesamtverweildauer im Krankenhaus (Uçan et al. 2023). Zu den Nachteilen einer simultanen bilateralen HTO zählte ein erhöhtes Risiko für Bluttransfusionen (Hernigou et al. 2020).

Für eine erfolgreiche Umstellungsosteotomie ist die richtige Einschätzung der Achsenabweichung und die exakte Korrektur der Beinachse notwendig (Pape et al. 2004). Hierfür ist zunächst ein Verständnis der physiologischen Beinachsenverhältnisse notwendig. In den durch die Sportklinik Halle zur Verfügung gestellten Abbildungen 1-3 sind die entsprechende Beinachsen bei varischer Beinstellung schematisch markiert (Abb. 1-3). Unterschieden werden anatomische und mechanische Achsen. Der Winkel

zwischen den anatomischen Achsen von Femur und Tibia, welche jeweils mittig durch die Diaphyse verlaufen, beträgt physiologischerweise 5 - 7° Valgus. Abzugrenzen hiervon sind die mechanischen Achsen von Femur und Tibia, welche durch die Mittelpunkte der angrenzenden Gelenke definiert werden. Diese bilden physiologischerweise einen Varuswinkel von 1,2°. Die Traglinie des Beines, auch als Mikulicz-Linie bezeichnet, verbindet das Hüftkopfzentrum mit dem Zentrum des oberen Sprunggelenks. Sie verläuft in physiologischer Achsenstellung 4 ± 4 mm medial des Kniegelenkmittelpunktes. Bei einem Genu varum kann aufgrund von unterschiedlichen Ursachen die Traglinie des Beines weiter nach medial verschoben sein. Dies kann auch als Prozentsatz der Tibiaplateaubreite (TPB) quantifiziert (Pape et al. 2004; Waldt et al. 2011).



**Abb. 1:** Anatomische Achsen (Sportklinik Halle)



**Abb. 2:** Mechanische Achsen (Sportklinik Halle)



**Abb. 3:** Mikulicz-Linie (Sportklinik Halle)

Ziel der HTO ist es, die Achsenfehlstellung zu korrigieren (Brouwer et al. 2014). Die Position der Traglinie des Beines in Relation zur TPB (mediale Begrenzung = 0%, laterale Begrenzung = 100%) gilt als genauster Parameter zur Beurteilung der prä- und postoperativen Beinachse (Pape et al. 2004; Hinterwimmer et al. 2012). Zum Ausmaß der Korrektur gibt es unterschiedliche Meinungen und indes nur unzureichende Evidenz. Das Korrekturziel basiert dabei noch heute auf einer Arbeit von Fujisawa et al. (1979), welche eine Gruppe von 54 Patienten präoperativ und 0,5 - 6,3 Jahre postoperativ nach HTO untersuchten. Entsprechend der arthroskopischen und histologischen Befunde kamen die Autoren zu dem Schluss, dass die ideale Korrektur erreicht wird, wenn die neue mechanische Achse das laterale Tibiaplateau 30 – 40% vom Kniegelenkszentrum

entfernt schneidet (Hinterwimmer et al. 2012). Noyes et al. (1993) präzisierten die zu erzielende Korrektur auf einen postoperativen Schnittpunkt der Traglinie des Beines zwischen 62 - 66% der TPB. Die vorliegende Studie orientierte sich an der 62% Koordinate. Ein Computermodell konnte zeigen, dass diese klassische gewichtstragende Achse bei 62,5% der TPB ausreichend Last auf das laterale tibiofemorale Gelenk überträgt und die normale Kniekinematik erhalten kann (Kuriyama et al. 2020). Hingegen analysierten Yuan et al. (2022) bei 278 Patienten retrospektiv das klinische Outcome nach HTO und empfahlen basierend auf ihren Ergebnissen eine Korrektur der Achse auf 55% der TPB.

Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Planungsmethoden, sowohl computergestützt als auch zeichnerisch. In den letzten Jahren hat die Verwendung von computergestützten Navigationssystemen an Bedeutung hinzugewonnen, um ein möglich präzises Korrekturergebnis zu erhalten (Akamatsu et al. 2012; Yan et al. 2016). Bisher konnten jedoch keine Verbesserungen im klinischen Outcome durch die computerassistierten Planungsmethoden nachgewiesen werden (Yan et al. 2016). In der vorliegenden Studie wurde unter Verwendung der Miniaci Methode das Ausmaß der benötigten Korrektur bestimmt. Pape et al. (2004) beschrieben die genaue Vorgehensweise: In einer Ganzbeinröntgenaufnahme wird eine Hilfslinie ausgehend von Hüftkopfzentrum durch den postoperativ zu erzielenden Schnittpunkt mit der TPB gezogen und bis auf die Höhe des Oberen Sprunggelenks verlängert. Diese Linie entspricht der postoperativen Traglinie (Linie 1). Das Drehzentrum der Osteotomie im Bereich der lateralen proximalen Tibiametaphyse auf Höhe des proximalen Tibiofibulargelenks (Punkt D) stellt den Endpunkt der geplanten horizontalen Osteotomie da. Die zweite Hilfslinie verbindet Punkt D mit der Mitte des oberen Sprunggelenks (Linie 2). Die finale Hilfslinie gleicher Länge verbindet Punkt D und den Endpunkt der Linie 1 nahe dem Oberen Sprunggelenk (Linie 3). Der von Linie 2 und Linie 3 eingeschlossene Winkel entspricht dem erforderlichen Korrekturwinkel ( $x$ ).

### **1.3 Posturale Stabilität und Gewichtsverteilung nach HTO**

Sowohl im Alltag als auch beim Sport stellt die posturale Stabilität eine wichtige Voraussetzung für die körperliche Funktionsfähigkeit dar. Vor allem die sich im Alter zeigenden Veränderungen der Kontrolle des Gleichgewichtes werden als Ursache für Stürze vermutet (Schwesig et al. 2010; Schwesig et al. 2013b). Besonders auch bei Patienten mit Gonarthrose sollte das erhöhte Sturzrisiko berücksichtigt werden (Doré et al. 2015; Aljehani et al. 2021; Chaharmahali et al. 2021; Freitas et al. 2023). Für die Aufrechterhaltung und Regulation von Haltung und Gleichgewicht dient das posturale System. Mithilfe der Posturographie kann die Funktionsfähigkeit der Gleichgewichtsregulation und somit des posturalen Systems unter Belastung der unteren Extremitäten ermittelt werden.

Mehrere Studien konnten bei Patienten mit Gonarthrose eine verminderte posturale Stabilität im Stehen und Einschränkungen der posturalen Kontrolle im Vergleich zu Patienten ohne Gonarthrose nachweisen (Hurley et al. 1997; Wegener et al. 1997; Hassan et al. 2001; Hinman et al. 2002; Kim et al. 2011; Truszczyńska-Baszak et al. 2020; Alshahrani und Reddy 2023; Freitas et al. 2023). Dabei nutzten Kim et al. (2011) die Posturographie mithilfe des IBS Systems, um 80 Patienten mit primärer Gonarthrose mit 40 altersgematchten Kontrollen zu vergleichen. Es zeigte sich eine verminderte posturale Stabilität in der Gruppe mit moderater bis schwerer Gonarthrose im Vergleich zu der Gruppe mit milder Gonarthrose oder der Kontrollgruppe. Um den Einfluss von akuter Schmerzlinderung auf die posturale Stabilität zu untersuchen, wurde 68 Probanden mit schmerzhafter Gonarthrose ein Lokalanästhetikum injiziert. Es zeigte sich keine Verbesserung der posturalen Stabilität (Hassan et al. 2002). Zhang et al. (2015) nutzten die Posturographie, um die zirkadiane Rhythmik der posturalen Stabilität bei Patienten mit Gonarthrose zu untersuchen. Es zeigte sich eine erhöhte posturale Stabilität am Nachmittag bei gleichzeitig erhöhter Schmerzintensität am Morgen. Birmingham et al. (2001a) konnten zeigen, dass vor allem bei Patienten mit Varusgonarthrose eine verminderte posturale Stabilität im Stehen mit der Krankheitsschwere assoziiert ist. Hunt et al. (2010) konnten überdies nachweisen, dass weniger stark ausgeprägte Varusfehlstellung als auch bilaterale Symptome mit einer erhöhten posturalen Stabilität assoziiert waren. Ein wichtiger Faktor bezüglich der posturalen Stabilität bei Patienten mit bilateraler Gonarthrose scheint die Kraftentwicklung des M. quadriceps zu sein (Alshahrani und Reddy 2023).

Mehrere Studien untersuchten die Auswirkungen einer KTEP auf die posturale Kontrolle und Stabilität (McChesney und Woollacott 2000; Goetz et al. 2017). McChesney und Woollacott (2000) konnten unter Verwendung von Kraftmessplatten zeigen, dass sich durch eine KTEP keine negativen Auswirkungen auf die posturale Stabilität ergeben.

Goetz et al. (2017) zeigten sogar, dass sich durch die erfolgreiche Behandlung der Kniearthrose unabhängig vom Implantat die zuvor geminderte posturale Stabilität auf das Niveau der kontralateralen gesunden Seite erholen konnte.

Es gibt bisher jedoch nur wenige Studien, die sich mit den postoperativen Effekten der HTO auf die posturale Kontrolle beschäftigen (Hunt et al. 2009; Zhang et al. 2023; Sabashi et al. 2023). Hunt et al. (2009) untersuchten die Effekte der HTO auf die posturale Stabilität präoperativ im Vergleich zu einem Jahr postoperativ bei 49 Probanden. Für jeweils dreimal 10 Sekunden standen die Probanden im Einbeinstand auf einer Kraftmessplatte. Anterioposteriore und mediolaterale Koordinaten des Druckmittelpunktes (COP) wurden genutzt, um die Pfadlänge des totalen Druckmittelpunktes, sowie die Spannweite und Variabilität der anterioposterioren und mediolateralen Koordinaten zu ermitteln. Die posturale Stabilität war bei den Patienten mit Gonarthrose nach der HTO nicht signifikant verändert. Hingegen konnten Sabashi et al. (2023) eine verbesserte posturale Kontrolle im aufrechten Stand in mediolateraler Richtung sechs Wochen postoperativ nach HTO anhand der COP-Maße zeigen. Einzig Zhang et al. (2023) untersuchten ebenfalls die posturale Kontrolle mittels Posturographie bis zu einem Jahr postoperativ bei 32 Patienten mit medialer Gonarthrose bei Varusdeformität nach HTO. Im Vergleich zu Kontrollen ohne Pathologie der unteren Extremität zeigte sich prä- und bis zu 3 Monate postoperativ eine verminderte posturale Stabilität. Ein Jahr postoperativ konnte eine deutliche Zunahme der posturalen Kontrolle beobachtet werden und es zeigte sich kein Unterschied mehr zwischen Patienten und den Kontrollen.

Längerfristige Follow-ups über 1 Jahr postoperativ hinaus, welche die Posturographie nutzten, um die posturale Stabilität und Regulation zu untersuchen, sind noch nicht verfügbar.

Bei gesunden Probanden bietet eine symmetrische Gewichtsverteilung zwischen beiden Beinen im aufrechten Stand optimale Stabilität, während eine asymmetrische Gewichtsverteilung negativen Einfluss auf die posturale Stabilität und Regulation hat (Genthon und Rougier 2005; Anker et al. 2008). Asymptomatische Probanden verteilen ihr Gewicht in der Mehrzahl der Fälle weitgehend gleichmäßig im aufrechten Stand (Summers et al. 1987; Talis et al. 2008; Prado-Rico und Duarte 2019). Das Alter scheint jedoch einen negativen Einfluss auf die symmetrische Belastung der Gliedmaßen im aufrechten Stand zu haben (Blaszczyk et al. 2000). Es ist klinisch wichtig, die Belastungssituation beider Gelenke zu erfassen, um eine mechanische Überlastung einer Seite zu verhindern und eine optimale Rehabilitation und Therapie zu ermöglichen (Harato et al. 2014; Nishizawa et al. 2021).

Bei Patienten mit einseitiger Gonarthrose zeigte sich in verschiedenen Studien eine größere Asymmetrie der Gewichtsverteilung bei alltäglichen Bewegungsmustern wie im Gang oder Übergängen aus dem Sitzen zum Stand. Die Kompensationsmechanismen gingen mit einer Entlastung der betroffenen Seite einher. Eine Abnahme des Schmerzniveaus war mit der Zunahme der Belastung der betroffenen Extremität im Gang assoziiert (Hurwitz et al. 2000; Boonstra et al. 2010; Christiansen und Stevens-Lapsley 2010; Creaby et al. 2012). Auch im ruhigen Stand konnte bei Patienten mit bilateraler Gonarthrose trotz ähnlichem Schmerzniveau und radiologisch vergleichbarem Arthroseggrad beider Seiten eine ausgeprägte Asymmetrie der Gewichtsverteilung gezeigt werden. Hierbei war ein vorhandenes Extensionsdefizit ein wichtiger Faktor für den Belastungszustand (Harato et al. 2014). Es konnte eine Korrelation zwischen der Knochendichte und einer asymmetrischen Gewichtsverteilung gezeigt werden. So hatte die stärker belastete Seite eine höheren Knochenmineraldichte bei Patienten mit bilateraler Gonarthrose, was für Orthopäden von Bedeutung sein könnte, um den Belastungszustand der Gelenke einzuschätzen (Nishizawa et al. 2021).

Auf Veränderungen durch Operationen oder die Progression der Krankheit scheint die Gewichtsverteilung sensitiv zu reagieren (Summers et al. 1987; Talis et al. 2008; Harato et al. 2010). Harato et al. (2010) zeigten, dass Patienten mit bilateraler Gonarthrose nach KTEP die operierte Seite im aufrechten Stand mit mehr Gewicht belasten, insofern kein Extensionsdefizit bestand. Bei bestehendem Defizit wurde das nicht-operierte Bein stärker belastet. Hingegen zeigten Patienten nach dem Einsatz einer Hüfttotalendoprothese eine bevorzugte Belastung der nicht-operierten Seite (Talis et al. 2008). Amputierte belasteten ihre Beinprothese ebenso mit weniger Gewicht (Summers et al. 1987). Zwar analysierten Li et al. (2023) den Einfluss der HTO auf die plantare Gewichtsverteilung im Gang, der Einfluss einer Umstellungsosteotomie auf die Symmetrie der Gewichtsverteilung wurde jedoch bislang unzureichend untersucht.

## 2 Zielstellung

Die hohe tibiale Osteotomie ist eine seit vielen Jahrzehnten häufig angewandte und erfolgreiche Methode zur Behandlung der medialen Gonarthrose infolge einer Varusfehlstellung. Insbesondere für aktive Patienten ist die HTO eine sinnvolle Therapieoption, um das Gelenk langfristig zu erhalten und einen notwendigen Ersatz durch eine Knieendoprothese hinauszuzögern oder gar zu verhindern.

Vielfältig untersucht sind die klinischen und radiologischen Ergebnisse der HTO. Auch der Vergleich verschiedener Operationstechniken, sowie alternative Behandlungsmöglichkeiten sind Gegenstand vieler Studien. Ebenso viel Aufmerksamkeit hat die Möglichkeit einer KTEP nach erfolgter HTO erhalten (El-Assal et al. 2010; Meding et al. 2011; Smith et al. 2011; Brouwer et al. 2014; Cotic et al. 2015; Altay et al. 2016; van der Woude et al. 2017; Chen et al. 2020; He et al. 2021).

Wenig Beachtung fanden aber bisher die langfristigen Auswirkungen der HTO auf die posturale Stabilität und Symmetrie der Gewichtsverteilung, sowie der Einfluss einer bilateral durchgeführten HTO.

Eine Literaturrecherche in der Datenbank PubMed mit den Suchtermini „(high tibial osteotomy) AND (posture)“ ergab in den letzten 10 Jahren lediglich 22 Ergebnisse. Dabei lag der Fokus der Studien auf der präoperativen Planung, den Operationstechniken mit unterschiedlichen Fixationsmöglichkeiten, Ganganalysen, sowie dem postoperativen Outcome und alternativen Behandlungsmöglichkeiten (Bode et al. 2013; Leitch et al. 2015; Zampogna et al. 2015; Kim et al. 2016; Lee et al. 2017; Nerhus et al. 2017; Jang et al. 2017; Huang et al. 2018; Thompson et al. 2019; Grünwald et al. 2019; Tarumi et al. 2019; Chieh-Szu Yang et al. 2020; Akasaki et al. 2020; Lee et al. 2020; So et al. 2020; Bockmann et al. 2021; Yang et al. 2021; Bonano et al. 2021; Ruggeri et al. 2022; Przystalski et al. 2023). Lediglich zwei Arbeiten untersuchten die Auswirkungen der HTO auf die posturale Stabilität mithilfe der Posturographie bis maximal ein Jahr postoperativ (Sabashi et al. 2023; Zhang et al. 2023).

Vor dem dargestellten Problemhintergrund hat die vorliegende Arbeit das folgende Ziel: Es sollen die Effekte der HTO bei varischer Beinachse mit symptomatischer medialer Gonarthrose auf die posturale Stabilität und Regulation, sowie Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit langfristig bis zu zwei Jahren postoperativ geprüft werden. Besondere Beachtung soll dabei auch der Einfluss einer beidseitig durchgeführten HTO, sowie der Einfluss des Zeitpunktes der postoperativen Materialentfernung erhalten.

Anhand einer prospektiven Längsschnittstudie sollen folgende Hypothesen geprüft werden:

### **Hypothese 1**

Die posturale Stabilität ist im Vergleich zu gesunden Kontrollen durch Tibia vara und HTO vermindert.

*Methodik:* IBS-System, Zielparameter: Stabilitätsindikator (ST)

### **Hypothese 2**

Die HTO führt bei der Mehrheit der Patienten zu einer erhöhten Belastung des Fußes der operierten Seite.

*Methodik:* IBS-System, Zielparameter: Mediolaterale Gewichtsverteilung (Left)

### **Hypothese 3**

Bei beidseitig durchgeführter HTO ist die Gewichtsverteilung ausbalancierter als bei einseitig durchgeführter HTO.

*Methodik:* IBS-System, Zielparameter: Mediolaterale (Left) und Anteriorposteriore Gewichtsverteilung (Heel), Gewichtsverteilungsindex (WDI)

### **Hypothese 4**

Die Materialentfernung verbessert die posturale Stabilität und -regulation, sowie die Lebensqualität und vermindert die Schmerzintensität.

*Methodik:* IBS-System, Zielparameter: ST, WDI, Left, Heel, Synchronisation (Synch), Frequenzbereiche (F) der posturale Subsysteme; Short-Form Gesundheitsfragebogen (SF-36), Zielparameter: körperliche (PCS) und psychische Summenskala (MCS); visuelle Analogskala (VAS)

### **Hypothese 5**

Die operative Beinachsenkorrektur führt bis zu zwei Jahre postoperativ zu einer Reduktion der Schmerzintensität und -häufigkeit und zu einer Zunahme der Lebensqualität.

*Methodik:* SF-36, VAS, Fragebogen zu Schmerzhäufigkeit

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Untersuchungsstichprobe

Im Rahmen der ambulanten Vorstellung in der Sportklinik oder im Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (DOUW) des Universitätsklinikums Halle konnten im Zeitraum von Mai 2018 bis August 2019 insgesamt 38 Patienten für die Teilnahme an der Studie rekrutiert werden. Die Rekrutierung richtete sich nach spezifischen Kriterien (Abb. 4).

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"><li>• Alter 18-60 Jahre</li><li>• freiwillige Teilnahme</li><li>• schriftliche Einverständniserklärung</li><li>• Indikation entsprechend der Zielstellung (Tibia vara), objektiviert anhand einer Ganzbeinaufnahme (Röntgen), seitlicher Röntgenaufnahme des Kniegelenks, ggf. MRT-Screening-Untersuchung, Arthroskopie</li><li>• symptomatische mediale Kompartementarthrose mit chronischen Ruhe- und Belastungsschmerz</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Patienten mit einer zwei- oder drittgradigen Kompartementarthrose des Kniegelenkes</li><li>• Patienten mit vorliegender Seitenbandinstabilität des betroffenen Kniegelenkes</li><li>• Osteonekrosen des medialen Tibiakopfes oder des medialen Femurkondylus</li><li>• Vorliegen entzündlicher rheumatischer Erkrankungen</li><li>• Operationsunfähigkeit aufgrund verschiedener Risikofaktoren (z. B. erhöhtes Infarktrisiko)</li><li>• Schwangerschaft und Stillzeit</li><li>• Alter &gt; 60 Jahre</li></ul>

**Abb. 4:** Ein- und Ausschlusskriterien

Einen Überblick über die Charakteristika der Stichprobe gibt Tab. 1 (Tab. 1) mit jeweiligem Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) zu den entsprechenden Messzeitpunkten (MZP). Weder Gewicht ( $p=0,474$ ,  $\eta_p^2=0,034$ ) noch BMI ( $p=0,485$ ,  $\eta_p^2=0,034$ ) veränderten sich im Untersuchungszeitraum signifikant. Von den initial rekrutierten Patienten konnten 25 (66%) die Studie vollständig abschließen. Aufgrund des überwiegenden Anteils männlicher Probanden wurden vier weibliche Probandinnen aus der Studie ausgeschlossen, um geschlechterspezifische Verzerrungen zu vermeiden. Weiterhin wurden vier Probanden aus der Studie ausgeschlossen, bei denen im Verlauf der Studie eine Umstellungsosteotomie des kontralateralen Beines erfolgte. Weitere Drop-Out-Ursachen sind in Tab. 2 dargestellt. Bei 9 (36%) Patienten zeigten sich orthopädische Komorbiditäten (Meniskusläsionen, Instabilität des Sprunggelenks, lumbale Bandscheibenerkrankungen, Nackenimplantate). An arteriellem Bluthochdruck litten 12 (48%) Patienten. Bei 12 (48%) der Patienten war das operierte Bein die dominante untere Extremität (z. B. das Bein, mit dem sie einen Ball schießen). Im Rahmen der Studie erfolgten 11 linksseitige Umstellungsosteotomien und 14

rechtsseitige Umstellungsosteotomien. Bei insgesamt acht Probanden wurde im Vorfeld der Studie eine kontralaterale Umstellungsosteotomie durchgeführt. Um den Einfluss einer solchen beidseitig durchgeführten Umstellungsosteotomie zu untersuchen wurden die Patienten in die Gruppen „nur linksseitig“, „nur rechtsseitig“ und „beidseitig“ operiert unterteilt.

**Tab. 1:** Charakteristika der Stichprobe: Alter, anthropometrische Merkmale; n=25 [MW±SD], betroffenes Bein und Seitigkeit

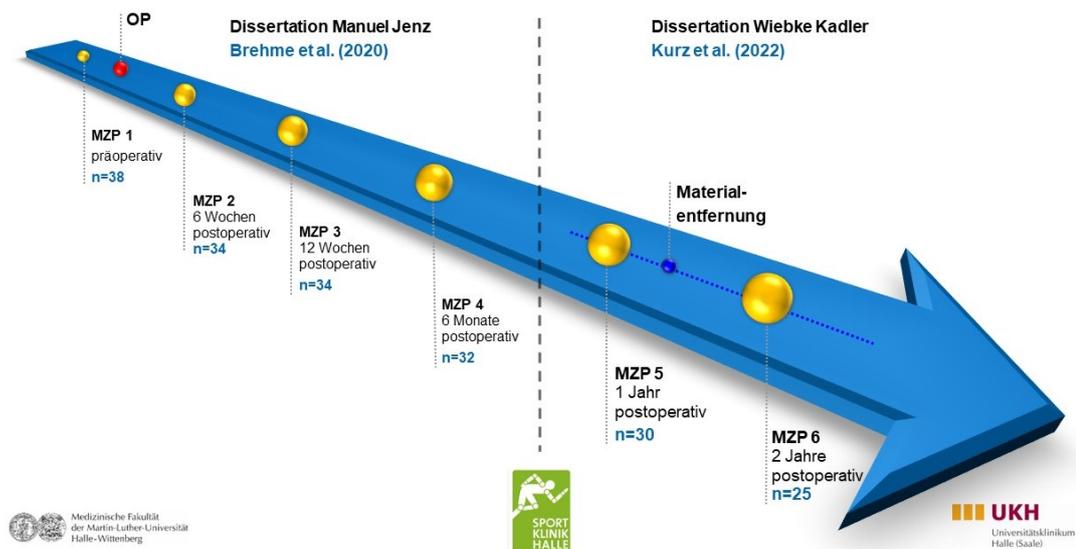
Variablen	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4	MZP 5	MZP 6
Alter [Jahre]	56,6 ± 5,01					
Größe [m]	1,79 ± 0,06					
Gewicht [kg]	98,7±14,1	98,6±14,3	98,8±14,4	99,3±15,1	98,8±14,9	99,7±14,9
BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	30,8±3,65	30,7±3,69	30,8±3,72	30,9±3,88	30,8±3,89	31,1±3,87
Betroffenes Bein	Linkes Bein: n=11 (44%); Rechtes Bein: n=14 (56%)					
Seitigkeit	Nur Linksseitig: n=5 (20%) Nur rechtsseitig: n=12 (48%); beidseitig: n=8 (32%)					

**Tab. 2:** Drop-Out-Ursachen im Längsschnitt

Drop-Out-Ursachen	MZP 1 (n=38)	MZP 2 (n=34)	MZP 3 (n=34)	MZP 4 (n=32)	MZP 5 (n=30)	MZP 6 (n=25)
Geschlechterspezifische Verzerrungen	0	4	0	0	0	0
Zeitmangel	0	0	0	0	0	2
Umzug	0	0	0	0	0	1
Lost to follow-up	0	0	0	1	0	1
OP kontralaterales Bein	0	0	0	1	2	1

## 3.2 Untersuchungsablauf

Die prospektive Längsschnittstudie untersuchte die Patienten über einen Zeitraum von zwei Jahren, in denen sechs MZP erhoben wurden. Zwischen MZP 1 und MZP 2 erfolgte die operative Versorgung des Genu varum mittels hoher tibialer Umstellungsosteotomie. Die in der Studie genutzte Operationstechnik bestand aus einer biplanaren medial-basierten OW-HTO mit distaler Lösung des oberflächlichen medialen Kollateralbandes unter Verwendung eines winkelstabilen Plattenfixateurs (LOQTEQ Osteotomy Plate system (aap Implants Inc. Dover, DE, USA)). Das Studiendesign wurde durch die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg geprüft und das Votum für die Durchführung erteilt (AZ 2018-66). Die Untersuchung der Patienten über die ersten sechs Monate war Gegenstand der Dissertation von Manuel Jenz (Jenz 2022) und wurde bereits im September 2020 veröffentlicht (Brehme et al. 2020). Die vorliegende Dissertation untersuchte die Patienten zu zwei weiteren MZP jeweils ein Jahr postoperativ (MZP 5) und zwei Jahre postoperativ (MZP 6; Abb. 5). Die Materialentfernung erfolgte zu individuellen Zeitpunkten zwischen 9 und 38 Monaten postoperativ.



**Abb. 5:** Studiendesign der prospektiven Längsschnittstudie

Alle Daten wurden in der Physiotherapie der Sportklinik Halle erhoben. Die Untersuchung bestand aus einer posturographischen Messung mittels des Interaktiven Balance System (IBS). Weiterhin wurden Fragebögen zur gesundheitsbezogenen Lebensqualität (SF-36), zur Schmerzintensität innerhalb der letzten 24 Stunden anhand einer VAS und zur Schmerzhäufigkeit verwendet.

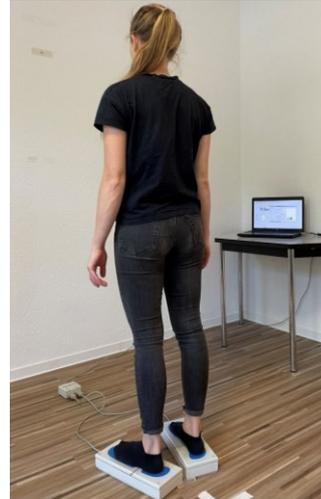
### 3.3 Assessments

#### 3.3.1 Interaktives Balance System (IBS)

Das IBS (neurodata GmbH, Wien) wurde in Israel entwickelt und diente ursprünglich der Untersuchung autistischer Kinder und deren Lernfähigkeit in Abhängigkeit vom posturalen Verhalten (Kohen-Raz und Hiriartborde 1979; Kohen-Raz 1991; Kohen-Raz et al. 1992; Schwesig 2006). Es besteht aus vier voneinander unabhängigen Kraftmessplatten, die in einem nach anterior offenen Winkel von 30° ausgerichtet sind (Abb. 6).



**Abb. 6:** Messanordnung IBS



**Abb. 7:** Messplatz IBS

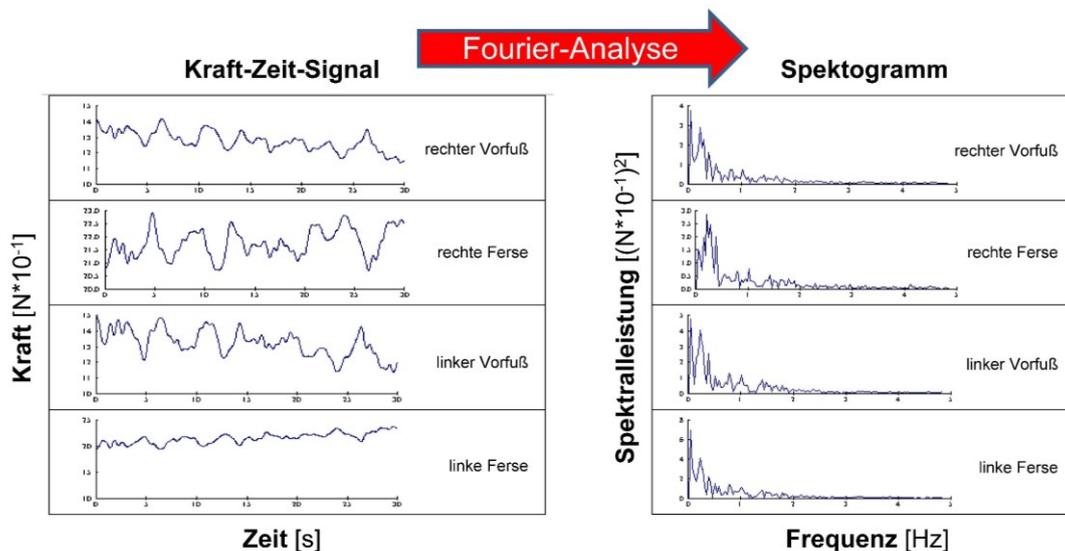
Der Proband steht ohne Schuhe mit Vorfuß und Rückfuß auf den Kraftmessplatten (Abb. 7) und nimmt acht standardisierte Testpositionen für jeweils 32 s (Abtastrate: 32 Hz) ein (Tab. 3).

**Tab. 3:** Standardisierte Testpositionen des IBS

Testposition	Testbeschreibung		
	Augen	Kopfposition	Untergrund
<b>NO</b>	Offen	gerade	fest
<b>NC</b>	Geschlossen	gerade	fest
<b>PO</b>	Offen	gerade	weich, auf Schaumstoffpolster (Höhe 6,5 cm) stehend
<b>PC</b>	Geschlossen	gerade	weich, auf Schaumstoffpolster (Höhe 6,5 cm) stehend
<b>HR</b>	Geschlossen	45° nach rechts rotiert	fest
<b>HL</b>	Geschlossen	45° nach links rotiert	fest
<b>HB</b>	Geschlossen	rekliniert	fest
<b>HF</b>	Geschlossen	antevertiert	fest

Der Stand ist entspannt und ruhig, die Arme hängen locker neben dem Körper herab. Die Füße werden gleichmäßig auf den Kraftmessplatten platziert. Die Untersuchung erfolgt in einem ruhigen geschlossenen Raum.

Die Messplatten erfassen vertikale Druckschwankungen des darauf stehenden Probanden. Mittels Fast-Fourier-Analyse (FFT) wird das Kraft-Zeit-Signal in ein Spektrogramm überführt und Amplituden sowie Frequenzen des Kraft-Zeit-Signals extrahiert (Schwesig et al. 2013a). Das Rohsignal stellt die Kraftwirkung an den vier Messpunkten in Abhängigkeit von der Zeit dar, während das Spektrogramm hingegen die Intensität der Kraftwirkung bzw. die Gesamtpower des Spektrums in Abhängigkeit von der Frequenz darstellt (Abb. 8; Schwesig et al. 2009).



**Abb. 8:** Überführung eines Kraft-Zeit-Signals in ein Fourier-Spektrum mittels FFT (Schwesig und Schulze 2018, S. 19)

Das Fourierspektrum lässt sich in acht Frequenzbänder unterteilen, welche sich unter funktionalem Aspekt zu vier Frequenzbereichen zusammenfassen lassen (Schwesig et al. 2009). Basierend auf verschiedenen Validierungsstudien sind die vier Frequenzbereiche mit bestimmten posturalen Subsystemen assoziiert (Oppenheim et al. 1999; Fukuoka et al. 2001; Schwartz et al. 2005; Friedrich et al. 2008; Schwesig et al. 2009; Schwesig et al. 2013a). Dabei zeigen sich verstärkte Schwankungsintensitäten innerhalb der einzelnen Frequenzbereiche als Hinweis für eine abnormale Funktion des entsprechenden Subsystems (Schwesig et al. 2014).

Einen Überblick über die vier Frequenzbereiche gibt Tab. 4. Parameter, die den motorischen Output erfassen, sind der Stabilitätsindikator (ST), der Gewichtsverteilungsindex (WDI), die Synchronisation (Synch), die anteriorposteriore (Heel) und die mediolaterale Gewichtsverteilung (Left). Die Parameter werden ausführlich in Schwesig et al. (2009), Bartels et al. (2019) und Reinhardt et al. (2019) beschrieben.

Bezüglich des ST konnte eine starke Korrelation zu den Pfadlängen des Kraftmittelpunktes (COP) gezeigt werden (Reinhardt et al. 2019). Alle Parameter mit Ausnahme von Heel und Left sind dimensionslos. Je höher der Wert eines jeden Parameters (Ausnahme: Synchronisation), desto niedriger ist das Level der posturalen Regulation (Schwesig et al. 2014).

**Tab. 4:** Frequenzbereiche und Parameter des motorischen Outputs (in Anlehnung an Bartels et al. 2019, S. 51)

<b>Frequenzbereich</b>	<b>Beschreibung</b>	
	Frequenz (Hz)	Posturales Subsystem
<b>F1</b>	0,03-0,1	Visuelles und nigrostriatales System
<b>F2-4</b>	0,1-0,5	Peripher-vestibuläres System
<b>F5-6</b>	0,5-1,0	Somatosensorisches System
<b>F7-8</b>	>1,0	Cerebelläres System
<b>Parameter des motorischen Outputs</b>		
<b>Stabilitätsindikator (ST)</b>	Beschreibt den Zustand der posturalen Stabilität. Wird mit der folgenden Gleichung berechnet: $ST = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sqrt{(A_{i+1} - A_i)^2 + (B_{i+1} - B_i)^2 + (C_{i+1} - C_i)^2 + (D_{i+1} - D_i)^2}$	
<b>Gewichtverteilungsindex (WDI)</b>	Beschreibt die Asymmetrie der Gewichtsverteilung von einem erwarteten Mittel von 25% pro Platte. Wird mit der folgenden Gleichung berechnet: $WDI = \sqrt{\frac{(\bar{A} - 25\%)^2 + (\bar{B} - 25\%)^2 + (\bar{C} - 25\%)^2 + (\bar{D} - 25\%)^2}{4}}$	
<b>Synchronisation (Synch)</b>	Beschreibt die Beziehung der Vibrationsmuster zwischen den einzelnen Platten (A, B, C und D). Durch skalare Multiplikation werden die sechs Synchronisationswerte berechnet. 1000 – vollständige Koaktivität -1000 – vollständige Kompensation 0 – keine Koaktivität oder Kompensation	
<b>Anteriorposteriore Gewichtsverteilung (Heel)</b>	prozentuale Lastverteilung Vorfuß vs. Rückfuß unter Angabe der Rückfußbelastung	
<b>Mediolaterale Gewichtsverteilung (Left)</b>	prozentuale Lastverteilung rechts vs. links unter Angabe der linksseitigen Belastung	

### 3.3.2 Short Form Gesundheitsfragebogen (SF-36)

Beim Short Form 36 Health Survey (SF-36) handelt es sich um ein Instrument zur krankheitsübergreifenden Erfassung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität. Aus dem im Rahmen der Medical Outcome Study in den Vereinigten Staaten von Amerika verwendeten Messinstrument (Tarlov et al. 1989), wurde der SF-36 als gekürzte Skala erstellt und psychometrisch und klinisch auf Validität getestet (Ware und Sherbourne 1992; McHorney et al. 1993). Im Rahmen des International Quality of Life Assessment-Projekts wurde eine deutschsprachige Version des SF-36 erstellt (Bullinger et al. 1995). Den Probanden wurde die Version 1.0 des SF-36 vorgelegt, welcher im Anhang eingesehen werden kann. Die selbstständige Beantwortung der 36 Items (Fragen) dauerte durchschnittlich 10 Minuten. Der Patient wurde gebeten, die Antwortalternative anzukreuzen, die seinem persönlichen Empfinden am nächsten kommt. Der Aufbau des SF-36 ist in der Handanweisung ausführlich beschrieben (Bullinger und Kirchberger 1998): Es gibt sowohl binäre Auswahlmöglichkeiten zwischen „ja“ und „nein“ als auch mehrstufige Antwortskalen. Im SF-36 werden 8 Subdimensionen der subjektiven Gesundheit abgebildet: die körperliche Funktionsfähigkeit (KÖFU), körperliche Rollenfunktion (KÖRO), körperliche Schmerzen (SCHM), allgemeine Gesundheitswahrnehmung (AGES), Vitalität (VITAL), Soziale Funktionsfähigkeit (SOFU), Emotionale Rollenfunktion (EMRO) und psychisches Wohlbefinden (PSYCH). Es werden auch Veränderungen der Gesundheit (GVER) erfasst. Den Subdimensionen sind unterschiedlich viele Items zugeordnet, wobei auffällt, dass sowohl körperliche Gesundheit als auch psychische Gesundheit gegenüber der sozialen Dimension überwiegen. Einzelne Subdimensionen können zu einer psychischen (MCS) und körperlichen Summenskala (PCS) zusammengefasst werden. Dabei ergeben sich aus den Subskalen KÖRÖ, KÖFU, SCHM und AGES die PCS und aus den Subskalen VITA, SOFU, EMRO und PSYC die MCS. Tab. 5 gibt eine Übersicht über die einzelnen Subdimensionen und die Veränderung der Gesundheit.

Zur Auswertung des SF-36 (Bullinger und Kirchberger 1998) werden die angekreuzten Itembeantwortungen pro Skala addiert. Dabei müssen 7 Items umgepolt werden, damit sichergestellt werden kann, dass ein höherer Wert auch mit besserem Gesundheitszustand einhergeht. Weitere 3 Items müssen rekaliert werden, um eine lineare Beziehung zwischen Itemwert und Skalenbildung herzustellen. Anschließend werden alle erfassten Skalen in Werte zwischen 0 und 100 transformiert. Dies ermöglicht sowohl ein Vergleich der Skalen untereinander als auch mit verschiedenen Patientengruppen.

**Tab. 5: Übersicht über die Subdimensionen**  
(in Anlehnung an Bullinger und Kirchberger 1998, S. 12)

<b>Subdimension</b>	<b>Itemzahl</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>Körperliche Funktionsfähigkeit</b>	10	Beeinträchtigung körperlicher Aktivitäten wie Selbstversorgung, Gehen, Treppen steigen, bücken, heben und mittelschwere oder anstrengende Tätigkeiten durch den Gesundheitszustand
<b>Körperliche Rollenfunktion</b>	4	Beeinträchtigung der Arbeit oder anderer täglicher Aktivitäten, z. B. geringere Produktivität als gewöhnlich, Einschränkungen in der Art der Aktivitäten oder Schwierigkeiten bei der Ausführung bestimmter Dinge durch den Gesundheitszustand
<b>Körperliche Schmerzen</b>	2	Schmerzen und Einfluss der Schmerzen auf die normale Arbeit, sowohl im als auch außerhalb des Hauses
<b>Allgemeine Gesundheitswahrnehmung</b>	5	Persönliche Beurteilung der Gesundheit, einschließlich aktuellen Gesundheitszustands, zukünftige Erwartungen und Widerstandsfähigkeit gegenüber Erkrankungen
<b>Vitalität</b>	4	Gefühl energiegeladen und voller Schwung sein vs. müde und erschöpft sein
<b>Soziale Funktionsfähigkeit</b>	2	Beeinträchtigung normaler sozialer Aktivitäten durch körperlichen Gesundheitszustand oder emotionale Probleme
<b>Emotionale Rollenfunktion</b>	3	Beeinträchtigung der Arbeit oder anderer täglicher Aktivitäten durch emotionale Probleme
<b>Psychisches Wohlbefinden</b>	5	Allgemeine psychische Gesundheit, einschließlich Depression, Angst, emotionale und verhaltensbezogene Kontrolle, allgemeine positive Stimmung
<b>Veränderung der Gesundheit</b>	1	Beurteilung des aktuellen Gesundheitszustands im Vergleich zum vergangenen Jahr

### **3.3.3 Visuelle Analogskala (VAS)**

Die Visuelle Analogskala ist ein einfaches und häufig verwendetes Instrument, um Schmerz zu beurteilen. Verschiedene Reviews kamen zu dem Ergebnis, dass es sich bei der VAS um ein reliables, valides, objektives und für Änderungen sensitives Instrument handelt (Schomacher 2008; Williamson und Hoggart 2005). Die in der vorliegenden Studie verwendete Visuelle Analogskala erfasst die Intensität des subjektiven Schmerzempfindens innerhalb der letzten 24 Stunden. Der Patient wurde gebeten, auf einem waagerechten farblich markierten Balken von 100 mm Länge mit einem senkrechten Strich entsprechend des Ausmaßes der Intensität seines subjektiven empfundenen Schmerzes zu markieren (siehe Anlage). Die Bewertung erfolgt von einem Extrem, ganz links „kein Schmerz“, bis zum anderem Extrem, ganz rechts „schlimmster vorstellbarer Schmerz“. Der vom Extrem „kein Schmerz“ in Millimeter abgelesene Abstand wird auf 100 normiert und als Prozentzahl angegeben.

### **3.3.4 Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit**

Zur Erfassung der Schmerzhäufigkeit wurde den Patienten in Anlehnung an den Deutschen Schmerzfragebogen (Version 2012.2; Frage Nummer 8 und 9) ein Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit vorgelegt (siehe Anhang). Die Patienten wurden gebeten, anzukreuzen, welche Aussage auf die Schmerzen in den letzten 4 Wochen am besten zutraf.

Zur Auswahl standen:

- 1) Dauerschmerzen mit leichten Schwankungen,
- 2) Dauerschmerzen mit starken Schwankungen,
- 3) Schmerzattacken, dazwischen schmerzfrei,
- 4) Schmerzattacken, auch dazwischen Schmerzen.

Zur besseren Veranschaulichung wurde den Patienten eine visuelle Darstellung der Schmerzhäufigkeit angeboten. Sofern im Studienverlauf weder Dauerschmerzen noch Schmerzattacken bestanden, wurde dies so vermerkt.

Zur besseren Charakterisierung der Schmerzattacken wurde zusätzlich nach der Häufigkeit des Auftretens der Schmerzattacken gefragt (mehrfach täglich, einmal täglich, mehrfach wöchentlich, einmal wöchentlich, mehrfach monatlich, einmal monatlich, seltener). Auch die Dauer der Schmerzattacken wurde erfragt (Sekunden, Minuten, Stunden, bis zu 3 Tagen, länger als 3 Tage). Weiterhin wurde nach einer Abhängigkeit der Schmerzen von der Tageszeit (Ja, Nein), sowie gefragt (Auswahl: morgens, mittags, nachmittags, abends, nachts).

### 3.4 Statistik

Zur Ermittlung des Stichprobenumfangs wurde a priori vor Studienbeginn eine Poweranalyse (nQuery 4.0, Statistical solutions LTD., Cork, Irland) durchgeführt. Angenommen wurde eine zweiseitige Hypothesentestung, ein Alphafehlerniveau von 0,05 bei einer Power (1- $\beta$ ) von 0,8. Zugrunde gelegt wurde eine Studie mit 39 Kniepatienten (Bartels et al. 2018). Als Hauptzielparameter wurde der Stabilitätsindikator (Mittelwertdifferenz: 3,1; Standardabweichung der Mittelwertdifferenz: 6,31;  $d=0,49$ ) verwendet. Demnach waren initial 35 Probanden zu rekrutieren, um die formulierten Hypothesen statistisch sicher prüfen zu können. Wird eine Dropoutrate von 15% ( $n=5$ ) zu Grunde gelegt, so ergibt sich eine Stichprobengröße von  $n=38$ .

Die statistische Auswertung der ermittelten Ergebnisse erfolgte mithilfe des Statistikprogramms SPSS Version 28.0 (IBM, Armonk, NY, USA).

Mittelwerte, Standardabweichungen und 95% Konfidenzintervalle wurden deskriptiv berechnet. Das Signifikanz- und Relevanzniveau wurde mit  $p < 0,05$  und  $\eta_p^2 > 0,15$  definiert (Richardson 2011).

Mittels einer Referenzdatenbank (Schwesig 2006; Schwesig et al. 2013a) konnte jeder Patient mit einer alters- und größenadjustierten Referenz verglichen werden.

Entsprechend der Handanweisung des SF-36 wurden die erhobenen 36 Items kodiert und die einzelnen Subdimensionen, sowie körperliche und psychische Summenscores errechnet.

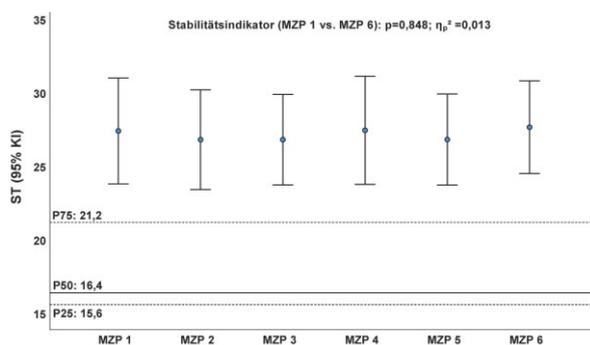
## 4 Ergebnisse

### 4.1 Posturale Stabilität und Regulation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich posturaler Stabilität und Regulation mittels des IBS über den gesamten Studienzeitraum dargestellt.

Anhand des Stabilitätsindikators (ST) wurde die posturale Stabilität beurteilt. Zu allen Messzeitpunkten fanden sich signifikant höhere Punktwerte im Vergleich zur Referenzgruppe (Abb. 9). Auch zu MZP 6 konnte mit  $27,7 \pm 7,64$  Punkten das Niveau der Referenzgruppe nicht erreicht werden und es zeigte sich ein signifikanter Unterschied zu dieser ( $p < 0,001$ ,  $\eta_p^2 = 0,30$ ). Zu beachten ist hierbei jedoch, dass präoperativ nur 44% der Patienten höhere Werte des ST im Vergleich zu den gesunden Kontrollen zeigten und somit die Mehrzahl der Patienten eine den Kontrollen gegenüber vergleichbare posturale Stabilität aufwies. Innerhalb des gesamten Beobachtungszeitraums über zwei Jahre konnte kein signifikanter Gesamtzeiteffekt festgestellt werden ( $p = 0,848$ ,  $\eta_p^2 = 0,01$ ). Ebenso zeigten sich keine signifikanten partiellen Effekte zwischen den einzelnen Messzeitpunkten.

Die posturale Stabilität im Vergleich zu gesunden Kontrollen ist durch Tibia vara und HTO vermindert und Hypothese 1 ist anzunehmen.

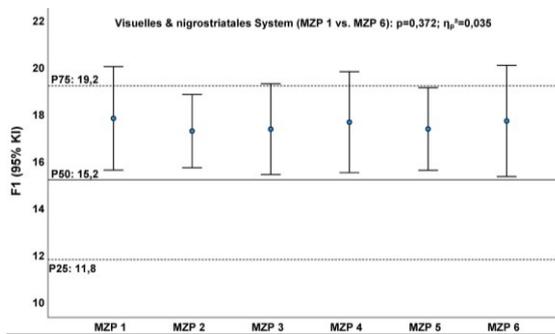


**Abb. 9:** Stabilitätsindikator (ST)

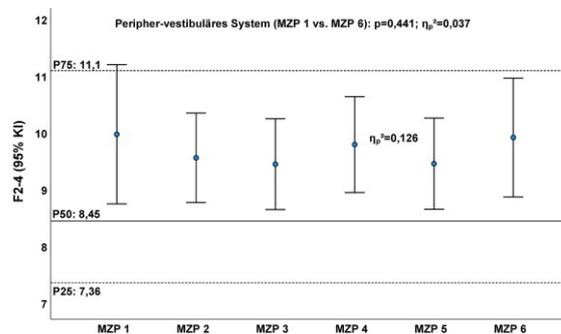
Im Folgenden werden die posturalen Subsysteme anhand der vier entsprechenden Frequenzbereiche betrachtet.

Das visuelle und nigrostriatale System (F1) präsentierte sich über den gesamten Messzeitraum im Mittel über dem Median der Referenzgruppe, es zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied zu dieser (Abb. 10). Ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ( $p = 0,372$ ,  $\eta_p^2 = 0,04$ ) und signifikante Mittelwertdifferenzen innerhalb der Messreihe präsentierten sich nicht. Im Beobachtungszeitraum zeigte sich das peripher-vestibuläre System (F2-4) im Mittel über dem Median der Referenzgruppe, jedoch ließ sich kein signifikanter Unterschied zu dieser feststellen (Abb. 11).

Zwischen MZP 4 mit  $9,80 \pm 2,05$  Punkten und MZP 5 mit  $9,46 \pm 1,94$  Punkten fand sich ein schwacher signifikanter partieller Effekt ( $p < 0,001$ ,  $\eta_p^2 = 0,13$ ). Jedoch konnte kein signifikanter Gesamtzeiteffekt ermittelt werden ( $p = 0,441$ ,  $\eta_p^2 = 0,04$ ).



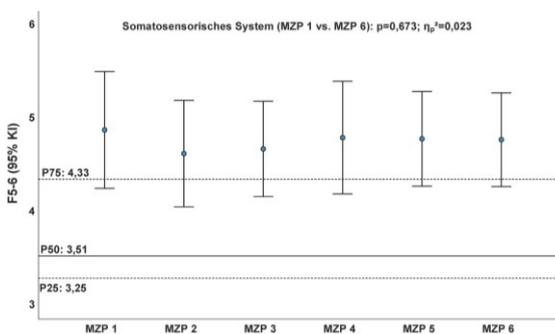
**Abb. 10:** Visuelles und nigrostriatales System (F1)



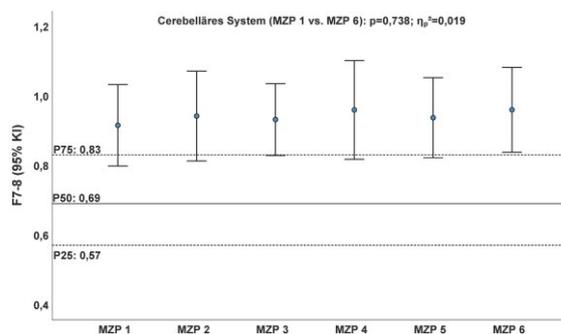
**Abb. 11:** Peripher-vestibuläres System (F2-4)

Das somatosensorische System (F5-6) zeigte im Mittel Punktwerte über dem 75. Perzentil der Referenzgruppe (Abb. 12). Signifikante Unterschiede zur Referenzgruppe zeigten sich jedoch zu keinem Messzeitpunkt. Es konnten weder signifikante partielle Effekte zwischen den einzelnen Messzeitpunkten noch ein signifikanter Gesamtzeiteffekt festgestellt werden ( $p = 0,673$ ,  $\eta_p^2 = 0,02$ ).

Im gesamten Messzeitraum zeigte das cerebellären Systems (F7-8) einen signifikanten Unterschied zur Referenzgruppe und präsentierte sich im Mittel über dem 75. Perzentil (Abb. 13). Präoperativ zeigte sich mit  $0,92 \pm 0,28$  Punkten ein signifikanter Unterschied zur Referenzgruppe ( $p = 0,018$ ,  $\eta_p^2 = 0,11$ ), auch 2 Jahre postoperativ blieb der Unterschied mit  $0,96 \pm 0,30$  Punkten signifikant ( $p = 0,004$ ,  $\eta_p^2 = 0,16$ ). Signifikante partielle Effekte zwischen den Messzeitpunkten oder ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ( $p = 0,738$ ,  $\eta_p^2 = 0,02$ ) zeigten sich nicht.



**Abb. 12:** Somatosensorisches System (F5-6)

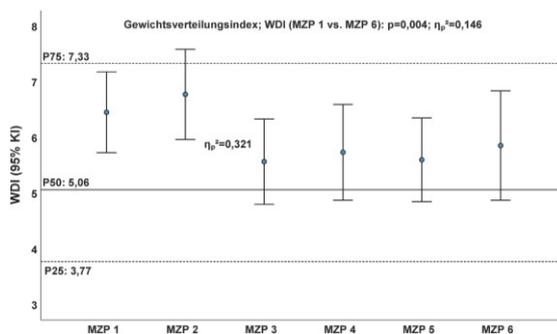


**Abb. 13:** Cerebelläres System (F7-8)

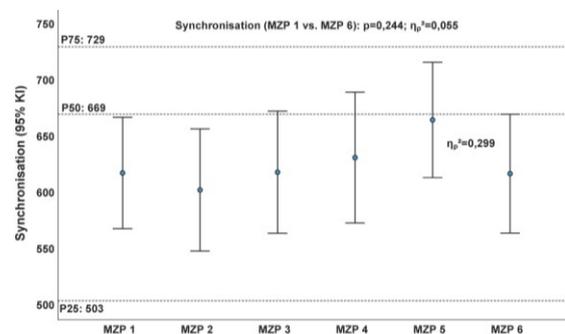
Insgesamt betrachtet zeigt sich trotz über den gesamten Messzeitraum höheren Punktwerten aller posturalen Subsysteme, das cerebelläre System (F7-8) ausgenommen, kein signifikanter Unterschied im Vergleich zu den gesunden Probanden der Referenzgruppe. Auch konnte über den gesamten Messzeitraum keine Veränderung der Leistungsfähigkeit der posturalen Subsysteme beobachtet werden.

Im Folgenden soll die Gewichtsverteilung und Fußkoordination betrachtet werden. Der Gewichtsverteilungsindex (WDI) zeigte über den gesamten Messzeitraum keine signifikanten Unterschiede zur Referenzstichprobe (Abb. 14). Präoperativ lag der Gewichtsverteilungsindex bei  $6,45 \pm 1,76$  Punkten und zeigte zwei Jahre postoperativ eine Abnahme zu  $5,85 \pm 2,38$  Punkten, was mit einer Abnahme der Asymmetrie beim Stehen einhergeht. Es zeigten sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ( $p=0,004$ ,  $\eta_p^2=0,15$ ), sowie eine signifikante Mittelwertdifferenz zwischen MZP 2 und MZP 3 ( $\eta_p^2=0,32$ ).

Über den gesamten Beobachtungszeitraum bewegte sich die Synchronisation (Synch) im Mittel unterhalb des Medians der Referenzgruppe und zeigte keine signifikanten Unterschiede zu dieser (Abb. 15). Postoperativ näherte sich die Synchronisation im Verlauf dem Median der Referenzstichprobe an. Zwischen MZP 5 und MZP 6 nahm das Niveau der Synchronisation jedoch wieder ab und es zeigte sich ein signifikanter Teilzeiteffekt zwischen MZP 5 zu MZP 6 ( $\eta_p^2=0,30$ ).

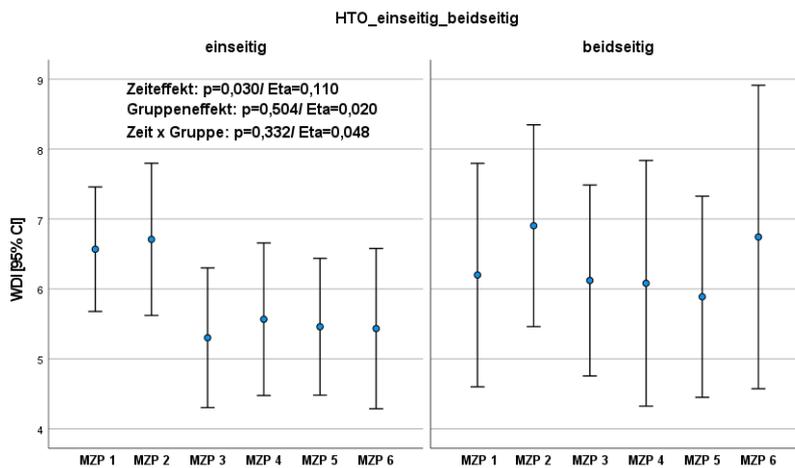


**Abb. 14:** Gewichtsverteilungsindex (WDI)



**Abb. 15:** Synchronisation (Synch)

Weiterhin wurde der Einfluss einer ein- oder beidseitig durchgeführten HTO auf den WDI untersucht. Schlussfolgernd ist zu konstatieren, dass diese Variable keinen nennenswerten Einfluss auf den WDI hat (Abb. 16).



**Abb. 16:** Gewichtsverteilungsindex (WDI) einseitig vs. beidseitig operierte Patienten

Um den Einfluss einer ein- oder beidseitig durchgeführten Umstellungsosteotomie auf die Gewichtsverteilung weiter zu untersuchen und die Belastung des betroffenen Beines zu prüfen, sind in Tab. 6 die Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel) und die mediolaterale Gewichtsverteilung (Left) für nur rechtsseitig, nur linksseitig und beidseitig operierte Patienten dargestellt.

Bei den nur rechtsseitig operierten Patienten zeigte sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt zwischen MZP 1 und MZP 6 bezüglich des Parameters Heel ( $p=0,063$ ;  $\eta_p^2=0,20$ ) und Left ( $p=0,029$ ;  $\eta_p^2=0,27$ ). Über den gesamten Messzeitraum war eine vermehrte Rückfußentlastung zu erkennen. Es konnten signifikante Teilzeiteffekte zwischen einzelnen Messzeitpunkten für den Parameter Heel festgestellt werden:

- MZP 1 vs. MZP 2:  $\eta_p^2=0,28$ ,
- MZP 3 vs. MZP 4:  $\eta_p^2=0,25$ .

Die rechtsseitig operierten Patienten zeigten präoperativ eine Mehrbelastung des linken Beines, diese verstärkte sich postoperativ und nahm dann bis zu 2 Jahren postoperativ ab, sodass zu MZP 6 mit  $\approx 50\%$  eine annähernde Gleichbelastung beider Beine vorlag. Es konnten signifikante Teilzeiteffekte zwischen einzelnen Messzeitpunkten für den Parameter Left festgestellt werden:

- MZP 2 vs. MZP 3:  $\eta_p^2=0,47$ ,
- MZP 4 vs. MZP 5:  $\eta_p^2=0,22$ .

Für die nur linksseitig operierten Patienten zeigte sich kein signifikanter Gesamtzeiteffekt bezüglich des Parameters Heel. Auch diese zeigten eine deutliche Mehrbelastung des Vorfußes, welche innerhalb der Messreihe schwankte und sich 2 Jahre postoperativ mit einer Fersenbelastung von  $\approx 45\%$  präsentierte. Es konnten signifikante partielle Effekte innerhalb der Messreihe für den Parameter Heel gezeigt werden:

- MZP 1 vs. MZP 2:  $\eta_p^2=0,24$ ,

- MZP 2 vs. MZP 3:  $\eta_p^2=0,26$ ,
- MZP 3 vs. MZP 4:  $\eta_p^2=0,58$ ,
- MZP 5 vs. MZP 6:  $\eta_p^2=0,47$ .

Die nur linksseitig operierten Patienten zeigten präoperativ, sowie bis zu 12 Wochen postoperativ eine Entlastung des linken Beins. Ab 6 Monaten bis zu 2 Jahren postoperativ konnte eine Mehrbelastung des linken Beines beobachtet werden, die sich zu MZP 6 mit 53% präsentierte. Es zeigte sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt für den Parameter Left ( $p=0,010$ ;  $\eta_p^2=0,66$ ), sowie signifikante partielle Effekte innerhalb der Messreihe:

- MZP 2 vs. MZP 3:  $\eta_p^2=0,60$ ,
- MZP 3 vs. MZP 4:  $\eta_p^2=0,58$ ,
- MZP 5 vs. MZP 6:  $\eta_p^2=0,32$ .

Bei den beidseitig operierten Patienten zeigten sich bezüglich des Parameters Heel weder ein signifikanter Gesamtzeiteffekt noch signifikante partielle Effekte. Über den gesamten Messzeitraum zeigte sich eine stark verminderte Fersenbelastung, welche 2 Jahre postoperativ mit 40% am stärksten vom Idealwert abwich. Für den Parameter Left zeigte sich innerhalb der Messreihe eine leichte Entlastung des linken Beins. 6 Monate postoperativ konnte mit  $\approx 49\%$  eine annähernd optimale Gewichtsverteilung erreicht werden. Es konnte kein signifikanter Gesamtzeiteffekt, jedoch signifikante partielle Effekte beobachtet werden:

- MZP 1 vs. MZP 2:  $\eta_p^2=0,22$ ,
- MZP 5 vs. MZP 6:  $\eta_p^2=0,37$ .

Insgesamt betrachtet führte die Umstellungsosteotomie zu einer Annäherung des Gewichtsverteilungsindex an die Referenzgruppe. Seitens der Vorfuß-Rückfuß-Belastung zeigte sich zwei Jahre postoperativ weiterhin eine verminderte Rückfußbelastung. Im Studienverlauf nahm die Belastung des Fußes der HTO-Seite im Durchschnitt zu. Zwei Jahre postoperativ wurde im Mittel der Fuß der operierten Seite stärker belastet. Hypothese 2 konnte bestätigt werden.

Im Vergleich der nur einseitig links oder rechts operierten zu den beidseitig operierten Patienten konnte keine wesentlich ausbalanciertere Gewichtsverteilung bei den beidseitig operierten Patienten festgestellt werden. Besonders auffällig war bei diesen Patienten die verstärkte Vorfußbelastung. Hypothese 3 gilt es zu verwerfen.

**Tab. 6:** Vorfuß-Rückfuß-Ratio und Seitigkeit bei nur links-/rechtsseitiger vs. beidseitiger Umstellungsosteotomie [MW ± SD]; Idealwert 50%

Parameter [%]	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4	MZP 5	MZP 6
<b>Nur Rechtsseitig operiert (n=12)</b>						
<b>Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel)</b>	48,0±10,6	44,7±8,23	48,2±8,41	45,2±8,09	44,5±7,37	45,4±8,91
<b>Mediolaterale Gewichtsverteilung (Left)</b>	52,8±4,55	54,8±6,00	51,5±5,36	51,4±4,52	50,3±3,86	49,1±4,72
<b>Nur Linksseitig operiert (n=5)</b>						
<b>Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel)</b>	45,7±6,15	42,6±7,36	44,4±5,25	42,8±5,95	42,3±5,12	44,8±4,00
<b>Mediolaterale Gewichtsverteilung (Left)</b>	46,1±5,32	45,9±4,60	49,2±1,79	51,5±3,21	52,1±1,81	53,1±2,59
<b>Beidseitig operiert (n=8)</b>						
<b>Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel)</b>	41,2±5,35	41,4±5,44	40,4±2,59	40,2±4,69	41,0±4,90	40,0±6,79
<b>Mediolaterale Gewichtsverteilung (Left)</b>	48,1±3,38	45,6±4,52	48,1±2,16	49,4±2,40	49,4±1,64	47,5±3,25

## 4.2 Einfluss der Materialentfernung

Im Mittel erfolgte die Materialentfernung 16,2 Monate postoperativ. Die Spannweite betrug 28,2 Monaten. Bei einem Probanden wurde das Material im Beobachtungszeitraum noch nicht entfernt. Um den Einfluss der postoperativen Materialentfernung zu untersuchen, wurde eine metrische Variable erstellt. Hierzu wurde die Differenz zwischen dem Zeitpunkt der OP und dem Zeitpunkt der Materialentfernung ermittelt (Diff\_OP-MatEntf). Die Korrelation zu posturographischen Parametern (Tab. 7), sowie Parametern der Schmerzintensität und Lebensqualität (Tab. 8) wurde zum Zeitpunkt zwei Jahre postoperativ (MZP 6) ermittelt.

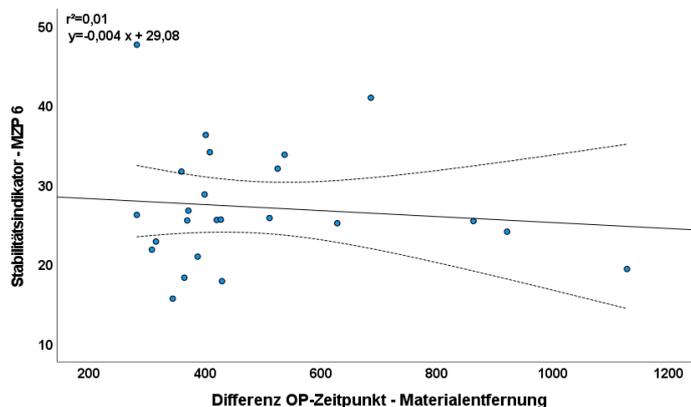
**Tab. 7:** Korrelation der IBS-Parameter mit der Diff\_OP-MatEntf zu MZP 6

Parameter	F1	F2-4	F5-6	F7-8	ST	WDI	Synch	Left	Heel
r	0,01	-0,15	-0,11	-0,01	-0,11	0,04	-0,14	-0,13	0,21

**Tab. 8:** Korrelation der klinischen Parameter mit der Diff\_OP-MatEntf zu MZP 6

Parameter	VAS	PCS	MCS
r	0,03	-0,08	0,01

Demnach korreliert der Zeitpunkt der Materialentfernung nicht mit posturographischen Parametern respektive mit den Lebensqualitätssummscores oder der Schmerzintensität. Beispielhaft sei dies für die Beziehung zum Stabilitätsindikator dargestellt (Abb. 17). Dementsprechend ist Hypothese 4 zu verwerfen.



**Abb. 17:** Einfluss der Materialentfernung auf den Stabilitätsindikator

### 4.3 Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit

Im Folgenden sollen die mittels Fragebögen ermittelten Ergebnisse bezüglich Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit dargestellt werden.

Für die Untersuchung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität anhand des Short Form Gesundheitsfragebogen (SF-36) dienen als Referenzwerte die deutsche Normstichprobe der Männer, welche in den Diagrammen als Mittelwert (MW) mit entsprechender Standardabweichung (SD) dargestellt sind.

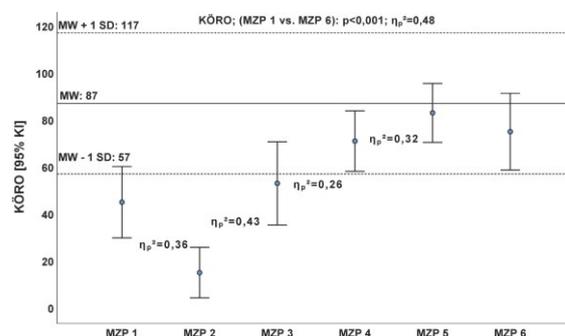
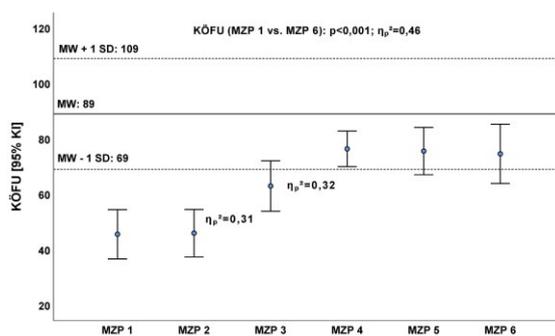
Im Studienverlauf war eine Zunahme der Lebensqualität im Bereich der körperlichen Gesundheit der Patienten zu beobachten. Präoperativ präsentierte sich die körperliche Summenskala deutlich unter dem Niveau der Referenzgruppe, was sich in den entsprechenden Subskalen widerspiegelte. Die größte Mittelwertdifferenz zur Referenzgruppe zeigte sich hier für die Subskala Körperlicher Schmerz (SCHM) mit  $\Delta=49$ . Ebenso zeigten die Subskalen Körperliche Funktionsfähigkeit (KÖFU  $\Delta=43$ ) und Körperlichen Rollenfunktion (KÖRO  $\Delta=42$ ) auffallend niedrigere Punktwerte. Zwei Jahre postoperativ präsentierten sich sowohl die entsprechenden Subskalen als auch die körperliche Summenskala mit höheren Punktwerten als präoperativ. Die Mittelwertdifferenzen erwiesen sich sowohl in der PCS ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,52$ ) als auch in den Subskalen KÖFU ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,46$ ), KÖRO ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,48$ ), SCHM ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,49$ ) als signifikant. Lediglich die Subskala AGES ( $p=0,234$ ;  $\eta_p^2=0,06$ ) zeigte keinen signifikanten Gesamtzeiteffekt.

Im Bereich der psychischen Gesundheit der Patienten zeigten sich differenzierte Entwicklungen. Präoperativ präsentierten sich sowohl psychische Summenskala, als auch die entsprechenden Subskalen näherungsweise auf dem Niveau der Referenzgruppe. Während sich 2 Jahre postoperativ im Vergleich zu präoperativ eine signifikante Zunahme der Subskala VITAL ( $p=0,006$ ;  $\eta_p^2=0,13$ ) zeigte, reduzierte sich die Subskala EMRO ( $p=0,003$ ;  $\eta_p^2=0,16$ ) signifikant. Die MCS ( $p=0,075$ ;  $\eta_p^2=0,08$ ) und die Subskalen SOFU ( $p=0,093$ ;  $\eta_p^2=0,08$ ) und PSYC ( $p=0,221$ ;  $\eta_p^2=0,06$ ) präsentierten keinen signifikanten Gesamtzeiteffekt.

Es folgt eine ausführlichere Betrachtung der einzelnen Subskalen des Short Form Gesundheitsfragebogens.

Die Subskala der Körperliche Funktionsfähigkeit (KÖFU) näherte sich postoperativ dem Mittelwert der Referenz an, konnte diesen aber nicht erreichen (Abb. 18). Es zeigten sich signifikante Teilzeiteffekte zwischen MZP 2 und MZP 3 ( $\eta_p^2=0,31$ ) sowie MZP 3 und MZP 4 ( $\eta_p^2=0,32$ ). Die KÖFU präsentierte sich 6 Monate postoperativ mit  $76,4 \pm 15,6$  Punkten auf ihrem höchsten Niveau, um danach bis zu 2 Jahre postoperativ wieder leicht abzunehmen. Dennoch konnte 2 Jahre postoperativ ein signifikant höherer Wert als präoperativ gezeigt werden ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,46$ ).

Die Subskala für die Körperliche Rollenfunktion (KÖRO) präsentierte sich über den gesamten Beobachtungszeitraum mit niedrigeren Mittelwerten als die Referenzgruppe (Abb. 19). Auffallend ist eine Abnahme um  $\Delta=30$  Punkte zwischen MZP 1 und MZP 2 ( $\eta_p^2=0,36$ ). Im Studienverlauf zeigten sich ebenfalls signifikante Teilzeiteffekte zwischen MZP 2 und MZP 3 ( $\eta_p^2=0,43$ ), MZP 3 und MZP 4 ( $\eta_p^2=0,26$ ), sowie MZP 4 und MZP 5 ( $\eta_p^2=0,32$ ), sodass 1 Jahr postoperativ der höchste Wert mit  $83,0 \pm 30,4$  Punkten erreicht wurde. Dieses Niveau konnte mit einer Abnahme von 8 Punkten bis zu 2 Jahren postoperativ nicht gehalten werden. Dennoch zeigt sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt mit einer Zunahme von  $\Delta=30$  Punkten zwischen MZP 1 und MZP 6 ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,48$ ).

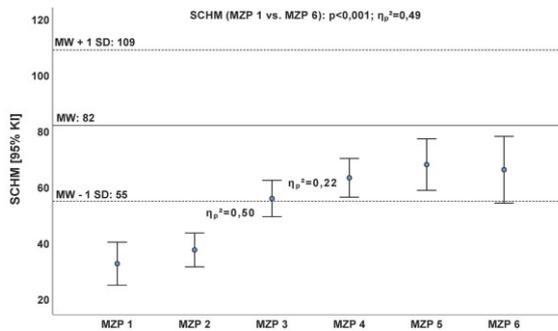


**Abb. 18:** KÖFU im Längsschnitt

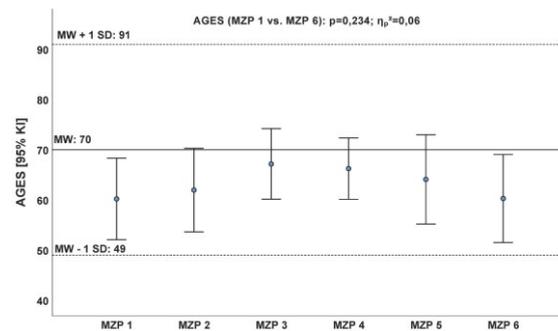
**Abb. 19:** KÖRO im Längsschnitt

Die Analyse der Subskala des Körperlichen Schmerzes (SCHM) zeigte über den gesamten Studienzeitraum eine signifikante Mittelwertdifferenz von  $\approx 34$  Punkten (MZP 1 vs. MZP 6:  $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,49$ ) (Abb. 20). Auch zwischen MZP 2 und MZP 3 ( $\eta_p^2=0,50$ ), sowie MZP 3 und 4 ( $\eta_p^2=0,22$ ) zeigten sich signifikante partielle Effekte. Zu MZP 5 konnte das höchste Niveau mit  $68,0 \pm 22,3$  Punkten erreicht werden, was aber dennoch mit 14 Punkten unterhalb des Referenzwertes lag.

Der Subskalenbereich der Allgemeine Gesundheitswahrnehmung (AGES) zeigte weder signifikante partielle Effekte zwischen einzelnen Messzeitpunkten, noch einen signifikanten Gesamtzeiteffekt ( $p=0,234$ ;  $\eta_p^2=0,06$ ; Abb. 21). Das Niveau lag sowohl präoperativ als auch 2 Jahre postoperativ mit  $\Delta \approx 10$  Punkten unterhalb des Referenzwertes. Zum MZP 3 konnte mit  $67,2 \pm 17,0$  der höchste Wert erreicht werden.



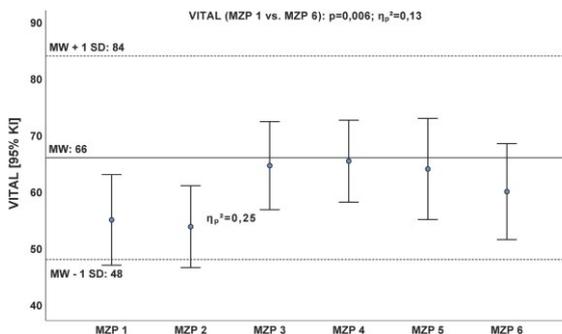
**Abb. 20:** SCHM im Längsschnitt



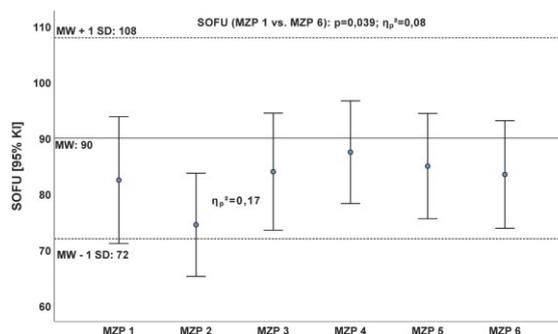
**Abb. 21:** AGES im Längsschnitt

Der Subskalenbereich der Vitalität (VITAL) präsentierte zwischen MZIP 1 und MZIP 6 eine signifikante Mittelwertdifferenz von  $\Delta \approx 5$  Punkten ( $p=0,006$ ;  $\eta_p^2=0,13$ ) (Abb. 22). Auch zwischen MZIP 2 und MZIP 3 zeigte sich ein signifikanter Teilzeiteffekt ( $\eta_p^2=0,25$ ). Zum Zeitpunkt 6 Monate postoperativ konnte mit dem höchsten Wert von  $65,4 \pm 17,6$  fast das Niveau der Referenzgruppe erreicht werden. Im Verlauf zeigte sich jedoch bis zu 2 Jahre postoperativ wieder eine Abnahme von  $\Delta \approx 5$  Punkten (MZIP 4 vs. MZIP 6).

Die Analyse der Sozialen Funktionsfähigkeit (SOFU) ergab über den gesamten Messzeitraum keinen signifikanten Gesamtzeiteffekt ( $p=0,093$ ;  $\eta_p^2=0,08$ ) (Abb. 23). Postoperativ ergab sich zu MZIP 2 eine Reduktion gegenüber dem präoperativen Wert von  $\Delta \approx 8$  Punkten. Im Verlauf zeigte sich ein signifikanter partieller Effekt zwischen MZIP 2 und MZIP 3 ( $\eta_p^2=0,17$ ). Ein halbes Jahr postoperativ konnte der höchste mittlere Punktwert mit  $87,5 \pm 22,2$  erreicht werden, auch hier wurde aber über den gesamten Messzeitraum nicht das Niveau der Referenzgruppe erreicht.



**Abb. 22:** VITAL im Längsschnitt

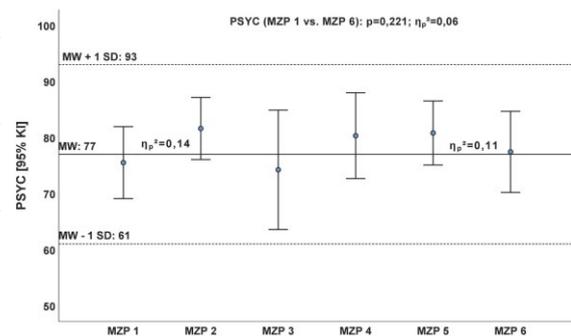
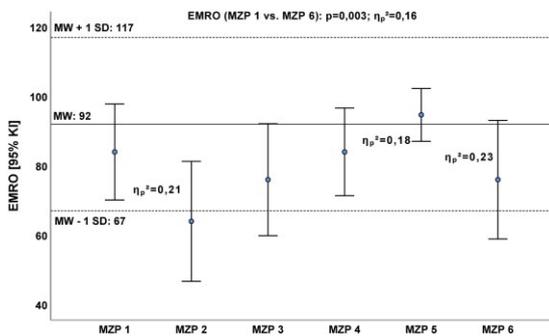


**Abb. 23:** SOFU im Längsschnitt

Die Subskala der emotionalen Rollenfunktion (EMRO) zeigte zunächst eine signifikante Reduktion um 20 Punkte zwischen MZIP 1 und MZIP 2 ( $\eta_p^2=0,21$ ; Abb. 24). Zwischen MZIP 4 und MZIP 5 konnte ein signifikanter partieller Effekt beobachtet werden ( $\eta_p^2=0,18$ ). Zu MZIP 5 konnte der höchste Punktwert erreicht werden, welcher mit 3 Punkten über der Referenz lag. Mit einer darauffolgenden Reduktion von 19 Punkten von MZIP 5 zu

MZP 6 ( $\eta_p^2=0,23$ ) lag 2 Jahre postoperativ das Niveau unter dem präoperativen Wert. Der Gesamtzeiteffekt mit einer Reduktion um 8 Punkte erwies sich als signifikant ( $p=0,003$ ;  $\eta_p^2=0,16$ ).

Der Subskalenbereich des Psychischen Wohlbefindens (PSYC) konnte keinen signifikanten Gesamtzeiteffekt präsentieren ( $p=0,221$ ;  $\eta_p^2=0,06$ ; Abb. 25). Es zeigten sich signifikante partielle Effekte zwischen MZP 1 und MZP 2 ( $\eta_p^2=0,14$ ), sowie zwischen MZP 5 und MZP 6 ( $\eta_p^2=0,11$ ). Insgesamt betrachtet zeigte das PSYC durchschnittlich bis auf MZP 1 und MZP 3 höhere Werte als die Referenzgruppe.



**Abb. 24:** EMRO im Längsschnitt

**Abb. 25:** PSYC im Längsschnitt

In Tab. 9 kann die längsschnittliche Entwicklung des Items der Gesundheitsveränderung (GVER) betrachtet werden. Präoperativ schätzten die Mehrheit der Patienten (44%) ihren Gesundheitszustand „etwas schlechter“ als im vergangenen Jahr ein. Bereits zu MZP 2 beurteilte die Mehrheit der Patienten (40%) ihren Gesundheitszustand „etwas besser“ als vor einem Jahr ein. Auch in der darauffolgenden Messung schätzte fast die Hälfte der Patienten ihren Gesundheitszustand „etwas besser“ als vor einem Jahr ein. Auch ein halbes Jahr postoperativ beurteilten 52% der Patienten ihren Gesundheitszustand „etwas besser“ als im vergangenen Jahr. Zu diesem Messzeitpunkt beurteilte keiner der Probanden seinen Gesundheitszustand „etwas“ oder „viel schlechter“ als vor einem Jahr. Sowohl 1 Jahr (56%) als auch 2 Jahre postoperativ (32%) schätzte die Mehrheit der Patienten ihren Gesundheitszustand „viel besser“ als vor einem Jahr ein. Es zeigte sich jedoch auch ein zunehmender Anteil an Patienten, die ihren Gesundheitszustand „etwas“ oder „viel schlechter“ als vor einem Jahr einschätzten. Insgesamt betrachtet führte die operative Beinachsenkorrektur 2 Jahre postoperativ zu einer positiveren Einschätzung des individuellen Gesundheitszustandes.

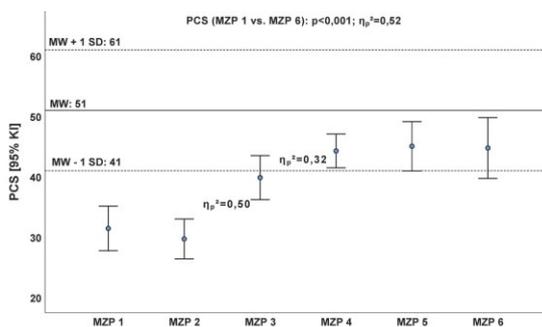
**Tab. 9:** SF-36-Skalenwert: Gesundheitsveränderung (GVER) [%]. Maxima sind fett markiert

	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4	MZP 5	MZP 6
„Derzeit viel besser als vor einem Jahr“	0	20	28	44	<b>56</b>	<b>32</b>
„Derzeit etwas besser als vor einem Jahr“	20	<b>40</b>	<b>48</b>	<b>52</b>	20	28
„Etwa so wie vor einem Jahr“	20	20	20	4	20	28
„Derzeit etwas schlechter als vor einem Jahr“	<b>44</b>	20	4	0	4	4
„Derzeit viel schlechter als vor einem Jahr“	16	0	0	0	0	8

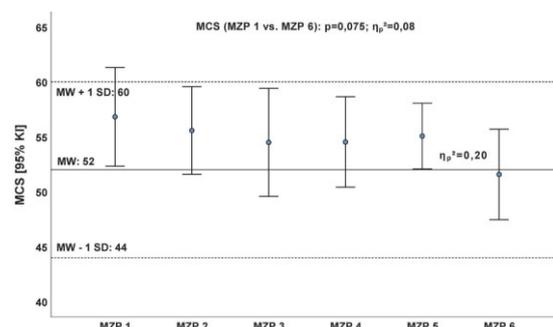
Die jeweiligen Subskalen lassen sich zu einer körperlichen (KÖRO, KÖFU, SCHM, AGES) und einer psychischen Summenskala (VITA, SOFU, EMRO, PSYC) zusammenfassen.

Die körperliche Summenskala (PCS) lag mit einem Unterschied von  $\Delta \approx 19$  Punkten präoperativ unter dem Niveau der Referenzgruppe (Abb. 26). Mit zunehmendem postoperativem Intervall näherte sich der Wert dem Mittelwert der Referenzgruppe an. Es zeigten sich signifikante partielle Effekte zwischen MZP 2 und MZP 3 ( $\eta_p^2=0,50$ ), sowie zwischen MZP 3 und MZP 4 ( $\eta_p^2=0,32$ ). Ein Jahr postoperativ konnte das höchste Niveau der körperlichen Summenskala erreicht werden. Über den gesamten Studienzeitraum zeigte sich eine signifikante Zunahme ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,52$ ).

Bezüglich der psychischen Summenskala (MCS) konnten präoperativ das höchste Niveau beobachtet werden, welches über dem Referenzwert lag (Abb. 27). Postoperativ sank der Wert bis zum Niveau der Referenzgruppe. Zwischen MZP 5 und MZP 6 zeigte sich ein signifikanter partieller Effekt ( $\eta_p^2=0,20$ ), jedoch konnte kein signifikanter Gesamtzeiteffekt festgestellt werden ( $p=0,075$ ;  $\eta_p^2=0,08$ ).

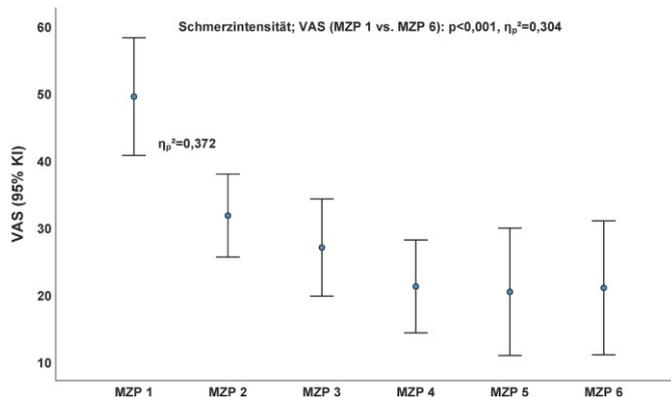


**Abb. 26:** PCS im Längsschnitt



**Abb. 27:** MCS im Längsschnitt

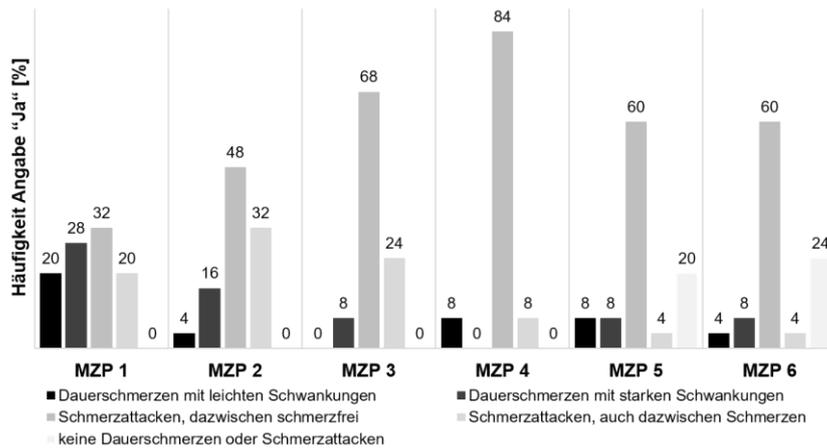
Die Schmerzintensität der letzten 24 h wurden zu allen Messzeitpunkten anhand einer Visuellen Analogskala erfasst (Abb. 28). Bereits 6 Wochen postoperativ zeigte sich eine signifikante Reduktion der Schmerzintensität im präoperativen Vergleich ( $\eta_p^2=0,37$ ). Im weiteren Verlauf konnte ein weiterer Rückgang der Schmerzintensität beobachtet werden. Nach einem halben Jahr postoperativ blieb die Schmerzintensität auf einem konstanten Niveau. Es fielen beträchtlich große Standardabweichungen auf. Es zeigte sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ( $p<0,001$ ;  $\eta_p^2=0,30$ ).



**Abb. 28:** Längsschnittliche Darstellung VAS-Werte

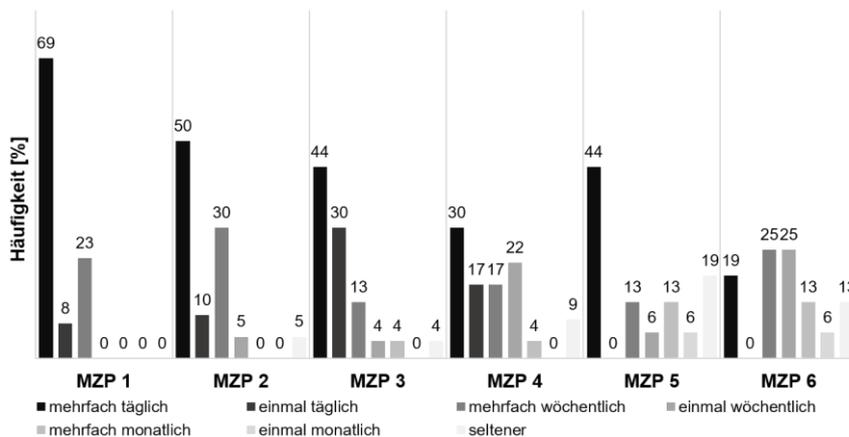
Anhand eines selbst erstellten Fragebogens wurde die Schmerzhäufigkeit untersucht. In den folgenden Abbildungen ist eine Gegenüberstellung der Dauerschmerzen gegen die Schmerzattacken, sowie eine Charakterisierung der Schmerzattacken hinsichtlich ihrer Anzahl und Dauer, sowie eine Untersuchung der tageszeitlichen Abhängigkeit der Schmerzen dargestellt.

Im Studienverlauf zeigte sich eine Abnahme des Anteils der Patienten mit Dauerschmerzen und Zunahme des Anteils der Patienten mit Schmerzattacken oder Schmerzfreiheit (Abb. 29). Präoperativ zeigten insgesamt 48% der Patienten Dauerschmerzen mit leichten oder starken Schwankungen. Zwei Jahre postoperativ präsentierten sich nur noch 12% der Patienten mit Dauerschmerzen mit leichten oder starken Schwankungen. Sowohl der Anteil der Patienten mit Schmerzattacken als auch der Anteil der Patienten mit weder Dauerschmerzen noch Schmerzattacken stieg postoperativ. Zwei Jahre postoperativ konnte bei 24% der Patienten eine Schmerzfreiheit ohne Angabe von Dauerschmerzen oder Schmerzattacken beobachtet werden.



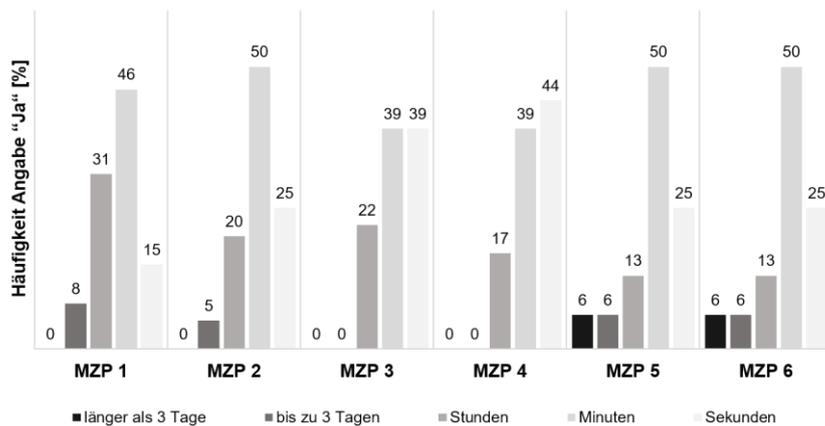
**Abb. 29: Dauerschmerzen vs. Schmerzattacken**

Die Schmerzattacken der Probanden wurden anhand ihrer Anzahl charakterisiert (Abb. 29). Die Angabe „mehrfach täglich“ zeigte eine deutliche Reduktion von 50% im Vergleich von MZP 1 zu MZP 6. Insgesamt betrachtet nahm die Häufigkeit der Schmerzattacken im Studienverlauf ab. Zwei Jahre postoperativ erlebten insgesamt  $\approx 19\%$  der Probanden mit Schmerzattacken täglich Schmerzattacken,  $\approx 50\%$  mehrfach oder einmal wöchentlich Schmerzattacken und  $\approx 32\%$  der Probanden seltener als einmal wöchentlich Schmerzattacken.



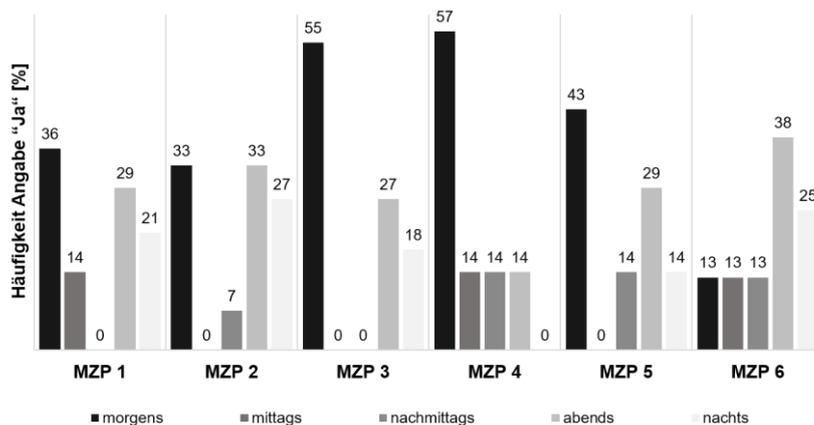
**Abb. 30: Anzahl Schmerzattacken**

Auch die Dauer der Schmerzattacken wurde erfasst (Abb. 31). Über den gesamten Messzeitraum dominierte eine kurze Länge der Schmerzattacken über einige Sekunden bis Minuten. Der Anteil der Probanden, die Schmerzattacken länger als 3 Tage erlebte, nahm jedoch 1 Jahr postoperativ und 2 Jahre postoperativ zu (MZP 5: 6%; MZP 6: 6%).



**Abb. 31: Dauer Schmerzattacken**

Im Folgenden soll die tageszeitliche Abhängigkeit der Schmerzen betrachtet werden (Abb. 31). Im Verlauf der Studie zeigte sich eine Abnahme der Angabe einer tageszeitlichen Abhängigkeit der Schmerzen. Präoperativ gaben 56% der Probanden eine tageszeitliche Abhängigkeit an, wohingegen 2 Jahre postoperativ nur noch 32% ihre Schmerzen als besonders stark zu einem bestimmten Zeitpunkt wahrnahmen. Die Angabe, besonders am Morgen Schmerzen zu empfinden, nahm von MZP 1 zu MZP 4 um 21% zu, war bis zu MZP 6 jedoch wieder um 44 % rückläufig. Mittägliche und nachmittägliche Schmerzen wurden insgesamt selten angegeben, während 2 Jahre postoperativ abendliche (38%) und nächtliche (25%) Schmerzen dominierten.



**Abb. 32: Tageszeitliche Abhängigkeit**

Um die klinische Relevanz statistisch signifikanter Veränderungen zu beurteilen, kann der minimale klinisch relevante Unterschied (MCID) herangezogen werden (Katz et al. 2015). Dieser erstmals von Jaeschke et al. (1989) beschriebene Schwellenwert ist definiert als der kleinste Unterschied in Punktzahl, der von den Patienten als vorteilhaft empfunden wird und ohne störende Nebenwirkungen und übermäßigen Kosten eine

Änderung der Behandlung des Patienten erfordern würde. Tab. 10 gibt einen Überblick über die mittleren absoluten Veränderungen der Schmerzintensität und gesundheitsbezogenen Lebensqualität der Patienten entsprechend der präoperativ erhobenen Werte.

Für den SF-36 wurden vom Entwickler 3 Punkte als MCID für PCS und MCS empfohlen, was sich als strenger Maßstab erwiesen hat (Frendl und Ware 2014). Angst et al. (2001) beschrieben für Patienten mit Gonarthrose nach Rehabilitation einen MCID von nur 2 Punkten. Somit kann die Zunahme der körperlichen Gesundheit gemessen anhand der PCS bereits ab 12 Wochen postoperativ als klinisch bedeutsam gewertet werden. Im Gegensatz dazu zeigte sich ab 2 Jahren postoperativ eine klinisch bedeutsame Abnahme der MCS.

Für die Definition eines MCID auf der VAS bei Patienten mit Gonarthrose zeigt sich bei Analyse der Literatur kein einheitlicher Konsens (Stauffer et al. 2011; Tubach et al. 2005; Katz et al. 2015). Bei einer wie in der vorliegenden Studie beobachteten mittleren Baseline wird ein MCID von 27 mm empfohlen (Tubach et al. 2005). Somit ist die Reduktion der Schmerzintensität ab 6 Monaten postoperativ als klinisch bedeutsam zu bewerten.

**Tab. 10:** *Mittlere absolute Veränderungen der Schmerzintensität und gesundheitsbezogenen Lebensqualität der Patienten bezüglich der Baseline (MZP 1).*

	<b>MZP 2</b>	<b>MZP 3</b>	<b>MZP 4</b>	<b>MZP 5</b>	<b>MZP 6</b>
<b>VAS</b>	-17,7	-22,5	-28,3	-29,1	- 28,5
<b>PCS</b>	-1,7	8,4	12,8	13,6	13,3
<b>MCS</b>	-1,2	-2,3	-2,3	-1,8	-5,2

Die operative Beinachsenkorrektur führt zwei Jahre postoperativ zu einer klinisch bedeutsamen Zunahme der körperlichen Gesundheit, einer Abnahme der Schmerzintensität sowie einer Reduzierung der Schmerzhäufigkeit. Hypothese 5 ist somit anzunehmen.

## 5 Diskussion

### 5.1 Ergebnisdiskussion

Ziel dieser prospektiven, longitudinalen Kohortenstudie war es, die Effekte der Umstellungsosteotomie bei Patienten mit symptomatischer medialer Gonarthrose bei varischer Beinachse auf die posturale Stabilität und Regulation, sowie gesundheitsbezogene Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit bis zu zwei Jahre postoperativ zu prüfen. Von besonderem Interesse waren hierbei die langfristigen Auswirkungen im Vergleich zum präoperativen Ausgangszustand. Untersucht werden sollte dabei auch der Einfluss einer beidseitig durchgeführten HTO auf die Gewichtsverteilung, sowie der Einfluss des Zeitpunktes der postoperativen Materialentfernung auf die posturale Stabilität und Lebensqualität sowie Schmerzintensität.

Bezüglich der anthropometrischen Daten zeigte sich in der Patientenkohorte präoperativ ein mittleres Alter von  $56,6 \pm 5,01$  Jahren. Damit entsprachen die Patienten der Empfehlung der ISAKOS, welche die HTO insbesondere für Patienten im Alter zwischen 40 und 60 Jahren empfiehlt (Brinkman et al. 2008). Mit einem mittleren BMI von  $30,8 \pm 3,65$   $\text{kg/m}^2$  präoperativ und  $31,1 \pm 3,87$   $\text{kg/m}^2$  zwei Jahre postoperativ bewegten sich die Probanden an der Grenze zwischen Übergewicht und Adipositas Grad 1. Übergewicht stellt einen bedeutenden Risikofaktor für die Entstehung von Gonarthrose dar (Felson 2004). Vor allem bei Patienten mit sowohl varischer Beinachse als auch Übergewicht konnte ein erhöhtes Risiko beobachtet werden (Brouwer et al. 2007). Somit stellt Übergewicht ein typisches Merkmal von HTO-Patienten dar. Im Gegensatz dazu zeigten die ausgewählten asymptomatischen Patienten der Referenzgruppe einen BMI  $27,4 \pm 3,7$   $\text{kg/m}^2$ . Bezüglich des idealen Patienten für die HTO erstreckte sich die Empfehlung der ISAKOS auf Patienten  $<30$   $\text{kg/m}^2$  (Brinkman et al. 2008). Jedoch zeigten Belsey et al. (2021) in einem Review, dass auch Patienten mit hohem BMI eine Rückkehr zu einem guten Aktivitätslevel nach HTO möglich war und sich entgegen traditioneller Empfehlungen die Indikationen für die HTO erweitern. Zudem stellten Herbst et al. (2022) fest, dass übergewichtige Patienten bezüglich klinischer Ergebnisse und gesundheitsbezogener Lebensqualität im gleichen Ausmaß wie normalgewichtige Patienten von einer HTO profitieren. Da das initial rekrutierten Patientenkollektiv einen überwiegenden Anteil männlicher Probanden präsentierte, wurden zur Vermeidung geschlechterspezifischer Verzerrungen nur männliche Probanden in die Datenanalyse eingeschlossen, wodurch die Zusammensetzung des Studienkollektivs nicht der typischen Geschlechtsstruktur der HTO-Patienten in Deutschland entspricht. Die Patientenkohorte kann nicht uneingeschränkt als repräsentativ angesehen werden und es kann nur eingeschränkt von einer Validität der Studienergebnisse für Patienten nach

HTO in Deutschland ausgegangen werden. Auch die Vergleichbarkeit mit anderen Studien ist eingeschränkt.

Zur Evaluation der **posturalen Stabilität und Regulation** wurden über den gesamten Studienzeitraum mittels des IBS posturographische Parameter erhoben.

Sowohl präoperativ als auch zwei Jahre postoperativ nach HTO zeigte sich der Stabilitätsindikator (ST) der Patienten im Vergleich zur Referenzgruppe erhöht, was auf eine herabgesetzte posturalen Stabilität der Patienten hindeuten lässt. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch, dass präoperativ die Mehrzahl der Patienten eine den Kontrollen gegenüber vergleichbare posturale Stabilität aufwies. Möglicherweise bedingen individuelle Lösungsstrategien eine hohe Variabilität. Die posturalen Subsysteme präsentierten sich über den gesamten Studienverlauf mit höheren Werten im Vergleich zur Referenzgruppe, jedoch waren mit Ausnahme des cerebellären Systems (F7-8) die Unterschiede nicht signifikant. Dies lässt auf eine ineffektive Arbeitsweise der posturalen Subsysteme bei Patienten vor HTO schließen. Am ehesten kann hier, in Übereinstimmung mit Bartels et al. (2019), von einer kompensatorischen Mobilisation der einzelnen Subsysteme ausgegangen werden. Über den gesamten Beobachtungszeitraum konnten keine signifikante Veränderung der Leistungsfähigkeit der posturalen Subsysteme gezeigt werden. Möglicherweise reichen die mechanischen Veränderungen durch die HTO nicht aus, um Veränderungen seitens der posturalen Subsysteme zu bewirken. Die von uns beobachtete präoperativ herabgesetzte posturale Stabilität deckt sich mit diversen Studien, welche bei Patienten mit Gonarthrose Einschränkungen der posturalen Stabilität und Kontrolle nachweisen konnten (Hurley et al. 1997; Wegener et al. 1997; Hassan et al. 2001; Hinman et al. 2002; Kim et al. 2011; Alshahrani und Reddy 2023). Die Vergleichbarkeit mit genannten Studien wird durch unterschiedliche Messmethoden (Swaymeter; Balance System<sup>TM</sup>; Balance Performance Monitor (BPM)) und klinische Parameter für das Outcome (centre of gravity; sway index; balance and sway coefficient; total body sway), sowie unterschiedliche Standzeiten (7 s, 10 s, 30 s) und -positionen (beidbeinig, einbeinig, mit/ohne visuelle Deprivation, mit/ohne Schaumstoff-unterlage) gemindert. Lediglich Kim et al. (2011) nutzten ebenfalls die Messmethodik des IBS und beobachteten einen signifikant höheren Stabilitätsindex in der Gruppe mit moderater bis schwerer Gonarthrose im Vergleich zu Patienten mit leichter Gonarthrose, sowie gesunden Kontrollen. Bei den Patienten mit moderater bis schwerer Gonarthrose zeigten sich im Vergleich zu gesunden Kontrollen in den Spektren F 5-6 und F 7-8 größere Instabilitäten. Im Einklang dazu zeigten sich in unserer Studie die größten Abweichungen zu den gesunden Kontrollen ebenfalls in den Frequenzbereichen F 5-6 und F7-8. Kim et al. (2011) leiteten ab, dass Patienten mit moderat bis schwerer Gonarthrose sich tendenziell

vermehrt auf ihr Sehvermögen verlassen, um die posturale Instabilität auszugleichen. Dabei sahen sie den Grund für die verminderte Leistungsfähigkeit in der Ermüdung des Bewegungsapparates und der Abnahme motorischer Funktionen von Wirbelsäule und unteren Extremitäten begründet.

Wenige Studien haben bislang den Einfluss von Interventionen auf die posturale Stabilität bei Patienten mit Gonarthrose untersucht (Hassan et al. 2002; Birmingham et al. 2001b; Hunt et al. 2009; Zhang et al. 2015; Sabashi et al. 2023). Dabei betrachteten Hassan et al. (2002) und Birmingham et al. (2001b) den Einfluss einer reversiblen Intervention auf die posturale Stabilität von Patienten mit Gonarthrose. Trotz gesunkenem Schmerzempfinden nach Injektion von Lokalanästhetikum blieb die posturale Stabilität im Stand mit geschlossenen Augen unverändert (Hassan et al. 2002). Auch das einstündliche Tragen einer Valgusschiene hatte bei Patienten mit Varusgonarthrose keinen signifikanten Effekt auf die posturale Kontrolle (Birmingham et al. 2001b). Mit dem Einfluss eines irreversiblen Eingriffes, wie der Umstellungsosteotomie, auf die posturale Stabilität haben sich bisher nur vereinzelt Studien beschäftigt (Hunt et al. 2009; Zhang et al. 2023; Sabashi et al. 2023). Keine der Studien untersuchte dabei aber die langfristigen Effekte, welche mehr als ein Jahr postoperativ auftraten. Hinsichtlich des Alters differierten die in den Studien untersuchten Patientenkollektive unwesentlich (Zhang et al. (2023):  $55,2 \pm 4,5$  Jahre; (Sabashi et al. 2023):  $55,9 \pm 8,2$  Jahre) vom Patientenkollektiv der vorliegenden Studie. Nur in der Studie von Hunt et al. (2009) wurde ein deutlich jüngeres Patientenkollektiv (mittleres Alter:  $46,0 \pm 9,1$  Jahre) untersucht. Bezüglich des in der vorliegenden Studie beobachteten Übergewichts zeigten sich vergleichbare Daten (Zhang et al. (2023): BMI  $28,9 \pm 4,5$  kg/m<sup>2</sup>; Hunt et al. (2009): BMI  $28,6 \pm 4,5$  kg/m<sup>2</sup>; (Sabashi et al. 2023): BMI  $29,3 \pm 4,8$  kg/m<sup>2</sup>). Wichtig ist jedoch anzumerken, dass die Autoren bezüglich der Geschlechterzusammensetzung jeweils heterogene Studienpopulationen betrachteten. Zhang et al. (2023) untersuchten 63% männliche und 37% weibliche Studienpatienten. In der Studie von Hunt et al. (2009) nahmen 90% männliche und 10% weibliche Probanden teil. Lediglich Sabashi et al. (2023) untersuchten mehr weibliche (60%) und weniger männliche (40%) Patienten. Interessanterweise deuteten die Ergebnisse von Zhang et al. (2015) darauf hin, dass bei männlichen Probanden die Auswirkungen von Gonarthrose auf die posturale Kontrolle stärker ausgeprägt sind.

Die erste Studie, welche die posturale Stabilität von Patienten nach MOW-HTO prüfte war von Hunt et al. (2009). Zwar zeigten sich postoperativ niedrigere Maße des Druckmittelpunktes (COP), jedoch waren die Effektgrößen klein (mittlere Abnahme: 4,4-8,1%,  $d < 0,34$ ) und die Veränderung nicht signifikant ( $p > 0,05$ , (Hunt et al. 2009). Auch Sabashi et al. (2023) untersuchten 6 Wochen nach HTO die posturale Stabilität bei 15

Patienten anhand der COP-Werte im Einbeinstand. Sie konnten eine signifikante Abnahme der Spannweite des COP in mediolateraler Richtung nachweisen, jedoch nahm die mittlere Geschwindigkeit des COP in der anteriorposterioren Richtung signifikant zu. Die unterschiedlichen Ergebnisse beider Studien sollten im Anbetracht des höheren Schweregrads der Arthrose des von Sabashi et al. (2023) untersuchten Patientenkollektivs (Arthrosegrad von Kellgren-Lawrence  $> 3$ ), der differierenden OP-Methode (umgekehrter V-förmiger HTO) und des kürzeren Zeithorizonts (6 Wochen postoperativ) betrachtet werden. Ob sich die Abnahme der Spannweite des COP in mediolateraler Richtung bei dem untersuchten Patientenkollektiv auch langfristig etablieren kann, bleibt zu untersuchen. Im Gegensatz zu der in den vorhergehenden Studien genutzter anspruchsvollen Testposition ohne Deprivation von Informationen, untersuchten Zhang et al. (2023) bei 32 Patienten die Entwicklung der posturalen Stabilität im aufrechten Stand sowohl unter visueller und somatosensorischer Deprivation nach HTO bis zu ein Jahr postoperativ. Im Vergleich zu Kontrollpersonen ohne Pathologie der unteren Extremität zeigte sich die posturale Stabilität präoperativ gemindert. Interessanterweise zeigten sich hier jedoch die Unterschiede zu gesunden Kontrollen präoperativ nur bei Hinzunahme störender Informationen. Auch blieb die posturale Stabilität und Kontrolle unter verfügbaren visuellen und somatosensorischen Informationen ein Jahr postoperativ unverändert. Hingegen konnte unter Deprivation sowohl visueller und somatosensorischer Informationen ein Jahr postoperativ eine höhere posturale Stabilität als vor der Operation gezeigt werden. Zhang et al. (2023) schlossen postoperativ auf eine bessere Integrationsfähigkeit der somatosensorischen Informationen und Verschiebung der sensomotorischen Dominanz vom Sehvermögen auf die Propriozeption. Diese Beobachtungen stehen teilweise im Einklang mit unseren Ergebnissen. Auch wir konnten präoperativ eine herabgesetzte posturale Stabilität nachweisen, jedoch im Studienverlauf keine Veränderung der posturalen Stabilität. Dabei ist wichtig anzumerken, dass der ST in unserer Studie für alle einzelnen Testpositionen separat, unter anderem auch unter Deprivation visueller und somatosensorischer Information, berechnet und anschließend zwecks Übersichtlichkeit gemittelt wurde. Somit ist eine differenzierte Betrachtung des Einflusses der visuellen und somatosensorischen Deprivation nicht Bestandteil der vorliegenden Studie. Ob bei differenzierter Betrachtung der einzelnen Testpositionen vergleichbare Entwicklungen der posturalen Stabilität beobachtet werden können, sollte weiter untersucht werden. Es besteht die Möglichkeit, dass das aufrechte Stehen ohne Deprivation von Informationen nicht anspruchsvoll genug ist, um Veränderungen in der posturalen Stabilität wiederzugeben und differenzierterer Betrachtung bedarf. Auch könnten die

mechanischen Veränderungen durch die HTO nicht ausreichen, um die posturale Kontrolle zu beeinflussen.

Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass die posturale Stabilität von HTO-Patienten präoperativ herabgesetzt ist. Die kurz- oder langfristigen Auswirkungen mechanischer Beinachsenkorrekturen auf die posturale Stabilität scheinen sich nur unter Deprivation von visuellen oder somatosensorischen Informationen zu zeigen. Eine differenzierte Betrachtung der langfristigen Entwicklung der posturalen Stabilität nach HTO sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Bezüglich der **Gewichtsverteilung** wurden unterschiedliche Parameter des IBS verwendet. Der Gewichtsverteilungsindex (WDI), welcher sowohl anteriorposteriore als auch mediolaterale Informationen enthält, nahm sechs Wochen postoperativ zu. Dies deutet darauf hin, dass sich die Gewichtsverteilung durch den Eingriff kurzfristig stark verändert hatte. Im Verlauf ab 12 Wochen postoperativ standen die Probanden gleichmäßiger auf den vier Kraftmessplatten als präoperativ, was sich in einem niedrigeren WDI widerspiegelt. Über den gesamten Beobachtungszeitraum zeigte die Synchronisation (Synch) keine signifikanten Unterschiede zur Referenzgruppe. Weiterhin wurde die anteriorposteriore Gewichtsverteilung (Heel) und mediolaterale Gewichtsverteilung (Left) erfasst. Bei allen Probanden zeigte sich eine vermehrte Vorfußbelastung, welche bei den beidseitig operierten Probanden besonders stark ausgeprägt war. Bei Patienten mit bilateraler Gonarthrose konnten Alshahrani und Reddy (2023) im Vergleich zu Gesunden eine Einschränkung der Kraft des M. quadriceps zeigen. Entsprechende muskuläre Einschränkungen und ein durch Schmerzen bedingter eingeschränkter Bewegungsumfang stellen möglicherweise Ursachen für die vermehrte Vorfußbelastung in der vorliegenden Studie dar. Präoperativ zeigte sich bei den nur einseitig operierten Patienten eine Entlastung der betroffenen Seite. Im Studienverlauf erhöhten die Probanden das auf die operierten Seite gebrachte Gewicht und zeigten so zwei Jahre postoperativ eine verbesserte mediolaterale Gewichtsverteilung. Im Vergleich der nur einseitig operierten zu den beidseitig operierten Patienten konnte keine wesentlich ausbalanciertere Gewichtsverteilung hinsichtlich WDI, mediolateraler oder anteriorposteriorer Gewichtsverteilung bei den beidseitig operierten Patienten festgestellt werden.

Die der Referenzgruppe entsprechenden Ergebnisse der Synchronisation stehen im Einklang mit der Studie von Kim et al. (2011), welche bei Probanden mit Gonarthrose ebenfalls keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Synchronisation zu gesunden Probanden beobachten konnten. Patienten mit Gonarthrose scheinen demnach keine Defizite seitens der Fußkoordination zu haben.

Die präoperative Entlastung des betroffenen Beins steht im Einklang mit verschiedenen Studien, die bei Patienten mit einseitiger Gonarthrose bei alltäglichen Bewegungsmustern wie im Gang oder Übergängen aus dem Sitzen zum Stand eine Entlastung der betroffenen Seite zeigen konnten (Hurwitz et al. 2000; Boonstra et al. 2010; Christiansen und Stevens-Lapsley 2010; Creaby et al. 2012). Dabei war eine Abnahme des Schmerzniveaus mit der Zunahme der Belastung der betroffenen Extremität im Gang assoziiert. Der Einfluss einer Intervention führt interessanterweise zu unterschiedlichen Kompensationsstrategien. Nach KTEP belasteten Patienten mit bilateraler Gonarthrose im aufrechten Stand vermehrt die operierte Seite (Harato et al. 2010). Entscheidend war hierbei jedoch, ob ein Extensionsdefizit des operierten Beines bestand. In diesem Fall wurde das nicht operierte Bein stärker belastet (Harato et al. 2010). Bei Patienten nach Hüft-TEP hingegen zeigte sich eine vermehrte Belastung der nicht-operierten Seite (Talis et al. 2008). Auch bei Amputierten wurde die Beinprothese mit weniger Gewicht belastet (Summers et al. 1987). Bei bilateraler Gonarthrose konnte Harato et al. (2014) trotz ähnlichem Schmerzniveau und radiologisch vergleichbarem Arthrosegrad eine ausgeprägte Asymmetrie der Gewichtsverteilung zeigen. Dabei hatte jeder Patient einen großen Unterschied zwischen beiden Seiten, der mehr als 5% des Körpergewichts betrug. Die stärker belastete Seite wurde im Mittel mit 58% des Körpergewichts belastet. Hingegen zeigten die Patienten mit bilateraler HTO vor der zweiten HTO in unsere Studie keine ähnlich großen Asymmetrien und belasteten die linke Seite mit durchschnittlich 48%. Sechs Monate postoperativ konnte eine annähernd optimale Gewichtsverteilung mit 49% erreicht werden. Diese verbesserte Gewichtsverteilung konnte sich jedoch nicht langfristig (2 Jahre postoperativ) etablieren.

Der Zeitpunkt der **Materialentfernung** zeigte keine nennenswerte Korrelation mit posturographischen Parametern respektive mit den Lebensqualitätssummscores oder der Schmerzintensität. Im Rahmen der Literaturrecherche konnten in keiner der betrachteten Studien Angaben zum Zeitpunkt der postoperativen Materialentfernung gefunden werden. Der Einfluss der Materialentfernung scheint vernachlässigbar zu sein.

Entsprechend der Zielstellung wurden in der vorliegenden Studie **Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit** über einen Zeithorizont von bis zu 2 Jahren postoperativ evaluiert. Die Patienten zeigten ein deutlich herabgesetztes Schmerzniveau nach HTO und konnten ihre Lebensqualität im Bereich der körperlichen Gesundheit steigern. Ebenso zeigte sich eine Abnahme der Schmerzhäufigkeit.

Anhand des SF-36 Gesundheitsfragebogens wurde die Lebensqualität sowohl im Bereich der körperlichen als auch der psychischen Gesundheit quantifiziert. Präoperativ zeigten die Probanden eine deutlich gegenüber der Referenzpopulation herabgesetzte

körperliche Gesundheit (PCS), was sich vor allem in den Subskalen SCHM, KÖFU und KÖRO widerspiegelte. Die psychische Gesundheit (MCS) präsentierte sich präoperativ minimal über dem Niveau der Referenzpopulation. Im Einklang mit unseren Beobachtungen stellten auch Herbst et al. (2020) bei der Untersuchung eines Patientenkollektivs von n=104 vor und bis zu 6 Jahre nach HTO die präoperativ größten Einschränkungen bei den körperlichen Dimensionen der Lebensqualität (SCHM, KÖFU, KÖRO) fest. Im Gegensatz zu unseren Ergebnissen präsentierte das von Herbst et al. (2020) untersuchte Patientenkollektiv auch eine präoperativ deutlich niedrigere MCS. Hierbei sollte das geringere Alter der Patienten und die heterogene Geschlechterzusammensetzung (69% Männer, 31% Frauen) berücksichtigt werden. Auch Ihle et al. (2016) beobachteten bei 96 Patienten vor HTO sowohl klinisch signifikant reduzierte präoperative Werte der MCS als auch der PCS im Vergleich zur Normalbevölkerung. Saier et al. (2017) untersuchten unter Berücksichtigung psycho-pathologischer Komorbiditäten die gesundheitsbezogene Lebensqualität von 64 Patienten bis zu 2 Jahren postoperativ nach HTO. Das untersuchte Patientenkollektiv differierte bezüglich anthropometrischer Daten im Vergleich zu unserer Studie wesentlich im Hinblick auf heterogene Geschlechterzusammensetzung, jüngerem Alter und niedrigerem BMI. Vergleichbare präoperative Einschränkungen der MCS, wie Herbst et al. (2020) und Ihle et al. (2016) beobachteten, konnten Saier et al. (2017) nur in der Gruppe der Patienten mit psychopathologischen Komorbiditäten zeigen, wohin-gegen die PCS sich hier in beiden Gruppen auch deutlich unter dem Referenzniveau präsentierte. Zusammenfassend zeigte sich sowohl im Einklang zu unseren Ergebnissen als auch anhand der aktuellen Studienlage eine präoperativ deutlich herabgesetzte Lebensqualität im Bereich der körperlichen Gesundheit der Patienten (Saier et al. 2017; Ihle et al. 2016; Herbst et al. 2020). Eine begleitende präoperative Einschränkung der psychischen Gesundheit wurde nur von einigen der Autoren beschrieben, wobei diese möglicherweise auf das Vorhandensein psychopathologischer Komorbiditäten zurückzuführen war (Saier et al. 2017).

Über den Beobachtungszeitraum von 2 Jahren spiegelte sich im von uns untersuchten Patientenkollektiv eine starke Zunahme der körperlichen Gesundheit einerseits in der körperlichen Summenskala und andererseits in der Mehrzahl der körperlichen Subskalen (KÖFU, KÖRO, SCHM) wider. Die AGES der Patienten nach HTO blieb vergleichsweise unverändert. Die Zunahme der körperlichen Gesundheit ging nicht mit vergleichbaren Veränderungen der psychischen Gesundheit der Patienten einher. Tatsächlich zeigte sich im beobachteten Studienkollektiv eine klinisch bedeutsame Abnahme der psychischen Summenskala zwei Jahre postoperativ. Diese Abnahme der MCS zeigte sich jedoch nicht signifikant und im Bereich der Subskalen waren

differenzierte Entwicklungen zu beobachten. Die Subskalen SOFU und PSYC zeigten 2 Jahre postoperativ im Vergleich zum präoperativen Wert keine signifikanten Veränderungen. Hingegen präsentierte die Subskala VITAL eine signifikante Zunahme und die EMRO eine signifikante Abnahme, mit jedoch jeweils geringe ausgeprägten Effektstärken. Dies steht im Einklang mit von Busija et al. (2008) berichteten Größenordnungen für die Veränderungen der SF-36-Subskalen nach orthopädischen Eingriffen. Hier konnten unabhängig von der Art des Eingriffes große Effektstärken in den körperlichen Subskalen gezeigt werden. Hingegen konnten nur geringe bis mäßige Effektstärken in den Subskalen, welche psychische und soziale Aspekte messen, ermittelt werden. Im Einklang zu unseren Ergebnissen blieben auch hier die Werte für die AGES der Patienten relativ unverändert. Im Gegensatz zu unseren Daten beobachteten Bastard et al. (2017) retrospektiv eine signifikante Zunahme sowohl der körperlichen als auch der psychischen Summenskala bei 30 Patienten vergleichbaren Alters und BMIs postoperativ nach HTO, wobei sich hier präoperativ deutlich höhere Summenskalenwerte präsentierten. Auch Saier et al. (2017) konnten in der körperlichen und psychischen Summenskala und in den jeweiligen Subskalen mit Ausnahme der AGES signifikante Zunahmen zeigen. Jedoch waren auch in dieser Studie die Effektstärken im Bereich der körperlichen Summenskala größer als in der psychischen Summenskala. Die Autoren postulierten, dass die mediale Gonarthrose insbesondere die körperliche Funktion beeinträchtigt, was mit einer eingeschränkten körperlichen Rollenfunktion einhergeht. Die HTO könne eine ausgezeichnete Verbesserung dieser Funktion bewirken. Unsere Ergebnisse bestätigen diese Hypothese. Weiterhin stellten Saier et al. (2017) fest, dass zwischen Patienten mit und ohne psychopathologischen Komorbiditäten signifikante Unterschiede sowohl in den präoperativ psychischen und funktionellen Beeinträchtigungen als auch den kurzfristigen Verbesserungen nach HTO bestehen. Bis auf eine signifikant längere Rückkehr an den Arbeitsplatz und niedrigeren Werten der psychischen Summenskala postoperativ zeigten sich jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Ihle et al. (2016) beobachteten hingegen, dass ein niedrigerer präoperativer Wert der psychischen Summenskala zu einem schlechteren postoperativen klinischen Ergebnis und einer längeren Dauer der Arbeitsunfähigkeit nach HTO führte. In Betrachtung der Studienlage und unserer Ergebnisse zeigt sich die Entwicklung der Lebensqualität im Bereich der psychischen Gesundheit postoperativ mit geringen Effektstärken und durch psychopathologische Komorbiditäten beeinflusst, hingegen konnten alle Autoren eine postoperative Zunahme der Lebensqualität im Hinblick der körperlichen Gesundheit zeigen (Ihle et al. 2016; Saier et al. 2017; Herbst et al. 2020).

Interessanterweise fanden Saier et al. (2017) die maximalen Verbesserungen bereits 6 bis 12 Monate postoperativ, das Niveau blieb im Anschluss unverändert. Fernerhin zeigten sich auch bei Herbst et al. (2020) 12 Monate postoperativ nach HTO eine signifikante Verbesserung der körperlichen Lebensqualität mit nachfolgendem Plateau. Bei Betrachtung der Ergebnisse von Ihle et al. (2016) fällt auf, dass zwischen 12 und 18 Monaten postoperativ keine signifikante Verbesserung der PCS mehr gezeigt werden konnte. Auch in der vorliegenden Studie wurde in der körperlichen Summenskala und in den Subskalen KÖFU und SCHM bereits ab 6 Monaten postoperativ ein Plateau erreicht und es konnten weiter keine signifikanten Veränderungen mehr zwischen den einzelnen MZP gezeigt werden. Unsere Ergebnisse und die Analyse der Literatur lässt darauf schließen, dass sich die kurzfristigen Veränderungen nach HTO bereits nach 6-12 Monaten postoperativ einstellen. Ob sich diese Veränderungen der Lebensqualität über 2 Jahre postoperativ hinaus weiter etablieren können, sollte weiter untersucht werden. Die Entwicklung der Schmerzintensität wurde anhand der VAS erfasst. Bereits 6 Wochen postoperativ zeigte sich eine signifikante Reduktion der Schmerzintensität im präoperativen Vergleich. Im weiteren Verlauf reduzierte sich das Schmerzniveau weiter, jedoch stellte sich nach einem halben Jahr postoperativ ein Plateau ein. Zudem wurden über den gesamten Zeitraum beträchtlich hohe Standardabweichungen beobachtet. Im Einklang mit unseren Ergebnissen zeigten auch andere Autoren eine vergleichbare langfristige Reduktion der Schmerzintensität postoperativ (Ghinelli et al. 2016; Altay et al. 2016; Saier et al. 2017; van der Woude et al. 2017; Morin et al. 2018). Im Gegensatz zu unseren Ergebnissen beobachteten Altay et al. (2016) eine kontinuierlich signifikante Abnahme der Schmerzintensität bis zu 36 Monaten postoperativ. Jedoch konnten die Autoren im Anschluss auch keine weiteren Veränderungen feststellen. Vergleichbar mit unseren Beobachtungen war in der Studie von Saier et al. (2017) das Maximum an Schmerzreduktion schon ein halbes Jahr nach HTO erreicht und blieb bis 2 Jahre postoperativ konstant. Dies könnte darauf hinweisen, dass die Reduktion der Schmerzintensität sich kurzfristig einstellt und langfristig keine weiteren Veränderungen zu erwarten sind. Zudem zeigten sich in der vorliegenden Studie, analog zu den Ergebnissen von Altay et al. (2016) und Saier et al. (2017) beträchtlich hohe Standardabweichungen. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die langfristige Schmerzreduktion möglicherweise stark von individuellen Gegebenheiten beeinflusst wird. Die Erfassung der Schmerzhäufigkeit erfolgte anhand eines für die Studie erstellten Fragebogens zur individuellen Situation des einzelnen Patienten. Es zeigte sich eine Abnahme des Anteils der Patienten mit Dauerschmerzen und Zunahme des Anteils der Patienten mit Schmerzattacken oder Schmerzfreiheit. Bei den Patienten, die Schmerzattacken angaben, nahm die Häufigkeit der Schmerzattacken im Studienverlauf

ab. Über den gesamten Messzeitraum dominierte eine kurze Länge der Schmerzattacken von einigen Sekunden bis Minuten. Im Verlauf der Studie zeigte sich eine Abnahme der tageszeitlichen Abhängigkeit der Schmerzen. Aufgrund des neuartigen Ansatzes ist die Vergleichbarkeit mit anderen Studien eingeschränkt. Eine Literaturrecherche bezüglich der Charakterisierung der Schmerzhäufigkeit nach HTO erbrachte keine Ergebnisse. In einem Patientenkollektiv von Patienten mit Cox- oder Gonarthrose konnten Hawker et al. (2008) zwei verschiedene Arten von Schmerz identifizieren. Einerseits einen dumpfen, schmerzenden, pochenden Schmerz, der mit Progress der Gonarthrose immer konstanter wurde und zunehmend von kürzeren Episoden eines intensiveren, oft unvorhersehbaren Schmerzes unterbrochen wurde. Davis et al. (2010) untersuchten unter Verwendung des Fragebogens zu intermittierenden und konstanten Arthroseschmerzen (ICOAP) das Auftreten von Schmerzen 6 Monate nach KTEP. Sie konnten sowohl eine Abnahme der Dauerschmerzen als auch der intermittierenden Schmerzen zeigen. Dies deckt sich mit der von uns beobachteten Abnahme des Anteils der Patienten mit Dauerschmerzen, sowie der Abnahme der Häufigkeit der Schmerzattacken im Studienverlauf. Die von uns hingegen beobachtete Zunahme des Anteils der Patienten mit Schmerzattacken liegt vermutlich im Design des Fragebogens begründet.

## **5.2 Limitationen der Arbeit**

Einige Limitationen der durchgeführten prospektiven Längsschnittstudie sind zu beachten. Die finale Stichprobengröße von  $n=25$  ist relativ klein. Die Dropoutrate betrug über den Untersuchungszeitraum von 2 Jahren 34%. Von den initial eingeschlossenen  $n=38$  Probanden mussten nachträglich vier weibliche Probanden ausgeschlossen, um eine möglichst homogene Stichprobe zu generieren und geschlechterspezifische Verzerrungen zu vermeiden. Eine weitere wesentliche Ursache für einen Dropout war die Notwendigkeit einer Operation des kontralateralen Beines im Studienzeitraum. Ebenso führten zeitlichen Limitationen seitens der Probanden, sowie Kontaktverlust dazu, dass Probanden der Nachbeobachtung verloren gegangen sind. Bei dem gegebenen Zeithorizont sind diese Faktoren jedoch unumgänglich. Für den Vergleich von einseitig gegenüber beidseitig durchgeführter HTO ergeben sich hieraus zudem sehr kleine Vergleichsgruppen (nur linksseitig:  $n=5$ ; nur rechtsseitig:  $n=12$ ; beidseitig:  $n=8$ ). Bei der Betrachtung der beidseitig durchgeführten HTO, konnten zudem keine standardisierten Zeitabstände zwischen den Operationen eingehalten werden, da die Indikationsstellung sich aus individuellen Bedürfnissen der Patienten ergab. Eine differenzierte Betrachtung der zuletzt links bzw. rechtsseitig operierten Probanden bei beidseitig durchgeführter HTO ist bei kleiner Probandenzahl nicht erfolgt. Ebenso ist die

von Zhang et al. (2015) beobachtete tageszeitliche Abhängigkeit der Performance der posturalen Stabilität nicht zu vernachlässigen. Die Messungen erfolgten entsprechend individueller zeitlicher Präferenzen der Probanden, sodass eine Messung zur gleichen Tageszeit nicht bei allen Probanden garantiert werden konnte. Des Weiteren handelt es sich bei den Daten der Kontrollgruppe um Daten aus einer Referenzdatenbank. Somit können keine Langzeiteffekte ermittelt werden. Eine Kontrollgruppe, welche keine Umstellungsosteotomie erhielt, gab es nicht. Auch zeigte sich eine signifikante Abweichung des BMI zwischen Kontroll- und Interventionsgruppe. Es wurden nur männliche Probanden untersucht. Ein wichtiger limitierender Faktor liegt in dem fehlenden Einfluss auf das Einhalten des empfohlenen standardisierten Rehabilitationsprogramms, da dieses nicht bei allen Probanden in der operierenden Klinik erfolgte. Ab 16 Wochen postoperativ konnte zudem eine standardisierte physiotherapeutische Nachbehandlung nicht gewährleistet werden. Zudem könnte die individuelle Einnahme von Analgetika als auch eine verzerrte Erinnerung die Einschätzung der Schmerzen beeinflusst haben. Der mögliche Einfluss von Komorbiditäten kann nicht ausgeschlossen werden, da nicht von allen Patienten Nebenerkrankungen bekannt waren. Bezüglich der Zeitintervalle zwischen den einzelnen Messzeitpunkten wurde versucht, möglichst minimale Abweichungen zu gewährleisten. Dennoch zeigen sich nicht vermeidbare Differenzen zwischen den Messzeitpunkten, welche einen Einfluss auf die Ergebnisse genommen haben könnten. Bezüglich des Zeitpunktes der Materialentfernung zeigte sich eine sehr große Spannweite von 28,2 Monaten.

Zudem ergeben sich vor allem in der Langzeitbetrachtung relativ große Zeitintervalle zwischen den einzelnen MZP, wie z. B. MZP 4 vs. MZP 5 ein halbes Jahr und MZP 5 vs. MZP 6 ein ganzes Jahr. Damit einher geht das Potential für intraindividuelle Leistungsschwankungen, welche punktuell nicht erfasst werden konnten. Für zukünftige Studien könnten mehrfach durchgeführte präoperative Messungen sinnvoll sein, um eine Baseline zu etablieren. Auf diese Weise könnte die Variation bezüglich der präoperativen Ausgangssituation gemindert werden, um die Behandlungseffekte präziser ermitteln zu können.

Letztlich stellte die Vergleichbarkeit zu anderen Studien eine weitere Schwierigkeit dar. Vor allem die Verwendung anderer Messinstrumente, die Nutzung differierender Operationsmethoden und unterschiedlicher Implantate wie auch differierende Rehabilitationsprogramme (Teilbelastung vs. Vollbelastung) stellen hier erschwerende Faktoren dar.

### **5.3 Ausblick**

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass Patienten auch langfristig nach HTO und Rehabilitation noch Defizite hinsichtlich der posturalen Stabilität zeigen, wohingegen die mediolaterale Gewichtsverteilung deutlich verbessert ist. Bezüglich der auf die körperliche Gesundheit bezogenen Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit zeigten sich trotz starker individueller Unterschiede deutliche Verbesserungen.

Das IBS erweist sich als nützliches, wissenschaftlich geprüfetes Instrument zur posturographischen Beurteilung von Patienten nach HTO. Besonders patienteneigene Defizite und Abweichungen zu asymptomatischen Probanden bezüglich der posturalen Stabilität sowie Gewichtsverteilung können zuverlässig aufgezeigt werden. Eine differenzierte Betrachtung des Einflusses der visuellen und somatosensorischen Deprivation auf die posturale Stabilität nach HTO sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. So könnte die patientenindividuelle Rehabilitation durch Ärzte und Physiotherapeuten postoperativ zielgerichtet unterstützt werden. Besonders vorteilhaft erweist sich hier der geringe Zeitaufwand der Untersuchung, das transportable System sowie die Möglichkeit der kurzfristigen Rückmeldung an die Patienten und somit eine einfache Integrierbarkeit in den klinischen Alltag.

Die langfristigen Unterschiede hinsichtlich der individuellen Entwicklung von Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit nach HTO können anhand des SF-36, VAS, sowie des Fragebogens zur Schmerzhäufigkeit erfasst werden und so kann gezielt auf die Bedürfnisse des einzelnen Patienten eingegangen werden.

Eine Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte 2022 im Journal of Personalized Medicine unter dem Titel: „Standing Steadiness and Asymmetry after High Tibial Osteotomy Surgery: A 2 Year Follow-Up Study“ (Kurz et al. 2022).

## 6 Literaturverzeichnis

Akamatsu Y, Mitsugi N, Mochida Y, Taki N, Kobayashi H, Takeuchi R, Saito T (2012) Navigated opening wedge high tibial osteotomy improves intraoperative correction angle compared with conventional method. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 20:586–593. doi:10.1007/s00167-011-1616-8

Akasaki Y, Mizu-Uchi H, Hamai S, Tsushima H, Kawahara S, Horikawa T, Nakashima Y (2020) Patient-specific prediction of joint line convergence angle after high tibial osteotomy using a whole-leg radiograph standing on lateral-wedge insole. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28:3200–3206. doi:10.1007/s00167-019-05821-8

Aljehani MS, Crenshaw JR, Dellose SM, Rubano JJ, Zeni JA (2021) Falling risk in patients with end-stage knee osteoarthritis. *Clin Rheumatol* 40:3–9. doi:10.1007/s10067-020-05165-6

Alkan BM, Fidan F, Tosun A, Ardiçoğlu Ö (2014) Quality of life and self-reported disability in patients with knee osteoarthritis. *Mod Rheumatol* 24:166–171. doi:10.3109/14397595.2013.854046

Alshahrani MS, Reddy RS (2023) Quadriceps Strength, Postural Stability, and Pain Mediation in Bilateral Knee Osteoarthritis: A Comparative Analysis with Healthy Controls. *Diagnostics (Basel)* 13:3110. doi:10.3390/diagnostics13193110

Altay MA, Ertürk C, Altay N, Mercan AŞ, Sipahioğlu S, Kalender AM, Işıkan UE (2016) Clinical and radiographic outcomes of medial open-wedge high tibial osteotomy with Anthony-K plate: prospective minimum five year follow-up data. *Int Orthop* 40:1447–1454. doi:10.1007/s00264-015-2919-z

Angst F, Aeschlimann A, Stucki G (2001) Smallest detectable and minimal clinically important differences of rehabilitation intervention with their implications for required sample sizes using WOMAC and SF-36 quality of life measurement instruments in patients with osteoarthritis of the lower extremities. *Arthritis Care Res* 45:384–391. doi:10.1002/1529-0131(200108)45:4<384::AID-ART352>3.0.CO;2-0

Anker LC, Weerdesteyn V, van Nes IJ, Nienhuis B, Straatman H, Geurts AC (2008) The relation between postural stability and weight distribution in healthy subjects. *Gait Posture* 27:471–477. doi:10.1016/j.gaitpost.2007.06.002

Bartels T, Brehme K, Pyschik M, Schulze S, Delank K-S, Fieseler G, Laudner KG, Hermassi S, Schwesig R (2018) Pre- and postoperative postural regulation following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Exerc Rehabil* 14:143–151. doi:10.12965/jer.1835204.602

- Bartels T, Brehme K, Pyschik M, Pollak R, Schaffrath N, Schulze S, Delank K-S, Laudner K, Schwesig R (2019) Postural stability and regulation before and after anterior cruciate ligament reconstruction - A two years longitudinal study. *Phys Ther Sport* 38:49–58. doi:10.1016/j.ptsp.2019.04.009
- Bastard C, Mirouse G, Pötage D, Silbert H, Roubineau F, Hernigou P, Flouzat-Lachaniette C-H (2017) Return to sports and quality of life after high tibial osteotomy in patients under 60 years of age. *Orthop Traumatol Surg Res* 103:1189–1191. doi:10.1016/j.otsr.2017.08.013
- Belsey J, Yaseen SK, Jobson S, Faulkner J, Wilson AJ (2021) Return to Physical Activity After High Tibial Osteotomy or Unicompartmental Knee Arthroplasty: A Systematic Review and Pooling Data Analysis. *Am J Sports Med* 49:1372–1380. doi:10.1177/0363546520948861
- Birmingham TB, Kramer JF, Kirkley A, Inglis JT, Spaulding SJ, Vandervoort AA (2001a) Association among neuromuscular and anatomic measures for patients with knee osteoarthritis. *Arch Phys Med Rehabil* 82:1115–1118. doi:10.1053/apmr.2001.24306
- Birmingham TB, Kramer JF, Kirkley A, Inglis JT, Spaulding SJ, Vandervoort AA (2001b) Knee bracing for medial compartment osteoarthritis: effects on proprioception and postural control. *Rheumatology (Oxford)* 40:285–289. doi:10.1093/rheumatology/40.3.285
- Blaszczyk JW, Prince F, Raiche M, Hébert R (2000) Effect of ageing and vision on limb load asymmetry during quiet stance. *J Biomech* 33:1243–1248. doi:10.1016/S0021-9290(00)00097-X
- Bockmann B, Nebelung W, Boese CK, Schulte TL, Venjakob AJ (2021) Planning Results for High Tibial Osteotomies in Degenerative Varus Osteoarthritis Using Standing and Supine Whole Leg Radiographs. *Orthop Surg* 13:77–82. doi:10.1111/os.12833
- Bode G, Schmal H, Pestka JM, Ogon P, Südkamp NP, Niemeyer P (2013) A non-randomized controlled clinical trial on autologous chondrocyte implantation (ACI) in cartilage defects of the medial femoral condyle with or without high tibial osteotomy in patients with varus deformity of less than 5°. *Arch Orthop Trauma Surg* 133:43–49. doi:10.1007/s00402-012-1637-x
- Bonano JC, Barrett AA, Amanatullah DF (2021) Medial Unicompartmental Knee Arthroplasty with a Mobile-Bearing Implant. *JBJS Essent Surg Tech* 11. doi:10.2106/JBJS.ST.20.00002

- Bonasia DE, Governale G, Spolaore S, Rossi R, Amendola A (2014) High tibial osteotomy. *Curr Rev Musculoskelet Med* 7:292–301. doi:10.1007/s12178-014-9234-y
- Boonstra MC, Schwering PJA, De Waal Malefijt MC, Verdonschot N (2010) Sit-to-stand movement as a performance-based measure for patients with total knee arthroplasty. *Phys Ther* 90:149–156. doi:10.2522/ptj.20090119
- Brehme K, Bartels T, Pyschik M, Jenz M, Delank K-S, Laudner KG, Schwesig R (2020) Postural Stability and Regulation before and after High Tibial Osteotomy and Rehabilitation. *Appl Sci* 10:6517. doi:10.3390/app10186517
- Brinkman J-M, Lobenhoffer P, Agneskirchner JD, Staubli AE, Wymenga AB, van Heerwaarden RJ (2008) Osteotomies around the knee: patient selection, stability of fixation and bone healing in high tibial osteotomies. *J Bone Joint Surg (Br)* 90:1548–1557. doi:10.1302/0301-620X.90B12.21198
- Brouwer GM, van Tol AW, Bergink AP, Belo JN, Bernsen RMD, Reijman M, Pols HAP, Bierma-Zeinstra SMA (2007) Association between valgus and varus alignment and the development and progression of radiographic osteoarthritis of the knee. *Arthritis Rheum* 56:1204–1211. doi:10.1002/art.22515
- Brouwer RW, Huizinga MR, Duivenvoorden T, van Raaij TM, Verhagen AP, Bierma-Zeinstra SMA, Verhaar JAN (2014) Osteotomy for treating knee osteoarthritis. *Cochrane Database Syst Rev* 12:CD004019. doi:10.1002/14651858.CD004019.pub4.
- Bullinger M, Kirchberger I (1998) Der SF-36 Fragebogen zum Gesundheitszustand: Anwendung, Auswertung und Interpretation: Handanweisung. Hogrefe, Verlag für Psychologie, Göttingen, Bern, Toronto, Seattle
- Bullinger M, Kirchberger I, Ware J (1995) Der deutsche SF-36 Health Survey Übersetzung und psychometrische Testung eines krankheitsübergreifenden Instruments zur Erfassung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität. *Z f Gesundheitswiss* 3:21–36
- Busija L, Osborne RH, Nilsson A, Buchbinder R, Roos EM (2008) Magnitude and meaningfulness of change in SF-36 scores in four types of orthopedic surgery. *Health Qual Life Outcomes* 6:55. doi:10.1186/1477-7525-6-55
- Chaharmahali L, Gandomi F, Yalfani A, Fazaeli A (2021) The effect of self-reported knee instability on plantar pressure and postural sways in women with knee osteoarthritis. *J Orthop Surg Res* 16:677. doi:10.1186/s13018-021-02823-6
- Chen X, Yang Z, Li H, Zhu S, Wang Y, Qian W (2020) Higher risk of revision in total knee arthroplasty after high tibial osteotomy: a systematic review and updated meta-analysis. *BMC Musculoskelet Disord* 21:153. doi:10.1186/s12891-020-3177-9

- Chieh-Szu Yang J, Chen C-F, Lee OK (2020) Benefits of opposite screw insertion technique in medial open-wedge high tibial osteotomy: A virtual biomechanical study. *J Orthop Translat* 20:31–36. doi:10.1016/j.jot.2019.06.004
- Christiansen CL, Stevens-Lapsley JE (2010) Weight-bearing asymmetry in relation to measures of impairment and functional mobility for people with knee osteoarthritis. *Arch Phys Med Rehabil* 91:1524–1528. doi:10.1016/j.apmr.2010.07.009
- Cotic M, Vogt S, Feucht MJ, Saier T, Minzlaff P, Hinterwimmer S, Imhoff AB (2015) Prospective evaluation of a new plate fixator for valgus-producing medial open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 23:3707–3716. doi:10.1007/s00167-014-3287-8
- Creaby MW, Bennell KL, Hunt MA (2012) Gait differs between unilateral and bilateral knee osteoarthritis. *Arch Phys Med Rehabil* 93:822–827. doi:10.1016/j.apmr.2011.11.029
- Cross M, Smith E, Hoy D, Nolte S, Ackerman I, Fransen M, Bridgett L, Williams S, Guillemin F, Hill CL, Laslett LL, Jones G, Cicuttini F, Osborne R, Vos T, Buchbinder R, Woolf A, March L (2014) The global burden of hip and knee osteoarthritis: estimates from the global burden of disease 2010 study. *Ann Rheum Dis* 73:1323–1330. doi:10.1136/annrheumdis-2013-204763
- Davis AM, Lohmander LS, Wong R, Venkataramanan V, Hawker GA (2010) Evaluating the responsiveness of the ICOAP following hip or knee replacement. *Osteoarthritis Cartilage* 18:1043–1045. doi:10.1016/j.joca.2010.04.013
- Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie , S2k-Leitlinie Gonarthrose, Version 3.0, 18.01.2018, Verfügbar unter: [https://register.awmf.org/assets/guidelines/033-004l\\_S2k\\_Gonarthrose\\_2018-01\\_1-abgelaufen.pdf](https://register.awmf.org/assets/guidelines/033-004l_S2k_Gonarthrose_2018-01_1-abgelaufen.pdf), Zugriff am 18.01.2024
- Doré AL, Golightly YM, Mercer VS, Shi XA, Renner JB, Jordan JM, Nelson AE (2015) Lower-extremity osteoarthritis and the risk of falls in a community-based longitudinal study of adults with and without osteoarthritis. *Arthritis Care Res* 67:633–639. doi:10.1002/acr.22499
- El-Assal MA, Khalifa YE, Abdel-Hamid MM, Said HG, Bakr HMA (2010) Opening-wedge high tibial osteotomy without bone graft. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 18:961–966. doi:10.1007/s00167-010-1104-6
- Felson DT (2004) An update on the pathogenesis and epidemiology of osteoarthritis. *Radiol Clin N Am* 42:1-9. doi:10.1016/S0033-8389(03)00161-1

- Freitas REJ de, Freitas JGA de, Vieira CP, Endres DC, Inacio FM, Da Silva Azevedo Nora FG (2023) Analysis of Postural Control in Patients Diagnosed with Unilateral Knee Osteoarthritis and Its Relationship with the Risk of Falls. *Adv Orthop* 2023:5536304. doi:10.1155/2023/5536304
- Frendl DM, Ware JE (2014) Patient-reported functional health and well-being outcomes with drug therapy: a systematic review of randomized trials using the SF-36 health survey. *Med Care* 52:439–445. doi:10.1097/MLR.00000000000010311
- Friedrich M, Grein H-J, Wicher C, Schuetze J, Mueller A, Lauenroth A, Hottenrott K, Schwesig R (2008) Influence of pathologic and simulated visual dysfunctions on the postural system. *Exp Brain Res* 186:305–314. doi:10.1007/s00221-007-1233-4
- Fuchs J, Rabenberg M, Scheidt-Nave C (2013) Prävalenz ausgewählter muskuloskelettaler Erkrankungen: Ergebnisse der Studie zur Gesundheit Erwachsener in Deutschland (DEGS1). *Bundesgesundheitsbl (Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz)* 56:678–686. doi:10.1007/s00103-013-1687-4
- Fujisawa Y, Masuhara K, Shiomi S (1979) The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. An arthroscopic study of 54 knee joints. *The Orthopedic clinics of North America* 10:585–608
- Fukuoka Y, Nagata T, Ishida A, Minamitani H (2001) Characteristics of somatosensory feedback in postural control during standing. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng* 9:145–153
- Genthon N, Rougier P (2005) Influence of an asymmetrical body weight distribution on the control of undisturbed upright stance. *J Biomech* 38:2037–2049. doi:10.1016/j.jbiomech.2004.09.024
- Ghinelli D, Parma A, Baldassarri M, Olivieri A, Mosca M, Pagliuzzi G, Buda R (2016) High tibial osteotomy for the treatment of medial osteoarthritis of the knee with new iBalance system: 2 years of follow-up. *Eur J Orthop Surg Traumatol* 26:523–535. doi:10.1007/s00590-016-1768-9
- Goetz J, Baeurle M, Dullien S, Grifka J, Koeck F, Baier C (2017) Postural Stability after Unicondylar Knee Arthroplasty and Patient-Specific Interpositional Knee Spacer. *Biomed Res Int* 2017:5836025. doi:10.1155/2017/5836025
- Grünwald L, Angele P, Schröter S, Dickschas J, Harrer J, Hinterwimmer S, Feucht MJ, Preiss A, Minzlaff P, Saier T (2019) Patients' expectations of osteotomies around the

knee are high regarding activities of daily living. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 27:3022–3031. doi:10.1007/s00167-018-5326-3

Harato K, Nagura T, Matsumoto H, Otani T, Toyama Y, Suda Y (2010) Extension limitation in standing affects weight-bearing asymmetry after unilateral total knee arthroplasty. *J Arthroplasty* 25:225–229. doi:10.1016/j.arth.2009.02.003

Harato K, Nagura T, Matsumoto H, Otani T, Toyama Y, Suda Y (2014) Asymmetry of the knee extension deficit in standing affects weight-bearing distribution in patients with bilateral end-stage knee osteoarthritis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 22:2608–2613. doi:10.1007/s00167-013-2442-y

Hassan BS, Mockett S, Doherty M (2001) Static postural sway, proprioception, and maximal voluntary quadriceps contraction in patients with knee osteoarthritis and normal control subjects. *Ann Rheum Dis* 60:612–618. doi:10.1136/ard.60.6.612

Hassan BS, Doherty SA, Mockett S, Doherty M (2002) Effect of pain reduction on postural sway, proprioception, and quadriceps strength in subjects with knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis* 61:422–428. doi:10.1016/j.arth.2009.02.003

Hawker GA, Stewart L, French MR, Cibere J, Jordan JM, March L, Suarez-Almazor M, Gooberman-Hill R (2008) Understanding the pain experience in hip and knee osteoarthritis - an OARSI/OMERACT initiative. *Osteoarthritis Cartilage* 16:415–422. doi:10.1016/j.joca.2007.12.017

He M, Zhong X, Li Z, Shen K, Zeng W (2021) Progress in the treatment of knee osteoarthritis with high tibial osteotomy: a systematic review. *Syst Rev* 10:56. doi:10.1186/s13643-021-01601-z

Heidemann C, Scheidt-Nave C, Beyer A-K, Baumert J, Thamm R, Maier B, Neuhauser H, Fuchs J, Kuhnert R, Hapke U (2021) Gesundheitliche Lage von Erwachsenen in Deutschland – Ergebnisse zu ausgewählten Indikatoren der Studie GEDA 2019/2020-EHIS. *Journal of Health Monitoring*. doi:10.25646/8456

Herbst M, Kuwashima U, Ahrend M-D, Gueorguiev BG, Schröter S, Ihle C (2020) Gesundheitsbezogene Lebensqualität – ein unterschätztes Kriterium zur Bewertung des Behandlungserfolgs und der Indikationsstellung bei HTO: prospektive 6-Jahres-Ergebnisse. *Z Orthop Unfall* 159:288–297. doi:10.1055/a-1098-8894

Herbst M, Ahrend M-D, Grünwald L, Fischer C, Schröter S, Ihle C (2022) Overweight patients benefit from high tibial osteotomy to the same extent as patients with normal weights but show inferior mid-term results. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 30:907–917. doi:10.1007/s00167-021-06457-3

- Hernigou P, Giber D, Dubory A, Auregan JC (2020) Safety of simultaneous versus staged bilateral opening-wedge high tibial osteotomy with locked plate and immediate weight bearing. *Int Orthop* 44:109–117. doi:10.1007/s00264-019-04385-z
- Hinman RS, Bennell KL, Metcalf BR, Crossley KM (2002) Balance impairments in individuals with symptomatic knee osteoarthritis: a comparison with matched controls using clinical tests. *Rheumatology (Oxford)* 41:1388–1394. doi:10.1093/rheumatology/41.12.1388
- Hinterwimmer S, Feucht MJ, Imhoff AB (2012) Hohe tibiale Osteotomie bei Varusgonarthrose. *Arthroskopie* 25:184–194. doi:10.1007/s00142-012-0697-9
- Huang T-L, Wang C-C, Yang K-C, Wu C-C (2018) Reliability of Roentgenographic Knee Alignment Measurements in Gonarthrosis. *J Knee Surg* 31:302–305. doi:10.1055/s-0037-1603638
- Hunt MA, Birmingham TB, Jones IC, Vandervoort AA, Giffin JR (2009) Effect of tibial realignment surgery on single leg standing balance in patients with knee osteoarthritis. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 24:693–696. doi:10.1016/j.clinbiomech.2009.05.009
- Hunt MA, McManus FJ, Hinman RS, Bennell KL (2010) Predictors of single-leg standing balance in individuals with medial knee osteoarthritis. *Arthritis Care Res* 62:496–500. doi:10.1002/acr.20046
- Hurley MV, Scott DL, Rees J, Newham DJ (1997) Sensorimotor changes and functional performance in patients with knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis* 56:641–648. doi:10.1136/ard.56.11.641
- Hurwitz DE, Ryals AR, Block JA, Sharma L, Schnitzer TJ, Andriacchi TP (2000) Knee pain and joint loading in subjects with osteoarthritis of the knee. *J Orthop Res* 18:572–579. doi:10.1002/jor.1100180409
- Ihle C, Ateschrang A, Grünwald L, Stöckle U, Saier T, Schröter S (2016) Health-related quality of life and clinical outcomes following medial open wedge high tibial osteotomy: a prospective study. *BMC Musculoskelet Disord* 17:215. doi:10.1186/s12891-016-1076-x
- Jaeschke R, Singer J, Guyatt GH (1989) Measurement of health status. Ascertaining the minimal clinically important difference. *Control Clin Trials* 10:407–415. doi:10.1016/0197-2456(89)90005-6
- Jang K-M, Lee J-H, Cho IY, Park B-K, Han S-B (2017) Intraoperative Fluoroscopic Assessment of Limb Alignment is a Reliable Predictor for Postoperative Limb Alignment

in Biplanar Medial Opening-Wedge High Tibial Osteotomy. *J Arthroplasty* 32:756–760. doi:10.1016/j.arth.2016.08.022

Jenz MR (2022) Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur mittels hoher tibialer additiver Osteotomie auf die posturale Stabilität und Regulation. Dissertation, Medizinische Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. doi:10.25673/86283

Katz NP, Paillard FC, Ekman E (2015) Determining the clinical importance of treatment benefits for interventions for painful orthopedic conditions. *J Orthop Surg Res* 10:24. doi:10.1186/s13018-014-0144-x

Khakha RS, Bin Abd Razak HR, Kley K, van Heerwaarden R, Wilson AJ (2021) Role of high tibial osteotomy in medial compartment osteoarthritis of the knee: Indications, surgical technique and outcomes. *Journal of clinical orthopaedics and trauma* 23:101618. doi:10.1016/j.jcot.2021.101618

Kim H-S, Yun DH, Yoo SD, Kim DH, Jeong YS, Yun J-S, Hwang DG, Jung PK, Choi SH (2011) Balance control and knee osteoarthritis severity. *Annals of rehabilitation medicine* 35:701–709. doi:10.5535/arm.2011.35.5.701

Kim YH, Dorj A, Han A, Kim K, Nha KW (2016) Improvements in spinal alignment after high tibial osteotomy in patients with medial compartment knee osteoarthritis. *Gait Posture* 48:131–136. doi:10.1016/j.gaitpost.2016.05.001

Kohen-Raz R (1991) Application of tetra-ataxiometric posturography in clinical and developmental diagnosis. *Percept Mot Skills* 73:635–656. doi:10.2466/pms.1991.73.2.635

Kohen-Raz R, Hiriartborde E (1979) Some observations on tetra-ataxiometric patterns of static balance and their relation to mental and scholastic achievements. *Percept Mot Skills* 48:871–890. doi:10.2466/pms.1979.48.3.871

Kohen-Raz R, Volkmar FR, Cohen DJ (1992) Postural control in children with autism. *J Autism Dev Disord* 22:419–432. doi:10.1007/BF01048244

Kuriyama S, Watanabe M, Nakamura S, Nishitani K, Sekiguchi K, Tanaka Y, Ito H, Matsuda S (2020) Classical target coronal alignment in high tibial osteotomy demonstrates validity in terms of knee kinematics and kinetics in a computer model. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28:1568–1578. doi:10.1007/s00167-019-05575-3

Kurz E, Brehme K, Bartels T, Pyschik M, Jenz M, Kadler W, Delank K-S, Schwesig R (2022) Standing Steadiness and Asymmetry after High Tibial Osteotomy Surgery: A 2 Year Follow-Up Study. *J Pers Med* 12. doi:10.3390/jpm12101594

- Lee SH, Lee O-S, Teo SH, Lee YS (2017) Change in gait after high tibial osteotomy: A systematic review and meta-analysis. *Gait Posture* 57:57–68. doi:10.1016/j.gaitpost.2017.05.023
- Lee DK, Wang JH, Won Y, Min YK, Jaiswal S, Lee BH, Kim J-Y (2020) Preoperative latent medial laxity and correction angle are crucial factors for overcorrection in medial open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28:1411–1418. doi:10.1007/s00167-019-05502-6
- Leitch KM, Birmingham TB, Dunning CE, Giffin JR (2015) Medial opening wedge high tibial osteotomy alters knee moments in multiple planes during walking and stair ascent. *Gait Posture* 42:165–171. doi:10.1016/j.gaitpost.2015.05.005
- Li K, Sun F-L, Guo H-B, Shi Z-J, Yao R, Zhang H (2023) Comparison of the plantar pressure distribution and mechanical alignment in patients with varus knee osteoarthritis following high tibial osteotomy. *BMC Musculoskelet Disord* 24:479. doi:10.1186/s12891-023-06603-7
- Liu X, Chen Z, Gao Y, zhang J, Jin Z (2019) High Tibial Osteotomy: Review of Techniques and Biomechanics. *J Healthc Eng* 2019:8363128. doi:10.1155/2019/8363128
- Martinek V, Imhoff AB (2003) Tibiale Umstellungsosteotomie am Kniegelenk – Renaissance eines klassischen Verfahrens? *Dtsch Z Sportmed* 54:229–232
- McChesney JW, Woollacott MH (2000) The effect of age-related declines in proprioception and total knee replacement on postural control. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 55:M658-66. doi:10.1093/gerona/55.11.M658
- McHorney CA, Ware JE, Raczek AE (1993) The MOS 36-Item Short-Form Health Survey (SF-36): II. Psychometric and clinical tests of validity in measuring physical and mental health constructs. *Med Care* 31:247–263. doi:10.1097/00005650-199303000-00006
- Meding JB, Wing JT, Ritter MA (2011) Does high tibial osteotomy affect the success or survival of a total knee replacement? *Clin Orthop Relat Res* 469:1991–1994. doi:10.1007/s11999-011-1810-5
- Michael JW-P, Schlüter-Brust KU, Eysel P (2010) The epidemiology, etiology, diagnosis, and treatment of osteoarthritis of the knee. *Dtsch Arztebl Int* 107:152–162. doi:10.3238/arztebl.2010.0152
- Morin V, Pailhé R, Duval BR, Mader R, Cognault J, Rouchy R-C, Saragaglia D (2018) Gait analysis following medial opening-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26:1838–1844. doi:10.1007/s00167-017-4421-1

Murray R, Winkler PW, Shaikh HS, Musahl V (2021) High Tibial Osteotomy for Varus Deformity of the Knee. *JAAOS Glob Res Rev* 5. doi:10.5435/JAAOSGlobal-D-21-00141

Neiryneck J, van Beek N, Claes T, Claes S, Bartholomeeusen S (2021) Simultaneous bilateral opening-wedge high tibial osteotomy with structural allograft impaction results in excellent early recovery and pain reduction similar unilateral osteotomy. *The Knee* 30:283–290. doi:10.1016/j.knee.2021.04.016

Nerhus TK, Ekeland A, Solberg G, Sivertsen EA, Madsen JE, Heir S (2017) Radiological outcomes in a randomized trial comparing opening wedge and closing wedge techniques of high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25:910–917. doi:10.1007/s00167-015-3817-z

Nishizawa K, Harato K, Morishige Y, Kobayashi S, Niki Y, Nagura T (2021) Correlation between weight-bearing asymmetry and bone mineral density in patients with bilateral knee osteoarthritis. *J Orthop Surg Res* 16:102. doi:10.1186/s13018-021-02252-5

Noyes FR, Barber SD, Simon R (1993) High tibial osteotomy and ligament reconstruction in varus angulated, anterior cruciate ligament-deficient knees. A two- to seven-year follow-up study. *Am J Sports Med* 21:2–12. doi:10.1177/036354659302100102

Ollivier B, Berger P, Depuydt C, Vandenneucker H (2021) Good long-term survival and patient-reported outcomes after high tibial osteotomy for medial compartment osteoarthritis. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 29:3569–3584. doi:10.1007/s00167-020-06262-4

Oppenheim U, Kohen-Raz R, Alex D, Kohen-Raz A, Azarya M (1999) Postural characteristics of diabetic neuropathy. *Diabetes Care* 22:328–332. doi:10.2337/diacare.22.2.328

Pape D, Seil R, Adam F, Rupp S, Kohn D, Lobenhoffer P (2004) Bildgebung und präoperative Planung der Tibiakopfoosteotomie. *Der Orthopäde* 33:122–134. doi:10.1007/s00132-003-0585-0

Prado-Rico JM, Duarte M (2019) Asymmetry of Body Weight Distribution During Quiet and Relaxed Standing Tasks. *Motor control*:1–13. doi:10.1123/mc.2018-0081

Przystalski K, Paleczek A, Szustakowski K, Wawryka P, Jungiewicz M, Zalewski M, Kwiatkowski J, Gądek A, Miśkowiec K (2023) Automated correction angle calculation in high tibial osteotomy planning. *Sci Rep* 13:12876. doi:10.1038/s41598-023-39967-w

Reinhardt L, Heilmann F, Teicher M, Lauenroth A, Delank K-S, Schwesig R, Wollny R, Kurz E (2019) Comparison of posturographic outcomes between two different devices. *J Biomech* 86:218–224. doi:10.1016/j.jbiomech.2019.02.013

- Richardson JTE (2011) Eta squared and partial eta squared as measures of effect size in educational research. *Educ Res Rev* 6:135–147. doi:10.1016/j.edurev.2010.12.001
- Rossi R, Bonasia DE, Amendola A (2011) The role of high tibial osteotomy in the varus knee. *J Am Acad Orthop Surg* 19:590–599
- Ruggeri M, Gill HS, Leardini A, Zaffagnini S, MacLeod A, Ortolani M, Faccia F, Grassi A, Fabbro GD, Durante S, Belvedere C (2022) Superimposition of ground reaction force on tibial-plateau supporting diagnostics and post-operative evaluations in high-tibial osteotomy. A novel methodology. *Gait Posture* 94:144–152. doi:10.1016/j.gaitpost.2022.02.028
- Sabashi K, Chiba T, Iwasaki K, Onodera T, Kondo E, Iwasaki N, Tohyama H (2023) Early Changes in Postural Balance Following Inverted V-Shaped High Tibial Osteotomy in Patients With Knee Osteoarthritis. *J Appl Biomech* 39:124–129. doi:10.1123/jab.2022-0273
- Saier T, Minzlaff P, Feucht MJ, Lämmle L, Burghoff M, Ihle C, Imhoff AB, Hinterwimmer S (2017) Health-related quality of life after open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25:934–942. doi:10.1007/s00167-015-3938-4
- Schomacher J (2008) Gütekriterien der visuellen Analogskala zur Schmerzbewertung. *physioscience* 4:125–133. doi:10.1055/s-2008-1027685
- Schwartz S, Segal O, Barkana Y, Schwesig R, Avni I, Morad Y (2005) The effect of cataract surgery on postural control. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 46:920–924. doi:10.1167/iovs.04-0543
- Schwesig R (2006) Plastizität und Trainierbarkeit des posturalen Systems in der Lebensspanne. Habilitationsschrift, Philosophische Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Schwesig R, Becker S, Lauenroth A, Kluttig A, Leuchte S, Esperer HD (2009) Neue posturographische Methode zur Differentialdiagnostik von Patienten mit Morbus Parkinson und Kleinhirnstörungen. *Biomed Tech* 54:347–356. doi:10.1515/BMT.2009.041
- Schwesig R, Becker S, Lauenroth A, Müller K, Leuchte S, Esperer H-D, Kluttig A (2010) Posturale Defizite und Sturzrisiko bei älteren Personen mit Verdacht auf Osteoporose. *Z Gerontol Geriatr* 43:158–164. doi:10.1007/s00391-009-0065-1
- Schwesig R, Fischer D, Kluttig A (2013a) Are there changes in postural regulation across the lifespan? *Somatosens Mot Res* 30:167–174. doi:10.3109/08990220.2013.779245

- Schwesig R, Fischer D, Lauenroth A, Becker S, Leuchte S (2013b) Can falls be predicted with gait analytical and posturographic measurement systems? A prospective follow-up study in a nursing home population. *Clin Rehabil* 27:183–190. doi:10.1177/0269215512452880
- Schwesig R, Becker S, Fischer D (2014) Intraobserver reliability of posturography in healthy subjects. *Somatosens Mot Res* 31:16–22. doi:10.3109/08990220.2013.819797
- Schwesig R, Schulze S (2018) Sind sensomotorische Interventionseffekte messbar? *Orthopädieschuhtechnik* (07.08.2018):16–25
- Sharma L, Song J, Felson DT, Cahue S, Shamiyeh E, Dunlop DD (2001) The role of knee alignment in disease progression and functional decline in knee osteoarthritis. *JAMA* 286:188–195. doi:10.1001/jama.286.2.188
- Sharma L, Chmiel JS, Almagor O, Felson D, Guermazi A, Roemer F, Lewis CE, Segal N, Torner J, Cooke TDV, Hietpas J, Lynch J, Nevitt M (2013) The role of varus and valgus alignment in the initial development of knee cartilage damage by MRI: the MOST study. *Ann Rheum Dis* 72:235–240. doi:10.1136/annrheumdis-2011-201070
- Smith TO, Sexton D, Mitchell P, Hing CB (2011) Opening- or closing-wedged high tibial osteotomy: a meta-analysis of clinical and radiological outcomes. *The Knee* 18:361–368. doi:10.1016/j.knee.2010.10.001
- So S-Y, Lee S-S, Jung EY, Kim JH, Wang JH (2020) Difference in joint line convergence angle between the supine and standing positions is the most important predictive factor of coronal correction error after medial opening wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28:1516–1525. doi:10.1007/s00167-019-05555-7
- Stauffer ME, Taylor SD, Watson DJ, Peloso PM, Morrison A (2011) Definition of nonresponse to analgesic treatment of arthritic pain: an analytical literature review of the smallest detectable difference, the minimal detectable change, and the minimal clinically important difference on the pain visual analog scale. *Int J Inflam* 2011:231926. doi:10.4061/2011/231926
- Summers GD, Morrison JD, Cochrane GM (1987) Foot loading characteristics of amputees and normal subjects. *Prosthet Orthot Int* 11:33–39. doi:10.3109/03093648709079378
- Talis VL, Grishin AA, Solopova IA, Oskanyan TL, Belenky VE, Ivanenko YP (2008) Asymmetric leg loading during sit-to-stand, walking and quiet standing in patients after unilateral total hip replacement surgery. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 23:424–433. doi:10.1016/j.clinbiomech.2007.11.010

- Tanamas S, Hanna FS, Cicuttini FM, Wluka AE, Berry P, Urquhart DM (2009) Does knee malalignment increase the risk of development and progression of knee osteoarthritis? A systematic review. *Arthritis Rheum* 61:459–467. doi:10.1002/art.24336
- Tarlov AR, Ware JE, Greenfield S, Nelson EC, Perrin E, Zubkoff M (1989) The Medical Outcomes Study. An application of methods for monitoring the results of medical care. *JAMA* 262:925–930. doi:10.1001/jama.262.7.925
- Tarumi E, Nakagawa Y, Mukai S, Yabumoto H, Nakamura T (2019) The clinical outcomes and the ability to sit straight in the Japanese style following high tibial osteotomy combined with osteochondral autologous transfer for osteonecrosis of the medial femoral condyle. *J Orthop Sci* 24:136–141. doi:10.1016/j.jos.2018.08.005
- Thompson KA, Darden CN, Katsman A, Alaia MJ, Strauss EJ, Jazrawi LM (2019) Short-Term Clinical Outcomes of High Tibial Osteotomy with the iBalance HTO System. *Bull Hosp Jt Dis* 77:256–262
- Truszczyńska-Baszak A, Dadura E, Drzał-Grabiec J, Tarnowski A (2020) Static balance assessment in patients with severe osteoarthritis of the knee. *The Knee* 27:1349–1356. doi:10.1016/j.knee.2020.06.014
- Tubach F, Ravaud P, Baron G, Falissard B, Logeart I, Bellamy N, Bombardier C, Felson D, Hochberg M, van der Heijde D, Dougados M (2005) Evaluation of clinically relevant changes in patient reported outcomes in knee and hip osteoarthritis: the minimal clinically important improvement. *Ann Rheum Dis* 64:29–33. doi:10.1136/ard.2004.022905
- Uçan V, Aliyev O, Demirkiran CB, Yildiz F, Elmali N, Uzer G (2023) Vergleich der funktionellen und radiologischen Ergebnisse der ein- und zweizeitigen bilateralen hohen Tibiakopffosteotomie - Einzeitige und zweizeitige bilaterale offene Keilosteotomie der hohen Tibia. *Z Orthop Unfall* 161:51–56. doi:10.1055/a-1611-0316
- van der Woude JAD, Wiegant K, van Heerwaarden RJ, Spruijt S, van Roermund PM, Custers RJH, Mastbergen SC, Lafeber FPJG (2017) Knee joint distraction compared with high tibial osteotomy: a randomized controlled trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25:876–886. doi:10.1007/s00167-016-4131-0
- Waldt S, Eiber M, Wörtler K (Hrsg) (2011) Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskelettalen Radiologie. Thieme, Stuttgart
- Ware JE, Sherbourne CD (1992) The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. *Med Care* 30:473–483

- Wegener L, Kisner C, Nichols D (1997) Static and dynamic balance responses in persons with bilateral knee osteoarthritis. *J Orthop Sports Phys Ther* 25:13–18. doi:10.2519/jospt.1997.25.1.13
- Williamson A, Hoggart B (2005) Pain: a review of three commonly used pain rating scales. *J Clin Nurs* 14:798–804. doi:10.1111/j.1365-2702.2005.01121.x
- Yan J, Musahl V, Kay J, Khan M, Simunovic N, Ayeni OR (2016) Outcome reporting following navigated high tibial osteotomy of the knee: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 24:3529–3555. doi:10.1007/s00167-016-4327-3
- Yang JC-S, Lin K-Y, Lin H-H, Lee OK (2021) Biomechanical evaluation of high tibial osteotomy plate with internal support block using finite element analysis. *PLoS One* 16:e0247412. doi:10.1371/journal.pone.0247412
- Yuan L, Niu S, Zhai C, Li S, Bian J, Zhao X, Zhang Y, Wang G (2022) Influence of lower-limb mechanical axis on the curative effect of medial high tibial osteotomy for knee osteoarthritis. *BMC Surg* 22:177. doi:10.1186/s12893-022-01629-5
- Zampogna B, Vasta S, Amendola A, Uribe-Echevarria Marbach B, Gao Y, Papalia R, Denaro V (2015) Assessing Lower Limb Alignment: Comparison of Standard Knee Xray vs Long Leg View. *Iowa Orthop J* 35:49–54
- Zhang Z, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Rat A-C, Paysant J, Perrin PP (2015) Diurnal variation on balance control in patients with symptomatic knee osteoarthritis. *Arch Gerontol Geriatr*:109–114. doi:10.1016/j.archger.2015.03.009
- Zhang Z, Tao H, Zhao Y, Xiang W, Cao H, Tao F (2023) High tibial osteotomy improves balance control in patients with knee osteoarthritis and a varus deformity. *J Orthop Surg Res* 18:538. doi:10.1186/s13018-023-04041-8

## 7 Thesen

1. Die posturale Stabilität zeigte sich bis zu zwei Jahren postoperativ nach Umstellungsosteotomie gegenüber der Referenzgruppe herabgesetzt.
2. Im Studienverlauf konnten langfristig keine signifikanten Veränderungen bezüglich der Leistungsfähigkeit der posturalen Subsysteme gezeigt werden.
3. Der Gewichtsverteilungsindex zeigte nach einer kurzfristigen postoperativen Zunahme eine nachhaltig signifikante Reduktion bis zu zwei Jahren postoperativ.
4. Bezüglich der mediolateralen Gewichtsverteilung bei den nur einseitig operierten Patienten zeigte sich im Studienverlauf eine Zunahme der Belastung der zuvor entlasteten betroffenen Seite.
5. Über den gesamten Beobachtungszeitraum zeigte sich eine vermehrte Vorfußbelastung.
6. Bei den beidseitig operierten Patienten konnte, verglichen mit den nur einseitig operierten Patienten, auch nach der zuletzt erfolgten Umstellungsosteotomie keine wesentlich ausbalanciertere Gewichtsverteilung erreicht werden.
7. Der Zeitpunkt der postoperativen Materialentfernung hat keinen nennenswerten Einfluss auf posturographische, respektive Parameter der Lebensqualität oder Schmerzintensität.
8. Die präoperativ besonders eingeschränkte auf die körperliche Gesundheit bezogene Lebensqualität konnte nach der Umstellungsosteotomie signifikant gesteigert werden, wobei ab 6 Monaten keine relevanten Zunahmen mehr beobachtet werden konnten.
9. Die Schmerzintensität konnte durch die Umstellungsosteotomie langfristig signifikant reduziert werden, wobei jedoch hohe Standardabweichungen auf den starken Einfluss individueller Gegebenheiten hindeuten.
10. Im Studienverlauf konnte eine Abnahme des präoperativ dominierenden Anteils der Patienten mit Dauerschmerzen und eine Zunahme des Anteils der Patienten mit Schmerzattacken oder vollständiger Schmerzfreiheit beobachtet werden.

# Anlagen

## Anlage 1 (SF-36-Fragebogen)

Ausgefüllt am: .....

UM .....  
(Wird durch Personal ausgefüllt)

2

### Fragebogen zum Gesundheitszustand (SF-36)

In diesem Fragebogen geht es um Ihre Beurteilung Ihres Gesundheitszustandes. Der Bogen ermöglicht es, im Zeitverlauf nachzuziehen, wie Sie sich fühlen und wie Sie im Alltag zurechtkommen.

Bitte beantworten Sie jede der folgenden Fragen, indem Sie bei den Antwortmöglichkeiten die Zahl ankreuzen, die am besten auf Sie zutrifft.

1. Wie würden Sie Ihren Gesundheitszustand im Allgemeinen beschreiben ?

(Bitte kreuzen Sie nur eine Zahl an)

Ausgezeichnet..... 1  
Sehr gut..... 2  
Gut..... 3  
Weniger gut..... 4  
Schlecht..... 5

2. Im Vergleich zum vergangenen Jahr, wie würden Sie Ihren derzeitigen Gesundheitszustand beschreiben ?

(Bitte kreuzen Sie nur eine Zahl an)

Derzeit viel besser als vor einem Jahr..... 1  
Derzeit etwas besser als vor einem Jahr..... 2  
Etwa so wie vor einem Jahr..... 3  
Derzeit etwas schlechter als vor einem Jahr..... 4  
Derzeit viel schlechter als vor einem Jahr..... 5

3

5. Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund seelischer Probleme irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause (z.B. weil Sie sich niedergeschlagen oder ängstlich fühlen) ?

(Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile nur eine Zahl an)

SCHWIERIGKEITEN	JA	NEIN
a. Ich konnte nicht so lange wie üblich tätig sein	1	2
b. Ich habe weniger geschafft als ich wollte	1	2
c. Ich konnte nicht so sorgfältig wie üblich arbeiten	1	2

6. Wie sehr haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen Ihre normalen Kontakte zu Familienangehörigen, Freunden, Nachbarn oder zum Bekanntenkreis beeinträchtigt?

(Bitte kreuzen Sie nur eine Zahl an)

Überhaupt nicht..... 1  
Etwas..... 2  
Mäßig..... 3  
Ziemlich..... 4  
Sehr..... 5

7. Wie stark waren Ihre Schmerzen in den vergangenen 4 Wochen ?

(Bitte kreuzen Sie nur eine Zahl an)

Ich hatte keine Schmerzen..... 1  
Sehr leicht..... 2  
Leicht..... 3  
Mäßig..... 4  
Stark..... 5  
Sehr stark..... 6

3. Im folgenden sind einige Tätigkeiten beschrieben, die Sie vielleicht an einem normalen Tag ausüben. Sind Sie durch Ihren derzeitigen Gesundheitszustand bei diesen Tätigkeiten eingeschränkt ? Wenn ja, wie stark ?

(Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile nur eine Zahl an)

TÄTIGKEITEN	Ja, stark eingeschränkt	Ja, etwas eingeschränkt	Nein, überhaupt nicht eingeschränkt
a. anstrengende Tätigkeiten, z.B. schnell laufen, schwere Gegenstände heben, anstrengenden Sport treiben	1	2	3
b. mittelschwere Tätigkeiten, z.B. einen Tisch verschieben, staubsaugen, kegeln, Golf spielen	1	2	3
c. Einkaufstaschen heben oder tragen	1	2	3
d. mehrere Treppenabsätze steigen	1	2	3
e. einen Treppenabsatz steigen	1	2	3
f. sich beugen, knien, bücken	1	2	3
g. mehr als 1 Kilometer zu Fuß gehen	1	2	3
h. mehrere Straßenkreuzungen weit zu Fuß gehen	1	2	3
i. eine Straßenkreuzung weit zu Fuß gehen	1	2	3
j. sich baden oder anziehen	1	2	3

4. Hatten Sie in den vergangenen 4 Wochen aufgrund Ihrer körperlichen Gesundheit irgendwelche Schwierigkeiten bei der Arbeit oder anderen alltäglichen Tätigkeiten im Beruf bzw. zu Hause ?

(Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile nur eine Zahl an)

SCHWIERIGKEITEN	JA	NEIN
a. Ich konnte nicht so lange wie üblich tätig sein	1	2
b. Ich habe weniger geschafft als ich wollte	1	2
c. Ich konnte nur bestimmte Dinge tun	1	2
d. Ich hatte Schwierigkeiten bei der Ausfüllung (z.B. ich mußte mich besonders anstrengen)	1	2

4

8. Inwieweit haben die Schmerzen Sie in den vergangenen 4 Wochen bei der Ausübung Ihrer Alltagstätigkeiten zu Hause und im Beruf behindert ?

(Bitte kreuzen Sie nur eine Zahl an)

Überhaupt nicht..... 1  
Ein bißchen..... 2  
Mäßig..... 3  
Ziemlich..... 4  
Sehr..... 5

9. In diesen Fragen geht es darum, wie Sie sich fühlen und wie es Ihnen in den vergangenen 4 Wochen gegangen ist. (Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile die Zahl an, die Ihrem Befinden am ehesten entspricht). Wie oft waren Sie in den vergangenen 4 Wochen...

(Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile nur eine Zahl an)

BEFINDEN	Immer	Meistens	Ziemlich oft	Manch-Mal	Selten	Nie
a. ...voller Schwung	1	2	3	4	5	6
b. ...sehr nervös	1	2	3	4	5	6
c. ...so niedergeschlagen, daß Sie nichts aufheuern konnte ?	1	2	3	4	5	6
d. ...ruhig und gelassen	1	2	3	4	5	6
e. ...voller Energie?	1	2	3	4	5	6
f. ...entmutigt und traurig	1	2	3	4	5	6
g. ...erschöpft	1	2	3	4	5	6
h. ...glücklich	1	2	3	4	5	6
i. ...müde	1	2	3	4	5	6

10. Wie häufig haben Ihre körperliche Gesundheit oder seelischen Probleme in den vergangenen 4 Wochen Ihre Kontakte zu anderen Menschen (Besuche bei Freunden, Verwandten usw.) beeinträchtigt?

(Bitte kreuzen Sie nur eine Zahl an)

Immer..... 1  
 Meistens..... 2  
 Manchmal..... 3  
 Selten..... 4  
 Nie..... 5

11. Inwieweit trifft jede der folgenden Aussagen auf Sie zu ?

(Bitte kreuzen Sie in jeder Zeile nur eine Zahl an)

AUSSAGEN	Trifft ganz zu	Trifft weitgehend zu	Weiß nicht	Trifft weitgehend nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
a. Ich schein etwas leichter als andere krank zu werden	1	2	3	4	5
b. Ich bin genauso gesund wie alle anderen, die ich kenne	1	2	3	4	5
c. Ich erwarte, daß meine Gesundheit nachläßt	1	2	3	4	5
d. Ich erfreue mich ausgezeichneter Gesundheit	1	2	3	4	5

12. Wie würden Sie Ihren derzeitigen Gesundheitszustand beschreiben ?

sehr gut o gut o mittelmäßig o schlecht o sehr schlecht o

## Anlage 2 (Visuelle Analogskala)

Bitte markieren Sie auf der Skala wie stark Sie **innerhalb der letzten 24h** durchschnittlich Ihre Schmerzen empfanden.

*Kennzeichnen Sie dazu bitte die zutreffende Lokalisation mit einem senkrechten Strich.*



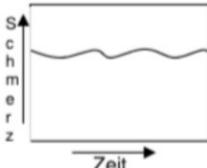
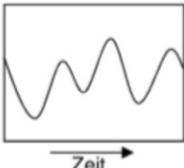
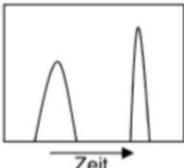
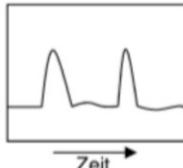
### Anlage 3 (Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit)

#### Schmerzhäufigkeit

Bitte charakterisieren Sie die Häufigkeit Ihres Schmerzerlebens anhand folgender Fragen.

Bitte kreuzen Sie dazu diejenige Antwortmöglichkeit an, die für Sie am Besten zutrifft.

a) Welche der Aussagen trifft auf Ihre **Schmerzen** in den letzten 4 Wochen am besten zu?  
(Bitte nur **eine** Angabe machen!)

			
1) Dauerschmerzen mit leichten Schwankungen <input type="radio"/>	2) Dauerschmerzen mit starken Schwankungen <input type="radio"/>	3) Schmerzattacken, dazwischen schmerzfrei <input type="radio"/>	4) Schmerzattacken, auch dazwischen Schmerzen <input type="radio"/>

Wenn Sie an Schmerzattacken leiden (Bild 3 und 4), beantworten Sie bitte zusätzlich noch folgende Fragen:

b) **Wie oft** treten diese Attacken durchschnittlich auf?

mehrfach täglich	<input type="radio"/>	einmal täglich	<input type="radio"/>	mehrfach wöchentlich	<input type="radio"/>
einmal wöchentlich	<input type="radio"/>	mehrfach monatlich	<input type="radio"/>	einmal monatlich	<input type="radio"/>
seltener:	<input type="radio"/>	_____			

c) **Wie lange** dauern diese Attacken durchschnittlich? Sekunden  Minuten

Stunden	<input type="radio"/>	bis zu drei Tagen	<input type="radio"/>	länger als drei Tage	<input type="radio"/>
---------	-----------------------	-------------------	-----------------------	----------------------	-----------------------

d) Sind Ihre Schmerzen zu bestimmten Tageszeiten besonders stark?

wenn ja:	morgens	<input type="radio"/>	mittags	<input type="radio"/>	nachmittags	<input type="radio"/>	abends	<input type="radio"/>	nein	<input type="radio"/>	nachts	<input type="radio"/>
----------	---------	-----------------------	---------	-----------------------	-------------	-----------------------	--------	-----------------------	------	-----------------------	--------	-----------------------

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b>	Anatomische Achsen (Sportklinik Halle).....	4
<b>Abb. 2:</b>	Mechanische Achsen (Sportklinik Halle) .....	4
<b>Abb. 3:</b>	Mikulicz-Linie (Sportklinik Halle).....	4
<b>Abb. 4:</b>	Ein- und Ausschlusskriterien .....	11
<b>Abb. 5:</b>	Studiendesign der prospektiven Längsschnittstudie .....	13
<b>Abb. 6:</b>	Messanordnung IBS.....	14
<b>Abb. 7:</b>	Messplatz IBS .....	14
<b>Abb. 8:</b>	Überführung eines Kraft-Zeit-Signals in ein Fourier-Spektrum mittels FFT (Schwesig und Schulze 2018, S. 19) .....	15
<b>Abb. 9:</b>	Stabilitätsindikator (ST) .....	21
<b>Abb. 10:</b>	Visuelles und nigrostriatales System (F1) .....	22
<b>Abb. 11:</b>	Peripher-vestibuläres System (F2-4).....	22
<b>Abb. 12:</b>	Somatosensorisches System (F5-6).....	22
<b>Abb. 13:</b>	Cerebelläres System (F7-8) .....	22
<b>Abb. 14:</b>	Gewichtsverteilungsindex (WDI) .....	23
<b>Abb. 15:</b>	Synchronisation (Synch) .....	23
<b>Abb. 16:</b>	Gewichtsverteilungsindex (WDI) einseitig vs. beidseitig operierte Patienten.....	24
<b>Abb. 17:</b>	Einfluss der Materialentfernung auf den Stabilitätsindikator .....	27
<b>Abb. 18:</b>	KÖFU im Längsschnitt .....	29
<b>Abb. 19:</b>	KÖRO im Längsschnitt.....	29
<b>Abb. 20:</b>	SCHM im Längsschnitt.....	30
<b>Abb. 21:</b>	AGES im Längsschnitt .....	30
<b>Abb. 22:</b>	VITAL im Längsschnitt .....	30
<b>Abb. 23:</b>	SOFU im Längsschnitt .....	30
<b>Abb. 24:</b>	EMRO im Längsschnitt.....	31
<b>Abb. 25:</b>	PSYC im Längsschnitt .....	31
<b>Abb. 26:</b>	PCS im Längsschnitt.....	32
<b>Abb. 27:</b>	MCS im Längsschnitt .....	32
<b>Abb. 28:</b>	Längsschnittliche Darstellung VAS-Werte .....	33
<b>Abb. 29:</b>	Dauerschmerzen vs. Schmerzattacken .....	34
<b>Abb. 30:</b>	Anzahl Schmerzattacken.....	34
<b>Abb. 31:</b>	Dauer Schmerzattacken.....	35
<b>Abb. 32:</b>	Tageszeitliche Abhängigkeit.....	35

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b>	Charakteristika der Stichprobe: Alter, anthropometrische Merkmale; n=25 [MW±SD], betroffenes Bein und Seitigkeit.....	12
<b>Tab. 2:</b>	Drop-Out-Ursachen im Längsschnitt .....	12
<b>Tab. 3:</b>	Standardisierte Testpositionen des IBS.....	14
<b>Tab. 4:</b>	Frequenzbereiche und Parameter des motorischen Outputs (in Anlehnung an Bartels et al. 2019, S. 51) .....	16
<b>Tab. 5:</b>	Übersicht über die Subdimensionen.....	18
<b>Tab. 6:</b>	Vorfuß-Rückfuß-Ratio und Seitigkeit bei nur links-/rechtsseitiger vs. beidseitiger Umstellungsosteotomie [MW ± SD]; Idealwert 50%.....	26
<b>Tab. 7:</b>	Korrelation der IBS-Parameter mit der Diff_OP-MatEntf zu MZP 6.....	27
<b>Tab. 8:</b>	Korrelation der klinischen Parameter mit der Diff_OP-MatEntf zu MZP 6.....	27
<b>Tab. 9:</b>	SF-36-Skalenwert: Gesundheitsveränderung (GVER) [%]. Maxima sind fett markiert .....	32
<b>Tab. 10:</b>	Mittlere absolute Veränderungen der Schmerzintensität und gesundheits-bezogenen Lebensqualität der Patienten bezüglich der Baseline (MZP 1). .....	36

## **Erklärungen**

(1) Ich erkläre, dass ich mich an keiner anderen Hochschule einem Promotionsverfahren unterzogen bzw. eine Promotion begonnen habe.

(2) Ich erkläre, die Angaben wahrheitsgemäß gemacht und die wissenschaftliche Arbeit an keiner anderen wissenschaftlichen Einrichtung zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht zu haben.

(3) Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Alle Regeln der guten wissenschaftlichen Praxis wurden eingehalten; es wurden keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht.

25.02.2024, W. Kadler

Datum, Unterschrift

## **Danksagung**

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Insbesondere bei Herrn apl. Prof. Dr. phil. Schwesig möchte ich mich für die ausgezeichnete Betreuung im gesamten Entstehungsprozess der Dissertation bedanken. Herrn Dr. med. Jenz gilt besonderer Dank für die umfassende Vorarbeit im Rahmen der Studie, sowie auch dem gesamten Team der Sportklinik Halle, insbesondere Herrn Dr. med. Brehme.

Natürlich möchte ich mich zudem bei allen Patienten bedanken, welche sich bereiterklärten über die gesamten zwei Jahre an der Studie teilzunehmen.

Und zuletzt möchte ich mich auch bei meiner Familie für stetige Motivation und emotionalen Beistand über den gesamten Entstehungszeitraum dieser Dissertation bedanken. Ohne die Unterstützung meiner Eltern, meines Großvaters und meiner Schwester wäre die Erstellung dieser Promotion nicht möglich gewesen.