

„Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur mittels hoher tibialer additiver Osteotomie 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 Manuel Rainer Jenz
geboren am 03.12.1996 in Freiberg (Sachsen)

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

Gutachterin/Gutachter: apl. Prof. C. Eckmann, Münden
PD W. Laube, Altach

(18.01.2022)

(15.06.2022)

Referat

Die Intention der vorliegenden Arbeit umfasste die längsschnittliche Evaluation posturaler Regulation und Stabilität sowie die Eruierung von Entwicklungen hinsichtlich der Schmerzintensität, -häufigkeit und -empfindung prä- und postoperativ hoher tibialer additiver Umstellungsosteotomie bei symptomatischer Tibia vara.

Im Zeitraum von Mai 2018 bis März 2020 wurden 32 Patienten zu jeweils definierten Messzeitpunkten (MZP 1: präoperativ, MZP 2: 6 Wochen postoperativ, MZP 3: 12 Wochen postoperativ, MZP 4: 6 Monate postoperativ) mit Hilfe des Interactive Balance Systems (IBS), Short Form-36 (SF-36), Visueller Analogskala (VAS) und eines Fragebogens zur Häufigkeitsanalyse des Schmerzes längsschnittlich untersucht.

Die statistische Auswertung erfolgte mittels SPSS Statistics Version 25.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) und Microsoft Excel 2010 für Windows.

Die operative Beinachsenkorrektur führte seitens der posturalen Stabilität zu keinem signifikanten Gesamtzeiteffekt während des Betrachtungszeitraumes ($p=0,728$; $\eta_p^2=0,012$). Innerhalb der posturalen Subsysteme spiegelte lediglich der cerebelläre Frequenzbereich F 7 - 8 (MZP 3: $p=0,005$; $\eta_p^2=0,118$, MZP 4: $p=0,010$; $\eta_p^2=0,103$) signifikante Mittelwertdifferenzen bezüglich der Referenzstichprobe wider. Darüber hinaus konnte in keinem der posturalen Subsysteme ein signifikanter Gesamtzeiteffekt detektiert werden. Demgegenüber führte die open-wedge HTO und die postoperative Rehabilitationsphase zu Verbesserungen seitens des Gewichtsverteilungsindex (WDI) ($p=0,001$; $\eta_p^2=0,297$) und zu einer ausbalancierteren mediolateralen Lastverteilung sowohl bei den links- ($p=0,001$; $\eta_p^2=0,547$) als auch rechtsseitig ($p=0,031$; $\eta_p^2=0,163$) operierten Patienten. Zum MZP 4 zeigte sich im Bereich der prozentualen Vorfuß-Rückfuß-Belastung für die rechtsseitig vorgenommenen Umstellungsosteotomien eine geringgradig schlechtere anterior-posteriore Lastverteilung im Vergleich zum MZP 1 ($p=0,052$; $\eta_p^2=0,131$).

Mit zunehmenden postoperativen Zeitintervall, stieg die Lebensqualität in allen Subskalen des SF-36 über dem Wert der präoperativen Messung. Die operativ valgisierende Beinachsenkorrektur führte, gemessen anhand der Visuellen Analogskala, zu einer signifikanten Reduktion ($p<0,001$; $\eta_p^2=0,438$) der Schmerzintensität. Des Weiteren konnte eine Abnahme der „Dauerschmerzen“ (MZP 1: 50%; MZP 4: 6%) und Zunahme der „Schmerzattacken mit Intervallen vollständiger Schmerzfreiheit“ (MZP 1: 28%; MZP 4: 88%) eruiert werden. Patienten, die bereits präoperativ an Schmerzattacken litten, reduzierten weiterhin die Frequenz als auch die zeitliche Länge ihrer Attacken deutlich. Zusätzlich verringerte sich die Angabe tageszeitlicher Schmerzmaxima während des Studienverlauf (MZP 1: 69%; MZP 4: 30%). Patienten mit postoperativer Schmerzpersistenz äußerten vermehrt Schmerzmaxima während den Morgen- (MZP 1: 24%; MZP 4: 50%) und Abendstunden (MZP 1: 29%; MZP 4: 30%), hingegen bildeten sich die nächtlichen Schmerzangaben (MZP 1: 19%; MZP 4: 0%) 6 Monate postoperativ vollständig zurück.

Die vergleichsweise schlechten posturographischen Ergebnisse (z.B. Parameter Heel) sind unter Umständen ein Beleg dafür, dass die rehabilitativen Maßnahmen dem patienteneigenen Gesundheitszustand unzureichend wirksam gegenüberstehen. Insbesondere die einfache Implementierung der Messsysteme in den klinischen Alltag sowie die zeitnahe Rückmeldung an die Patienten offeriert ein hohes Potenzial in der nachoperativen Betreuung als auch die Grundlage einer zunehmend patientenindividuelleren physiotherapeutischen Rehabilitation.

Jenz, Manuel Rainer: Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur mittels hoher tibialer additiver Osteotomie auf die posturale Stabilität und Regulation, Halle (Saale), Univ., Med. Fak., Diss, 80 Seiten, 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Messverfahren.....	2
1.2	Die Articulatio genus.....	9
1.3	Patho-/Physiologie der unteren Extremität.....	11
1.4	Kontra-/Indikationen der hohen tibialen (open-wedge) Osteotomie..	14
1.5	Präoperatives Planungsverfahren nach Miniaci.....	16
1.6	Operationsprocedere.....	18
2	Zielstellung und Hypothesen.....	23
3	Material und Methodik.....	25
3.1	Untersuchungsstichprobe.....	25
3.2	Studienablauf.....	25
3.3	Posturographie (Interactive Balance System, IBS).....	26
3.4	Short Form - 36 (SF-36).....	31
3.5	Visuelle Analogskala (VAS).....	33
3.6	Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit.....	35
3.7	Statistische Datenanalyse.....	36
4	Ergebnisse.....	37
4.1	Stichprobe.....	37
4.2	Gewichtsverteilung und Fußkoordination.....	38
4.3	Posturale Stabilität.....	41
4.4	Posturale Subsysteme.....	41
4.5	Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit.....	43
5	Diskussion.....	53
5.1	Ergebnisdiskussion.....	53
5.2	Methodendiskussion (Limitationen).....	63
6	Zusammenfassung.....	65
7	Literaturverzeichnis.....	67
8	Thesen.....	76
9	Anhang.....	77

Abkürzungsverzeichnis

A.	Arteria
Abb.	Abbildung
AGES	Allgemeiner Gesundheitszustand
AZ	Aktenzeichen
BMI	Body Mass Index
bzw.	beziehungsweise
cm	Zentimeter
CoG	Center of Gravity
CoP	Center of Pressure
cwHTO	closed-wedge hohe tibiale Osteotomie
EMG	Elektromyografie
EMRO	Emotionale Rollenfunktion
etc.	et cetera
f.	folgend
F 1	Frequenzbereich für das visuelle Subsystem
F 2 - 4	Frequenzbereich für das peripher-vestibuläre Subsystem
F 5 - 6	Frequenzbereich für das somatosensorische Subsystem
F 7 - 8	Frequenzbereich für das zentrale, cerebelläre Subsystem
FFT	Fast Fourier Transformation
GVER	Veränderung der Gesundheit
h	Stunde
HB	Augen geschlossen, Reklination des Kopfes
HF	Augen geschlossen, Anteversion des Kopfes
HL	Augen geschlossen, Kopf 45° nach links rotiert
HR	Augen geschlossen, Kopf 45° nach rechts rotiert
HTO	Hohe tibiale Osteotomie
Hz	Hertz
IBS	Interactive Balance System
ICC	Intraclass Korrelationskoeffizient
kg	Kilogramm
kg/m ²	Kilogramm pro Quadratmeter
KI	Konfidenzintervall
KÖFU	Körperliche Funktionsfähigkeit
KÖRO	Körperliche Rollenfunktion
LOQTEQ	Plattenfixateur
m	Meter
M.	Musculus
MAD	Mechanical axis deviation
min	Minuten
mLDFW	Mechanisch lateraler distaler Femurwinkel
mm	Millimeter
mMPTW	Mechanisch medialer proximaler Tibiawinkel
MOS	Medical Outcome Study
MPTA	Medialer proximaler Tibiawinkel
MRT	Magnetresonanztomographie

MW	Mittelwert
MZP	Messzeitpunkt
N.	Nervus
NC	Augen geschlossen, Kopf gerade
NRS	Numerische Rationalskala
NO	Augen offen, Kopf gerade
o.g.	oben genannt
owHTO	open-wedge hohe tibiale Osteotomie
OR	Odds Ratio
p	p-Wert
PO	Augen offen, Kopf gerade, auf Schaumstoffpolster (32 cm x 12,5 cm x 6,5 cm) stehend
PC	Augen geschlossen, Kopf gerade, auf Schaumstoffpolster (32 cm x 12,5 cm x 6,5 cm) stehend
PSYC	Psychisches Wohlbefinden
r	Korrelationskoeffizient
s	Sekunden
SCHM	Körperlicher Schmerz
SD	Standardabweichung
SF-36	Short Form - 36
SOFU	Soziale Funktionsfähigkeit
ST	Stabilitätsindikator
Tab.	Tabelle
TOES/HEEL	Synchronisation Vorfuß/Rückfuß
TomoFix™	Plattenfixateur
v.a.	vor allem
VAS	Visuelle Analogskala
VITA	Vitalität
VOR	Vestibulookulärer Reflex
vs.	versus
W.D.	Weight Distribution
WDI	Weight Distribution Index (Gewichtsverteilungsindex)
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
η_p^2	partielles eta-Quadrat
α	alpha
β	beta
γ	gamma
&	und
Δ	Differenz
<	kleiner
>	größer
≠	ungleich
~	rund
±	plus minus
♂	Männliches Geschlecht
✓	vorhanden

1 Einleitung

Lastachsenverschiebungen der unteren Extremität können im Sinne einer Varus- oder Valgusstellung und der damit einhergehenden erhöhten unikompartimentellen Druckbelastung zu der Entstehung und Progression einer vorzeitigen Gonarthrose mit chronischen Schmerzsyndrom beitragen. Neben operativen Interventionen wie die total- oder teildoprothetische Versorgung, bieten vor allem kniegelenksnahe Umstellungsosteotomien einen kausalen Behandlungsansatz für den Patienten (Martinek und Imhoff, 2003).

Ziel der HTO ist es, sowohl eine Entlastung des geschädigten Kniekompartiments als auch die physiologische Beinachse operativ wiederherzustellen.

Achsfehlstellungen können neben in oben genannter Frontalebene (Genu varum, Genu valgum) mit größter klinischer Relevanz, gleichfalls in der Sagittalebene (Genu recurvatum) und in der Transversalebene (Innen- und Außenrotation) apparent werden. Darüber hinaus ist es möglich, dass Achsabweichungen zusätzlich in verschiedenen Kombinationen oder Ebenen auftreten. Die Kausalität kann dabei kongenitaler beziehungsweise konstitutioneller Natur sein oder durch degenerative Knorpeldefekte begünstigt werden. Darüber hinaus sind auch posttraumatische Komplikationen (z.B. fehlerheilte Frakturen) von Relevanz (Schnurr und König, 2019). In dieser Studie lag der Fokus auf dem Genu varum, da Achsfehlstellungen dieser Art nicht nur eine im Mittel 2fach erhöhte Arthrosegefahr im Gelenkabschnitt erzeugen, sondern auch eine circa 3fach vergrößerte Arthroseprogredienz im Vergleich zu einem Kollektiv mit gesunder unterer Achsstellung aufweisen können (Brouwer et al., 2007). Es ist hinlänglich bekannt, dass Patienten mit medialer Gonarthrose je nach ausgeprägter Beschwerdesymptomatik aufgrund von belastungsabhängigen Schmerzen unter Funktionseinschränkungen im Alltag leiden. Infolge einer operativen Beinachsenkorrektur profitiert die Mehrheit maßgeblich an einem Zugewinn von Lebensqualität (Sprangers et al., 2000; Duchow und Kohn, 2003; Ihle et al., 2016; Herbst et al., 2020). Bislang liegen nur wenig wissenschaftliche Studien vor, die sich mit den postoperativen Auswirkungen einer HTO auf die Haltungsverstärkung und Regulation beschäftigen haben (Hunt et al., 2009).

Die Hauptintentionen der vorliegenden Studie *„Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur mittels hoher tibialer additiver Osteotomie auf die posturale Stabilität und Regulation“* bestanden in der präoperativen Evaluation des Einflusses einer varischen Beinachse sowie der anschließenden Effekte einer operativen Achskorrektur hinsichtlich der posturalen Stabilität und Regulation. Gleiches

gilt für die longitudinale Darstellung der patientenindividuellen Lebensqualität und Schmerzcharakteristik.

Der unmittelbare Nutzen für den einzelnen Patienten resultierte in der begleitenden postoperativen Betreuung, der zeitnahen Rückmeldung bezüglich der individuellen Haltungs- und Gleichgewichtsregulation (Posturographie) sowie der längsschnittlichen Darstellung des Schmerzgeschehens (SF-36, VAS, Schmerzhäufigkeitsanalyse)

1.1 Messverfahren

Der Körper des Menschen befindet sich sowohl im aufrechten Stand wie auch Gang in einem zumeist in sich instabilen Zustand. Insbesondere der normale Gangzyklus mit seiner Schwung- (ca. 40%) und Standphase (ca. 60%) erzeugt während des Einbeinstandes eine stete Destabilisierung (Perry, 2003). Zur Generierung einer Haltungsstabilität bedarf es der Korrekturmechanismen des „posturalen Systems“.

Der evolutionär bedingte bipedale Stand birgt im Vergleich zum Vierfüßlerstand ein von sich aus gesteigertes Sturzrisiko. Etwaige äußere Umgebungseinflüsse zum Beispiel Erschütterungen, Stöße oder unebene Standflächen erhöhen darüber hinaus die Wahrscheinlichkeit eines Sturzereignisses beziehungsweise den individuellen Unsicherheitsgedanken.

Der Terminus Posturographie leitet sich vom englischen Wort „posture“ und vom griechischen „graphie“, in Deutsch „Haltung“ und „zeichnen“, ab und wird am treffendsten sinngemäß mit „Haltungsanalyse“ übersetzt. Hierbei werden Wegparameter bezogen auf definierte Körperpunkte des aufrechtstehenden Menschen hinsichtlich seiner Lage- und Bewegungsänderung erfasst. Dabei ist die physiologische Körperhaltung als solche mit geringer muskulärer Anstrengung, Belastung, Ermüdung und Schmerz definiert (Schwesig, 2006; Bartow, 2012). Messmethodisch zu verorten ist die Posturographie innerhalb der elektrophysiologischen Diagnostik.

Die Intaktheit der Gleichgewichtsregulation beziehungsweise -aufrechterhaltung ist maßgeblich verantwortlich für die Minimierung einer durch Beeinträchtigung der Balance hervorgerufenen erhöhten Fallneigung des Individuums. Angesprochene Faktoren können endogener (Blutzirkulation, Atmung, psychische und physische Verfassung) und/oder exogener (unebene Untergrundbeschaffenheit) Natur sein (Schwesig, 2006; Young und Mark Williams, 2015). Eine vollständige sich in Ruhe befindliche Körpersituation ist demnach ausgeschlossen. Die Haltungsregulation und posturale Stabilität werden durch geringe, reflektorisch oszillierende Ausgleichsbewegungen hervorgerufen. Diese sind das Ergebnis synergistischer und antagonistischer Muskelaktivität (Schwesig, 2006).

Posturographische Untersuchungsmethoden erfolgen heutzutage vor allem im Hinblick auf die Vermessung von Körperschwankungen im aufrechten Stand in Ruhelage sowie unter provozierter Bewegung der Standfläche. Die einfache Handhabung und computergestützte Datenauswertung ermöglichen die Verwendung in Fachbereichen der Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Neurologie, Orthopädie und in der Schwindeldiagnostik/-therapie (Schwesig, 2006). Die Stabilitäts- und Haltungsregulation spiegeln dabei wesentliche Komponenten der individuellen Ganzkörperkoordination wider und können mit Hilfe der Posturographie indirekt abgeschätzt werden. Da es dem Menschen nicht willentlich möglich ist, vollkommen regungslos auf seinem Untergrund zu stehen, würden auch bei gesunden Probanden bestimmte Schwankungsmuster um eine stabile Lage auftreten („Standunruhe“). Problematisch wird dies, wenn es zu größeren Gewichtsverlagerungen (Ausgleichsbewegungen), bezogen auf die physiologisch durchschnittliche Standstabilität, kommt und somit Rückschlüsse auf eventuell vorhandene Funktionseinschränkungen der gleichgewichtserhaltenden Subsysteme gezogen werden müssten (Schwesig, 2006).

Die Geschichte der posturographischen Vermessung reicht bis in das 19. Jahrhundert zurück. In den Anfängen wurde als Maß der Körperschwankung bei ruhig stehenden Patienten die Auslenkung des Kopfes visuell an auf Kopfhöhe angebrachter Lineale („sway meter“ - Silas Weir Mitchell) vom Untersucher abgelesen. Später konnten bereits Körperschwankungen grafisch erfasst werden („Ataxiagraph“ - Charles Dana) (Lanska, 2002). Währenddessen wurde der Ableitung der Verteilung von Fußdrücken auf dem Untergrund erst relativ spät Beachtung geschenkt (Schwesig, 2006).

Grundsätzlich kann die Gleichgewichtsanalyse in subjektive und objektive Verfahren differenziert werden. Die subjektive Diagnostik umfasst die Selbsteinschätzung anhand von Fragebögen oder der Beurteilung Dritter. Der Bereich der objektiven posturographischen Verfahren gliedert sich in einen dynamischen und „statischen“ Anteil. Primär das Auslösen aktiver posturaler Reaktionen und die Bewertung deren Effizienz unterscheidet die dynamische (Parameter: Gleichgewichtsregulation) von der das individuelle Schwankungsverhalten auf festem oder weichem Untergrund analysierenden „statischen“ Posturographie (Parameter: Haltungsregulation) (Schwesig, 2006). In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Methoden eingehend erläutert.

Um die posturale Stabilität subjektiv beurteilen zu können, bedarf es einer mehrgleisig aufgestellten Diagnostik. Der Patient durchläuft dazu orientiert durchgeführte, psychische und physische Untersuchungsverfahren. Zur Überprüfung der Standsicherheit kann beispielsweise der Romberg-Versuch genutzt werden. Bei diesem

Untersuchungsverfahren steht der Proband mit geschlossenen Augen und vorgestreckten Armen aufrecht an einer definierten Stelle. Eine eventuelle Orientierung an akustischen, visuellen oder andersartig auf den zu Untersuchenden einwirkenden äußeren Reizen sollte im Vorfeld bereits ausgeschlossen werden. Eine entsprechende Fallneigung ein- oder beidseits gilt als pathologisch (Romberg-Versuch positiv). Zusätzlich zu einer körperlichen Testung sollte eine Befragung des Patienten auf früher stattgehabte Sturzereignisse oder Einschränkungen in bestimmten motorischen und sozialen Aktivitäten (z.B. anhand Activities Specific Balance Confidence Scale) erfolgen (Lanska, 2002; Cameron und Huisinga, 2013). Es gilt zu prüfen, inwiefern sich Stürze mit dieser Methode bei eingeschränktem Erinnerungsvermögen oder verminderter motorischer Aktivität und folglich verfälscht geringer ermitteltem Sturzrisiko eruieren lassen. Darüber hinaus könnten Vorfälle in die patienteneigene Betrachtung inkludiert werden, welche aufgrund externer Effekte unvermeidbar gewesen sind und nicht primär auf eine Gleichgewichtsproblematik hindeuten würden.

Im objektiven Bereich wird die „statische“ von der dynamischen Posturographie abgegrenzt. Zweites Verfahren ermittelt die Körperschwankungen beispielsweise mit Hilfe eines an der Hüfte (Körperschwerpunkt) befestigten Gurtsystems (z.B. VertiGuard-System). Ein außerordentlicher Vorteil dieses Systems besteht in der Darstellung alltagsrelevanter, komplexer Aufgaben wie Laufen, Treppensteigen etc. (Basta und Ernst, 2011; Basta et al., 2013). In einem weiteren Messverfahren können bewegliche, zur Auslenkung (Perturbation in mediolateral, anteriorposterior) fähige Plattformen eingesetzt werden (z.B. Equitest). Die perturbative Posturographie ermittelt die Fähigkeit des Patienten, plötzlich auftretende Manipulationen in Vorwärts-, Rückwärts- oder Kippbewegungen ausgleichen zu können. Diese Art Testverfahren mit entsprechenden Provokationsmanövern kann zudem in zwei Untergruppen klassifiziert werden. Dementsprechend existiert die Möglichkeit, das Resultat von durch den Patienten selbst hervorgerufener Auslenkungen auf einem instabilen Boden und den darauffolgenden Versuch des kompensatorischen Ausbalancierens zu ermitteln oder anhand standardisiert durchgeführter Perturbationen an der Untergrundplatte Korrekturbewegungen aktiv zu provozieren (Commissaris et al., 2002; Schwesig, 2006). Differenziert wird hierbei eine langsame (1° Perturbation/s) von einer schnellen (5° Perturbation/150 ms) dynamischen Posturographie (Grenzebach et al., 2004).

Trotz einer hohen realitätsnahen Darstellung, teils auch in Verbindung mit der gleichzeitigen Ableitung von Muskelreaktionen mit Hilfe einer Elektromyografie (EMG), können anhand der großen Variationsmöglichkeit an Störgrößen wie Modulationen der Frequenz, der Strecke oder des Zeitraumes einer Perturbation, nur eingeschränkt

Vergleiche zur posturalen Stabilität zwischen verschiedenen Studien gezogen werden (Turbanski, 2005).

Mit Hilfe der „statischen“ Posturographie werden Körperschwankungen in anteriorerposteriorer beziehungsweise mediolateraler Richtung detektiert und die Dimension der natürlichen Standruhe analysiert. Im Unterschied zur dynamischen Posturographie lagern sich die Kraftmessplatten auf festem Untergrund (Schwesig, 2006). Weitere Ausführungen zum in dieser Studie verwendeten Verfahren können *Kapitel 3.3 Posturographie (Interactive Balance System, IBS)* entnommen werden.

Der aufrechte bipedale Stand des Menschen stellt insofern eine spezielle Situation dar, als dass eine relativ kleine Fläche unter den Füßen einen je nach Körpergröße gelegenen Körperschwerpunkt („Center of gravity“, CoG) tarieren muss. Der besagte Punkt, lokalisiert auf circa 55% der Körperhöhe (von kaudal), ist Bestandteil der sogenannten Schwerkraftlinie, eines senkrecht durch den CoG fallenden Lots. Um einen stabilen Stand zu gewährleisten, sollte dabei der Schnittpunkt Körperlot-Boden innerhalb der Standfläche lokalisiert sein (Schwesig, 2006; Bartow, 2012).

Posturographische Vermessungssysteme detektieren die Haltungsregulation über die Messung der Veränderungen des Druckmittelpunktes auf seiner Unterstützungsfläche („Center of Pressure“, CoP) oder anhand der Lageänderung des Körperschwerpunktes beziehungsweise Massenmittelpunktes (CoG) in Bezug zu einer Horizontalebene. Der CoP ist als Schnittpunkt der Wirkungslinie der Bodenreaktionskräfte und der Oberfläche der Kraftmessplatten angegeben. Als Massenmittelpunkt spiegelt der CoG eine fixe Lokalisation wider. In ihm können alle vom Körper ausgehenden Massepunkte und deren resultierende Kräfte zu einer Gesamtkraft („Resultierende“) gebündelt werden, ohne eine Änderung am Bewegungszustand der Gesamtmasse zu erzeugen. Es gilt zu bemerken, dass von einer synonymen Verwendung beider Begriffe abzusehen ist, da diese lediglich im Bereich des vollständig starren Standes identisch sind und dem Prinzip der posturographischen Messung nicht gerecht werden würden (Schwesig, 2006). Die biologische Verknüpfung für voran genannte physikalische Prozesse, die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts anhand adäquater Reaktionsmechanismen, steuert sich nunmehr über die Verarbeitung afferenter Information der Propriozeption anhand von Muskelspindeln, Golgi-Sehnen-Organen, Tonuszustand des Stütz- und Halteapparates, Vestibularorganen und dem visuellen System im Zentralnervensystem. Die weiteren grundlegenden Komponenten des posturalen Systems werden in Tab. 1 skizziert (Gründer, 2015a).

Das visuelle System bildet, bestehend aus seinem physikalisch dioptrischen Apparat, seiner neuralen Netzhaut, den photosensorischen Prozessen und der zentralen

Verarbeitung im Neokortex, den leistungsfähigsten Fernsinn des Menschen. Ersterer ist für die exakte Abbildung der Außenwelt auf Netzhautniveau zuständig. Währenddessen transformiert die Netzhaut das Lichtsignal in ein neuronales System und erste Signalverarbeitungsprozesse können stattfinden (Gründer, 2015c).

Tab. 1: Komponenten der zentralen vestibulären Verschaltung (Gründer, 2015a, S. 645f.)

Informationeller Input (Afferenzen)	Ausgänge (Efferenzen)
<ul style="list-style-type: none"> ○ visuelles System ○ Propriozeptoren, v.a. des Halsbereichs ○ Purkinjezellen des Vestibulocerebellums sowie über die vestibuläre Kommissur vom kontralateralen Vestibulariskern 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Kerne der Augenmuskeln ○ über Moosfasern zum Vestibulocerebellum ○ Thalamus und Kortex ○ über Tractus vestibulospinalis zu Motoneurone des Rückenmarks ○ Formatio reticularis ○ andere ipsilaterale Vestibulariskerne

Insbesondere dem visuellen System kommt aufgrund der Abschätzung von Eigenbewegung des Körpers zu Fremdbewegung eine tragende Rolle zu (Berger et al., 1984). Auch die vestibulookuläre Verbindung ist in diesem Kontext anzuführen. Ihre Verschaltung von Vestibulariskernen auf Kerngebiete der Augenmuskeln ermöglicht ein aufrechtes Bild in beinahe jeder Kopfposition zu generieren (vestibulookulärer Reflex, VOR) (Gründer, 2015a).

Das Innenohr ist aufgebaut aus dem Vestibularorgan und der Cochlea. Darüber hinaus lässt sich das Vestibularorgan wiederum aufgliedern in die Makulaorgane Sacculus und Utriculus sowie die drei Bogengänge. Erstere detektieren Linearbeschleunigungen, während letztere für Rotationsbeschleunigung von Bedeutung sind (Gründer, 2015a). Informationen seitens der Vestibularorgane ermöglichen die Orientierung im Raum durch die Verschaltung von Beschleunigungs- und Richtungsveränderungen des Kopfes. Wichtig voranzustellen sei, dass lediglich die Detektion von Geschwindigkeitsänderungen als Reize wahrgenommen werden (Vertikal- und Winkelbeschleunigung $\neq 0$). Sowohl im Stand als auch in Bewegung dominiert tendenziell das vestibuläre System in Verbindung mit den visuellen Afferenzen gegenüber den anderen Subsystemen die Standmotorik (Schwesig, 2006; Gründer, 2015a).

Afferente Fasern des N. vestibularis ziehen zu den vier Vestibulariskernen. Des Weiteren bestehen Verbindungen zwischen dem lateralen und cranialen Kerngebieten sowie direkte Verknüpfungen (vestibulocerebellärer Rückkopplungsmechanismus) zum Kleinhirn, welches somit eine integrative Stellung der Koordination motorischer Aktivität

und der Aufrechterhaltung des Gleichgewichts innehat. Zahlreiche Berührungspunkte zu anderen Strukturen wie Augenmuskelkerne, Kleinhirn, Muskelspindeln und Teile der Großhirnrinde kennzeichnen das vestibuläre System keineswegs als ein geschlossenes Konstrukt (Schwesig, 2006).

Das Somatosensorische System mit seinen Mechano-, Thermo- und Nozizeptoren ist ein wesentlicher Bestandteil in der Aufnahme von Reizen der Haut (Ekterozeption; epikritischer und protopathischer Sensibilität), Eingeweiden (Enterozeption), des Bewegungsapparates (Tiefensensibilität und Propriozeption) und der zentralen Verarbeitung dieser (Gründer, 2015b). Mittels der Aktivierung permanenter posturaler Reaktionen zeigen insbesondere die Rezeptoren im Halswirbelsäulenbereich und die Sensorsysteme der Haut und des Bewegungssystems außerordentliche Bedeutung in der Aufrechterhaltung unseres Gleichgewichts (Schwesig, 2006).

Nachdem die Integration der vestibulären, somatosensorischen und visuellen Afferenzen in Strukturen des Cerebellums, der Basalganglien, des Thalamus und Cortex erfolgte, kann eine entsprechende Anpassung der Körperstellung zur Sturzvermeidung per efferenter Muskelaktivierung und darüber hinaus Gelenkbewegung auf Basis des Bewegungs- und Halteapparates realisiert werden. Dementsprechend können Verlagerungen des Körperschwerpunktes durch posturale Störgrößen mittels der Integration unterschiedlicher sensorischer Informationen reflektorisch entgegengesteuert und spezifische motorische, kompensatorische Ausgleichsbewegungen generiert (= posturale Reaktion) werden. Im besonderen Maß betrifft diese die Rumpf- und Beinmuskulatur, welche hiermit einen außerordentlichen Beitrag zur Gewährung der individuellen Standstabilität innehat (Froböse et al., 2003).

Als ein Beispiel ist die Anspannung der Rumpf- und Beinextensoren von Hüft-, Knie- und Sprunggelenke aufzuführen. Sie dient der Balance und folglich dem Ziel einer gewissen Haltungsstabilität in Frontal- wie auch Sagittalebene (Berger et al., 1984).

Koordinationsstörungen im Bereich der Stütz-/Zielmotorik, des Gleichgewichts und der Okulomotorik und damit sekundär des gezielten und dosierten Einsatzes von Muskulatur können darüber hinaus im Bereich des Cerebellums auf Funktionsbeeinträchtigungen affer- und efferenter Verbindungen hinweisen (Schwesig, 2006).

Die multilokuläre Verknüpfung zeigt, dass die Betrachtung des posturalen Systems dem eines geschlossenen Konstruktes (z.B. auditives System) nicht gerecht werden würde. Ausfälle einzelner afferenter Subsysteme als auch persönliche Gefühlszustände können zu Einschränkungen in der individuellen Haltungsregulation und Standstabilität führen (Woollacott et al., 1986; Bolmont et al., 2002; Thomas et al., 2018).

Es gilt zu beachten, dass die Gleichgewichtsregulation ebenfalls im Wesentlichen von den angeeigneten motorischen Vorerfahrungen wie auch des Muskelstatus abhängig zu sein scheint. Muskelatrophie infolge von Immobilisation und schmerzbedingter Einschränkungen aufgrund arthrotischer Veränderungen, Gelenkkontrakturen oder eine anderweitig herabgesetzte Leistung des Bewegungsapparates können einer angepassten posturalen Regulation konträr gegenüberstehen (Pierobon und Funk, 2013).

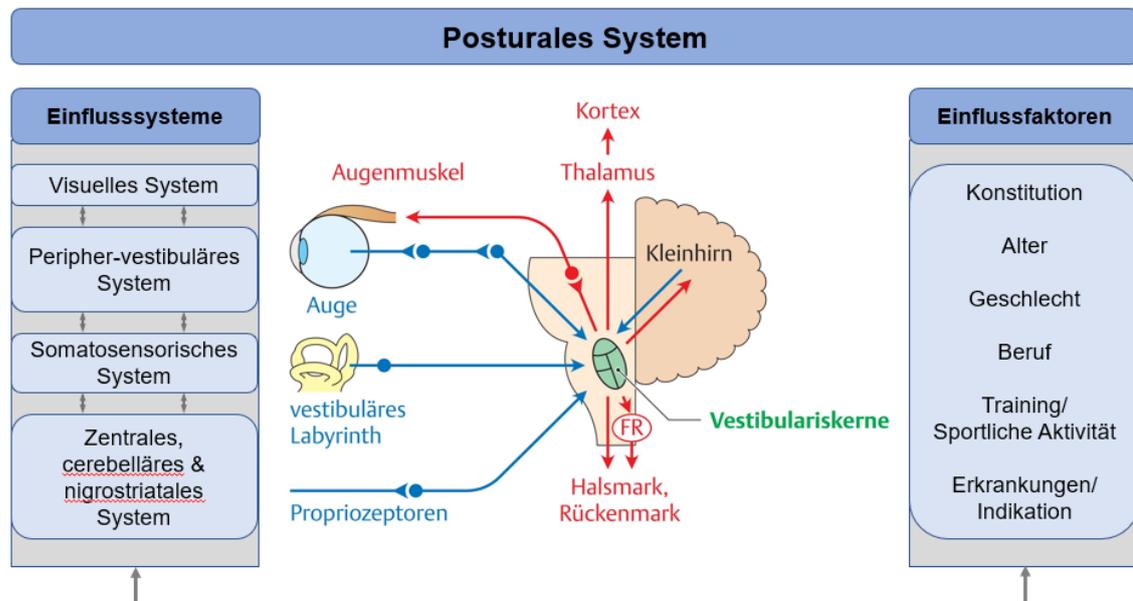


Abb. 1: Einflusssysteme und -faktoren des Posturalen Systems
(in Anlehnung an Schwesig, 2006, S. 51 und Gründer, 2015a, S. 646)

Das posturale System umfasst eine Vielzahl von Einflussfaktoren und -systemen, welche ihre Effekte auch in Interaktion zueinander wirken lassen. Daran knüpft sich unabdingbar die Tatsache, dass eine differenzierte Erfassung einzelner potentieller Faktoren/Systeme nur bedingt möglich zu sein scheint. Im Zuge der komplexen Verknüpfungen und Plastizität (Pfeile), die in Abb. 1 illustriert wird, ist vielmehr von einer systemdynamischen Komponente im Rahmen der Aufrechterhaltung posturaler Stabilität auszugehen. Insbesondere verdeutlichen diesen Umstand die zahlreichen, multimodalen Interaktionen afferenter Sinnessysteme. Einflussfaktoren, betrachtet als unabhängige Variablen, prägen darüber hinaus die Einflusssysteme. Exemplarisch kann hier die Beziehung zwischen der Konstitution, auf Basis von Körpergewicht und -größe, auf die posturale Stabilität angeführt werden. Natürlich sind die zahlreichen Interaktionen unter Berücksichtigung des Alters zu werten (Schwesig, 2006).

Zusammenfassend ermöglichen posturographische Messungen von Patienten individuelle Aussagen über deren kompensatorische Ausgleichsbewegungen als Beitrag der Haltungsstabilität unter oder ohne perturbativen Einfluss. Des Weiteren können mit ihnen die uni- wie bipedale Gewichtsverteilung dargestellt werden.

Insbesondere die nicht invasive wie auch zeitlich vertretbare Untersuchungsdauer (circa 5 - 10 min, 8 Messungen á 32 s) lässt eine patientenorientierte, quer- wie auch längsschnittliche Begutachtung und somit auch praxiskonforme Beurteilung konservativer wie postoperativer Behandlungsmaßnahmen zu.

Es ist anzumerken, dass die Ergebnisse einer Posturographie die Summe aller Haltungsänderungen des Körpers bezogen auf den Körperschwerpunkt, projiziert auf die horizontale Messfläche, widerspiegeln. Dementsprechend sind schlussfolgernde Aussagen über die kompensatorischen Prozesse einzelner Körperabschnitte nur relativ zu sehen. Vielmehr bedarf es einer ganzheitlichen Betrachtung der posturalen Stabilität und Regulation (Schwesig, 2006).

1.2 Die Articulatio genus

Als größtes Gelenk des menschlichen Körpers bildet die Articulatio genus als Dreh- und Scharniergelenk (Trochoginglymus), in mittlerer Position der unteren Extremität, die Möglichkeit der Beugung, Streckung und Rotation des Unter- gegenüber des Oberschenkels (Platzer und Shiozawa, 2018).

Während des physiologischen Laufvorganges können Kräfte zwischen dem 2- bis 3fachen des eigenen Körpergewichts zum Tragen kommen (D'Lima et al., 2012).

Das Kniegelenk umfasst drei Teilgelenke. Zum einen das Femorotibial- und das Femoropatellar und zum anderem das proximale Fibulotibialgelenk. Beide zuerst genannten umlagert eine gemeinsame Gelenkkapsel bestehend aus der Membrana synovialis und fibrosa. Die Synovia dient vordergründig der Knorpelnutrition.

Die Gelenkfacetten der Facies articularis superior tibiae artikulieren mit den Condyli femoris im Articulatio femorotibialis. Im Articulatio femoropatellaris hingegen treten die Facies patellaris des Femurs mit der Facies articularis der Patella in Kontakt. Zu beachten gilt, dass die Trochlea als eine Art Gleitlager der Kniescheibe zu beschreiben ist. Bei der Betrachtung dieser zeigen sich unterschiedlich ausgeprägte Kondylenhöhen. Zumeist ist die laterale Condylenwange nach cranial erhöht und verbreitert, so dass eine nach medial verlagerte Rinne der Trochlea entsteht. Die relative Inkongruenz des Gelenks, begründet durch die konvexen Femurkondylen dem bikonkaven medialen und konvexen lateralen Tibiaplateau, wird aktiv (z.B. M. quadriceps) und passiv (v.a. Kollateral- und Kreuzbänder) stabilisierend gesichert. Primär der Innen- und Außenmeniskus, als ausgleichende Strukturen zwischen den Femurkondylen und dem Tibiaplateau, haben punktuell den höchsten Betrag an einwirkenden Kräften aufzunehmen (Ficklscherer und Weidert, 2012). Die Menisken zeichnen sich durch eine Druckverformbarkeit anhand ihres nach medial keilförmig zulaufendem anatomischem Aufbaus, bestehend aus peripheren Faserknorpels und zentralen straffen

Bindegewebes, aus. Der c-förmige innere Meniskus ist aufgrund seiner Verwachsung mit der Gelenkkapsel wie auch dem Ligamentum collaterale tibiale bedingt in seiner Lage verschiebbar. Lediglich mit der Gelenkkapsel verbunden, ist der dreiviertelkreisförmige Außenmeniskus deutlich beweglicher. Eine zusätzliche Verbindung seines Hinterhorns zum Ligamentum cruciatum posterius ist möglich. Das Ligamentum transversum genus gilt dabei als konnektierende Komponente zwischen beiden Menisci (Wurzinger, 2017).

Die extrakapsuläre Stabilisierung des Kniegelenkes wird durch die folgenden Bänder gewährleistet: Retinaculum patella mediale und -laterale als auslaufende Anteile der Sehnen der M. vastus medialis und lateralis.

Der passive das Kniegelenk stabilisierende Bandapparat gliedert sich in Außen- und Innenbänder. Die Sehne des Musculus quadriceps femoris zieht, die Kniescheibe als Hypomochlion integrierend, bis zur Basis der Patella. Als Fortsetzung der Sehne des Musculus rectus femoris spannt sich das Ligamentum patellae vom Apex bis zur Tuberositas tibiae und ermöglicht dementsprechend eine effiziente Kraftübertragung des Musculus quadriceps femoris auf seinen Ansatz. Das Ligamentum collaterale fibulare zieht von der lateralen Femurkondyle zum Caput fibulae, während das Ligamentum collaterale tibiale von der medialen Femurkondyle, anhaftend am medialen Meniskus und Gelenkkapsel, zur Facies medialis tibiae verläuft. Weitere passive Stabilisatoren bilden das Ligamentum patellae, das Ligamentum popliteum obliquum und arcuatum und das Retinaculum patellae mediale und laterale. Die Kreuzbänder sichern die Articulatio genus in der Sagittalebene und den Kontakt zwischen Femur und Tibia. Strukturell liegen die Innenbänder extrasynovial und intraartikulär. Das Ligamentum cruciatum anterius spannt sich vom Condylus femoris lateralis zur Area intercondylaris anterior. Gegliedert in ein anteromediales und posterolaterales Band beschränkt es die Innen- und Außenrotation und verhindert eine Luxation der Tibia nach vorn. Von der lateralen Fläche des Condylus femoris medialis verläuft das Ligamentum cruciatum posterius zur Area intercondylaris posterior. Seines Verlaufs entsprechend wirkt es als stabilisierender Faktor während der Beugung und vermindert eine dorsale Luxationsgefahr des Schienbeins (Schünke et al., 2018a).

Als ein Trochoginglymus (Dreh-Scharniergelenk) ist das Kniegelenk fähig, Bewegungen in der Longitudinal- als auch Transversalachse durchzuführen. Die insgesamt fünf Freiheitsgrade können hierbei in zwei Drehbewegungs- und drei Verschiebungsfreiheitsgrade aufgeschlüsselt werden. Eine Extension von 0 - 10° wird zunehmend durch den umgebenden Bandapparat bzw. eine Flexion von 120 - 150° durch die aktive Muskelinsuffizienz der ischiokruralen Muskulatur begrenzt. Zur maximal möglichen

Streckung ist eine leichte Außenrotation von 5 - 10° nötig. Bedingt relaxieren die Bänder und die Anspannung wird gelockert. Im 90° gebeugten Knie sind eine Außen- oder Innenrotation von 30 - 40° und 10° möglich. Die eingeschränkte innere Rotation ist begründet durch das ineinander verdrehen der Kreuzbänder (Schünke et al., 2018a).

1.3 Patho-/Physiologie der unteren Extremität

Die radiologische Beurteilung der Beinachsen erfolgt mittels eines im anterior-posterior gelichteten Röntgenbildes. Besondere Achtsamkeit sollte hierbei auf die ventrale Ausrichtung der Patella gerichtet werden, so dass diese zentriert zwischen beiden Femurkondylen erscheint (Waldt et al., 2017). Unter Verwendung von Ganzbeinröntgenaufnahmen können zwei Beinachsen in Bezug auf die untere Extremität unterschieden werden.

Die anatomischen Achsen von Femur und Tibia verlaufen mitdiaphysär und bilden zueinander einen lateral offenen Winkel von 173 - 175° (Galla und Lobenhoffer, 2007). Die zweite Beinachse, auch mechanische Tragachse beziehungsweise Mikulicz-Linie genannt, zieht vom Zentrum des Caput femoris zur Mitte des oberen Sprunggelenks. In normaler Achsstellung verläuft sie 4 ± 2 mm medial des Kniegelenkzentrums (Galla und Lobenhoffer, 2007).

Nach Paley und Pfeil (2000) werden für die Berechnung einer Achsfehlstellung die folgenden Gelenkwinkel zu den Basislinien berechnet (Abb. 2, Abb. 3). Angegeben sind die Normwerte mit den entsprechenden Streubreiten in Klammern.

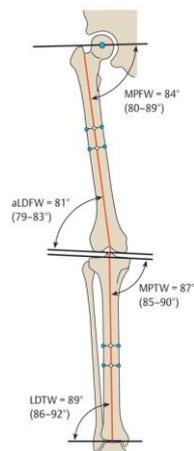


Abb. 2: Gelenkwinkel - anatomischer Beinachse (Waldt et al., 2017, S. 4)

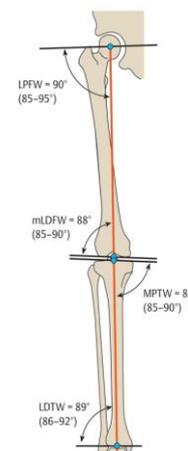


Abb. 3: Gelenkwinkel - mechanische Beinachse (Waldt et al., 2017, S. 4)

Das Genu varum wird physiologisch im Rahmen des normalen Gangbildes erzeugt und resultiert in einer Adduktion der Tibia mit konsekutiv einhergehender Varusstellung in Frontalebene. Begründet werden kann dieses Phänomen damit, dass das lasttragende Bein adduziert werden muss, um den jeweiligen Fuß unterhalb des Körperlotes zu positionieren. Ist dies der Fall, resultiert eine vermehrte Belastung des medialen Kompartimentes im Vergleich zum lateralen, welches sich öffnet (Schipplein und Andriacchi, 1991).

Das Zusammenspiel passiver Bandstrukturen (z.B. posterolaterale Kniegelenksstrukturen) wie auch aktiv die Muskelarbeit (z.B. M. quadriceps femoris, M. gluteus maximus, Tractus iliotibialis) wirkt dem adduzierendem Moment entgegen und generiert die erforderliche Stabilität im Kniegelenk (Masouros et al., 2015).

Als Beispiel einer pathologischen Achsstellung in der Frontalebene, resultiert das Genu varum zumeist aus einer Fehlstellung der Metaphyse der Tibia. Innerhalb der physiologischen Beinachse neigt sich das Tibiaplateau ca. 3° nach medial ab. Bei der O-Bein-Stellung ist das Abfallen der Gelenklinie nach medial verstärkt. In einer geringeren Fallzahl besteht auch die Möglichkeit einer Abhängigkeit durch das Femur selbst (Rupp, 2005). Ob eine Achsendeviation tibial oder femoral bedingt ist, lässt sich anhand der mechanischen Achsabweichung (MAD, mechanical axis deviation), dem mLDFW und mMPTW näher klassifizieren (Abb. 4) (Schnurr und König, 2019). Je nach vorhandenen Kasus kann ein operatives Vorgehen an Oberschenkelknochen und/oder Schienbein vorgenommen werden (Rupp, 2005). Von einer Umstellungsosteotomie bei gegebener alleiniger intraartikulärer Fehlstellung und in Folge dessen einhergehender Achsdeviation sollte jedoch abgesehen werden (Schnurr und König, 2019).

femoral bedingte Varusfehlstellung	tibialbedingte Varusfehlstellung	femoral bedingte Valgusfehlstellung	tibial bedingte Valgusfehlstellung
<ul style="list-style-type: none"> • MAD nach medial >15 mm • mLDFW >87° ± 3° 	<ul style="list-style-type: none"> • MAD nach medial >15 mm • mMPTW <87° ± 3° 	<ul style="list-style-type: none"> • MAD nach lateral >10 mm • mLDFW <87° ± 3° 	<ul style="list-style-type: none"> • MAD nach lateral >10 mm • mMPTW >87° ± 3°

Abb. 4: Analyse des Ursprungs der Fehlstellung durch Bestimmung: mLDFW und mMPTW (Schnurr und König, 2019, S. 613)

Ein häufig gesehenes Aufklappen des Kniegelenks nach außen unter Belastung (z.B. Gehen) ist zumeist durch die Insuffizienz der lateralen Stabilisatoren wie M. tensor fasciae latae, M. gluteus maximus, M. biceps femoris und M. popliteus bedingt. Dieses Phänomen wird als Varus Thrust bezeichnet (Rupp, 2005).

Alle beschriebenen Ursachen führen summativ zu einer vermehrten Krafteinwirkung auf das mediale Kniekompartiment mit der Folge vorzeitiger degenerativer Veränderungen.

Der Anwendungsbereich konservativer Therapiemaßnahmen wie 3 - 5 mm Erhöhungen des Schuhaußenrandes, korrigierende Schienen, Orthesen und krankheitsorientierte Gymnastik sind prospektiv mit eingeschränkt positiven Ergebnissen zu beurteilen. Es erfolgt hierbei lediglich eine symptomkomplexorientierte Therapie, die tatsächliche Kausalität bleibt weiterhin existent. Zusammenfassend lässt sich bemerken, dass lediglich eine operative Versorgung mit einhergehender Beinachsenkorrektur eine Achsfehlstellung ursächlich zu korrigieren vermag (Ficklscherer und Weidert, 2012).

Der kontinuierlich auftretende Verschleiß von knorpeliger Gelenkfläche kann je nach Belastungs- und Vorverletzungsgrad zu einer Gonarthrose führen. Jene kann das gesamte Kniegelenk (Pangonarthrose), die retropatellare Gelenkfläche und/oder den medialen beziehungsweise lateralen Gelenkspalt (unikompartimentelle Arthrose) umfassen (Ficklscherer und Weidert, 2012). Begründet wird dieser Umstand anhand der Tatsache, dass durch die verminderte Kongruenz, vertikal einwirkende Kompressionskräfte in geringerem Maße gleichmäßig auf die Knorpelfläche verteilt werden können (Fox et al., 2012). Darüber hinaus wird die Prävalenz an gonarthrotischen Symptomen zu leiden nach der sechsten Lebensdekade bei männlichem um 10% und bei weiblichem Geschlecht auf 13% beziffert. Dabei sollte eine gesamtheitliche Betrachtung aller systematischer und lokaler Einflussfaktoren wie zunehmendes Alter, Übergewicht /Adipositas, Knieverletzungen, Knochendichte, muskuläre Insuffizienz und Laxität des Bandapparates bedacht werden (Zhang und Jordan, 2010).

Eine Dysbalance zwischen Belastung und zu kompensierender Belastbarkeit kann zu arthrotischen Veränderungen führen, welche kurz- oder langfristig in einer Sekundärarthrose resultieren können. Dabei sind sie zumeist zurückzuführen auf explizit nachweisbare Faktoren, zum Beispiel prominente Formen der Genua vara, Fehlstellungen im Gelenk, entzündliche Erkrankungen, traumatische Knorpeldefekte, Frakturen im Gelenkbereich etc. (Ficklscherer und Weidert, 2012).

Der Beginn einer Arthrose äußert sich zumeist erst nach einem langwierigen symptomfreien Intervall mit einer morgendlichen Steifigkeit und allmählich bei Bewegung abklingenden Anlaufschmerzen. In Kombination zu erstgenannten Beschwerden treten diffuse Muskel- und Gelenkschmerzen in den Vordergrund. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit einer Inaktivitätshypotrophie (insbesondere des M. vastus medialis), welche je nach Bewegungseinschränkung auf die vorhandene restriktive Mobilität zurückzuführen ist. Zu einem Dauer- und Ruheschmerz wird die Symptomatik erweitert in dem eine Synovitis unter einer ausgeprägten Sekretion von Synovialflüssigkeit eine Ergussbildung induziert. Diese wird für den Patienten zumeist als Schwellung in der Kniekehle, genannt Baker-Zyste, oder Schwellung cranial des Articulatio genus apparent (Ficklscherer und Weidert, 2012).

Diagnostisch ist der Grad der Gelenkdestruktion anhand radiologischer Parameter ossär (osteophytäre Anbauten, Verminderung bzw. Aufhebung des Kniegelenkspaltes, Sklerosierungs- und Fehlstellungsgrad; Abb. 5) beziehungsweise direkt chondral unter arthroskopischer Sicht (aufgerauter, z.T. abgeriebener Knorpel, degenerative Rissbildungen im Meniskus „→“; Abb. 6) zu beurteilen.

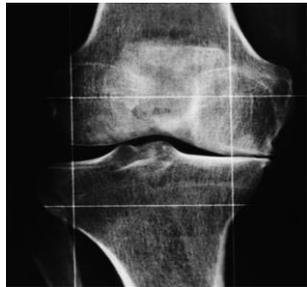


Abb. 5: Röntgenbefund -
Varusgonarthrose
(Niethard et al., 2017, S. 579)

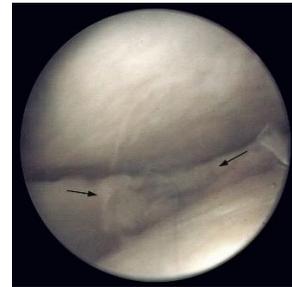


Abb. 6: Arthroskopischer Befund -
Arthrose
(Niethard et al., 2017, S. 578)

Die in der Praxis praktikabelste, radiologische Klassifikation zur Einstufung oben genannten Sachverhaltes entspricht der von Kellgren-Lawrence anhand von 5 Schwere- und der ICRS (International Cartilage Research Society) mit 9 Ausprägungsgraden. Anzumerken ist, dass eine reine Einstufung anhand radiologischer Parameter jedoch nicht immer mit dem vom Patienten vorgetragenen Beschwerdebild korreliert (Kellgren, 1963; Hannan et al., 2000; Niethard et al., 2017; Stöve, 2018).

1.4 Kontra-/Indikationen der hohen tibialen (open-wedge) Osteotomie

Für Patienten, welche unter einer primären oder sekundär degenerativen, inneren unikompartimentalen Arthrose des Knies leiden, stellt die HTO eine sinnvolle Therapieoption dar (Rupp, 2005). Erstmals durchgeführt unter der Indikationsstellung einer Varusgonarthrose wurde die Tibiakopf-Umstellungsosteotomie (high tibial osteotomy, HTO) im Jahr 1965 durch Marc Coventry (Coventry, 1965). Insbesondere Achsfehlstellungen zeigen ein relativ eingeschränktes Ansprechen bei ausschließlich band- und knorpelchirurgischen Eingriffen. Um eine dauerhafte erfolgversprechende Situation zu erzielen, bedarf es einer Achskorrektur (Martinek und Imhoff, 2003).

Konkret wurde in dieser Studie das Genu varum mit medial arthrotischen Gegebenheiten im Gelenkbereich, einschließlich pathologisch veränderter Tibia (MPTA < 87°) betrachtet (Ruchholtz und Wirtz, 2019). Eine modelhafte Untersuchung um Agneskirchner und Wrann (2006) konnte den Zusammenhang zwischen varischer Beinachse und einer dadurch vermehrten Druckbelastung von 65% des Gesamtdrucks

im medialen Kompartiment nachweisen. Nach erfolgter öffnender Osteotomie zeigte sich jedoch trotz nun valgischer Beinachse und eines forcierten Durchtritts der mechanischen Beinachse am Fujisawa-Punkt ein Anstieg der medialen Druckbelastung auf 71%. Begründet wurde dieser Umstand anhand der aus der Öffnung resultierenden Überspannung des Knie-Innenbandes. Um derartige Druckverschiebungen zu umgehen, wird eine Release des oberflächlichen Innenbandes im distalen Bereich empfohlen, worauf sich eine Druckbelastung von circa 36% einstellt (Agneskirchner und Wrann, 2006). Folglich können Umstellungsosteotomien als präventive Maßnahmen erwähnt sein, um einer progressiven Ausprägung der Gonarthrose zuvor zu kommen. Dabei stellt die HTO besonders bei bereits durchlaufenen konservativen Therapiemaßnahmen und einer als zeitlich gesehen zu früh erscheinenden Knie-Total-/Teilendoprothese eine mögliche Form der operativen Intervention dar (Dettoni et al., 2010). Eine grundlegende Altersbeschränkung für oder gegen das OP-Verfahren ist wissenschaftlich bislang nicht belegt (Kohn et al., 2013; Goshima et al., 2017). Ein Maß für die Annahme einer HTO für jüngere Patienten unterhalb des 60. Lebensjahres gründet sich zumeist auf die bessere Knochenqualität/-restitution.

Zusammenfassend sollten folgende Punkte bei der Indikationsstellung im Fokus des Untersuchenden stehen: belastungsabhängiger Schmerz über dem betroffenen Kompartiment, Schmerzabnahme bei Druckentlastung, Achsabweichung, präoperativ ein Minimum des Bewegungsumfanges von ca. 90° und ein maximales Streckdefizit von circa 10°. Eine mäßiggradige Laxizität der lateralen Bänder stellt unterdessen keine Kontraindikation dar. Röntgenologisch beziehungsweise arthroskopisch sollten bestenfalls keinerlei pathologischer Veränderungen im gegenüberliegenden oder patellofemorale Kompartiment zu verzeichnen sein. Die Interpretation einer möglichen Anwendungsgrenze sollte dementsprechend eher aufgrund des biologischen Alters, dem Wunsch des Patienten nach postoperativer körperlicher und sportlicher Aktivität und unter Beachtung der Folgen einer Korrektur auf proximal und distal gelegene Nachbargelenke gestellt werden (Rupp, 2005).

Spahn et al. (2006) konnten Prädiktoren ermitteln, welche mit einem schlechteren Outcome nach HTO assoziiert sind. Diese zeichnen sich durch schwere Knorpeldestruktionen in Höhe Grad III - IV (OR: 3; 95% KI: 1,9 - 9,2), Verschmälerung oder Aufhebung des inneren Gelenkspaltes < 5 mm (OR: 5,8; 95% KI: 2,1 - 16,3), mediale Tibiaosteophyten > 10 mm (OR: 18,7; 95% KI: 5,7 - 61,7), Nikotinabusus (OR: 5,3; 95% KI: 1,8 - 14,9), Adipositas (BMI > 30 kg/m²; OR: 3,2; 95% KI: 1,2 - 8,5) und Ruheschmerz bzw. außerordentlicher Leidensdruck > 24 Monate (OR: 73,3; 95% KI: 14,4 - 37,2) aus. Sind vermehrt vorangestellt aufgeführte Faktoren evaluierbar, so ist

die Indikation zur Umstellung zurückhaltend zu stellen (Spahn et al., 2006). Weiterhin führten Spahn et al. (2015) eine ausgeprägte Sklerose der Tibiagelenkfläche, einen erheblichen Krepitus sowie eine Synovialitis chondrodedrica als negative Prädikтивfaktoren an. Primäres Ziel des Operationsverfahren ist es, den Arthroseprozess mit einhergehender Gelenkinsuffizienz zu verlangsamen beziehungsweise zu stoppen und somit die Gelenkfunktion langfristig zu verbessern.

Entscheidungskriterien gegen eine Umstellungsosteotomie ergeben sich bei einer Pangoarthrose, ausgeprägtem, lateralem Meniskusschaden/-verlust (subtotale Resektion) bzw. Knorpelschäden, Störungen der Knochenbruchheilung, schwere Osteoporose, Zustand nach Knochen- und Weichteilinfektion im zu operierenden Gebiet, Knorpelschäden und/oder manifester Arthrose im lateralen Kompartiment. Nicht arthroskopisch entfernbare Bewegungseinschränkungen im Kniegelenk, welche zu einer Streckbehinderung $> 10^\circ$ und Beugung $< 90^\circ$ führen, stellen gleichfalls eine absolute Kontraindikation dar.

Relative Kontraindikationsparameter entsprechen dem biologischen Alter > 60 Jahre, arthrotischen Veränderungen im Patellofemoralgelenk, ein partieller Außenmeniskusverlust, Übergewicht mit einem BMI $> 30 \text{ kg/m}^2$, schwerer Nikotinabusus, eine geringgradige Varusfehlstellung von $< 5^\circ$, ligamentär verursachte Instabilitäten und gonarthrotisch bedingte Veränderungen aufgrund rheumatischer und metabolischer Erkrankungen (Spahn et al., 2015).

1.5 Präoperatives Planungsverfahren nach Miniaci

Über das Ausmaß der Korrektur einer varischen Achsfehlstellung besteht zurzeit kein allgemeingültiger Konsens. Literaturrecherchen ergeben unterschiedlich forcierte Winkelgrößen zwischen anatomischer Femur- und Tibiaachse. (physiologisch: $5 - 7^\circ$ Valgus) von einer neutralen Beinachse bis hin zu einer Überkorrektur (Tab. 2).

Tab. 2: Literaturrecherche Korrekturwinkel bei varischer Fehlstellung (Rupp, 2005, S. 386)

Autor	Korrekturwinkel	Autor	Korrekturwinkel
Insall et al. (1984)	ca. 7° Valgus	Coventry (1973)	etwas $> 7^\circ$ Valgus
Hernigou et al. (1987)	$3 - 6^\circ$ Valgus	Keene und Dyreby (1983)	$5 - 13^\circ$ Valgus
Ivarsson et al. (1990)	$3 - 7^\circ$ Valgus	Tjörnstrand et al. (1985)	10° Valgus
Lootvoet et al. (1993)	$3 - 5^\circ$ Valgus	Cass und Bryan (1988)	$10 - 12^\circ$ Valgus
		Keene et al. (1989)	$7 - 13^\circ$ Valgus

Aufgrund des bereits thematisierten physiologischen Adduktionsmoments in dynamischen Prozessen mit konsekutiver vermehrter Belastung des medialen Kompartimentes, ist eine leichte Überkorrektur als biomechanisch sinnvoll zu bewerten (Ivarsson et al., 1990; Rupp, 2005; Schnurr und König, 2019).

Fujisawa et al. (1979) inspizierten in einer Studie mit 54 Teilnehmern die Knorpelverhältnisse prä- und postoperativ einer Umstellungsosteotomie arthroskopisch. Eine Verminderung der Knorpelschäden konnte lediglich in Fällen aufgezeigt werden, in

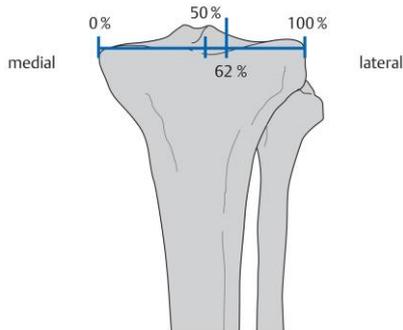


Abb. 7: Einteilung des Tibiaplateau (Schnurr und König, 2019, S. 616)

denen die postoperative Tragachse durch einen Bereich von 60 - 70% medial und 40 - 30% lateral der Tibiaplateaubreite verlief. Die weitere Präzisierung erfolgte durch Dugdale (1992) in einer Angabe der Tragachse zwischen 62 - 66% und Noyes (1993) mit der 62% - Koordinate (Abb. 7) (Pape, 2014). Eine Studie von Martay et al. (2018) überprüfte die Auswirkungen des Durchtrittspunkt der mechanischen Beinachse am Tibiaplateau, unter zur Hilfe-nahme von Modelberechnungen (n=45). Die gewichts-

tragende Achse wurde dementsprechend von ihrer ursprünglichen Lokalisation nach 40 - 80% mediolateral (in 3% Schritten) verlagert. Anschließend erfolgte eine Stress-induktion durch simulierte Belastung. Eine Korrektur auf 50% (0° varus - valgus) des Tibiaplateaus ging einher mit einer annähernd halbierten medialen Drucksituation, aber schien das Risiko einer Unterkorrektur zu haben. Die Umformung auf das derzeit weit verbreitete 62 - 65% (3,4 - 4,6° valgus) Intervall reduzierte die mediale Druckbelastung weiterhin, jedoch erwies sich das Risiko einer Gewebeschädigung des lateralen Kompartiments als erhöht. Im Hinblick auf die Gefahr einer Unterkorrektur und der idealen Druckbelastung medial- wie lateralseitig, bietet sich Martey et al. (2018) zufolge eine präoperative Planung auf einen 55%igen (1,7 - 1,9° valgus) Durchtrittspunkt an.

In der vorliegenden Studie erfolgte eine Orientierung des Durchtritts der Tragachse an der 62% Koordinate. Die Durchführung der Planungsmethode nach Miniaci bedarf einer Ganzbeinröntgenaufnahme des betroffenen Beines. Es erfolgt die Einteilung des Tibiaplateaus von medial 0% nach lateral 100%. Die erste Verbindungslinie (= Traglinie, *gestrichelt*) wird vom Zentrum des Hüftkopfs durch die 62% - Koordinate des Tibiaplateaus projiziert, bis kaudal auf Höhe des Sprunggelenks verlängert und entspricht der gewünschten postoperativen Mikulicz-Linie (Abb. 8). Als nächster Schritt erfolgt die Bestimmung des Drehpunktes (D) (lateraler hinge point, ca. 10 mm medial der lateralen Tibiakortex). Die Projektionslinie (1) verbindet den hinge point mit der Mitte

des Sprunggelenks und wird radiär nach lateral gezogen bis sie die Verbindungslinie (=Traglinie, *gestrichelt*) schneidet. Folglich ergibt sich Linie 2 aus dem Schnittpunkt und dem lateralen hinge point (D). Der von den Linien 1 und 2 eingeschlossene Winkel α spiegelt den erforderlichen Korrekturwinkel wieder (Abb. 9) (Rupp, 2005).

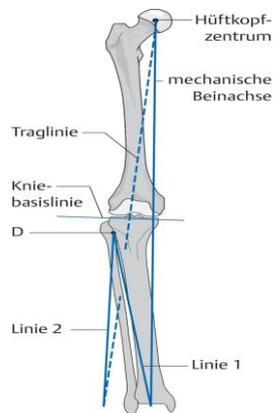


Abb. 8: Planungsmethode nach Miniaci
Varusgonarthrose
(Schnurr und König, 2019
S. 615)

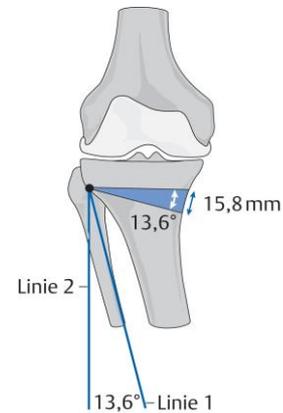


Abb. 9: Bestimmung des
Korrekturwinkels (α)
(Schnurr und König, 2019,
S. 615)

Die Korrektheit des ermittelten Winkels α kann nur gegeben sein, falls der laterale Gelenkspalt in der Ganzbeinstandaufnahme geschlossen ist. Kommt es zu einer röntgenologischen Verminderung der Gelenkspalthöhe unter Valgusstress-Testung so ist der Korrekturwinkel anzupassen. Aus der Überlagerung beider Tangenten an der distalen Femurachse resultiert ein Winkel β , der von α subtrahiert werden sollte. Dementsprechend ergibt sich der vollständige Korrekturwinkel γ wie folgt: $\gamma = \alpha - \beta$ (Rupp, 2005).

1.6 Operationsprocedere

Die operativ-öffnende valgusierende Umstellungsosteotomie der proximalen Tibia erfolgt für den Patienten in Rückenlage. Ausschlaggebend ist, dass das betroffene Bein perioperativ sowohl in 90° Flexions- wie auch in Extensionsstellung gelagert werden kann. Vor Operationsbeginn ist das Anlegen einer Oberschenkelblutsperre von Vorteil (Galla und Lobenhoffer, 2007). Der vorgenommene Eingriff ermöglicht den Beibehalt der anatomischen Knochenform der Tibia (Tibia-Alignment) und es besteht darüber hinaus die Möglichkeit einer eventuell später folgenden Umstellung auf eine knieendoprothetische Versorgung (Meding et al., 2011; van Raaij et al., 2009).

Vor der geplanten Osteotomie sollte eine systemische single-shot Antibiotikaprophylaxe durchgeführt werden. Während des Eingriffes erfolgt eine arthroskopische Beurteilung der Knorpelverhältnisse im lateralen sowie im medialen Gelenkberreich. Anschließend

können gegebenenfalls pathologisch veränderte Strukturen wie instabile Knorpellappen durch Abrasio mit Mikrofrakturierung in beiden Kompartimenten therapiert werden.

Nach der Markierung entsprechender anatomischer Landmarken (tastbarer Oberrand des Pes anserinus, medialer Gelenkspalt, Verlauf des oberflächlichen Innenbandes und der Tuberositas tibiae) wird eine 6 - 8 cm umfassende nach dorsokraniel verlaufende Hautinzision oberhalb des Ansatzes der Pes anserinus - Sehnen in Richtung posteromedialen Gebietes des Tibiakopfes gesetzt. Nach erfolgter Freilegung des Operationsgebietes werden die Pes - Sehnen nach distal gezogen, das oberflächliche Innenband mobilisiert und der mediale Bereich des Ligamentum patellae freipräpariert. Unter Einbringung zweier Kirschnerdrähte (2,3 mm) werden Orientierungspunkte für den Verlauf und Höhe der Osteotomie in den Tibiakopf geschaffen. Die zwei in Richtung oberes Drittel des Tibiofibulargelenkes gerichteten Drähte dienen nun als doppelte Führungsschiene für die oszillierende Säge. Die Durchtrennung des Tibiakopfes erfolgt bis auf einen Abstand von 10 mm zur lateralen Kortikalis (Galla und Lobenhoffer, 2007). Unabhängig einer hochstehenden Tuberositas tibiae kann die Hauptosteotomieebene schräg nach cranial ansteigend positioniert werden. Gleichzeitig besteht kein Verletzungsrisiko für die Patellarsehne (Rupp, 2005).

Eine eindimensionale Schnittführung auf Basis der alleinigen Korrektur innerhalb der Frontalebene der Beinachse ist dato nicht mehr durchzuführen. Vielmehr bedarf es der Kopplung mit einer inkompletten, aufsteigenden Schrägosteotomie (biplanare Technik). Als Resultat erhält man eine größere Kontaktfläche zwischen beiden Osteotomiepartnern, welche eine hohe Stabilität nach sich zieht (Spahn et al., 2007).

Während des Sägevorganges des Elektrokauters wird im Operationsgebiet eine durchgängige Spülung vorgenommen. Ist die geplante Öffnungstiefe der Osteotomie erreicht, kann der verursachte Spalt durch vorsichtiges kontinuierliches Einbringen mehrerer Flachmeißel in Fächertechnik langsam aufgespreizt werden. Bei Erreichen der benötigten Öffnungshöhe kommt es im posteromedialen Osteotomiegebiet zum Einsatz eines valgusierend öffnenden Arthrodesenspreizers. Im Anschluss erfolgt eine klinische und radiologische Kontrolle der Valgisierung (Galla und Lobenhoffer, 2007). Ist die forcierte Achsenkorrektur umgesetzt worden, kann ein mit Abstandshaltern montierter winkelstabiler Plattenfixateur (z.B. TomoFix™) durch einen Subkutantunnel vorgeschoben und proximal verriegelt werden. Dieser wird in seinem ersten distalsten Plattenloch durch eine temporäre Zugschraube an der medialen Tibia befestigt. Infolge des Heranziehens des distalen Osteotomiesegmentes an den Plattenfixateur erfährt die laterale Kortikalisbrücke eine Kompression. Entsprechend der Reihenfolge von distal nach proximal werden die restlichen Plattenlöcher besetzt und die im ersten Schritt eingebrachte temporäre Zugschraube durch eine bikortikale Verriegelungsschraube

ersetzt. Im Anschluss erfolgt die Entfernung des Arthrodesenspreizers (Galla und Lobenhoffer, 2007).

Bei vorhandenen osteoporotischen Knochenzustand oder erfahrungsgemäß problematischer Knochenregeneration (z.B. Adipositas, Nikotinabusus) bzw. einer Korrektur von $> 10^\circ$ ist ein Auffüllen des entstandenen Osteotomiespalt mit autologer Spongiosa ratsam (Hinterwimmer, 2014). Gegen Ende des Operationsvorganges erfolgen die Auflage eines Kollagenvlieses über den Osteotomiespalt, die Einlage einer nach proximal ausleitenden Überlaufdrainage sowie eine radiologische Dokumentation und ein sukzessiver schichtweiser Wundverschluss (Galla und Lobenhoffer, 2007).

Neben allgemeinen Risiken wie eines Hämatoms, Infektion oder Thrombose, welche fast jede umfangreichere Operation mit sich führt, werden bei der open-wedge HTO ebenfalls von der Operationstechnik und Implantat ausgehende Komplikationen beschrieben. Diese beinhalten achsenabhängige Fehlstellungen durch Über-/Unterkorrektur und folglich dem Ausbleiben des angestrebten postoperativen Korrekturergebnisses, materialbedingte (z.B. Schrauben) sowie perioperative Brüche der lateralen Kortikalisbrücke oder Infraktion der lateralen Tibiagelenkfläche und patientenindividuelle Gegebenheiten wie verlangsamte Knochenheilung und Pseudarthrosenbildung (Spahn, 2004; van den Bekerom et al., 2008; Hinterwimmer, 2014). Die Gefahr der Verletzung des Nervus peroneus bei Durchführung einer open-wedge Osteotomie ist als geringgradig anzusehen, nimmt jedoch mit zunehmend distaler Schraubenfixierung zu (Lobenhoffer et al., 2004; Itou et al., 2020). Ein Versagen intraoperativ eingebrachter Materialien wie Schrauben oder winkelstabilen Platten ist zum derzeitigen Wissensstand ohne adäquates traumatisches Ereignis gering einzuschätzen. Demgegenüber gilt es zu beachten, dass die open-wedge HTO aufgrund der Beinachsenkorrektur eine veränderte patelläre Gleitbahn hin zu einer Patella baja forcieren kann (Rupp, 2005; Portner, 2014).

In Studien von 2010 und 2014 wurde der Zusammenhang von Übergewicht ($> 30 \text{ kg/m}^2$, gemäß den Normwerten der Deutschen Gesellschaft für Ernährung) und/oder der Konsum von Tabak mit den Ergebnis Knochenheilung nach hoher Tibia-Osteotomie bei Varus-Fehlstellung thematisiert. Es konnte gezeigt werden, dass Patienten mit einem BMI über 30 kg/m^2 ein geringgradig schlechteres Outcome postoperativ bezüglich des Schmerz- und Funktionszustandes aufwiesen, jedoch die Komplikationsrate nicht signifikant erhöht ist (Flörkemeier et al., 2014). Risikofaktoren für die Entwicklung einer Pseudarthrose werden mit Rauchen, erhöhtem BMI und der Frakturierung des lateralen kortikalen Gelenks deklariert. Für die Faktoren Alter, Grad der Korrektur, Begleiterkrankungen, postoperative Komplikationen, Drogenkonsum, zusätzlich durchgeführte Eingriffe und Einsatz einer temporären Zugschraube konnte kein Einfluss

festgestellt werden. Infolgedessen sollte in Erwägung gezogen werden, dass bei Hochrisikopatienten Beckenkamm-Knochentransplantationen a priori durchgeführt werden (Meidinger et al., 2011). Oberflächliche und tiefe Infektionen nach einer hohen tibialen Osteotomie sind mit 1 - 9% und 0,5 - 4,7% selten. Aktuelle Daten über Risikofaktoren, Raten, Lokalisationen und mögliche Behandlungsoptionen der Infektionen erlauben keine verallgemeinernde Schlussfolgerungen (Anagnostakos et al., 2013).

Das in dieser Studie praktizierte Nachbehandlungsschema gliederte sich wie folgt auf: Patienten, welche das Therapieverfahren einer hohen tibialen additiven Umstellungsosteotomie durchliefen, wurden für eine Nacht zur Beobachtung und sich daraus gebender Möglichkeit einer Intervention stationär aufgenommen. Am ersten postoperativen Tag erfolgte die Entfernung der subcutanen Drainage unter Beachtung des aktuell gültigen Hygienestandards. Vier Tage nach der Operation war ein Verbandswechsel mit gleichzeitiger Beurteilung des Wundbereichs geplant. Bei Bedarf konnte innerhalb eines Intervalls von sieben Tagen ein erneuter Verbandswechsel stattfinden. War dies nicht der Fall, erfolgte die ärztliche Begutachtung des Wundverlaufs und Durchführung einer Erneuerung des Verbandes eine Woche postoperativ. Am 10. bis 14. Tag nach der Operation wurden die perioperativ zum Wundverschluss eingesetzten Klammern entfernt und ein Röntgen angefertigt. Im gleichen Schritt konnte wiederum ein Verbandswechsel unter Beurteilung der Wundsituation durchgeführt und eine Belastungsfreigabe für das operierte Bein angesetzt werden. In Abhängigkeit vom jeweiligen Wundstatus konnte demnach im Hinblick auf die hohe Stabilität der winkelstabilen Implantate eine schmerzadaptierte Auf- bis Vollbelastung innerhalb kurzer Zeit erwägt werden. Ab vorab genanntem Zeitpunkt sollte der Patient über eine Dauer von 14 Tagen eine Teilbelastung von circa 20 kg Körpergewicht nicht überschreiten. Physiotherapeutische Maßnahmen spiegelten sich in der sofortigen Anwendung manueller Lymphdrainagen, der bis zur 3. Woche passiven und ab der 4. Woche forcierten aktiven Krankengymnastik wider.

Eine erneute röntgenologische Kontrolle war vier Wochen und je nach individueller Ausgangssituation beziehungsweise Beschwerdelage des Patienten drei Monate postoperativ nach Bedarf anzustreben. Osteotomien dieses Ausmaßes sind für gewöhnlich innerhalb von 1,5 - 2 Jahren strukturell knöchern durchbaut. Aufgrund der Einbringung der winkelstabilen Platten, können Reizsymptomaten im Bereich der Ansatzsehnen des Pes anserinus resultieren. Im Allgemeinen wird eine elektive Metallentfernung, langjährig im Körper verbliebener Stabilisatoren mit einem 5% erhöhten Komplikationsrisiko intraoperativ angegeben. Demgegenüber wird von jenen Patienten nochmals eine deutlich gebesserte Schmerzsymptomatik nach der Materialentfernung beschrieben. Anzumerken sei in diesem Kontext, dass zurzeit keine

evidenzbasierte Leitlinie zur Explantation der winkelstabilen Platten besteht. Ob eine gleichzeitige Kontrollarthroskopie im selbigen Eingriff der Materialentfernung stattfinden sollte, wird vom jeweiligen individuellen Beschwerdebild abhängig gemacht (Spahn et al., 2012; Gras et al., 2013). Eine Materialentfernung bei vorhandener Beschwerdesymptomatik (z.B. durch Druckgefühl) ist in einem zeitlichen Rahmen von 1 - 1,5 Jahren anzustreben (Hinterwimmer, 2014).

Schlussfolgernd sollte oberstes Ziel stets eine Linderung der individuellen Schmerzsituation und Besserung der Funktionseinschränkungen im gonarthrotisch veränderten Kniegelenk sein. Einhergehend mit der voran genannten Problematik ist eine wieder zunehmende beziehungsweise der Erhalt der Belastbarkeit zu forcieren. Allerdings kann der kontinuierlich vorangeschrittene Arthroseprozess mittels oben beschriebener Maßnahmen lediglich verlangsamt und/oder für ein zeitlich befristetes Intervall stagniert werden. Im Hinblick auf das Outcome der aktiven Teilnahme im Alltag nach stattgehabter Achsumstellung, profitieren nicht nur jüngere, sondern auch ältere Patienten von einem Zugewinn an Lebensqualität (Kohn et al., 2013; Flörkemeier und Lobenhoffer, 2015; Goshima et al., 2017).

2 Zielstellung und Hypothesen

Eine Literaturrecherche in der Datenbank PubMed unter der Verwendung des Suchterminus „*high tibial osteotomy and posture*“ ergab 14 Beiträge innerhalb der letzten Dekade (Tab. 3).

Tab. 3: Literaturrecherche Pubmed zu „*high tibial osteotomy and posture*“

	Schmerz	Lebensqualität	Gang-/Bewegungs-analyse	Gleichgewicht	goniometrische Beurteilung	HTO + knorpelchirurgischer Eingriff	owHTO	cwHTO
Bode et al. (2013)	✓	✓				✓	✓	
Zampogna et al. (2015)					✓			
Leitch et al. (2015)			✓				✓	
Kim et al. (2016)			✓				✓	
Jang et al. (2017)					✓		✓	
Nerhus et al. (2017)					✓		✓	✓
Lee et al. (2017)			✓				✓	✓
Huang et al. (2018)					✓			
Tarumi et al. (2019)		✓				✓	✓	✓
Chieh-Szu Yang et al. (2019)							✓	
Grünwald et al. (2019)	✓	✓					✓	
Thompson et al. (2019)	✓	✓						
Lee et al. (2020)					✓		✓	
So et al. (2020)					✓		✓	

Dieser Umstand zeigt quantitativ die unzureichende Evidenz für die zu bearbeitenden Fragestellungen. Qualitativ ist zu bemerken, dass keine Originalarbeit die betrachteten Hypothesen adressierte. Die Hauptfragestellungen in voran genannten Arbeiten fokussierten sich auf die goniometrische Betrachtung der Umstellungsosteotomie, Reliabilitätsanalysen sowie Operationstechniken. Lediglich das Review von Lee et al. (2017) thematisiert die Auswirkungen der HTO auf die Motorik des Ganges. Jedoch bleibt auch in diesem die posturale Stabilität und Regulation unberücksichtigt. Im Bereich der Evaluation der Lebensqualität wurden von Grünwald et al. (2019) zudem die präoperativen Erwartungen von Patienten auf verschiedene gesundheitsbezogene Lebensbereiche wie Arbeitsfähigkeit, Schmerzlinderung und Wiederherstellung der Kniefunktion untersucht. Je geringer die Lebensqualität vor der Operation, umso höher zeigten sich die patienteneigenen Vorstellungen zu Verbesserungen in Bezug auf das tägliche Leben postoperativ.

Einige Autoren (Ihle et al., 2016; Bastard et al., 2017; Morin et al., 2018; Herbst et al., 2020) konnten in den vergangenen Jahren mit ihrer Forschung die Grundlage der Evaluation von Lebensqualität und Schmerzcharakteristik bei Bestehen von gonarthrotischen Veränderungen sowie nach erfolgter Umstellungsosteotomie bilden. Im Kontext der Literaturrecherche schienen somit die Projektziele und -inhalte dementsprechend neuwertig, innovativ und von hoher wissenschaftlicher Relevanz.

Ziel der vorliegenden Studie war es, die Auswirkungen der Tibia vara (O-Beinstellung) präoperativ zu ermitteln sowie die durchgeführte HTO mit daraus ergebender Beinachsenkorrektur bezüglich ihres Einflusses auf die posturale Regulation und Stabilität, Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit zu mehreren Zeitpunkten (6 und 12 Wochen sowie 6 Monaten) postoperativ zu überprüfen.

Der Begutachtung zugrunde lagen folgende Hypothesen:

- Nullhypothese** Die Tibia vara und die operative Beinachsenkorrektur führt zu einer Abnahme der posturalen Stabilität und Regulation.
- Hypothese I** Die Beinachsenkorrektur führt zu einer ausbalancierteren Statik (Prüfinstrument: Posturographie; Messparameter: Gewichtsverteilung lateral und anterior-posterior, Gewichtsverteilungsindex).
- Hypothese II** Die Beinachsenkorrektur führt zu einer erhöhten posturalen Stabilität (Prüfinstrument: Posturographie; Messparameter: Stabilitätsindikator).
- Hypothese III** Die Beinachsenkorrektur führt auf der Prozessebene vor allem zu einer erhöhten Leistungsfähigkeit des somatosensorischen Systems (Prüfinstrument: Posturographie; Messparameter: Frequenzbereich F 5 - 6).
- Hypothese IV** Die Beinachsenkorrektur führt zu einer signifikanten Abnahme der Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit (Prüfinstrument: Short Form - 36 (SF-36), Visuelle Analogskala (VAS), Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit)

Die Forschungshypothesen gründen auf zahlreichen Evidenzen denen zufolge das Interactive Balance System (IBS) im Rahmen eines solchen Studiendesigns als ein reliables, valides und praktikables Messinstrument verwendet werden kann (Schwesig et al., 2009; Schwesig et al., 2013; Schwesig et al., 2014a; Schwesig et al., 2014b; Schwesig et al., 2017; Bartels et al., 2018; Bartels et al., 2019).

3 Material und Methodik

3.1 Untersuchungsstichprobe

Im Zeitraum vom Mai 2018 bis August 2019 wurde an 34 Patienten die operative Versorgung des Genu varum mittels open-wedge Osteotomie der Tibia durchgeführt (Tab. 4).

Tab. 4: Übersicht Anzahl Studienteilnehmer

Studienteilnehmer präoperativ	38	100%
Studienausschluss aufgrund geschlechtsbezogenen Verzerrungseffekts	4	10%
Studienteilnehmer postoperativ	MZP 1: 34 MZP 2: 34 MZP 3: 34 MZP 4: 32	84%

3.2 Studienablauf

Im Rahmen dieser Dissertation konnten prospektiv längsschnittlich über vier Messzeitpunkte (MZP 1: präoperativ, MZP 2: ca. 6 Wochen postoperativ, MZP 3: ca. 12 Wochen postoperativ, MZP 4: ca. 6 Monate postoperativ) insgesamt 32 Patienten aufgrund spezifischer Kriterien (Tab. 5) in die Studie eingeschlossen werden.

Die Probanden wurden über den Ablauf des Studiendesigns schriftlich und mündlich während der ambulanten Vorstellung in der Sportklinik Halle beziehungsweise im Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (DOUW) des Universitätsklinikums Halle aufgeklärt. Im entsprechenden Falle des schriftlichen Einverständnisses wurde die Durchführung der Messungen, Erhebung von Fragebogeninhalten und Asservierung sowie der Verwendung von Daten in wissenschaftlichen Veröffentlichungen zugestimmt (Anlage 1). Die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg prüfte das Studiendesign und erteilte das Votum für die Durchführung (AZ 2018-66).

Anthropometrische Daten (Alter, Geschlecht, Gewicht, Größe, BMI) sowie orthopädische Vorbefunde im Bereich der unteren Extremität wie auch die jeweilige Schmerzdauer (in Monaten) wurden im Zuge der ersten Messung (MZP 1) präoperativ erhoben und zum Teil im Genesungszeitraum reevaluiert (Alter, Gewicht, BMI).

Die Fragebogendiagnostik mittels Short Form - 36 (SF-36), Visueller Analogskala (VAS) und Ermittlung der Häufigkeit des Schmerzgeschehens wurde jeweils nach der IBS-Messung durchgeführt.

Im Rahmen jeder Konsultation erfolgte die Durchführung einer Ergebniserläuterung mittels einer Übersichtsdarstellung der Parameter, der acht Testpositionen (Postural Summary Sheet) und es konnte auf eventuelle Fragen des Patienten (Messergebnisse, Behandlungstechniken etc.) eingegangen werden.

Tab. 5: Ein- und Ausschlusskriterien der Studie

Einschlusskriterien:	<ul style="list-style-type: none">• Volljährigkeit; Altersbereich 18-70 Jahre,• Freiwilligkeit,• Schriftliche Einverständniserklärung,• Indikation entsprechend der Zielstellung (Tibia vara), objektiviert anhand Ganzbeinstandaufnahme (Röntgen), seitlicher Röntgenaufnahme des Kniegelenks, ggf. MRT-Screening-Untersuchung, Arthroskopie,• Symptomatische mediale Kompartmentarthrose mit chronischem Ruhe- und Belastungsschmerz
Ausschlusskriterien:	<ul style="list-style-type: none">• Patienten mit einer zweit- oder drittgradigen Kompartmentarthrose des Kniegelenks,• Patienten mit vorliegender Seitenbandinstabilität des betroffenen Kniegelenks,• Osteonekrosen des medialen Tibiakopfes oder des medialen Femurkondylus,• Vorliegen entzündlicher rheumatischer Erkrankungen,• Operationsunfähigkeit aufgrund verschiedener Risikofaktoren (z.B. erhöhtes Infarktrisiko)

3.3 Posturographie (Interactive Balance System, IBS)

Die Anfänge dieses posturographischen Messsystems finden sich in den 90er Jahren. Entwickelt in Israel, diente es vornehmlich der Untersuchung der motorischen Lernfähigkeit autistischer Kinder (Schwesig, 2006). Mittlerweile konnte das Anwendungsspektrum deutlich erweitert werden z.B. innerhalb der Vestibularidiagnostik, der Neurologie oder Orthopädie (Balci et al., 2013; Bartels et al., 2018; Palamar et al., 2018; Gorski et al., 2019; Lauenroth et al., 2019).

Das IBS (neurodata, Wien, Österreich) ermöglicht durch seine, in einem nach anterior offenen Winkel von 30° angeordneten vier Kraftmessplatten die differenzierte Erfassung der beidseitigen Vertikalkräfte von Rück- und Vorfuß. Darüber hinaus können diese in

Beziehung zueinander gesetzt werden. Die Komponenten des Messsystems setzten sich wie folgt zusammen (Schwesig, 2006) (Abb. 10):



- 2 duale Kraftmessplatten mit 4 Dehnungsmessstreifen (Widerstand: $350 \pm 0,30\%$; k-Faktor: $2,03 \pm 1,00\%$; Querempfindlichkeit $\pm 0,10\%$; Material Aluminium)
- 2 Schaumstoffpolster á $32 \text{ cm} \times 12,5 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$
- Erfassungs- und Analysesoftware
- Auswerterechner

Abb. 10: Messplatz

Die posturographische Messung der zu untersuchenden Probanden erforderte einen ruhigen und frei von äußeren Störgrößen gelegenen Raum. Die Patienten wurden gebeten, sich ohne Schuhe aufrechtstehend auf die Kraftmessplatten zu positionieren. Nach einer individuellen Eingewöhnungszeit wurde mit den Testinstruktionen begonnen. Für alle Positionen gemein war der ruhige, jedoch nicht rigide Stand in einem circa 2 m zur Zimmerwand messenden Abstand. Während der Messung sollte nicht gesprochen werden (Schwesig, 2006). Die Wand war zudem hell, ohne auffällige Strukturen und mit einer auf Augenhöhe befindlichen Markierung (Kreuz/Kreis) zur Blickfixation (Messung: NO; PO) versehen. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass die Arme freihängend und nicht am Rumpf fixiert wurden (z.B. am Hosengürtel).

Ein grundlegender Bestandteil der IBS-Untersuchung beruht in der experimentellen Manipulation des sensorischen Inputs des visuellen, somatosensorischen und labyrinthären Subsystems. So konnten durch Augenschluss, Stand auf elastischen Polstern sowie Kopfneigung in verschiedenen Ebenen systematische Störungen beziehungsweise Reizirritationen generiert werden.

Tab. 6: Posturographische Testpositionen

Position	Erläuterung
NO	Augen offen, Kopf gerade
NC	Augen geschlossen, Kopf gerade
PO	Augen offen, Kopf gerade auf Schaumstoffpolstern ($32 \text{ cm} \times 12,5 \text{ cm} \times 6,5 \text{ cm}$) stehend
PC	Augen geschlossen, Kopf gerade auf Schaumstoffpolstern ($32 \text{ cm} \times 12,5 \text{ cm} \times 6,5 \text{ cm}$) stehend
HR	Augen geschlossen, Kopf 45° nach rechts rotiert
HL	Augen geschlossen, Kopf 45° nach links rotiert
HB	Augen geschlossen, Reklination des Kopfes
HF	Augen geschlossen, Inklination des Kopfes

Für die individuelle posturographische Beurteilung eines Patienten bedurfte es der Messung von acht Testpositionen, die in Tab. 6 näher definiert werden.

Das Zeitintervall zwischen den einzelnen Testpositionen betrug beim Wechsel von offenen zu geschlossenen Augen circa 10 Sekunden, so dass der Patient seine Standposition beibehalten konnte.

In den folgenden Abschnitten sollen das Messprinzip und die physikalischen Grundlagen erläutert werden. Die Posturographie basiert auf dem Gedanken Körperschwankungen in Bezug auf in einer Transversalebene angeordneter Drucksensoren im Stand auf festen ebenen Messplattformen zu ermitteln. Mit Hilfe von integrierten Dehnungsstreifen konnten die patientenindividuellen, vertikalen Reaktionskräfte auf insgesamt vier unabhängigen Plattformen (A, B, C und D) detektiert werden. Die anteilige Gewichtskraft pro Platte wurde anhand ihres verformenden, an den halbleitenden Elementen wirkenden, Moments in eine Spannung umgewandelt (Schwesig, 2006). Innerhalb einer durchschnittlichen Messdauer von jeweils circa 32 s und einer Abtastrate von 32 Hz können mit Hilfe des IBS über 900 Werte generiert werden (Schwesig, 2006).

Die Zerteilung der Kraftmessplattformen gestattet zudem die getrennte Detektion von Druckkräften des linken und rechten Vorfußes wie auch der Fersen. Die exakte Bestimmung der Druckverteilung auf den vier Platten ermöglicht über die Transformation des jeweiligen Kraft-Zeit-Signals in ein Frequenzspektrum [Power ($N \cdot 10^{-1}$)²] mittels Fourier-Analyse die Parametrisierung und Quantifizierung relevanter Subsysteme (visuell und nigrostriatal, peripher-vestibulär, somatosensorisch, cerebellär) der posturalen Regulation (Schwesig, 2006). In der nachfolgenden Tabelle (Tab. 7) werden die verschiedenen Frequenzbereiche mit den dazugehörigen posturalen Subsystemen dargestellt.

Tab. 7: Frequenzbereiche der posturalen Subsysteme (Schwesig, 2006, S. 148)

Frequenzbereich	Bezeichnung	Posturales Subsystem
F 1	0,03 - 0,10 Hz	low Visuelles und nigrostriatales System
F 2 - 4	0,10 - 0,50 Hz	medium-low Peripher-vestibuläres System
F 5 - 6	0,50 - 1,00 Hz	medium-high Somatosensorisches System
F 7 - 8	≥ 1,00 Hz	high Cerebelläres System

Der gesunde Proband realisiert im physiologischen Stand seine posturale Stabilität und Regulation im low-Frequenzbereich mit einer hauptsächlich bei 0,2 Hz ausgeprägten

Schwankungsfrequenz. Dieser Frequenzbereich ermöglicht es dem Körper bei geringem Energieaufwand maximale Ausdauer in Bezug auf die Haltung zu regulieren.

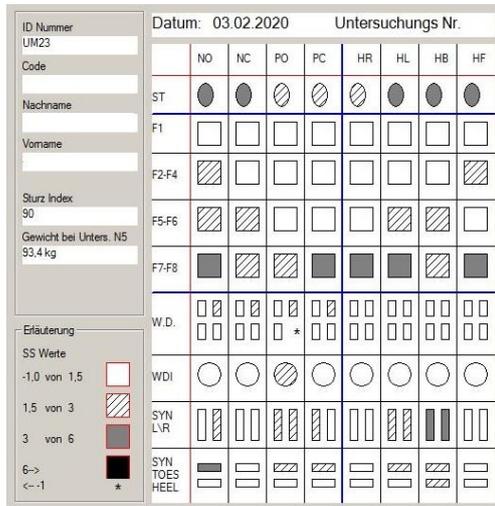


Abb. 11: Postural Summary Sheet (Eigene Darstellung)

Die Betrachtung von Abweichungen in den einzelnen Frequenzbereichen erlaubt dementsprechend Rückschlüsse zu ziehen, inwieweit kompensatorische Prozesse beziehungsweise Pathologien aktiv vorhanden sind. Deutlich sei hierbei wiederholt darauf hingewiesen, dass lediglich eine ganzheitliche Betrachtung der Messergebnisse eine sinnvolle Untersuchungsinterpretation erlaubt. Eine Reduktion beziehungsweise Stimulation der einzelnen Afferenzen (visuell, peripher-vestibulär, somatosensorisch und cerebellär) des

posturalen Systems ermöglicht die Ableitung verschiedener Parameter in Abhängigkeit der resultierenden Körperschwankungen. Anhand eines „Postural Summary Sheet“ können diese nach der Messung dargestellt und dem Patienten eine Rückmeldung bezüglich seiner individuellen Leistung oder seiner Haltungsregulation in Bezug zu einer gesunden Referenzgruppe gegeben werden (Abb. 11).

Der Vergleich der Messparameter zu den Referenzwerten einer gesunden Referenzgruppe erfolgt unter Beachtung vier aufsteigender Intervalle von Standardabweichungen, die die Bildung eines Summenscores erlauben.

Für die Beurteilung posturographischer Ergebnisse in dieser Studie bedurfte es der Betrachtung im folgendem definierter Parameter (Tab. 8).

Tab. 8: Messparameter des IBS (Schwesig, 2006, S. 152f.)

Messparameter	Erläuterung
Stabilitätsindikator (ST)	Gibt den Zustand der posturalen Stabilität an. ST berechnet sich aus der Quadratwurzel der Summe der quadrierten Differenzen zweier unmittelbar benachbarter Druckschwankungssignale. Je größer ST, desto größer die Instabilität.
WD-Score (weight distribution score)	Verteilung (%) des Körpergewichtes bezüglich der Einzelplatten (A, B, C, D).
Frequenzbereiche (F 1 – F 8)	Die jeweiligen Kraft-Zeit-Signale der Schwankungen werden von den Mittelwerten subtrahiert und unter Verwendung der Fast Fourier Analyse (FFT) in ein Frequenzspektrum überführt. Die Ordinate des

Vorfuß-Rückfuß- Ratio (Heel)	<p>Koordinatensystems entspricht der Frequenz-amplitude und ist dahingehend dimensionslos. Zudem sind die Ergebnisse der FFT zu den Ausgangssignalen proportional.</p> <p>Beschreibt die prozentuale Druckbelastung Vorfuß vs. Rückfuß unter Angabe des Rückfußes. Zur Detektion der anteriorposterioren Lastverteilung erfolgt eine weitere Präzisierung anhand der Berechnung: 50% - Heel. Ergebnisse mit negativen Vorzeichen deuten auf eine erhöhte Fersenbelastung, wohingegen ein positives Vorzeichen auf eine verstärkte Vorfußbelastung deuten würde.</p>
Seitigkeit (Left)	<p>Anhand des Parameters Seitigkeit erfolgt die Klassifizierung der prozentualen Druckbelastung rechts gegenüber links, unter Angabe der linken Seite. Zur Detektion der mediolateralen Lastverteilung erfolgt eine weitere Präzisierung anhand der Berechnung: 50% - Left. Ein negatives Vorzeichen der Differenz verweist auf eine vermehrte linksseitige Lastverteilung, wohingegen ein positives Vorzeichen für eine vermehrte rechte Druckbelastung stehen würde.</p>
Gewichtsver- teilungsindex (WDI, Gewichtsver- teilungsharmonie)	<p>Der Gewichtsverteilungsindex, kurz WDI, gibt die Standardabweichung der ermittelten WD-Scores in Bezug auf die 25%-Konstante pro Einzelplatte an. Je kleiner der WDI-Wert, desto geringer ist die Abweichung zwischen den vier individuellen Gewichtsprozenten der Tragplatten. Das Minimum des WDI wird mit 0 angegeben. Dieser Wert kann unter einer vollkommen ausgeglichenen Gewichtsverteilung von 25% pro Tragfläche erreicht werden. WDI-Werte nahe 0 stehen jedoch als ein Indiz für eine übertriebene Rigidität und damit einhergehender Kompensation posturaler Defizite mittels starrer Körperhaltung. Tendenziell ist dementsprechend eine Ausprägung im Bereich von 2 bis 12 als normwertig anzusehen (Kohen-Raz, 1991; Schwesig, 2006).</p>
Synchronisation (Synch: AB, CD, AC, BD, AD, BC)	<p>Ermöglicht eine Aussage über die Beziehungen der Schwingungsmuster der vier Platten zueinander. Insgesamt werden sechs Synchronisationswerte durch skalare Multiplikation berechnet. Werte von -1000 zeigen eine vollständige Kompensation, währenddessen Werte um 1000 eine perfekte Koaktivität darstellen (Kohen-Raz, 1991; Schwesig, 2006).</p>

3.4 Short Form - 36 (SF-36)

Eine körperliche Beeinträchtigung im alltäglichen Leben führt zumeist konsekutiv zu einer Minderung der Lebensqualität. Als ein nicht direkt fassbares psychologisches Konstrukt eines jeden Einzelnen subjektiv empfundenen Abbildes des Gesundheitszustandes, wurde unter zu Hilfenahme des SF-36 die „gesundheitsbezogene Lebensqualität“ erfasst und dokumentiert. Grundlegend werden in diesem Fragebogen Lebensbereiche wie das psychische Wohlbefinden, Einschränkungen im Alltags- wie Berufsleben, soziale Beziehungen und das körperliche Befinden quantitativ und qualitativ thematisiert.

Historisch gesehen ist die Erforschung lebensqualitativer Daten bis in die siebziger Jahre des letzten Jahrhunderts zurückzuverfolgen. Seinen Ursprung findet der SF-36 im Rahmen der durchgeführten Medical Outcome Study (MOS) in den Vereinigten Staaten von Amerika. Das Bestreben dieser Studie bestand in der Operationalisierung der patientenindividuellen Sicht auf deren Gesundheitszustand. Die Kürzung der originalen Anzahl von 149 Items (8 Summenskalen und 35 Skalen) auf ein bidimensionales Messinstrument mit 36 Items rückte die Repräsentanz von körperlicher wie psychischer Dimensionen in den Vordergrund (Bullinger und Kirchberger, 1998).

Im deutschsprachigen Raum wurde der SF-36 bereits 1998 im Deutschen Bundesgesundheitsurvey als Messinstrument etabliert (Bellach et al., 2000). Der Nachweis einer hohen Sensitivität als auch Ökonomie privilegiert ihn als ein führendes Messinstrument in Bezug auf die Detektion psychometrischer wie physischer Veränderungen (Bullinger, 1995).

In der vorliegenden Studie ist die deutschsprachige Standardversion des Fragebogens (Version 1.0) mit 36 Items und einer Zeitraumbetrachtung von vier Wochen verwendet worden. Der Fragebogen erlaubt die Bearbeitung durch Patienten ab dem 14. Lebensjahr. Im Rahmen dieser Studie wurde der zu Untersuchende darauf hingewiesen, jede Fragestellung zu bearbeiten. Ein Zeiteinsatz von circa zehn Minuten ermöglichte eine zeiteffiziente Durchführung des SF-36.

Die Haupt- und Subdimensionen beschreiben die Aufgliederung des individuellen Gesundheitszustandes in zwei Summenskalen und deren acht Unterkategorien (Bullinger und Kirchberger, 1998).

Insbesondere die Operationalisierung der funktionellen Kompetenz, psychischen Verfassung, des körperlichen Zustandes und der sozialen Interaktion bilden die Basis einer vom Patienten selbst getroffenen Auskunft über das eigene Befinden (Bullinger und Kirchberger, 1998). Im Folgenden werden in Anlehnung an die SF-36

Handanweisung Seite 12, Tabelle 1 die verschiedenen Subdimensionen inhaltlich vorgestellt (Tab. 9).

Tab. 9: Messparameter des SF-36

	Messparameter	Erläuterung
Körperliche Summenskala	Körperliche Funktionsfähigkeit (KÖFU)	Anhand von 10 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit der Gesundheitszustand körperliche Aktivitäten wie Selbstversorgung, Gehen, Treppen steigen, bücken, heben und mittelschwere oder anstrengende Tätigkeiten beschränkt.
	Körperliche Rollenfunktion (KÖRO)	Anhand von 4 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit der körperliche Gesundheitszustand die Arbeit oder andere tägliche Aktivitäten beeinträchtigt, z.B. geringere Produktivität als gewöhnlich, Einschränkungen in der Art der Aktivitäten oder Schwierigkeiten bei der Ausführung bestimmter Dinge.
	Körperliche Schmerzen (SCHM)	Anhand von 2 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit Schmerzen und deren Einfluss auf die normale Arbeit, sowohl innerhalb des Haushaltes als auch außerhalb Restriktionen hervorrufen.
	Allgemeine Gesundheitswahrnehmung (AGES)	Anhand von 5 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit die persönliche Beurteilung der Gesundheit, einschließlich des aktuellen Gesundheitszustandes, zukünftige Erwartungen und Widerstandsfähigkeit gegenüber Erkrankungen eingeschätzt werden.
	Vitalität (VITAL)	Anhand von 4 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit sich die Untersuchten voller Schwung und Energie versus müde und erschöpft fühlen.
Psychische Summenskala	Soziale Funktionsfähigkeit (SOFU)	Anhand von 2 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit die körperliche Gesundheit oder emotionale Probleme normale soziale Aktivitäten beeinträchtigen.
	Emotionale Rollenfunktion (EMRO)	Anhand von 3 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit emotionale Belastungen die Arbeit oder andere tägliche Aktivitäten beeinträchtigen oder nicht so sorgfältig wie üblich gearbeitet wird.
	Psychisches Wohlbefinden (PSYCH)	Anhand von 5 Items wird das Ausmaß ermittelt, inwieweit die allgemeine psychische Gesundheit, einschließlich Depression, Angst, emotionale und verhaltensbezogene Kontrolle und die allgemeine positive Gemüthsstimmung sich repräsentieren.

Veränderung der Gesundheit (GVER)	Anhand von 1 Item wird beurteilt, inwieweit sich der Gesundheitszustand im Vergleich zum vergangenen Jahr darstellt.
--	--

Die Antwortmöglichkeiten halten sich dichotom „ja-*nein*“ oder mehrstufig skaliert. Eine detaillierte Auflistung der Fragen ist dem Anhang zu entnehmen (Anlage 2). Das Verständnis der Patienten wurde dahingehend geschult, bei jeder Antwortoption nur eine individualbezogene Auswahl zu treffen.

Die Auswertung kann per Statistikprogramm (z.B. SPSS) oder schriftlich durchgeführt werden und beruht auf der Summation der angekreuzten Itemantworten pro Skala. Vollständigkeitshalber zu erwähnen, unterliegt diese teilweise einer speziellen Anpassung beziehungsweise Umcodierung. Eine entsprechende Transformation der acht Dimensionen in Werte zwischen 0 (geringste Lebensqualität) und 100 (höchste Lebensqualität), ermöglicht den Vergleich zwischen unterschiedlichen Patientengruppen oder innerhalb einer Gruppe. Fehlende Werte einer Skala können bis zu einem Prozentsatz von weniger 50% über eine Mittelwertberechnung angeglichen werden. Referenzwerte in Bezug auf die Normalbevölkerung wurden der Handweisung zum SF-36 entnommen. Zu bemerken ist allerdings, dass diese Patientengruppen nicht auf einer Vorauswahl ärztlichen Handelns zurückzuführen sind, sondern auf Selbstauskünfte im Rahmen einer Befragung basieren (Bullinger und Kirchberger, 1998)

Einige Autoren (Ihle et al., 2016; Bastard et al., 2017; Morin et al., 2018; Herbst et al., 2020) konnten in den vergangenen Jahren bereits die strukturierte Anwendbarkeit des SF-36 im Rahmen der Evaluation von Umstellungsosteotomien und arthrotischen Veränderungen des Kniegelenkes nachweisen.

Die Erfassung gesundheitsbezogener Lebensqualität ist als ein wesentlicher Punkt in der Beurteilung von medizinischen Interventionen und der Rehabilitation zu verstehen. Besonders Erkenntnisse in Bereichen des subjektiven Patientenempfindens zeigen Möglichkeiten einer sowohl punktuellen, als auch längsschnittlichen Beurteilung auf.

3.5 Visuelle Analogskala (VAS)

Um Veränderungen individueller Empfindungen wie Schmerzintensität ermitteln zu können, dient die VAS als ein objektives, reliables wie valides Instrument mit hoher Sensitivität. Bei der Deutung von Schmerzreduktionen sind Werte in Prozentangaben denen der absoluten vorzuziehen (Schomacher, 2008). Die VAS stellt heute einen Standard in der adäquaten Erfassung von Schmerzintensitäten dar und ermöglicht darüber hinaus, auch Veränderungen im Krankheitsverlauf zu erkennen.

Die VAS besteht aus einer zumeist 100 mm langen im deutschen Raum waagerechten Linie, an deren Endpunkten jeweils zwei Extrempunkte („kein Schmerz“ und „schlimmstvorstellbarer Schmerz“) lokalisiert sind. Anhand der Verbalisierung der beiden Extrempunkte wird die Spannweite möglicher Schmerzausprägungen veranschaulicht. Der Patient ist angehalten, mit einem eindeutigen senkrechten Strich die Intensität seines subjektiv beurteilten Schmerzstärke auf die VAS aufzutragen. Als Indikator für die Merkmalsausprägung der Schmerzintensität dient die vom Patienten markierte Position auf der Skala (z.B. Entfernung von Endpunkt „kein Schmerz“ in Millimeter). In dieser Studie wurde eine horizontale Version der Visuellen Analogskala verwendet (Anlage 3). Grundsätzlich sollten auf einer VAS lediglich eine Modalität des Schmerzes abgebildet werden, um eine uniformere Wertausprägung zu erhalten (Ogon et al., 1996; de C Williams et al., 2000). Bei der hier verwendeten Skala entspricht dies der Intensität.

Alghadir et al. (2018) zeigten zudem, dass die VAS (ICC: 0,97; 95% KI: 0,96 - 0,98) im Gegensatz zur NRS (Numerischen Rationalskala; ICC: 0,95; 95% KI: 0,93 - 0,96) und VRS (Visuellen Rating Skala; ICC: 0,93; 95% KI: 0,90 - 0,95) die höchste Retestrelabilität bei an Gonarthrose leidender Patienten aufweist. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der VAS gegenüber der NRS besteht in der genaueren Darstellung bezüglich der Schmerzintensität. Zur Auswertung der Visuellen Analogskalen können die Markierungen der Patienten auf der Linie in Zahlenwerte umgewandelt werden.

Um etwaige Verzerrungseffekte zwischen den einzelnen Messzeitpunkten zu vermeiden und eine exakte Darstellung des Schmerzgeschehens darstellen zu können, wurde bewusst auf die Verwendung einer graduellen Untergliederung verzichtet. Die Abstände der vom Patienten markierten Position wurden vom Endpunkt „kein Schmerz“ in Millimeter [mm] erhoben.

Deskriptiv wurden Mittelwerte, Standardabweichungen, Minima, Maxima als auch Mediane und Quartile berechnet. Inwieweit bestimmte oben genannte statistische Größenbereiche klinische Relevanz aufweisen, sollte im Vorfeld festgelegt werden. In einigen Arbeiten (Schomacher, 2008; Myles et al., 2017) konnte exemplarisch bereits eine Reduktion von 10 mm (10%) auf einer 100 mm VAS als klinisch signifikant angesehen werden. Marquié et al. (2003) verwiesen auf den hohen Stellenwert einer VAS-Diagnostik. Es konnte aufgezeigt werden, dass Ärzte die Schmerzen ihrer Patienten kontinuierlich weniger intensiv einschätzten (Marquie et al., 2003). Diese Ergebnisse unterstreichen die adäquate Anwendung der VAS in der vorliegenden Studie zur Umstellungsosteotomie für eine entsprechende Evaluation der subjektiven Schmerzintensität.

3.6 Fragebogen zur Schmerzhäufigkeit

In Anlehnung an den Deutschen Schmerzfragebogen (Version 2012.2; Fragen Nummer 8 und 9) erfolgte die Klassifizierung der Schmerzhäufigkeit innerhalb der letzten vier Wochen (Anlage 4).

Die Patienten konnten ihren Schmerzzustand in vier Kategorien angeben:

- „*Dauerschmerzen mit leichten Schwankungen*,“
- „*Dauerschmerzen mit starken Schwankungen*“,
- „*Schmerzattacken, dazwischen schmerzfrei*“,
- „*Schmerzattacken, dazwischen Schmerzen*“.

Unterstützend wirkte die visuelle Darstellung der jeweiligen Klassifikation mit Hilfe eines Diagramms (Abszisse: Zeit; Ordinate: Schmerz) und eines Graphen.

Traten Schmerzattacken im besagten Zeitraum auf, erfolgte eine weitere Spezifizierung in die Teilbereiche der Häufigkeit:

- „*mehrfach täglich*“,
- „*einmal wöchentlich*“,
- „*einmal monatlich*“,
- „*einmal täglich*“,
- „*mehrfach monatlich*“,
- „*seltener*“,
- „*mehrfach wöchentlich*“,

und Schmerzdauer:

- „*Sekunden*“,
- „*Stunden*“,
- „*länger als drei Tage*“,
- „*Minuten*“,
- „*bis zu drei Tage*“,

Im letzten Abschnitt wurde das tageszeitliche Schmerzgeschehen evaluiert. Bestand eine Abhängigkeit, so konnte der Patient zwischen folgenden Antwortmöglichkeiten auswählen:

- „*morgens*“,
- „*nachmittags*“,
- „*nachts*“,
- „*mittags*“,
- „*abends*“,

Die Erfassung der Schmerzhäufigkeit und deren Spezifikation vorhandener Schmerzattacken in -dauer und -rhythmik, ermöglichte zusammen mit der Darstellung der tageszeitlichen Abhängigkeit deskriptive Aussagen über die Schmerzsituation in den vergangenen vier Wochen.

3.7 Statistische Datenanalyse

Für die Bestimmung der Stichprobengröße wurde a priori eine Poweranalyse (nQuery 4.0, Statistical solutions Ltd., Cork, Ireland) auf Grundlage eines zweiseitigen Hypothesentests (α -Fehler: 0,05) durchgeführt. In Übereinstimmung mit van der Woude et al. (2017) wurde eine Teststärke von 80% (Mittelwertdifferenz: 3, SD der Mittelwertdifferenz: 6) verwendet. Als Hauptzielparameter wurde der Stabilitätsindikator zugrunde gelegt (Bartels et al., 2018). Demnach mussten initial 35 Patienten rekrutiert werden, um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu generieren. Eine Dropout-Rate von 15% (n=5) berücksichtigend, konnten 38 Patienten zum MZP 1 präoperativ in die Studie eingeschlossen werden.

Die statistische Auswertung erfolgte mittels SPSS Statistics Version 25.0 für Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) und Microsoft Excel 2010 für Windows.

Deskriptiv wurden Mittelwerte, Standardabweichungen und 95% KI berechnet. Nach Anwendung der Bonferroni-Korrektur wurde das Signifikanzniveau $p < 0,05$ durch die Anzahl der posturographischen Tests dividiert. Mittelwertunterschiede waren als statistisch signifikant einzuordnen, falls: $p < 0,006$ oder $\eta_p^2 > 0,10$ (Richardson, 2011).

Im Vorfeld der statistischen Analysen wurden alle Variablen auf ihre Normalverteilung überprüft (Shapiro-Wilk Test).

Zu jedem Patienten konnte eine alters- und größenadjustierte Referenz bestimmt und zugeordnet (matched pairs Technik) werden. Der Vergleich erfolgte mittels einer Referenzdatenbank (Schwesig, 2006; Schwesig et al., 2013).

Die längsschnittliche Prüfung von Mittelwertunterschiede (MZP 1 - 4; HTO-Patienten vs. Referenzgruppe) und die Berechnung von Zeiteffekten erfolgte varianzanalytisch mittels einfaktorieller (MZP; Gruppe), univariater Allgemeiner Linearer Modelle. Die Varianzanalyse gliederte sich, wie ausführlich in Bartels et al. (2019) beschrieben, in drei Teilbereiche.

Die Berechnung der körperlichen und psychischen Summenscores des SF-36 wurden mit Hilfe des Tabellenprogramms Microsoft Excel 2010 und SPSS Statistics Version 25.0 angefertigt. Die erhobenen 36 Items konnten entsprechend der Vorgaben der Handanweisung des SF-36 kodiert werden.

Die längsschnittliche Betrachtung des Fragebogens zur Schmerzhäufigkeit wurde deskriptiv auf der Basis von Häufigkeitsverteilungen evaluiert.

4 Ergebnisse

Mittels des Operationsverfahrens der hohen tibialen additiven Osteotomie sollte die pathologische O-Beinstellung korrigiert und der vorzeitige Verschleiß sowie die Schmerzproblematik innerhalb des Kniegelenkes, besonders im medialen Kompartiment, eliminiert bzw. vermindert werden. Es galt längsschnittlich die Parameter der posturalen Regulation und Stabilität, der Lebensqualität, der Schmerzintensität und -häufigkeit zu evaluieren.

4.1 Stichprobe

Die in dieser Arbeit dargestellte Studie wurde in Kooperation des Departments für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie (DOUW) des Universitätsklinikums Halle und der Sportklinik Halle durchgeführt. Im Rahmen des Rekrutierungsprozesses konnten über einen Zeitraum von 15 Monaten 38 Probanden eingeschlossen und von diesen 34 (90%) postoperativ untersucht werden. Um die Homogenität der Stichprobe sowie die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, wurden aufgrund der deutlich größeren Zahl männlicher Patienten 4 (10%) Frauen der Studie exkludiert.

In der längsschnittlichen Evaluation wurden zum vierten Messzeitpunkt (6 Monate postoperativ) 32 Patienten vollständig betrachtet.

Innerhalb der Studie können den operativ valgusierend versorgten Tibiae 20 (62%) rechtsseitige und 12 (38%) linksseitige Umstellungsosteotomien zugeordnet werden. Es zeigte sich eine Dominanz an rechtsseitig vorgenommenen HTO's.

Tab. 10: Stichprobencharakteristik: Alter, anthropometrische Daten; n=32 [MW \pm SD, (Spannweite)] und dominantes Bein

	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4
Alter [Jahre]	55,3 \pm 5,57 (42,0 - 62,0)			
Größe [m]	1,80 \pm 0,07 (1,70 – 2,01)			
Gewicht [kg]	99,4 \pm 13,4 (77,8 - 129,1)	99,0 \pm 13,5 (78,3 - 130,8)	99,3 \pm 13,6 (80,0 - 133,1)	99,7 \pm 14,1 (79,3 - 135,5)
BMI [kg/m²]	30,6 \pm 3,61 (24,0 - 39,6)	30,5 \pm 3,58 (24,2 - 39,0)	30,6 \pm 3,68 (24,7 - 38,7)	30,7 \pm 3,79 (24,4 - 39,5)
Dominantes Bein	n=13 links; n=18 rechts (1 Patient zeigte keine Dominanz)			

Im Studienverlauf über 6 Monate waren seitens der Parameter Gewicht ($p=0,567$, $\eta_p^2=0,018$) und BMI ($p=0,557$, $\eta_p^2=0,017$) keine signifikanten Veränderungen ersichtlich (Tab. 10). Auffällig erschien der über alle Messzeitpunkte erhöhte BMI im Bereich Adipositas Grad I (Deutsche Adipositas Gesellschaft).

Es zeigte sich keine Beziehung (Chi-Quadrat: 2,306, $p=0,129$) zwischen der zu operierenden Seite und dem dominanteren oder nicht dominanteren Bein.

Alle in die Studie eingeschlossenen Patienten wiesen eine moderate Gonarthrose (Kellgren-Lawrence-Grad: 3) auf.

Bezogen auf die Dauer der patienteneigenen ersten erinnerbaren Schmerzsituation im betroffenen Bein bis zum jeweiligen Operationszeitpunkt konnten durchschnittlich $28,3 \pm 20,2$ Monate (Range: 4 - 96 Monate) eruiert werden.

4.2 Gewichtsverteilung und Fußkoordination

Israel (1997) zufolge wird die aufrechte Körperhaltung maßgeblich über die Koordination der Füße bestimmt. Somatosensorische Inputs des unteren Regelkreises (Fuß-, Knie-, Hüftgelenk und Rückenmark) ermöglichen eine adäquate Gesamtkörperstabilität. Die Fußkoordination wird primär mittels des Parameters Synchronisation abgebildet. Darüber hinaus wurden folgende Parameter zur Charakterisierung der anteriorposterioren und mediolateralen Gewichtsverteilung erhoben: Gewichtsverteilungsindex (WDI), Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel) und Seitigkeit (Left).

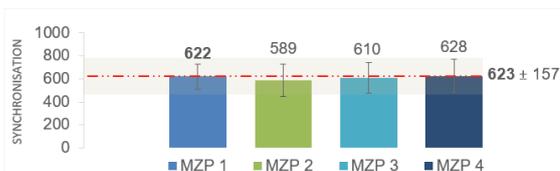


Abb. 12: Synchronisation (Synch) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz



Abb. 13: Gewichtsverteilungsindex (WDI) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz

Seitens der Synchronisation zeigte sich einzig zum MZP 2 eine nennenswerte Veränderung (Abb. 12). Bezüglich des Parameters Synchronisation fanden sich weder partielle Effekte zwischen benachbarten Messzeitpunkten noch ein Gesamtzeiteffekt ($p=0,390$; $\eta_p^2=0,031$). Gleiches gilt für den Vergleich mit der Referenzstichprobe zu allen 4 Messzeitpunkten.

Die Gewichtsverteilungsindices (Abb. 13) unterschieden sich innerhalb des Betrachtungszeitraumes nicht signifikant von dem der Referenz und bewegten sich im Normbereich (2 - 12). Zwischen der präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) und 6 Monate postoperativ (MZP 4) konnte ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ermittelt werden ($p=0,003$; $\eta_p^2=0,152$). Einzig zwischen dem MZP 2 und 3 ließ sich ein signifikanter Teileffekt ($p=0,001$; $\eta_p^2=0,297$) nachweisen.

Tab. 11: anteriorposteriore und mediolaterale Lastverteilung [MW ± SD]

Parameter	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4	Referenz
anterior-posterior	5,30 ± 8,16	7,54 ± 6,93	5,81 ± 6,91	7,44 ± 6,59	0,58 ± 10,7
medio-lateral	-0,35 ± 5,42	-0,19 ± 7,93	-0,26 ± 5,27	-0,58 ± 4,13	0,31 ± 5,55

Bezüglich der anteriorposterioren Gewichtsverteilung zeigten sich im Betrachtungszeitraum Teileffekte aufeinanderfolgender Messzeitpunkte zwischen MZP 1 und MZP 2 ($p=0,017$; $\eta_p^2=0,170$) sowie MZP 3 und MZP 4 ($p=0,045$; $\eta_p^2=0,124$). Die präoperative Messung (MZP 1) stellte den Wert mit der balanciertesten Druckbelastung dar. Dennoch war auch hier eine Mehrbelastung des Vorfuß (~55%) zu beobachten (Tab. 11).

Die mediolaterale Lastverteilung wies innerhalb des Studienverlauf weder partielle Effekte zwischen benachbarten Messzeitpunkten noch einen Gesamtzeiteffekt ($p=0,966$; $\eta_p^2=0,002$) auf. Gleiches gilt für den Vergleich mit der Referenzstichprobe zu allen 4 Messzeitpunkten (Tab. 11).

Tab. 12: Vorfuß-Rückfuß-Ratio und Seitigkeit bei links-/rechtsseitiger Umstellungsosteotomie [MW ± SD]; Messwerte mit der geringsten Differenz zum Idealwert von 50% fett hervorgehoben

Parameter [%]	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4
linksseitig operiert (n=12)				
Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel)	42,9 ± 5,78	41,9 ± 6,11	42,8 ± 4,56	41,4 ± 4,87
Seitigkeit (Left)	46,2 ± 4,25	43,1 ± 6,23	47,9 ± 3,68	50,2 ± 3,28
rechtsseitig operiert (n=20)				
Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel)	45,8 ± 9,28	42,8 ± 7,51	45,0 ± 7,99	43,3 ± 7,44
Seitigkeit (Left)	52,9 ± 4,43	54,5 ± 5,42	51,7 ± 5,64	50,8 ± 4,64

In Tab. 12 ist für links- und rechtsseitig operierte Patienten die jeweilige Vorfuß-Rückfuß-Ratio (Heel) und Seitigkeit (Left) getrennt dargestellt.

Die linksseitig operierten Patienten zeigten zum MZP 1 (~43%) und während des Studienzeitraumes eine geringere Gewichtsbelastung ihrer Fersen. Ein partieller Effekt benachbarter Messzeitpunkte konnte zwischen MZP 3 und MZP 4 ($p=0,199$; $\eta_p^2=0,145$)

detektiert werden. Ein Gesamtzeiteffekt ($p=0,594$; $\eta_p^2=0,051$) ließ sich jedoch im Bereich der anteriorposterioren Lastverteilung nicht beobachten.

Rechtsseitig operierte Patienten wiesen zum präoperativen Messzeitpunkt (MZP 1) ebenfalls eine verminderte Rückfußbelastung auf (~46%). Innerhalb der Messzeitfolge fanden sich Teileffekte zwischen:

- MZP 1 vs. MZP 2: $p=0,015$; $\eta_p^2=0,272$,
- MZP 2 vs. MZP 3: $p=0,120$; $\eta_p^2=0,122$,
- MZP 3 vs. MZP 4: $p=0,127$; $\eta_p^2=0,118$.

6 Monate postoperativ reduzierte sich die prozentuale Rückfußbelastung darüber hinaus auf ~43% des Körpergewichts ($p=0,052$; $\eta_p^2=0,131$).

In Bezug auf die laterale Gewichtsverteilung der linksseitig operierten Patienten war zum MZP 1 eine leichte Entlastung der operierten Seite zu beobachten (~46%). Die längsschnittliche Betrachtung ergab signifikante Teileffekte zu allen benachbarten Messzeitpunkten:

- MZP 1 vs. MZP 2: $p=0,107$; $\eta_p^2=0,219$,
- MZP 2 vs. MZP 3: $p=0,001$; $\eta_p^2=0,636$,
- MZP 3 vs. MZP 4: $p=0,008$; $\eta_p^2=0,486$

als auch einen Gesamtzeiteffekt ($p=0,001$; $\eta_p^2=0,547$). Ein halbes Jahr nach der HTO war die mediolaterale Gewichtsverteilung im Vergleich zur präoperativen Ausgangssituation sehr gut ausbalanciert (linksseitige Belastung: ~50%).

Bei den rechtsseitig operierten Patienten zeigte sich eine vermehrte Belastung des linken Beines mit ~53% zum MZP 1 und ein Anstieg auf ~55% sechs Wochen postoperativ (MZP 2). Ein signifikanter Unterschied innerhalb der Messzeitfolge zeigte sich erst zum MZP 3 ($p=0,001$; $\eta_p^2=0,420$) anhand einer Verringerung der linksseitigen Belastung (~3%). Während des Studienverlaufs konnte ein Gesamtzeiteffekt zwischen MZP 1 und MZP 4 festgestellt werden ($p=0,031$; $\eta_p^2=0,163$). 6 Monate postoperativ wurde eine ausgeglichene links- (~51%) zu rechtsseitige (~49%) Lastverteilung beobachtet.

Die operative Beinachsenkorrektur führte zu signifikanten Verbesserungen im Bereich des Gewichtsverteilungsindex und zu einer ausbalancierteren mediolateralen Lastverteilung. Innerhalb der prozentualen Vorfuß-Rückfuß-Belastung zeigten sich 6 Monate postoperativ (MZP 4) geringgradige Verschlechterungen (Links: ~1%; Rechts: ~2%) der anteriorposterioren Lastverteilung im Vergleich zur präoperativen Ausgangssituation (MZP 1). Hypothese I kann folglich nur bedingt angenommen werden. Die HTO trug einen wesentlichen Beitrag zu einer ausbalancierteren mediolateralen Statik der Patienten bei.

4.3 Posturale Stabilität

Die posturale Stabilität wurde anhand der Berechnung des Stabilitätsindikators (ST) zu jedem Messzeitpunkt ermittelt.

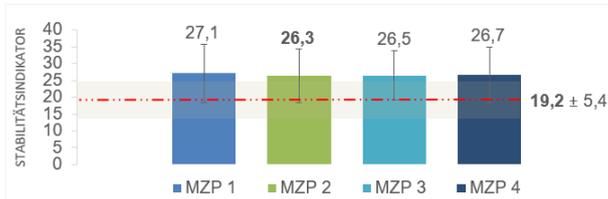


Abb. 14 Stabilitätsindikator (ST) [MW ± SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz

MZP 1 präsentierte mit $27,1 \pm 8,59$ einen circa 8 Punkte höheren Stabilitätsindikator im Vergleich zum Referenzwert und unterschied sich signifikant ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,237$) von diesem (Abb. 14). Zu allen Messzeitpunkten fanden sich signifikante

Unterschiede zur Referenzstichprobe. Partielle Effekte innerhalb der Messreihe konnten nicht evaluiert werden.

Der Parameter Stabilitätsindikator (ST) wies keinen signifikanten Gesamtzeiteffekt (MZP 1 vs. MZP 4: $p = 0,728$; $\eta_p^2 = 0,012$) auf.

Demnach führte die Beinachsenkorrektur nicht zu einer erhöhten posturalen Stabilität und Hypothese II sollte entsprechend der vorliegenden Ergebnisse verworfen werden.

4.4 Posturale Subsysteme

Es erfolgte die Parametrisierung und Quantifizierung der posturalen Subsysteme anhand der durch Fast Fourier-Analyse (FFT) berechneten vier Frequenzspektren. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Bereiche spezifischer erläutert.



Abb. 15: Visuell-nigrostriatales System (F 1) [MW ± SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz



Abb. 16: Peripher-vestibuläres System (F 2 - 4) [MW ± SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz

Präoperativ (MZP 1) war im visuell-nigrostriatalen Frequenzbereich (F 1) ein circa 2 Punkte höherer Wert im Vergleich zur Referenz zu beobachten ($p = 0,213$; $\eta_p^2 = 0,025$) (Abb. 15). Interessanterweise erhöhten sich die Werte zu den ersten beiden postoperativen Messzeitpunkten (MZP 2: $20,9 \pm 22,1$; MZP 3: $21,6 \pm 22,0$). Im Studienverlauf näherte sich die Werte zum MZP 4 der Referenz wieder bis auf rund $\Delta = 1$

an ($p=0,431$; $\eta_p^2=0,010$). Signifikante Mittelwertdifferenzen innerhalb der Messreihe konnten nicht evaluiert werden.

Innerhalb des visuell-nigrostriatalen Frequenzbereiches zeigte sich während der Betrachtungszeit von 6 Monaten (MZP 1 zum MZP 4) kein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p=0,635$; $\eta_p^2=0,014$).

MZP 1 zeigte mit $10,3 \pm 3,13$ im peripher-vestibulären Subsystem (F 2 - 4) einen höheren Ausgangswert im Vergleich zum Referenzwert, unterschied sich von diesem jedoch nicht signifikant ($p=0,416$; $\eta_p^2=0,011$) (Abb. 16). Ein konstantes Niveau der Werte verblieb bis zum MZP 4. Die Messung 6 Monate postoperativ zeigte keinen signifikanten Unterschied im Vergleich zur Referenz ($p=0,708$; $\eta_p^2=0,002$). Signifikante Partialeffekte während des Studienverlaufs waren ebenfalls nicht zu evaluieren.

Für das peripher-vestibuläre Subsystem konnte kein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p=0,145$; $\eta_p^2=0,059$) zwischen der präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) und 6-monatigen postoperativen Erueierung (MZP 4) festgestellt werden.

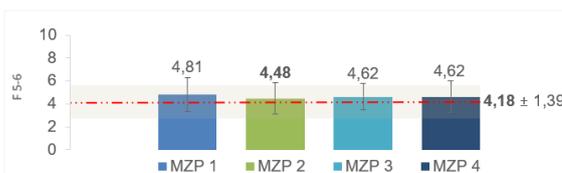


Abb. 17: Somatosensorisches System (F 5 - 6) [MW ± SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz

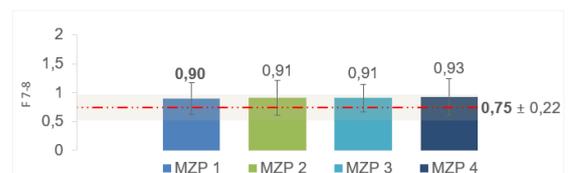


Abb. 18: Cerebelläres System (F 7 - 8) [MW ± SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz

Präoperativ fand sich mit $4,81 \pm 1,50$ ein höherer Ausgangswert im Vergleich zum Referenzwert ($p=0,086$; $\eta_p^2=0,047$) innerhalb des somatosensorischen Subsystems (F 5 - 6) (Abb. 17). Ein signifikanter Teileffekt konnte zwischen dem präoperativen Messzeitpunkt und dem ersten postoperativen Messzeitpunkt (MZP 2) evaluiert werden ($p=0,025$; $\eta_p^2=0,152$). MZP 4 zeigte hingegen keine Signifikanz im Unterschied zur Referenz ($p=0,198$; $\eta_p^2=0,027$).

Während des Studienverlauf fand sich innerhalb des somatosensorischen Subsystems kein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p=0,114$; $\eta_p^2=0,062$).

Mit $0,90 \pm 0,27$ konnte zum MZP 1 ein ($p=0,015$; $\eta_p^2=0,092$) höherer Ausgangswert im Vergleich zur Referenz innerhalb des cerebellären Subsystems (F 7 - 8) detektiert werden (Abb. 18). Ein konstantes Niveau der Werte zeigte sich bis 6 Monate postoperativ. Signifikante Mittelwertdifferenzen wurden nicht evaluiert.

Innerhalb des cerebellären Subsystems konnte kein signifikanter Unterschied ($p=0,810$; $\eta_p^2=0,008$) zwischen der präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) und 6-monatigen postoperativen Erueierung (MZP 4) festgestellt werden.

Schlussfolgernd unterschieden sich die visuell & nigrostriatalen (F 1), peripher-vestibulären (F 2 - 4) und somatosensorischen (F 5 - 6) Subsysteme nicht signifikant von denen gesunder Probanden. Einzig das cerebelläre Subsystem (F 7 - 8) spiegelte signifikante Mittelwertdifferenzen zu den Referenzwerten (MZP 3, MZP 4) wider. Im Bereich der varianzanalytischen Auswertung konnte lediglich das Frequenzspektrum F 5 - 6 Signifikanz ($p=0,025$; $\eta_p^2=0,152$) zwischen dem präoperativen Ausgangszustand und der ersten postoperativen Messung (MZP 2) aufweisen.

Innerhalb der Betrachtungszeit führte die operative Beinachsenkorrektur auf Prozessebene nicht zu einer erhöhten Leistungsfähigkeit des somatosensorischen Systems (F 5 - 6). Hypothese III ist dementsprechend abzulehnen.

4.5 Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Sub- und Summenskalen des **Short Form - 36** dargestellt.

Sowohl die körperlichen als auch die psychischen Subskalen der Patienten zeigten niedrigere Mittelwerte zum MZP 1 im Vergleich zur deutschen Referenzstichprobe. Die ermittelten Standardabweichungen bewegten sich in der Mehrheit in Größenbereichen der Referenz. Der betragsmäßig größte Unterschied im Mittelwertvergleich MZP 1 zur Referenz konnte in der Subskala des Körperlichen Schmerzes (SCHM: $\Delta=48$) beschrieben werden. Auffallend niedrige präoperative Werte waren ebenfalls in den Subskalen der Körperlichen Funktionsfähigkeit (KÖFU: 46) und Körperlichen Rollenfunktion (KÖRO: 43) zu beobachten.

Alle Subskalen wiesen 12 Wochen postoperativ (MZP 3) höhere Mittelwerte im Vergleich zum MZP 1 auf. Während des Studienverlaufs zeigte sich, dass mit steigendem postoperativen Zeitintervall die subjektiv beurteilte Lebensqualität zunahm. Dieser Effekt erwies sich in den Subskalen: KÖFU ($p<0,001$; $\eta_p^2=0,451$), KÖRO ($p<0,001$; $\eta_p^2=0,446$), SCHM ($p<0,001$; $\eta_p^2=0,560$), AGES ($p=0,007$; $\eta_p^2=0,134$), VITA ($p<0,001$; $\eta_p^2=0,267$), SOFU ($p=0,003$; $\eta_p^2=0,151$), EMRO ($p=0,008$; $\eta_p^2=0,126$) als signifikant. Im Teilbereich Psychisches Wohlbefinden (PSYC) ($p=0,646$; $\eta_p^2=0,016$) konnte hingegen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden.

In den folgenden Abschnitten erfolgt eine detaillierte Darstellung der einzelnen Subskalen des SF-36:

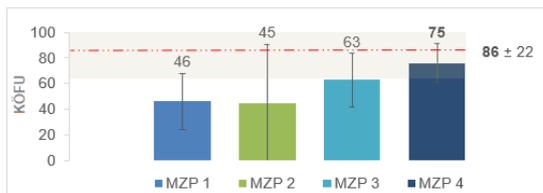


Abb. 19: SF-36-Subskale:
Körperliche Funktionsfähigkeit
(KÖFU) [MW ± SD]



Abb. 20: SF-36-Subskale:
Körperliche Rollenfunktion
(KÖRO) [MW ± SD]

Die Analyse der Subskala für Körperliche Funktionsfähigkeit (KÖFU) zeigte während des Studienverlaufs eine Zunahme um 29 Punkte (Abb. 19). Dennoch lag sie 6 Monate postoperativ (MZP 4) weiterhin 11 Punkte unterhalb des Wertes der Referenzpopulation. Signifikante Teileffekte konnten zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,376$) sowie MZP 3 vs. MZP 4 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,337$) beobachtet werden.

Innerhalb der Subskala Körperliche Funktionsfähigkeit fand sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,451$) zwischen der präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) und MZP 4 (6 Monate postoperativ).

Der Subskalenbereich der Körperlichen Rollenfunktion (KÖRO) wurde während des Studienverlaufs (MZP 1 zum MZP 4) um 31 Punkte höher bewertet (Abb. 20). Zu bemerken ist die Reduktion um 30 Punkte zwischen MZP 1 vs. MZP 2 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,386$). Es stellten sich ebenfalls signifikante Teileffekte zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,500$) sowie MZP 3 vs. MZP 4 ($p = 0,006$; $\eta_p^2 = 0,221$) dar. Auch in dieser Subskalenkategorie erreichten die Patienten zum MZP 4 nicht den Wert der Referenz ($\Delta = \sim 10$ Punkte).

6 Monate (MZP 4) nach durchlaufener additiver HTO konnte ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,446$) im Vergleich zur präoperativen Messung (MZP 1) detektiert werden.



Abb. 21: SF-36-Subskale:
Körperlicher Schmerz
(SCHM) [MW ± SD]

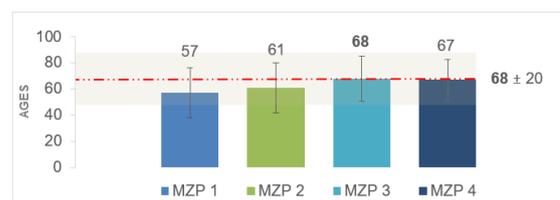


Abb. 22: SF-36-Subskale:
Allgemeine Gesundheitswahrnehmung
(AGES) [MW ± SD]

Die Subskala Körperlicher Schmerz (SCHM) zeigte im Studienverlauf eine stetige Verbesserung (Abb. 21). Signifikante Unterschiede waren zwischen den MZP 2 vs. 3

($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,562$) sowie zwischen MZP 3 vs. MZP 4 ($p = 0,007$; $\eta_p^2 = 0,212$) zu beobachten.

Innerhalb der Subskala Schmerz konnte gleichfalls ein signifikanter ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,560$) Gesamtzeiteffekt zwischen MZP 1 (präoperativ) und MZP 4 (6 Monate postoperativ) beobachtet werden.

Die Subskala der Allgemeinen Gesundheitswahrnehmung (AGES) wurde während der 12-wöchigen Betrachtung (MZP 3) um circa 11 Punkte besser beurteilt und näherte sich dem Referenzwert an (Abb. 22). Ein signifikanter Zeiteffekt zeigte sich vom ersten postoperativen Messzeitpunkt (MZP 2) zum MZP 3 ($p = 0,048$; $\eta_p^2 = 0,120$).

Innerhalb des Studienverlaufs (MZP 1 vs. MZP 4) konnte ein signifikanter Gesamtzeiteffekt für die Subskala Allgemeine Gesundheitswahrnehmung ($p = 0,007$; $\eta_p^2 = 0,134$) eruiert werden.

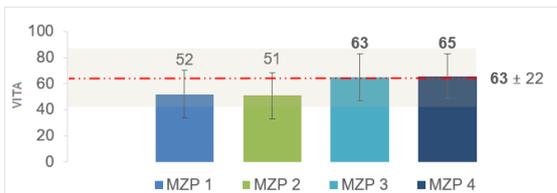


Abb. 23: SF-36-Subskale:
Vitalität (VITA) [MW ± SD]

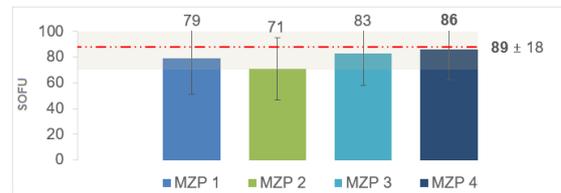


Abb. 24: SF-36-Subskale:
Soziale Funktionsfähigkeit (SOFU) [MW ± SD]

In der Analyse der Subskala Vitalität (VITA) ließ sich eine Zunahme von 12 Punkten zwischen der ersten (MZP 2) und zweiten postoperativen Messung (MZP 3) beobachten (Abb. 23). Ein signifikanter Teileffekt zeigte sich zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,369$), wobei zum MZP 4 das Niveau der Referenzstichprobe sogar um 2 Punkte übertroffen wurde.

Für die Subskala Vitalität fand sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,267$) zwischen der präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) und 6-monatigen postoperativen Eruiierung (MZP 4).

Der Subskalenbereich Soziale Funktionsfähigkeit (SOFU) reduzierte seinen Ausgangswert um 8 Punkte zum ersten postoperativen Messzeitpunkt (MZP 2) (Abb. 24). Darüber hinaus zeigte sich postoperativ ein signifikanter partieller Effekt zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($p = 0,005$; $\eta_p^2 = 0,226$).

Innerhalb der Subskala Soziale Funktionsfähigkeit konnte ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p = 0,003$; $\eta_p^2 = 0,151$) zwischen der prä- (MZP 1) und 6 Monate postoperativen Eruiierung (MZP 4) beobachtet werden.

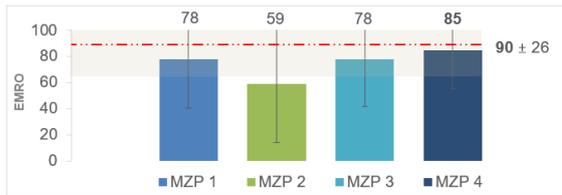


Abb. 25: SF-36-Subskale:
Emotionale Rollenfunktion
(EMRO) [MW ± SD]

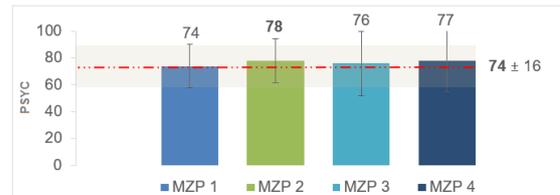


Abb. 26: SF-36-Subskale:
Psychisches Wohlbefinden
(PSYC) [MW ± SD]

Die Subskala Emotionale Rollenfunktion (EMRO) wies eine signifikante ($p=0,012$; $\eta_p^2=0,188$) Reduktion um 19 Punkte zwischen MZP 1 und MZP 2 auf (Abb. 25). Ein signifikanter Unterschied fand sich ebenfalls zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($p=0,024$; $\eta_p^2=0,154$).

Ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p=0,008$; $\eta_p^2=0,126$) berechnete sich seitens der Subskala Emotionale Rollenfunktion zwischen MZP 1 und MZP 4.

In der längsschnittlichen Beobachtung der Subskala für das Psychische Wohlbefinden (PSYC) zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten (Abb. 26). Zu bemerken gilt in diesem Kontext die stets positivere Einschätzung des psychischen Wohlbefindens der Patienten- im Vergleich zur Referenzgruppe im postoperativen Beobachtungszeitraum.

Zusammenfassend konnte innerhalb der Subskala Psychisches Wohlbefinden kein signifikanter Gesamtzeiteffekt (MZP 1 vs. MZP 4: $p=0,646$; $\eta_p^2=0,016$) festgestellt werden.

Das Item Gesundheitsveränderung (GVER) wurde längsschnittlich deskriptiv aufbereitet (Tab. 13).

Tab. 13: SF-36-Skalenwert: Gesundheitsveränderung (GVER);
Maxima fett hervorgehoben

	MZP 1	MZP 2	MZP 3	MZP 4
„Derzeit viel besser als vor einem Jahr“	0%	22%	31%	47%
„Derzeit etwas besser als vor einem Jahr“	15%	34%	44%	44%
„Etwa so wie vor einem Jahr“	22%	25%	19%	9%
„Derzeit etwas schlechter als vor einem Jahr“	47%	19%	6%	0%
„Derzeit viel schlechter als vor einem Jahr“	16%	0%	0%	0%

47% der Patienten beschrieben ihren Gesundheitszustand zum MZP 1 im Vergleich zum vergangenen Jahr als „etwas schlechter“. Bereits in der ersten postoperativen Messung (MZP 2: 6 Wochen) konnte eine Verlagerung der Einschätzung hinzu einer Verbesserung im Sinne „etwa so wie vor einem Jahr“ (25%), „etwas besser“ (34%) und

„viel besser“ (22%) verzeichnet werden. 12 Wochen postoperativ (MZP 3) präsentierten sich die Hauptpositionen der Patienten in einer subjektiv günstiger eingeschätzten Gesundheitssituation - „etwas besser“ (44%) und „viel besser“ (31%). 6 Monate postoperativ (MZP 4) gaben 47% der Patienten einen „viel besseren“ und 44% einen „etwas besseren“ Gesundheitszustand an.

Schlussfolgernd führten die operative Beinachsenbegradigung und die postoperative Rehabilitation über den Studienverlauf von 6 Monaten zu einer günstigeren Wahrnehmung des individuellen Gesundheitszustandes im Vergleich zum vorangegangenen Jahr.

Die acht Subskalen ließen sich, wie bereits unter *Kapitel 3.4 Short Form - 36* beschrieben, in die Körperliche Summenskala (KÖRO, KÖFU, SCHM, AGES) und die Psychische Summenskala (VITA, SOFU, EMRO, PSYC) differenzieren.

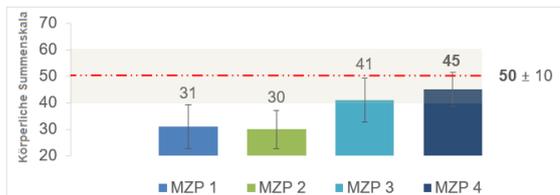


Abb. 27: Körperliche SF-36 Summenskala [MW ± SD]

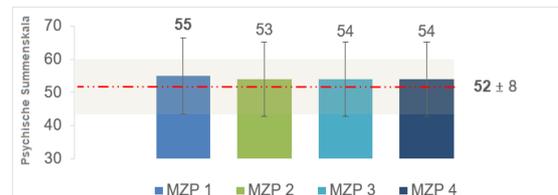


Abb. 28: Psychische SF-36 Summenskala [MW ± SD]

Wie Abb. 27 zu entnehmen, fielen die Werte der Körperlichen Summenskala zu allen vier Messzeitpunkten im Vergleich zur Referenzstichprobe niedriger aus. Das betragsmäßig geringste Ergebnis ergab sich zum MZP 2 und das höchste zum MZP 4. Bezogen auf den präoperativen Ausgangszustand (MZP 1) konnte eine Zunahme um 14 Punkte bis 6 Monate (MZP 4) nach erfolgter operativer Beinachsenkorrektur verzeichnet werden. Signifikante Unterschiede ergaben sich innerhalb der längsschnittlichen Betrachtung zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,569$) sowie MZP 3 vs. MZP 4 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,365$).

Seitens der Körperlichen Summenskala fand sich ein signifikanter Gesamtzeiteffekt ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,573$) zwischen der präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) und 6-monatigen postoperativen Erueierung (MZP 4).

In der Kategorie der Psychischen Summenskala wurden innerhalb des Betrachtungszeitraum gleichbleibend, über dem Referenzniveau, hohe Ausprägungen beobachtet (Abb. 28).

Die Psychische Summenskala zeigte somit keinen signifikanten Gesamtzeiteffekt ($p = 0,804$; $\eta_p^2 = 0,010$) während des Studienverlaufs.

In Abb. 29, 30 und 31 erfolgte gemäß Handanweisung des SF-36 jeweils eine alterstratifizierte Darstellung der SF-36-Summenskalen.

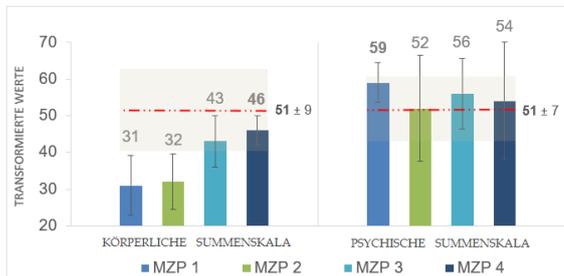


Abb. 29: SF-36 Summenskalen
Alter: 41-50 Jahre, n=6
[MW ± SD]

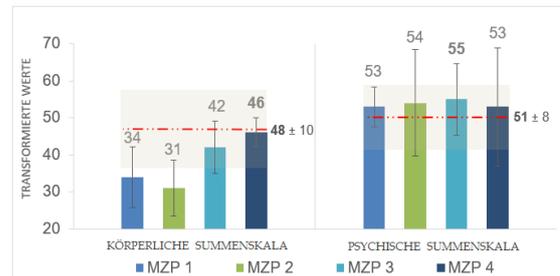


Abb. 30: SF-36 Summenskalen
Alter: 51-60 Jahre, n=17
[MW ± SD]

In der Altersgruppe der 41-50-Jährigen stellte sich während des Studienverlaufs eine stetige Zunahme der Werte der Körperlichen Summenskalen dar (Abb. 29). Ein relevanter Unterschied von 11 Punkten fand sich hinsichtlich der Messzeitfolge zwischen dem MZP 2 und 3. Die 6 Monate postoperative Messung (MZP 4) zeigte einen 5 Punkte geringeren Summenskalenwert im Vergleich zur Referenz.

Im Psychischen Summenskalenbereich äußerte sich bereits ein zum präoperativen Messzeitpunkt um 8 Punkte höherer Summenskalenwert bezogen auf die Referenz (Abb. 29). Gleichfalls konnten in allen folgenden Messzeitpunkten höhere Summenskalenwerte im Vergleich zur Referenz eruiert werden.

Für die 51-60-Jährigen offenbarte sich eine Reduktion der Werte der Körperlichen Summenskalen von prä- (MZP 1) zu 6 Wochen postoperativ (MZP 2) um 3 Punkte (Abb. 30). Signifikante Mittelwertdifferenzen konnten zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,588$) sowie MZP 3 vs. MZP 4 ($p = 0,004$; $\eta_p^2 = 0,414$) erhoben werden. Im Längsschnitt der Studie (MZP 1 zum MZP 4) zeigte sich für diese Patientengruppe ein signifikanter Anstieg an physischer Lebensqualität ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,559$).

Die Werte der Psychischen Summenskalen wiesen während des Beobachtungszeitraumes ein konstant über dem Referenzwert bleibendes Niveau auf (Abb. 30).

Durchgängig schätzten Patienten der Altersgruppe 61-70 Jahre ihre körperliche Verfassung und ihr körperliches Leistungsvermögen niedriger ein, als die Referenzgruppe (Abb. 31). Indes zeigten sich Veränderungen zwischen MZP 2 vs. MZP 3 ($\Delta = 10$) sowie MZP 3 vs. MZP 4 ($\Delta = 6$) als auch im Längsschnitt von MZP 1. In der Betrachtung der Psychischen Summenskalen konnte ein konstantes Niveau der Summenskalenwerte von MZP 1 zum 6 Monate postoperativen Zustand (MZP 4) nachgewiesen werden (Abb. 31).

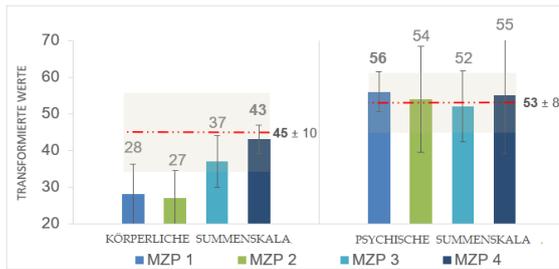


Abb. 31: SF-36 Summenskalen
Alter: 61-70 Jahre, n=9
[MW ± SD]

Allen Patientengruppen gemein, war die stets geringer eingeschätzte körperliche Lebensqualität im Vergleich zur altersadjustierten Referenzgruppe. Indes ließen sich über den Studienzeitraum seitens der psychischen Lebensqualität äquivalente beziehungsweise positiver eingeschätzte Werte nachweisen.

Nahezu jede rehabilitative Maßnahme hat eine Reduktion der Schmerzintensität und -häufigkeit zum Ziel. So galt es auch in dieser Studie mittels operativer Beinachsenkorrektur und nachfolgender Rehabilitation die Schmerzstärke und -frequenz zu reduzieren.

Der längsschnittlichen Darstellung diene hierfür die Erfassung der Schmerzstärke mit Hilfe der **Visuellen Analogskala**. Werte in Millimeter [mm] wurden in Prozentangaben transformiert. Die Ergebnisse für die gesamte Studienpopulation werden in Abb. 32 und alterstratifiziert in Abb. 33 wiedergegeben.

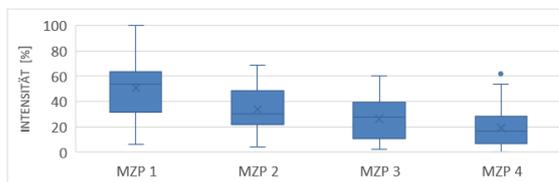


Abb. 32 Längsschnittliche Darstellung VAS-Werte (gesamte Studien-Population) [MW: x]

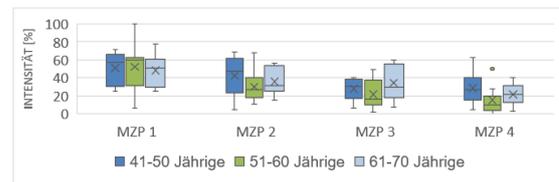


Abb. 33 Längsschnittliche Darstellung VAS-Werte (altersstratifiziert) [MW: x]

MZP 1 offenbarte die höchsten prozentualen Schmerzangaben bezogen auf die Mittelwerte ($51\% \pm 20,0$), dargestellt mit „x“, den Medianen (54%) und den Minima (6%) beziehungsweise Maxima (100%) (Abb. 32). Der längsschnittlichen Betrachtung konnte eine stetige Reduktion der angegebenen Schmerzintensitäten entnommen werden. Zum MZP 4 zeigte sich ein „Ausreißer“ in Höhe von 62%. Signifikante Mittelwertdifferenzen wurden innerhalb aller aufeinanderfolgender Messzeitpunkte ermittelt:

- MZP 1 vs. MZP 2 ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,339$),
- MZP 2 vs. MZP 3 ($p = 0,030$; $\eta_p^2 = 0,114$),
- MZP 3 vs. MZP 4 ($p < 0,050$; $\eta_p^2 = 0,119$).

Zusammenfassend konnte ein signifikanter Unterschied ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,438$) zwischen der präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) und 6-monatigen postoperativen Eruerung (MZP 4) aufgezeigt werden. Die operative valgusierende Beinachsenkorrektur führte demnach zu einer signifikanten Reduktion der Schmerzintensität.

Im Altersbereich der 41-50-Jährigen ($n=6$) wurde während des Studienverlaufs ein Rückgang der mittleren Schmerzintensität um $\sim 22\%$ eruiert (Abb. 33). Der größte Unterschied zwischen benachbarten Messzeitpunkten zeigte sich zwischen MZP 2 und MZP 3 ($\sim 15\%$).

In der Gruppe der 51-60-Jährigen ($n=17$) fand sich eine deutliche Schmerzreduktion in Höhe von $\sim 37\%$ ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,557$). Längsschnittlich konnten darüber hinaus zu allen aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten signifikante Effekte beobachtet werden:

- MZP 1 vs. MZP 2: $p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,558$,
- MZP 2 vs. MZP 3: $p = 0,089$; $\eta_p^2 = 0,170$,
- MZP 3 vs. MZP 4: $p = 0,117$; $\eta_p^2 = 0,147$ (Abb. 33).

Im Altersbereich der 61-70-Jährigen ($n=9$) konnten zwischen MZP 1 und MZP 2 ($\sim 12\%$) sowie MZP 3 und MZP 4 ($\sim 13\%$) Reduktionen der mittleren Schmerzintensitäten ermittelt werden. Innerhalb des Beobachtungszeitraumes (MZP 1 zum MZP 4) verminderte sich die angegebene Schmerzstärke um $\sim 27\%$ (Abb. 33).

Zusammenfassend konnten in allen drei Altersgruppen Rückgänge der Schmerzintensitäten 6 Monate nach (MZP 4) erfolgter HTO (22% - 37%) evaluiert werden.

Der Charakterisierung der **Schmerzhäufigkeit** dienten Fragen bezüglich der Unterscheidung von Dauerschmerzen gegenüber Schmerzattacken, der Häufigkeit, der zeitlichen Länge dieser und inwieweit eine tageszeitliche Abhängigkeit der Schmerzproblematik aufgeklärt werden konnte. Die jeweiligen Maxima wurden fett hervorgehoben.

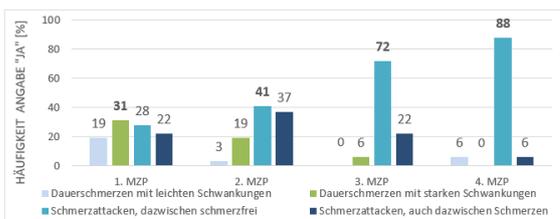


Abb. 34: Dauerschmerzen versus Schmerzattacken

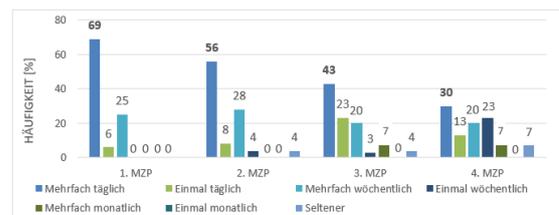


Abb. 35: Durchschnittliche Anzahl der Schmerzattacken

Eine stetige Abnahme der prozentualen Häufigkeiten von MZP 1 zum MZP 4 konnte in der Angabe der Dauerschmerzen verzeichnet werden (Abb. 34). Im Bereich der „Dauerschmerzen mit leichten Schwankungen“ wurde eine Reduktion von rund $\Delta=13\%$ und in der Kategorie der „Dauerschmerzen mit starken Schwankungen“ von circa $\Delta=31\%$ erreicht.

Zum zweiten Messzeitpunkt verlagerte sich der prozentuale Schwerpunkt in den Bereich der Schmerzattacken. „Schmerzattacken, auch dazwischen Schmerzen“ waren vor allem in der ersten postoperativen Messung (37%) zu beobachten, wiesen jedoch eine Reduktion zum MZP 4 auf. Die Rubrik „Schmerzattacken, dazwischen schmerzfrei“ nahm zum MZP 3 mit 72% und zum MZP 4 mit 88% deutlich an Wichtigkeit zu.

Kennzeichneten Patienten den Schmerzcharakter in Form von Schmerzattacken, wurde die durchschnittliche Anzahl anhand von 7 Antwortmöglichkeiten spezifiziert (Abb. 35). Deutlich zeigte sich eine prozentuale Abschwächung der Angabe „mehrfach täglich“ Schmerzattacken zu verspüren um $\Delta=39\%$ von MZP 1 zum MZP 4. Die Kategorie „einmal täglich“ steigerte sich vom MZP 1 zum MZP 3 um $\Delta=17\%$. Eine „mehrfach wöchentliche“ Angabe äußerte sich konstant auf einem während der Betrachtungszeit gleichbleibenden Niveau. 6 Monate postoperativ (MZP 4) zeigte die Angabe „einmal monatlich“ mit 23% eine Schmerzattacke zu durchleben, insgesamt eine deutliche Reduktion der Häufigkeit von Schmerzanfällen gegenüber der präoperativen Situation.

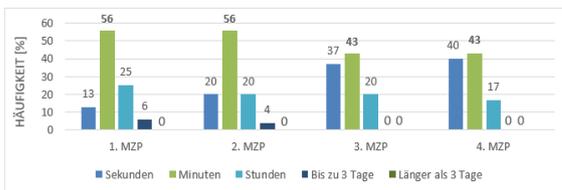


Abb. 36: Durchschnittliche Dauer der Schmerzattacken

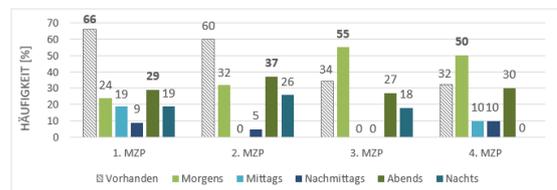


Abb. 37: Tageszeitliche Abhängigkeit der Schmerzen

Die zeitliche Länge der Schmerzattacken wurde anhand weiterer 5 Antwortmöglichkeiten konkretisiert (Abb. 36). Als einzige Option präsentierte sich die Angabe „Sekunden“ von MZP 1 mit 13% zum MZP 4 mit 40% um $\Delta=27\%$ zunehmend. Indes stellte sich die Anzahl der Antworten „Minuten“ und „Stunden“ auf einem gleichbleibenden Niveau dar. Als positiv zu bewerten, galt das Ausbleiben der Angabe „Bis zu 3 Tage“ Schmerzen zu verspüren nach MZP 2.

Die Antworten in Bezug auf die Frage „Sind Ihre Schmerzen zu einer bestimmten Tageszeit besonders stark?“ ließen einen rückläufigen Prozess ($\sim 34\%$) beobachten (Abb. 37).

Zu bemerken galt ein Anstieg der morgendlichen (MZP 1 zum MZP 4: ~26%) Schmerzangaben, wohingegen sich die Antworten „*Mittags*“, „*Nachmittags*“ insgesamt gering äußerten. Interessanterweise verblieb die Angabe besonders „*Abends*“ Schmerzen zu verspüren auf einem gleichbleibend hohen Niveau. Die nächtliche Schmerzangabe erreichte zum MZP 2 ihr Maximum mit 26% und wurde zum MZP 4 nicht festgestellt.

Zusammenfassend konnten über den Betrachtungszeitraum von 6 Monaten folgende Schlüsse gezogen werden:

- Es wurde eine Abnahme der Dauerschmerzen hinzu Schmerzattacken mit Intervallen vollständiger Schmerzfreiheit eruiert.
- Patienten, die an Schmerzattacken litten, reduzierten weiterhin die Frequenz als auch die Dauer ihrer Attacken deutlich.
- Tageszeitliche Schmerzmaxima verringerten sich im Verlauf der Studie.
- Darüber hinaus präsentierten sich jedoch bei Patienten mit postoperativer Beschwerdepersistenz Schmerzspitzen während den Morgen- und Abendstunden.

Auf Basis der vorangegangenen Ausführungen kann Hypothese IV angenommen werden. Die operative Beinachsenkorrektur führte zu einer signifikanten Abnahme der Schmerzintensität und -häufigkeit. Darüber hinaus verzeichneten die Patienten eine deutliche Zunahme an Lebensqualität.

5 Diskussion

5.1 Ergebnisdiskussion

Entsprechend der Zielstellung dieser Arbeit wurden die Auswirkungen seitens symptomatischer Tibia vara und deren operative Beinachsenkorrektur mittels open-wedge HTO evaluiert. Innerhalb des 6-monatigen Untersuchungszeitraums wurden Parameter der Statik, posturalen Stabilität und Regulation sowie die längsschnittliche Entwicklung der Lebensqualität, Schmerzintensität und -häufigkeit einbezogen.

Während der Beobachtungszeit konnten zum ersten Messzeitpunkt 38 Probanden (100%) in die Studie eingeschlossen und von diesen 34 (90%) weiterhin betrachtet werden. 6 Monate postoperativ (MZP 4) verringerte sich die Anzahl der Studienteilnehmer um zwei Probanden, so dass 32 Patienten (84%) vollständig über vier Messzeitpunkte untersucht werden konnten.

Die Abfolge der Messzeitpunkte erfolgte in Koordination patientenindividueller Termine und wurde innerhalb einer Abweichung von 0 bis 5 Tagen präoperativ bei 69% (n=22) realisiert. Die folgenden Messungen konnten in einem 3-tägigen Zeitintervall um den jeweilig geplanten Zeitpunkt für 66% (n=21, MZP 2), 44% (n=14, MZP 3) und 31% der (n=10, MZP 4) der Probanden durchgeführt werden. Für den 6-monatigen Betrachtungszeitraum (MZP 1 zum MZP 4) konnte übereinstimmend mit Yokoyama et al. (2016), eine Steigerung der Leistungsfähigkeit erwartet werden. In dieser Studie wurden 47 Patienten mit symptomatischer medialer Gonarthrose aufgenommen. Alle unterliefen das OP-Verfahren einer open-wedge HTO und wurden nachoperativ anhand der angegebenen Schmerzen beim Laufen und Treppen steigen evaluiert. Im Mittel berichteten die Autoren eine Genesungszeit von $6,3 \pm 3,9$ Monaten. Besonders ein höherer BMI wie auch das weibliche Geschlecht galten als Faktoren für eine längere Heilungsperiode.

Hinsichtlich der durchgeführten Umstellungsosteotomien zeigte sich eine Dominanz an rechtsseitig vorgenommenen Eingriffen mit 62% (n=20). Ergebnisse von van der Woude et al. (2016) spiegeln geringere Angaben rechtseitiger Schmerzproblematiken (56%) bei circa 1,5facher Patientenzahl (n=45; Studienzeitraum: 2011 - 2013, 12 Monate follow-up) wider. Gleiches gilt für die Arbeit von Ihle et al. (2016) mit rund 3facher Studiengröße (n=96; Studienzeitraum: 2008 - 2011; 18 Monate follow-up). In beiden genannten Studienpopulationen erfolgte jedoch keine geschlechterspezifische Betrachtung der Seitigkeit. Im Zuge dessen sollten Aussagen bezüglich der in dieser Studie aufgezeigten Seitendominanz innerhalb einer größeren Fallzahl geschlechtsadjustiert überprüft werden.

Zum MZP 1 konnten Patienten eines Alters von $55,3 \pm 5,57$ Jahren (Range: 42 - 62 Jahre) und einer Größe von $1,80 \pm 0,07$ m in die Betrachtung eingeschlossen werden. Es ließen sich deutliche Unterschiede in der Gewichts- ($99,4 \pm 13,4$ kg) und BMI-Verteilung ($30,7 \pm 3,65$ kg/m²) im Vergleich zur alters- und geschlechtsadjustierten Referenzstichprobe aufzeigen. Die Patienten waren im Mittel erheblich schwerer als ihre gesunde Referenzgruppe ($88,4 \pm 13,1$ kg), so dass sich die vorliegende Studie bezüglich des Faktors Übergewicht im Einklang mit der betrachteten Literatur befand (Bonnin et al., 2013; Alkan et al., 2014; McNamara et al., 2014; Ihle et al., 2016; Bastard et al., 2017). Zudem fanden Sharma et al. (2010) heraus, dass die Entstehung einer medialen Kompartmentarthrose (adjustierte OR: 1,49; 95% KI: 1,06 - 2,10) sowie dessen Voranschreiten (adjustierte OR: 3,59; 95% KI: 2,62 - 4,92) durch eine varische Beinachse begünstigt werden. Brouwer et al. (2007) bestätigten die voran genannten Ergebnisse bezüglich des Entstehungsrisikos (OR: 2,06; 95% KI: 1,28 - 3,32) und dessen Progression (OR: 2,90; 95% KI: 1,07 - 7,88). Stratifiziert anhand des BMI's verglichen sie Probanden mit physiologischer und varischer Beinachse. Sowohl in der Gruppe der ≥ 25 kg/m² bis < 30 kg/m² (OR: 2,02; 95% KI: 1,07 - 3,84) wie auch bei den ≥ 30 kg/m² (OR: 5,06; 95% KI: 1,71 - 14,94) zeigte sich hinsichtlich der Entwicklung einer Kniegelenksarthrose ein höheres Risiko.

In mehreren Studien wurde bereits die mittlere Schmerzdauer an Gonarthrose leidender Patienten thematisiert. So wiesen Pang et al. (2015) und Alkan et al. (2014) in ihren Untersuchungen beträchtliche zeitliche Spannweiten der Erkrankungsdauer und somit ersten erinnerbaren Schmerzsituation von 0,5 - 240 und 5 - 300 Monate nach. Lediglich Bonnin et al. (2011) bezogen sich auf die präoperative Schmerzdauer vor geplanter HTO und evaluierten, dass 50% der Patienten bereits 5 Jahre präoperativ Schmerzen verspüren würden. Diese Datenlage zeigt ein deutliches Defizit an Informationen bezüglich der präoperativen Schmerzdauer vor geplanter operativer Beinachsenbegradigung und wird anhand der vorliegenden Studienergebnisse ergänzt. Die erste patienteneigene erinnerbare Schmerzsituation konnte im Mittel mit $28,3 \pm 20,2$ Monaten eruiert werden. Die Range von 4 bis 96 Monaten liegt deutlich unterhalb der voran genannten Spannweiten, ist jedoch von diesen aufgrund des unterschiedlichen Studiendesigns (längs- vs. querschnittlich) und Fragestellung deutlich zu differenzieren. Es bleibt zu hinterfragen, inwieweit die Geschlechterverteilung, die Höhe der Fallzahl, klinischen Erhebungsscores, der Fehlstellungsgrad der unteren Extremitätenachse, der Destruktionszustand im Kniegelenk oder die Inanspruchnahme medizinischer Betreuung zu den unterschiedlichen Ergebnissen beitragen.

In der Literatur konnten zahlreiche Publikationen hinsichtlich der Ermittlung posturaler Stabilität und Regulation an Gonarthrose (Hassan et al., 2002; Hinman et al., 2002; Kim et al., 2011) erkrankter Patienten, operativen Eingriffen nach Kreuzbandrupturen (Lee et al., 2015; Palm et al., 2015; Bartels et al., 2019) sowie der totalendoprothetischen Versorgung (Stensdotter et al., 2015; Moutzouri et al., 2017; Notarnicola et al., 2018) des Kniegelenks recherchiert werden. Effekte der valgisierenden operativen Beinachsenkorrektur bezüglich der Haltungsstabilität bei symptomatischem Genu varum wurden bisher unzureichend in die wissenschaftlichen Betrachtungen einbezogen.

Kim et al. (2011) zeigten mit Hilfe von Kraftmessplattformen, dass Patienten mit Kniearthrose eine deutlich höhere Haltungsinstabilität im Vergleich zu ihrer gesunden Referenzgruppe aufweisen. Gleiches gilt für Studien um Hassan et al. (2002) und Hinman et al. (2002), welche vermehrte Schwingungen in anteriorposteriore und mediolaterale Richtung innerhalb der an Kniearthrose erkrankten Studienteilnehmern nachweisen konnten. Park et al. (2013) detektierten, dass das Alter und die varische Beinachse zur Geschwindigkeit in anteriorposteriorer Auslenkung positiv, hingegen der Schwere der Arthrose (nach Kellgren & Lawrence) negativ assoziiert. Darüber hinaus konnten sie keinen Zusammenhang zwischen den empfundenen Schmerzen und der mittleren Auslenkung in mediolateraler und anteriorposteriorer Richtung nachweisen. Das Ergebnis stützt die Studie um Hassan et al. (2002), in welcher Patienten nach Injektion eines Analgetikums (Bupivacain) in das Kniegelenk zwar ein geringeres Schmerzniveau und kräftigere Kontraktion des Musculus quadriceps aufwiesen, jedoch keine signifikanten Änderungen hinsichtlich der posturalen Stabilität ersichtlich gewesen sind. Hunt et al. (2010) konnte eine höhere Balancefähigkeit bei geringerer Varus-Fehlstellung nachweisen. Allerdings bezogen sich die Ergebnisse auf Messungen bezüglich des Standes auf einem Bein. In einer weiteren Studie von Hunt et al. (2009) überprüften die Autoren die Auswirkungen der HTO auf die posturale Stabilität im Einbeinstand. Nach 12 Monaten konnten im Vergleich zur präoperativen Messung Verbesserungen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit und des Schmerzzustandes im Kniegelenk nachgewiesen, nicht jedoch signifikante Änderungen hinsichtlich der Haltungsstabilität ermittelt werden.

Für die Aufrechterhaltung einer adäquaten Gesamtkörperstabilität bedarf es der Integration somatosensorischer Inputs insbesondere des unteren Regelkreises (Fuß-, Knie-, Hüftgelenk und Rückenmark). Die Fußkoordination wurde primär in der vorliegenden Studie anhand des Parameters Synchronisation dargestellt. Innerhalb des Messverlaufs zeigten sich konstante Ergebnisse im Bereich des Referenzwertes. Einzig zum ersten postoperativen Messzeitpunkt konnte eine Reduktion um $\Delta \approx 30$ detektiert

werden. Die ermittelten Ergebnisse lassen sich lediglich im Kontext einer Studie um Kim et al. (2011) betrachten. In dieser erörterten die Autoren Auswirkungen des Schweregrades einer Kniegelenksarthrose auf die posturale Stabilität und Regulation. Anhand von 80 Patienten (n=39, Kellgren-Lawrence Grad: ≤ 2 und n=41, Kellgren-Lawrence Grad: ≥ 3) sowie 40 altersadjustierten Referenzen konnten mithilfe des IBS keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Schwingungsmuster aufgezeigt werden.

Der WDI wies während des ersten postoperativen Messzeitpunktes seine höchste Ausprägung mit $7,13 \pm 2,26$ auf und tendierte damit zu einer inadäquateren Gewichtsverteilung im Vergleich zum voroperativen Ausgangszustand (MZP 1). Ab dem dritten Messzeitpunkt (MZP 3) ließen sich konstante Werte hinsichtlich der Gewichtsverteilungsindices (WDI), welche sich der gesunden Referenz bis auf $\Delta=0,10$ annäherten, beobachten. Im Vergleich zur Referenzgruppe konnten zu allen vier Messzeitpunkten keine signifikanten Mittelwertunterschiede festgestellt werden. Zusammenfassend verbesserte sich die prozentuale Gewichtsverteilung der Patienten dieser Studie hinsichtlich der 4 Kraftmessplatten (A, B, C und D) innerhalb von 6 Monaten nach erfolgter HTO.

Zu allen Messzeitpunkten konnte eine Mehrbelastung des Vorfußes in der anteriorposterioren Lastverteilung nachgewiesen werden. Der balancierteste Zustand ermittelte sich zum MZP 1: Vorfuß $\sim 55\%$. Auffällig stellte sich die prozentuale Steigerung der Vorfußbelastung zum zweiten Messzeitpunkt ($\sim 58\%$) sowie 6 Monate postoperativ ($\sim 57\%$) dar. Im Bereich der mediolateralen Lastverteilung konnten hingegen keine Zeiteffekte ermittelt werden.

Eine differenzierte Betrachtung der anteriorposterioren Lastverteilung bezogen auf das jeweils betroffene Bein zeigte, dass die rechtsseitig operierten Patienten (MZP 1: $\sim 46\%$; MZP 4: $\sim 43\%$; $p=0,052$; $\eta_p^2=0,131$) im Gegensatz zu den linksseitigen Umstellungsosteotomien (MZP 1: $\sim 43\%$; MZP 4: $\sim 41\%$) ihre Rückfußbelastung 6 Monate postoperativ signifikant reduzierten ($p=0,052$; $\eta_p^2=0,131$). Interessanterweise konnten in beiden Gruppen zum MZP 3 (12 Wochen postoperativ) ausbalanciertere prozentuale Rückfußbelastungen (Links: $\sim 43\%$; Rechts: ~ 45) im Vergleich zum MZP 2 (Links: $\sim 42\%$; Rechts: $\sim 43\%$) und MZP 4 ermittelt werden. Mögliche Ursachen seitens der Rückfußbelastung des operierten Beines zum MZP 2 könnten sowohl auf die postoperative Muskelatrophie (v.a. M. quadriceps), das Rehabilitationsschema (20 kg Teilbelastung) als auch auf einen eingeschränkten Bewegungsumfang (v.a. schmerz- und muskulär bedingtes Extensionsdefizit) zurückzuführen sein. Die ausbalanciertere anterior-posteriore Statik 12 Wochen postoperativ (MZP 3) wird vermutlich als ein Effekt der kontinuierlich schmerzadaptierten Aufbelastung sowie der aktiven physiotherapeu-

tischen Rehabilitationsmaßnahmen (v.a. Muskelaufbau, sensomotorisches Training) zu betrachten sein. Die wiederholte Verringerung der Rückfußbelastung 6 Monate postoperativ (MZP 4) könnte zum einen in dem Fortbestehen des Extensionsdefizites und dem gegenüber in der regredienten Inanspruchnahme physiotherapeutischer Begleitung Begründung finden.

Die mediolaterale Lastverteilung wies präoperativ sowohl bei den rechtsseitig (~47%) als auch bei den linksseitig (~46%) betroffenen Probanden eine geringere Gewichtsbelastung des zu operierenden Beines auf. 6 Wochen postoperativ (MZP 2) reduzierte sich die Gewichtsbelastung der jeweiligen Seite weiterhin um: Links: ~3% und Rechts: ~2%. Ab dem MZP 3 konnte jedoch eine prozentuale Aufbelastung des operierten Beines innerhalb beider Gruppen eruiert werden, so dass 6 Monate nach erfolgter open-wedge HTO eine ausgeglichene mediolaterale Statik links/rechts für das Patientenkollektiv zu beobachten gewesen ist (linksseitig operiert: 50%/50%; rechtsseitig operiert: 51%/49%). Beide Gruppen unterschieden sich präoperativ lediglich geringfügig hinsichtlich der Minderbelastung des zu operierenden Beines ($\Delta \sim 1$), so dass aufgrund der jeweiligen Fallzahlen (Links: n=12; Rechts: n=20) nicht per se auf eine relevantere Minderbelastung der linksseitig betroffenen Patienten geschlussfolgert werden kann.

Innerhalb des 6-monatigen Betrachtungszeitraumes konnten keine signifikanten Partialeffekte hinsichtlich der posturalen Stabilität festgestellt werden. Alle Stabilitätsindikatoren (ST) zeigten darüber hinaus deutlich höhere Haltungsinstabilitäten (~36%), als ihre gesunde Referenz. Verbesserungen seitens der posturalen Stabilität könnten innerhalb der postoperativen Messreihe (MZP 2 bis MZP 4) aufgrund des bestehenden Wundschmerzes und der Dehnung muskulärer beziehungsweise medialer kapsulärer Kniegelenksstrukturen maskiert gewesen sein. Die Entwicklung der Stabilitätsindikatoren sollte Bestandteil zukünftiger Forschung bleiben.

In Bezug auf die vier posturalen Subsysteme stellten sich in fast allen Frequenzbereichen und Messzeitpunkten höhere Werte im Vergleich zur gesunden Referenzgruppe dar. Diese sind, in Analogie zu Bartels et al. (2019), im Sinne einer kompensatorischen Hyperaktivität zu interpretieren. Im Gegensatz zu Bartels et al. (2019) war keine Suppression des somatosensorischen Systems infolge operativer Rekonstruktion zu beobachten. Ein signifikanter Unterschied konnte lediglich im Bereich des cerebellären Subsystem (F 7 - 8) zum MZP 3 und 4 nachgewiesen werden. Die größte Leistungsentwicklung während des Studienverlaufs konnte für das visuell & nigrostriatale Subsystem (F 1) zum MZP 4, für das peripher-vestibuläre Subsystem (F 2 - 4) zum MZP 3 und das somatosensorische Subsystem (F 5 - 6) zum MZP 2 eruiert werden. Darüber hinaus zeigten 6 Monate nach erfolgter HTO alle Frequenzbereiche,

mit Ausnahme des cerebellären Subsystems (F 7 - 8), vergleichbare Werte bezüglich der Referenz. Als möglicher Erklärungsansatz für das Abweichen des Frequenzbereiches 7 - 8 sollte die multilokuläre Verschaltung mehrerer cerebellärer Subzentren (z.B. Gleichgewichtskerngebiete, Nucleus motorius tegmenti mit vestibulärer Bahn, Flokkulus mit okulomotorischer Bahn, Purkinje-Zellen mit somatovestibulärer Bahn) mit den einzelnen Sinnessystemen in Betracht gezogen werden (Scherer, 1997).

Zhang et al. (2015) konnten in ihren Untersuchungen tageszeitliche Schwankungen hinsichtlich der Aufrechterhaltung der Haltungsstabilität nachweisen. Insbesondere wiesen die frühen Morgen- (10 - 12 Uhr) und Nachmittagsstunden (13 - 15 Uhr) deutliche Beeinträchtigungen für an Gonarthrose erkrankter Patienten auf. Innerhalb der vorliegenden Studie sollte sich dieser Effekt jedoch herausmitteln, da eine Terminvergabe individuell zwischen 6:00 und 21:00 Uhr erfolgte und zudem keine zeitliche Präferenz für die Durchführung der Messung seitens der Patienten ersichtlich gewesen ist.

Die Zielstellungen dieser Studie umfassten eine engmaschige (MZP 1: präoperativ, MZP 2: 6 Wochen, MZP 3: 12 Wochen und MZP 4: 6 Monate postoperativ) längsschnittliche Evaluation der patienteneigenen Lebensqualität anhand des SF-36 sowie Schmerzproblematik mittels VAS und eines Fragebogens zur Häufigkeitsanalyse durchlebter Schmerzperioden.

Die Ergebnisse der körperlichen wie auch der psychischen Subskalen des **Short Form - 36 (SF-36)** stellten in der vorliegenden präoperativen Erhebung (MZP 1) eine deutlich niedrigere Lebensqualität im Vergleich zur deutschen Referenzpopulation dar. Die größten Abweichungen konnten im Bereich der physischen Subskalen KÖFU ($\Delta \approx -40$), KÖRO ($\Delta \approx -41$) sowie SCHM ($\Delta \approx -48$) festgestellt werden. Hingegen stellte sich die psychische Subskala PSYCH als einzige Dimension auf dem Niveau der Referenz dar. Vergleichbare Ergebnisse berichten Herbst et al. (2020) in ihrer längsschnittlichen Beurteilung subjektiver Lebensqualitätsentwicklung nach HTO.

6 Wochen postoperativ (MZP 2) konnten in zwei der physischen (KÖFU: $\Delta = -1$; KÖRO: $\Delta = -30$) und drei der psychischen Subskalen (VITA: $\Delta = -1$; SOFU: $\Delta = -8$; EMRO: $\Delta = -19$) teils deutlich verminderte Subskalenwerte im Bezug zur präoperativen Ausgangssituation (MZP 1) beobachtet werden.

Kontinuierliche Verbesserungen innerhalb der Messzeitfolge ab der ersten Messung (MZP 1) bis zur 6 Monate postoperativen Evaluation (MZP 4) verzeichneten die Subskalen SCHM, AGES sowie PSYCH.

Bemerkenswerterweise wurde die subjektive Lebensqualität innerhalb der Messzeitfolge ab dem dritten Messzeitpunkt (12 Wochen postoperativ) in allen

Subskalen (Ausnahme: Psychisches Wohlbefinden) signifikant besser eingeschätzt und lokalisierte sich in den Bereichen der jeweiligen Standardabweichung des Referenzwertes. Die psychischen Subskalen VITA und PSYCH übertrafen darüber hinaus ihren Referenzwert zum MZP 3 und 4.

Im Vergleich zu langjährig (> 4,2 Jahre) an schwerer Gonarthrose leidender Patienten verwiesen Studienergebnisse der zu Untersuchten im Bereich der psychischen Subskalen SOFU, EMRO und PSYCH sowie der psychischen Summenskala auf deutlich geringere Lebensqualitätseinschränkungen präoperativ (MZP 1). Die Dimension des körperlichen Schmerzes (SCHM) zeigte hingegen eine höhere Beeinträchtigung (Bindawas et al., 2018). Die hier untersuchte Studienpopulation war mit $55,3 \pm 5,57$ im Mittel circa 4 Jahre jünger und rekrutierte sich im Gegensatz zu Bindawas et al. (2018) (♂: 36%) vollumfänglich aus dem männlichen Geschlecht.

Die Handanweisung zur Auswertung des SF-36 ermöglichte die Betrachtung der ermittelten Messergebnisse im Kontext einer Stichprobe von Arthrose/Arthritis-Patienten (Alter: $61,5 \pm 15,3$ Jahren; ♂: 40%) (Bullinger und Kirchberger, 1998). Gegenüberstellend den physischen Subskalen KÖFU ($\Delta=-18$), KÖRO ($\Delta=-17$) und SCHM ($\Delta=-22$) konnte zum MZP 1 eine subjektiv schlechtere körperliche Lebensqualität bei den betrachteten Studienteilnehmern eruiert werden. Gleiches zeigte sich für die psychische Subskala EMRO ($\Delta=-3$). Die vier Dimensionen AGES ($\Delta=+6$), VITA ($\Delta=+2$), SOFU ($\Delta=+1$) und PSYCH ($\Delta=+7$) zeigten darüber hinaus bessere Einschätzungen hinsichtlich der Lebensqualität.

Interessanterweise beurteilte das hier untersuchte Patientenkollektiv 6 Monate postoperativ (MZP 4) seinen Gesundheitszustand in allen Dimensionen im Vergleich zur Arthrose/Arthritis-Gruppe positiver. Deutlich äußerte sich dies in den physischen Subskalen: KÖFU ($\Delta=+22$), KÖRO ($\Delta=+24$), SCHM ($\Delta=+26$) sowie AGES ($\Delta=+17$). Die geringste Differenz konnte in der Subskala PSYCH ($\Delta=+8$), welche sich allerdings bereits voroperativ auf dem Referenzniveau befand, ermittelt werden.

Der mehrmonatigen (präoperativ, 6, 12 und 18 Monate postoperativ) Evaluation von Lebensqualitätsentwicklung nach erfolgter HTO anhand der einzelnen SF-36 Subskalen widmeten sich lediglich Arbeiten von Ihle et al. (2016) und Herbst et al. (2020).

Ihle et al. (2016) konnten insgesamt 120 Patienten in einem zweijährigen Zeitraum in die Studie einschließen, wobei 96 Patienten in der Auswertung betrachtet wurden. Unterschiede zu dem hier vorliegenden Patientenkollektiv zeigten sich bezüglich des jüngeren mittleren Alters von circa - 9 Jahren, des geringeren BMI - $1,8 \text{ kg/m}^2$ sowie der höheren Fallzahl (Ihle et al. (2016): $n=96$, ♂ 72%).

Die Ergebnisse der hier untersuchten Studienpopulation wiesen zum MZP 1 im Vergleich zur präoperativen Messung von Ihle et al. (2016) niedrigere Subskalenwerte

in KÖFU ($\Delta=-6$), SCHM ($\Delta=-7$), AGES ($\Delta=-4$) sowie VITA ($\Delta=-1$) auf. Positiver eingeschätzte Bereiche beinhalteten die Subskalen KÖRO ($\Delta=+5$), SOFU ($\Delta=+4$), EMRO ($\Delta=+14$) und PSYCH ($\Delta=+5$). Die Summenskalen PCS ($\Delta=+1$) und MCS ($\Delta=+9$) wurden präoperativ in der vorliegenden Studie gleichfalls höher bewertet.

In der Gegenüberstellung des MZP 4 zur 6 Monate postoperativen Messung von Ihle et al. (2016) fanden sich in beinahe allen erhobenen Subskalen: KÖFU ($\Delta=+8$), KÖRO ($\Delta=+12$), SCHM ($\Delta=+6$), VITA ($\Delta=+5$), SOFU ($\Delta=+8$), EMRO ($\Delta=+9$) und PSYCH ($\Delta=+7$) höher bewertete Ergebnisse. Einzig die Subskala AGES ($\Delta=-1$) zeigte sich annähernd kongruent.

In beiden Studien wurden Anstiege in den Punktwerte der Subskalen nachgewiesen. Für das hier untersuchte Patientenkollektiv konnte jedoch in allen Subskalenbereichen, außer der Allgemeinen Gesundheitswahrnehmung (AGES), höhere Zunahmen an Lebensqualität innerhalb eines halben Jahres nachgewiesen werden.

Die Differenzierung der acht Subskalen in zwei Summenskalen erfolgte wie in der Handanweisung zum SF-36 beschrieben (Bullinger und Kirchberger, 1998).

In der längsschnittlichen Betrachtung konnte innerhalb der körperlichen Summenskala (PCS) vom MZP 1 zum MZP 4 ein signifikanter ($p<0,001$; $\eta_p^2=0,573$) Zuwachs an Lebensqualität nachgewiesen werden. Dennoch lag der Wert zum MZP 4 mit rund 5 Punkten weiterhin unterhalb der deutschen Referenz. Im Gegensatz dazu wies die psychische Summenskala (MCS) während der gesamten Messzeitfolge Werte oberhalb der Referenz auf ($\Delta\approx 4$ Punkte).

Präoperativ (MZP 1) zeigte sich ein geringerer Punktwert der körperlichen Summenskala ($\Delta=-9$) im Vergleich zur Arthritis-Gruppe (Bullinger und Kirchberger, 1998). Erst ab der 12. postoperativen Woche (MZP 3) schätzten die Patienten ihre Lebensqualität positiver ein ($\Delta=+2$), so dass 6 Monate nach erfolgter HTO der körperliche Zustand nochmals deutlich besser im Vergleich zur Arthritis-Referenz bewertet wurde ($\Delta=+5$). Die psychische Summenskala konnte sowohl zum MZP 1 ($\Delta=+8$) als auch zum MZP 4 ($\Delta=+7$) im Vergleich zu den an Arthritis leidenden Patienten gleichbleibend besser beurteilt werden.

Hinsichtlich der längsschnittlichen Entwicklung der Summenskalen prä- und postoperativ (MZP 4) der HTO konnten gleichwertige Ausprägungen in der körperlichen sowie psychischen Lebensqualität zu einer Studie von van der Woude et al. (2017) nachweisen werden. Gleiches gilt für die Gegenüberstellung der in der vorliegenden Studie altersadjustierten Patientengruppe der 51-60-Jährigen ($n=17$) und den Ergebnissen bezüglich der unter Gonarthrose leidenden Patientenpopulation in der Arbeit von Bindawas et al. (2018).

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen darüber hinaus die Untersuchungen von Ihle et al. (2016), Bastard et al. (2017) und Morin et al. (2018), welche körperliche und psychische Lebensqualitätssteigerungen innerhalb von 6 beziehungsweise 12 Monaten nach erfolgter valgusisierender Beinachsenbegradigung nachweisen konnten. Dabei gelten die im Patientenkollektiv bereits präoperativ hohen Ausprägungen der psychischen Summenskalen zu berücksichtigen.

Im Gegensatz zu Saier et al. (2017) (n=64, ♂ 74%) zeigte das hier vorgestellte Patientenkollektiv präoperativ höhere Einschränkungen hinsichtlich der körperlichen Summenskala. 6 (MZP 2) und 12 (MZP 3) Wochen sowie 6 Monate postoperativ näherten sich die Werte jedoch einander an. Im Bereich der psychischen Summenskalen konnten während der Messreihe vergleichbare Skalenwerte eruiert werden.

In Hypothese IV wurde die signifikante Abnahme der Schmerzintensitäten nach operativer Beinachsenkorrektur postuliert. Der längsschnittlichen Evaluation diente eine 100 mm breite **visuelle Analogskala (VAS)** mit den Endpunkten „*kein Schmerz*“ und „*schlimmst vorstellbarer Schmerz*“. Signifikante Schmerzreduktionen (MZP 1: $50,7 \pm 20$) konnten für die untersuchte Studienpopulation zwischen allen aufeinanderfolgenden Messzeitpunkten bis 6 Monate postoperativ (MZP 4: $19,3 \pm 16$) eruiert werden ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,438$).

Die präoperativen Ergebnisse zum MZP 1 der VAS-Diagnostik zeigten geringere Ausprägungen gegenüber denen von van der Woude et al. (2017) mit 65 ± 21 sowie Morin et al. (2018) mit 6 ± 2 (bezogen auf 10 cm). Die Schmerzintensitäten des betrachteten Patientenkollektivs zum MZP 1 bewegten sich innerhalb den Angaben einer Studie von Bindawas et al. (2018), welche 126 mild/moderate (Gruppe 1, ♂ 42%: $4,5 \pm 1,2$) und 83 schwer (Gruppe 2, ♂ 27%: $8,2 \pm 0,9$) an Kniearthrose betroffenen Patienten untersuchte.

Längsschnittlich zeigte das vorliegende Studienkollektiv trotz des gleichen Operationsverfahrens und Stabilisation deutlich geringere Ausprägungen hinsichtlich der Schmerzintensitäten 12 Wochen (MZP 3: $\Delta = -21$) und 6 Monate (MZP 4: $\Delta = -28$) nach erfolgter HTO gegenüber van der Woude et al. (2017).

Mögliche Intensitätsunterschiede könnten innerhalb des Schweregrades nach Kellgren-Lawrence vermutet werden. Aber auch die geschlechtliche Aufteilung und besonders der Anteil an Frauen, welche unabhängig des Arthrosegrades höhere Schmerzangaben berichten würden, sollten in der Betrachtung berücksichtigt werden (Cho et al., 2010; Glass et al., 2014).

Präoperativ (MZP 1) der geplanten Umstellungsosteotomie konnten gleichwertige Ergebnisse zu einer Studie um Saier et al. (2017) nachgewiesen werden. Während 6 Wochen postoperativ (MZP 2) die Patienten ihre Intensitäten um $\Delta=+6$ höher einschätzten, wiesen sie hingegen zum MZP 3 und zur 6 Monate nachoperativen Messung (MZP 4) jeweils geringere Schmerzstärken ($\Delta=-6$) auf.

Für die Charakterisierung der Schmerzperioden hinsichtlich ihrer Anzahl, Dauer und tageszeitlichen Abhängigkeit wurde ein **Fragebogen zur Häufigkeitsanalyse** angewandt. Dieses Verfahren stellte gleichfalls einen neuen Ansatz in der Evaluation der patientenindividuellen Schmerzsituation vor und nach erfolgter hoher tibialer additiver Osteotomie dar.

Stellte sich präoperativ (MZP 1) ein homogenes Bild zwischen den übergeordneten Antworten Dauerschmerzen (50%) und Schmerzattacken (50%) zu verspüren dar, so konnte bereits 6 Wochen postoperativ (MZP 2) eine klare Tendenz zu „*Schmerzattacken mit dazwischen schmerzfreien Intervallen*“ (41%) sowie „*Schmerzattacken, auch dazwischen Schmerzen*“ (37%) detektiert werden. Die Rubrik Schmerzattacken zu durchleben, jedoch zwischen diesen beschwerdefrei zu sein, bestimmte ab dem zweiten postoperativen Messzeitpunkt (MZP 3: 72%) und MZP 4 (88%) die Mehrheit der Antworten.

6 Monate nach (MZP 4) erfolgter HTO zeigte sich eine deutliche Reduktion an Schmerzanfällen. Prägnant konnte man dies am Beispiel der Angabe „*mehrfach täglich*“ eruieren. Äußerte sich diese Angabe zum MZP 1 mit 69%, verringerte sie sich um mehr als die Hälfte auf 30% zum MZP 4.

Die zeitliche Länge einer Schmerzattacke stellte sich während des gesamten Studienverlaufs konstant auf einem Niveau von „*Minuten*“ und „*Stunden*“ dar. Positiv galt das Ausbleiben der Angabe „*Bis zu 3 Tage*“ Schmerzen zu verspüren ab dem ersten postoperativen Messtermin (MZP 2).

Für die Angabe, ob die „*Schmerzen zu einer bestimmten Tageszeit besonders stark*“ seien, konnten innerhalb von 6 Monaten rückläufige Angaben ermittelt werden. Zu bemerken galt ein Anstieg der morgendlichen Schmerzangaben (MZP 1 zum MZP 4: ~26%), wohingegen die Antwort „*Abends*“ auf einem gleichbleibend hohen Niveau verblieb. Damit ließen sich Ergebnisse von Zhang et al. (2015) bestätigen, welche in ihren Untersuchungen zu Patienten mit Gonarthrose absteigend tageszeitliche Schmerzmaxima während der späten (10:00 - 12:00 Uhr) und frühen (8:00 - 10:00 Uhr) Morgen- sowie späten (15:00 - 17:00 Uhr) Nachmittagsstunden postulierten. Das hier untersuchte Patientenkollektiv zeigte darüber hinaus eine gänzliche Rückläufigkeit „*Nachts*“ Schmerzen ertragen zu müssen.

5.2 Methodendiskussion (Limitationen)

Die Vergleichbarkeit mit anderen Studien wird beeinträchtigt durch die hohe Variabilität von angewandten Messgeräten (Interactive Balance System, Balance System Machine, Balance Performance Monitor, Swaymeter etc.), differierender Messparameter, Studienstrukturen sowie der sich unterscheidenden anthropometrischen Daten und ist dementsprechend lediglich punktuell möglich.

Des Weiteren repräsentiert die vorliegende Studie eine relativ kleine Stichprobengröße ($n=32$). Von den ursprünglich 38 rekrutierten Patienten wurden, im Sinne einer homogenen Verteilung und zur Vermeidung eines geschlechtsbezogenen Verzerrungseffektes, vier Frauen nachträglich exkludiert ($n=34$, MZP 2). Zwischen MZP 3 und 4 reduzierte sich die Anzahl der Studienteilnehmer um weitere zwei Probanden ($n=32$, MZP 4). Die Nichtinanspruchnahme der weiteren Betreuung begründete sich in der individuellen langen Anreisedauer und zeitlichen Einschränkungen.

In Analogie zu Bartels et al. (2019) wird der längsschnittliche Vergleich begrenzt durch die unterschiedlichen Zeitintervalle (z.B. sechs Wochen, zwölf Wochen und sechs Monate). Folglich könnte der längste Abschnitt von 12 Wochen zwischen MZP 3 und 4 das höchste Potential für etwaige individuelle Leistungsveränderungen aufweisen.

Im Vergleich zu den geplanten Messzeitpunkten bestanden geringe Differenzen (in Tagen) in Bezug auf die Zeitintervalle der postoperativen Untersuchungen: MZP 1 (präoperativ) $6,38 \pm 10,2$ (0 - 40), MZP 2 (6 Wochen postoperativ) $41,8 \pm 5,11$ (33 - 53), MZP 3 (12 Wochen postoperativ) $88,3 \pm 20,3$ (74 - 193) und MZP 4 (6 Monate postoperativ) $182 \pm 12,1$ (137 - 203). Eine exakte Einhaltung der Zeitachse konnte nicht ausnahmslos garantiert werden. Jedoch wurden 69% ($n=22$) der Patienten 0 bis 5 Tage vor ihrer Operation untersucht. 66% ($n=21$, MZP 2), 44% ($n=14$, MZP 3) und 31% ($n=10$, MZP 4) konnten in einem zeitlichen Intervall von 3 Tagen um den geplanten Messzeitpunkt evaluiert werden.

Eine Gegenüberstellung der Fragebogeninhalte mit der aktuellen Literatur stellte sich insofern diffizil dar, dass teils unterschiedliche Operationsverfahren (HTO mit/ohne Einbringung von Knochenersatzmaterial, Durchführung von Begleiteingriffen) zum Einsatz kamen. Weiterhin begrenzten den Vergleich eine multizentrische operative Versorgung, die Verwendung anderer Implantate (TomoFix™, Puddu-Platte, LOQTEC-Platte etc.) oder abweichende Physiotherapieschemata (early full weight vs. partial weight bearing). Darüber hinaus unterschieden sich die Studienkollektive in ihren anthropometrischen Daten sowie des Alters und der geschlechtlichen Aufteilung voneinander, so dass Vergleiche nur begrenzt möglich waren. In der vorliegenden Studie ist die deutschsprachige Standardversion des SF-36 (Version 1.0) mit einer

Zeitraumbetrachtung von vier Wochen verwendet worden. Ein wesentlicher Grund für die Auswahl dieses Zeitintervalls begründete sich in der zeitlichen Abfolge der ersten drei, im Abstand von 6 Wochen, aufeinanderfolgenden Messzeitpunkte (MZP 1: präoperativ, MZP 2: 6 Wochen und MZP 3: 12 Wochen postoperativ). Eventuelle Falscherinnerungen und sekundär Fehleinschätzungen des subjektiven Zustandes aufgrund des langen Zeitintervalls beziehungsweise Einflüsse durch eingenommene Medikation (z.B. Analgetika) können nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Zu bemerken gilt, dass in einigen Subskalen hohe Standardabweichungen zu verzeichnen waren. Dieses Phänomen kann einerseits auf eine hohe Streuung der subjektiven Einschätzungen oder auf das dichotome (ja/nein) Niveau der Antwortskalen zurückzuführen sein. Der Vergleich der jeweiligen Subskalenergebnisse unterschiedlicher Studien sollte dementsprechend differenziert betrachtet werden (Bullinger und Kirchberger, 1998). Die Einordnung der Subskalen Allgemeine Gesundheitswahrnehmung (AGES) und Vitalität (VITAL) ist dahingehend komplex, dass eine definitionsgemäße Zuordnung zu einer der beiden Summenskalen nicht gegeben ist. Im Kontext der Items und übereinstimmend mit der Literatur erfolgte eine Einordnung der Subskala AGES in die körperliche und VITA in die psychische Summenskala. Weitere Limitationen zeigten sich seitens der physiotherapeutischen Nachbehandlung. Nicht alle Patienten führten ihr standardisiertes Rehabilitationsprogramm unter Aufsicht der operierenden Klinik durch, so dass die exakte Befolgung etwaiger Empfehlungen lediglich gemutmaßt werden kann. Darüber hinaus bestand keine einheitlich normierte Behandlung 16 Wochen postoperativ.

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden der Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur mittels hoher tibialer additiver Osteotomie auf die posturale Stabilität und Regulation sowie der Lebensqualitätsentwicklung, Schmerzintensität und -häufigkeit längsschnittlich (MZP 1: präoperativ; MZP 2: 6 Wochen, MZP 3: 12 Wochen und MZP 4: 6 Monate postoperativ) evaluiert.

Es wurde postuliert, dass die operative Beinachsenkorrektur zu einer ausbalancierteren Statik führe. 6 Monate postoperativ (MZP 4) konnten mit Hilfe des Interactive Balance Systems (IBS) seitens der prozentualen Vorfuß-Rückfuß-Belastung geringgradige Verschlechterungen (Links: ~1%; Rechts: ~2%) der anteriorposterioren Lastverteilung im Vergleich zum präoperativen Messzeitpunkt (MZP 1) aufgezeigt werden. Positiv zu bewerten, zeigten sich hingegen die signifikanten Verbesserungen hinsichtlich des Gewichtsverteilungsindex ($p=0,003$; $\eta_p^2=0,152$) und das Ergebnis einer ausbalancierteren mediolateralen Lastverteilung (Links: $p=0,001$; $\eta_p^2=0,547$; Rechts: $p=0,031$; $\eta_p^2=0,163$) zum MZP 4 im Vergleich zur präoperativen Messung (MZP 1).

Zum Studienbeginn wurde erwartet, dass die open-wedge HTO eine Steigerung der posturalen Stabilität zu Folge hat. Signifikante Verbesserungen der Haltungsstabilität ($p=0,728$; $\eta_p^2=0,012$) wurden während des Verlaufs der Studie jedoch nicht beobachtet. Zudem zeigten die Patienten zu allen Messzeitpunkten seitens der Stabilitätsindikatoren signifikante Unterschiede zur ihrer Referenzstichprobe.

Weiterhin wurde vermutet, dass auf Prozessebene postoperativ eine erhöhte Auslenkung des somatosensorischen Systems zu verzeichnen ist. Kurzfristige Verringerungen der Somatosensorik (Suppression) zum ersten postoperativen Messzeitpunkt ($p=0,025$; $\eta_p^2=0,152$) können vermutlich auf die operative Schädigung von Rezeptoren und der Dehnung von Muskulatur beziehungsweise medialen Kniegelenksstrukturen zurückzuführen sein, so dass eine langfristige Betrachtung im Zeitraum von 1,5 Jahren (MZP 5) und 2 Jahren (MZP 6) anzustreben ist.

Die Beinachsenkorrektur sollte darüber hinaus zu einer signifikanten Abnahme der Schmerzintensität und -häufigkeit führen. Zum MZP 4 ($19,3\% \pm 16,0$) verringerte das Patientenkollektiv die angegebene Schmerzintensität im Vergleich zur präoperativen Messung (MZP 1: $50,7\% \pm 20,0$) deutlich ($p<0,001$; $\eta_p^2=0,438$). Des Weiteren konnte innerhalb des Studienverlaufs eine Reduktion der „*Dauerschmerzen mit leichten beziehungsweise starken Schwankungen*“ (MZP 1: 50%; MZP 4: 6%) zu „*Schmerzattacken mit schmerzfreien Intervallen*“ (MZP 1: 28%; MZP 4: 88%) eruiert werden. Patienten, welche bereits präoperativ an Schmerzattacken litten, verringerten

sowohl die Frequenz (am Beispiel „*mehrfach täglich*“ MZP 1: 69%; MZP 4: 30%) wie auch die Dauer (am Beispiel „*Minuten*“ MZP 1: 56%; MZP 4: 43%) dieser erheblich.

6 Monate nach erfolgter operativer Beinachsenkorrektur schätzten die Patienten ihren Gesundheitszustand im Vergleich zum vorausgegangenen Jahr „*viel besser*“ (MZP 1: 0%; MZP 4: 47%) beziehungsweise „*etwas besser*“ (MZP 1: 15%; MZP 4: 44%) ein und konnten mit steigendem postoperativen Zeitintervall ihre Lebensqualität in allen Skalenbereichen des SF-36 erhöhen.

Die vorliegenden Studienergebnisse stellen somit relevante wissenschaftliche Beiträge seitens der längsschnittlichen Entwicklung der posturalen Stabilität und Regulation sowie der Evaluation von Schmerz und Lebensqualität postoperativ einer HTO für männliche Patienten dar. Insbesondere die vergleichsweise einfache Implementierung des IBS in den klinischen Alltag sowie eine dem Gesundheitszustand ganzheitlich umfassende Schmerzanamnese anhand der vorgestellten Fragebögen, ermöglichen die Erstellung individueller Rehabilitationspläne. Eine abschließende Beurteilung des klinischen Nutzens des IBS im Rahmen dieser Indikation ist erst nach Ablauf des Gesamtprojektes (2 Jahres follow-up) möglich.

Eine Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgte September 2020 im Journal Applied Sciences (MDPI) unter dem Titel: „*Postural Stability and Regulation before and after High Tibial Osteotomy and Rehabilitation*“ (Brehme et al., 2020).

7 Literaturverzeichnis

Agneskirchner J, Wrann C: Biomechanische Untersuchung zur tibiofemorale Druckverteilung nach valgusierender Tibiakopfoleotomie in open wedge-Technik. In: Lobenhoffer P, Agneskirchner J, Galla M (Hrsg): Kniegelenksnahe Osteotomien. 1. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2006, S. 13–19.

Alghadir AH, Anwer S, Iqbal A, Iqbal ZA (2018) Test-retest reliability, validity, and minimum detectable change of visual analog, numerical rating, and verbal rating scales for measurement of osteoarthritic knee pain. *J Pain Res* 11: 851–856.

Alkan BM, Fidan F, Tosun A, Ardiçođlu O (2014) Quality of life and self-reported disability in patients with knee osteoarthritis. *Mod Rheumatol* 24 (1): 166–171.

Anagnostakos K, Mosser P, Kohn D (2013) Infections after high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21 (1): 161–169.

Balci NC, Tonga E, Gulsen M (2013) The Effect of Balance Training by Tetrax Interactive Balance System on Balance and Fall Risk in Parkinson's Patients: A Report of Four Cases. *Noro Psikiyatr Ars* 50 (3): 283–287.

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 (1): 143–151.

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.

Bartow K: Untersuchen und Befunden in der Physiotherapie: Körperhaltung, Haltungstypen und Haltungskontrolle Springer Medizin Verlag, Berlin Heidelberg, 2012, S. 51-60.

Basta D, Ernst A (2011) Vibrotaktiler Neurofeedbacktraining mit dem Vertiguard®-RT-System. *HNO* (59): 1005.

Basta D, Rossi-Izquierdo M, Soto-Varela A, Ernst A (2013) Mobile posturography: posturographic analysis of daily-life mobility. *Otol Neurotol* 34 (2): 288–297.

Bastard C, Mirouse G, Potage 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 (8): 1189–1191.

Bellach BM, Ellert U, Rodoschewski M (2000) Der SF-36 im Bundes-Gesundheitssurvey: Erste Ergebnisse und neue Fragen. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 43 (3): 210–216.

Berger W, Dietz V, Hufschmidt A, Jung R, Mauritz, KH., Schmidtbleicher, D. (Hrsg): Haltung und Bewegung beim Menschen: Physiologie, Pathophysiologie, Gangentwicklung und Sporttraining Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1984.

Bindawas SM, Vennu V, Alfhadel S, Al-Otaibi AD, Binnasser AS (2018) Knee pain and health-related quality of life among older patients with different knee osteoarthritis severity in Saudi Arabia. *PloS one* 13 (5): [Epub ahead of print].

Bode G, Schmal H, Pestka JM, Ogon P, Sudkamp 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 degrees. *Arch Orthop Trauma Surg* 133 (1): 43–49.

- Bolmont B, Gangloff P, Vouriot A, Perrin PP (2002) Mood states and anxiety influence abilities to maintain balance control in healthy human subjects. *Neurosci Lett* 329 (1): 96–100.
- Bonnin MP, Laurent JR, Zadegan F, Badet R, Pooler Archbold HA, Servien E (2013) Can patients really participate in sport after high tibial osteotomy? *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21 (1): 64–73.
- Brehme K, Bartels T, Pyschik M, Jenz M, Delank KS, Laudner KG, Schwesig R (2020) Postural Stability and Regulation before and after High Tibial Osteotomy and Rehabilitation. *Appl Sci* 10 (18)
- 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 (4): 1204–1211.
- Bullinger M (1995) German translation and psychometric testing of the SF-36 Health Survey: preliminary results from the IQOLA Project. *International Quality of Life Assessment. Soc Sci Med* 41 (10): 1359–1366.
- Bullinger M, Kirchberger I: *Der SF-36-Fragebogen zum Gesundheitszustand: Anwendung, Auswertung und Interpretation: Handanweisung Hogrefe*, Verlag für Psychologie, Göttingen, Bern, Toronto, Seattle, 1998.
- Cameron MH, Huisinga J (2013) Objective and subjective measures reflect different aspects of balance in multiple sclerosis. *J Rehabil Res Dev.* 50 (10): 1401–1410.
- Cass JR, Bryan RS (1988) High tibial osteotomy. *Clin Orthop Relat Res* (230): 196–199.
- Chieh-Szu Yang J, Chen C-F, Lee OK (2019) Benefits of opposite screw insertion technique in medial open-wedge high tibial osteotomy: A virtual biomechanical study. *J Orthop Translat* 20 (7): 31–36.
- Cho HJ, Chang CB, Yoo JH, Kim SJ, Kim TK (2010) Gender differences in the correlation between symptom and radiographic severity in patients with knee osteoarthritis. *Clin Orthop Relat Res* 468 (7): 1749–1758.
- Commissaris DACM, Nieuwenhuijzen PHJA, Overeem S, Vos A de, Duysens JEJ, Bloem BR (2002) Dynamic posturography using a new movable multidirectional platform driven by gravity. *J Neurosci Methods* 113 (1): 73–84.
- Coventry MB (1965) Osteotomy of the upper portion of the tibia for degenerative arthritis of the knee. A preliminary report by Mark B. Coventry. *J Bone Joint Surg Am* 47: 984–990.
- Coventry MB (1973) Osteotomy about the knee for degenerative and rheumatoid arthritis. *J Bone Joint Surg Am* 55 (1): 23–48.
- de C Williams AC, Davies HT, Chadury Y (2000) Simple pain rating scales hide complex idiosyncratic meanings. *Pain* 85 (3): 457–463.
- Dettoni F, Bonasia DE, Castoldi F, Bruzzone M, Blonna D, Rossi R (2010) High tibial osteotomy versus unicompartmental knee arthroplasty for medial compartment arthrosis of the knee: a review of the literature. *Iowa Orthop J* 30: 131–140.
- D'Lima DD, Fregly BJ, Patil S, Steklov N, Colwell CW (2012) Knee joint forces: prediction, measurement, and significance. *Proc Inst Mech Eng H* 226 (2): 95–102.
- Duchow J, Kohn D (2003) Die Behandlung der beginnenden Gonarthrose im mittleren Lebensalter. *Der Orthopäde* 32 (10): 920–930.
- Ficklscherer A, Weidert S (Hrsg): *Kurzlehrbuch Orthopädie und Unfallchirurgie: Knie* Urban & Fischer in Elsevier, München, 2012.

- Flörkemeier S, Lobenhoffer P: Klinisches Outcome nach Tibiakopfoosteotomie. In: Kohn D (Hrsg): Expertise Knie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2015, S. 313–314.
- Flörkemeier S, Staubli AE, Schroeter S, Goldhahn S, Lobenhoffer P (2014) Does obesity and nicotine abuse influence the outcome and complication rate after open-wedge high tibial osteotomy? A retrospective evaluation of five hundred and thirty three patients. *Int Orthop* 38 (1): 55–60.
- Fox AJS, Bedi A, Rodeo SA (2012) The basic science of human knee menisci: structure, composition, and function. *Sports health* 4 (4): 340–351.
- Froböse I, Nellessen G, Wilke C: Training in der Therapie: Grundlagen und Praxis 2. Aufl. Urban & Fischer in Elsevier, München, Jena, 2003, S. 140-158.
- Fujisawa Y, Masuhara K, Shiomi S (1979) The effect of high tibial osteotomy on osteoarthritis of the knee. An arthroscopic study of 54 knee joints. *Orthop Clin North Am* 10 (3): 585–608.
- Galla M, Lobenhoffer P (2007) Achsfehlstellungen - Knie. *Orthopädie und Unfallchirurgie update* 2 (2): 21–40.
- Glass N, Segal NA, Sluka KA, Torner JC, Nevitt MC, Felson DT, Bradley LA, Neogi T, Lewis CE, Frey-Law LA (2014) Examining sex differences in knee pain: the multicenter osteoarthritis study. *Osteoarthritis Cartilage* 22 (8): 1100–1106.
- Gorski LP, Silva AM, Cusin FS, Cesaroni S, Gananca MM, Caovilla HH (2019) Body balance at static posturography in vestibular migraine. *Braz J Otorhinolaryngol* 85 (2): 183–192.
- Goshima K, Sawaguchi T, Sakagoshi D, Shigemoto K, Hatsuchi Y, Akahane M (2017) Age does not affect the clinical and radiological outcomes after open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25 (3): 918–923.
- Gras F, Marintschev I, Lenz M, Klos K, König V, Hofmann GO (2013) Frakturen durch Materialentfernungen. *Trauma und Berufskrankheit* 15: 25–32.
- Grenzebach U, Most E, Rudolf G., Schmälf F, Schwenkreis P, Stoll M, Stoll W, Tegenthoff M: Posturographie. In: Stoll W, Most E, Tegenthoff M, Schmälf F, Schwenkreis P, Stoll M (Hrsg): Schwindel und Gleichgewichtsstörungen: Diagnostik, Klinik, Therapie, Begutachtung Ein interdisziplinärer Leitfaden für die Praxis. 4. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2004, S. 91–95.
- Gründer S: Gleichgewichtssinn. In: Gekle M, Wischmeyer E, Gründer S (Hrsg): Taschenlehrbuch Physiologie. 2. Aufl. Thieme, Stuttgart, 2015a, S. 641–647.
- Gründer S: Somatosensorik. In: Gekle M, Wischmeyer E, Gründer S (Hrsg): Taschenlehrbuch Physiologie. 2. Aufl. Thieme, Stuttgart, 2015b, S. 602–608.
- Gründer S: Visuelles System. In: Gekle M, Wischmeyer E, Gründer S (Hrsg): Taschenlehrbuch Physiologie. 2. Aufl. Thieme, Stuttgart, 2015c, S. 648.
- 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 (9): 3022–3031.
- Hannan MT, Felson DT, Pincus T (2000) Analysis of the discordance between radiographic changes and knee pain in osteoarthritis of the knee. *J Rheumatol* 27 (6): 1513–1517.
- 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 (5): 422–428.

- Herbst M, Kuwashima U, Ahrend MD, Gueorguiev BG, Schröter S, Ihle C (2020) Health-Related Quality of Life - an Underestimated Factor to Evaluate the Treatment Success after Open Wedge HTO Surgery: Prospective 6-Years Follow-Up. *Z Orthop Unfall*: [Epub ahead of print].
- Hernigou P, Medevielle D, Debeyre J, Goutallier D (1987) Proximal tibial osteotomy for osteoarthritis with varus deformity. A ten to thirteen-year follow-up study. *J Bone Joint Surg Am* 69 (3): 332–354.
- 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 (12): 1388–1394.
- Hinterwimmer S: Valgisierende Tibiakopfoosteotomie. In: Imhoff A, Linke R, Baumgartner R (Hrsg): *Checkliste Orthopädie*. 3. Aufl. Thieme, Stuttgart, 2014, S. 580–584.
- Huang TL, Wang CC, Yang KC, Wu CC (2018) Reliability of Roentgenographic Knee Alignment Measurements in Gonarthrosis. *J Knee Surg* 31 (4): 302–305.
- 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 (8): 693–696.
- Hunt MA, McManus FJ, Hinman RS, Bennell KL (2010) Predictors of single-leg standing balance in individuals with medial knee osteoarthritis. *Arthritis Care Res (Hoboken)* 62 (4): 496–500.
- Ihle C, Ateschrang A, Grunwald L, Stockle U, Saier T, Schroter S (2016) Health-related quality of life and clinical outcomes following medial open wedge high tibial osteotomy: a prospective study. *BMC Musculoskelet Disord* 17: [Epub ahead of print].
- Insall JN, Joseph DM, Msika C (1984) High tibial osteotomy for varus gonarthrosis. A long-term follow-up study. *J Bone Joint Surg Am* 66 (7): 1040–1048.
- Israel S: Sportfähigkeit wegen oder trotz muskulärer Dysbalancen. In: Zichner L, Engelhardt M., Freiwaldt J. (Hrsg): *Rheumathologie/Orthopädie-Neuromuskuläre Dysbalancen*. Hoffmann, Schorndorf, 1997, S. 123–131.
- Itou J, Itoh M, Maruki C, Tajimi T, So T, Kuwashima U, Okazaki K (2020) Deep peroneal nerve has a potential risk of injury during open-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 28 (5): 1372–1379.
- Ivarsson I, Myrnerets R, Gillquist J (1990) High tibial osteotomy for medial osteoarthritis of the knee. A 5 to 7 and 11 year follow-up. *J Bone Joint Surg Br* 72 (2): 238–244.
- Jang KM, Lee JH, Cho IY, Park BK, Han SB (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 (3): 756–760.
- Keene JS, Dyreby JR (1983) High tibial osteotomy in the treatment of osteoarthritis of the knee. The role of preoperative arthroscopy. *J Bone Joint Surg Am* 65 (1): 36–42.
- Keene JS, Monson DK, Roberts JM, Dyreby JR, JR (1989) Evaluation of patients for high tibial osteotomy. *Clin Orthop Relat Res* (243): 157–165.
- Kellgren JH (1963) Arthritis in population. *J Coll Gen Pract* 6: 2-7.
- 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.

- Kim HS, Yun DH, Yoo SD, Kim DH, Jeong YS, Yun JS, Hwang DG, Jung PK, Choi SH (2011) Balance control and knee osteoarthritis severity. *Ann Rehabil Med* 35 (5): 701–709.
- Kohen-Raz R (1991) Application of tetra-ataxiometric posturography in clinical and developmental diagnosis. *Percept Mot Skills* 73 (2): 635–656.
- Kohn L, Sauerschnig M, Iskansar S, Lorenz S, Meidinger G, Imhoff AB, Hinterwimmer S (2013) Age does not influence the clinical outcome after high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 21 (1): 146–151.
- Lanska DJ (2002) The Romberg Sign and Early Instruments for Measuring Postural Sway. *Semin Neurol* 22: 409–418.
- Lauenroth A, Reinhardt L, Schulze S, Laudner KG, Delank K-S, Schwesig R (2019) Does low back pain affect the reliability of postural regulation? *Somatosens Mot Res* 36 (2): 116–121.
- Lee DH, Lee JH, Ahn SE, Park MJ (2015) Effect of Time after Anterior Cruciate Ligament Tears on Proprioception and Postural Stability. *PloS one* 10 (9): [Epub ahead of print].
- 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.
- Lee DK, Wang JH, Won Y, Min YK, Jaiswal S, Lee BH, Kim JY (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 (5): 1411–1418.
- 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 (2): 165–171.
- Lobenhoffer P, Agneskirchner J, Zoch W (2004) Die öffnende valgusierende Osteotomie der proximalen Tibia mit Fixation durch einen medialen Plattenfixateur. *Der Orthopäde* 33: 153–160.
- Lootvoet L, Massinon A, Rossillon R, Himmer O, Lambert K, Ghosez JP (1993) Upper tibial osteotomy for gonarthrosis in genu varum. Apropos of a series of 193 cases reviewed 6 to 10 years later. *Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot* 79 (5): 375–384.
- Marquie L, Raufaste E, Lauque D, Marine C, Ecoiffier M, Sorum P (2003) Pain rating by patients and physicians: evidence of systematic pain miscalibration. *Pain* 102 (3): 289–296.
- Martay JL, Palmer A, JR, Bangerter NK, Clare S, Monk AP, Brown CP, Price AJ (2018) A preliminary modeling investigation into the safe correction zone for high tibial osteotomy. *The Knee* 25 (2): 286–295.
- Martinek V, Imhoff B (2003) Tibiale Umstellungsosteotomie am Kniegelenk – Renaissance eines klassischen Verfahrens? *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 54 (6): 229–232.
- Masouros S, Halewood C, Bull A, Amis A: Grundlagen zur Funktion. In: Kohn D (Hrsg): *Expertise Knie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2015, S. 37–41.
- McNamara IR, Birmingham TB, Marsh JD, Chesworth BM, Bryant DM, Giffin JR (2014) A preference-based single-item measure of quality of life following medial opening wedge high tibial osteotomy: large improvements similar to arthroplasty. *Knee* 21 (2): 456–461.
- 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 (7): 1991–1994.

- Meidinger G, Imhoff AB, Paul J, Kirchhoff C, Sauerschnig M, Hinterwimmer S (2011) May smokers and overweight patients be treated with a medial open-wedge HTO? Risk factors for non-union. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 19 (3): 333–339.
- Morin V, Pailhe R, Duval BR, Mader R, Cognault J, Rouchy RC, Saragaglia D (2018) Gait analysis following medial opening-wedge high tibial osteotomy. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 26 (6): 1838–1844.
- Moutzouri M, Gleeson N, Billis E, Tsepis E, Panoutsopoulou I, Gliatis J (2017) The effect of total knee arthroplasty on patients' balance and incidence of falls: a systematic review. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25 (11): 3439–3451.
- Myles PS, Myles DB, Gallagher W, Boyd D, Chew C, MacDonald N, Dennis A (2017) Measuring acute postoperative pain using the visual analog scale: the minimal clinically important difference and patient acceptable symptom state. *Br J Anaesth* 118 (3): 424–429.
- 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 (3): 910–917.
- Niethard F, Pfeil J, Biberthaler P: Knochenerkrankungen. In: Niethard F, Pfeil J, Biberthaler P (Hrsg): *Duale Reihe Orthopädie und Unfallchirurgie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2017, S. 564–598.
- Notarnicola A, Maccagnano G, Fiore A, Spinarelli A, Montenegro L, Paoloni M, Pastore F, Tafuri S, Moretti B (2018) Baropodometry on patients after total knee arthroplasty. *Musculoskelet Surg* 102 (2): 129–137.
- Ogon M, Krismer M, Sollner W, Kantner-Rumplmair W, Lampe A (1996) Chronic low back pain measurement with visual analogue scales in different settings. *Pain* 64 (3): 425–428.
- Palamar D, Guler H, Hanci M, Sucuoglu H, Sanus GZ, Tuzun S (2018) Posturographic examination of body balance in patients with Chiari type I malformation and correlation with the presence of syringomyelia and degree of cerebellar ectopia. *Turk J Phys Med Rehabil* 65 (1): 74–79.
- Paley D, Pfeil J (2000) Principles of deformity correction around the knee. *Orthopäde* 29 (1): 18–38.
- Palm HG, Schlumpberger S, Riesner HJ, Friemert B, Lang P (2015) Influence of anterior cruciate reconstruction on postural stability: A pre- and postoperative comparison. *Unfallchirurg* 118 (6): 527–534.
- Pang J, Cao YL, Zheng YX, Gao NY, Wang XZ, Chen B, Gu XF, Yuan W, Zhang M, Liu T, Zhan HS, Shi YY (2015) Influence of pain severity on health-related quality of life in Chinese knee osteoarthritis patients. *Int J Clin Exp Med* 8 (3): 4472–4479.
- Pape D: Präoperative radiologische Planung von Osteotomien. In: Lobenhoffer P, van Heerwaarden R, Agneskirchner J (Hrsg): *Kniegelenksnahe Osteotomien*. 2. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2014, S. 59–60.
- Park HJ, Ko S, Hong HM, Ok E, Lee JI (2013) Factors related to standing balance in patients with knee osteoarthritis. *Ann Rehabil Med* 37 (3): 373–378.
- Perry J: *Ganganalyse: Norm und Pathologie des Gehens*. 1. Aufl. Urban & Fischer in Elsevier, München, Jena, 2003, S. 36-95; 268-289.
- Pierobon A, Funk M (2013) Gleichgewichtsfähigkeit, posturales System, Lokomotion und Gang. *Sprache - Stimme - Gehör* 37 (2): 78–82.

- Platzer W, Shiozawa T: Die freie untere Extremität. In: Platzer W, Shiozawa T (Hrsg): Taschenatlas Anatomie: Band 1: Bewegungsapparat. 12. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2018, S. 218–227.
- Portner O (2014) High tibial valgus osteotomy: closing, opening or combined? Patellar height as a determining factor. *Clin Orthop Relat Res* 472 (11): 3432–3440.
- Richardson JTE (2011) Eta squared and partial eta squared as measures of effect size in educational research. *Educ Res Rev* 6: 135–147.
- Ruchholtz S, Wirtz D (Hrsg): Orthopädie und Unfallchirurgie essentials: Achsfehlstellungen Knie 3. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2019.
- Rupp S: Umstellungsosteotomie. In: Kohn D (Hrsg): Orthopädie und Orthopädische Chirurgie - Knie. 1. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2005, S. 379–405.
- 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 (3): 934–942.
- Scherer H: Das Gleichgewicht 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, 1997.
- Schipplein OD, Andriacchi TP (1991) Interaction between active and passive knee stabilizers during level walking. *J Orthop Res* 9 (1): 113–119.
- Schnurr C, König DP: Achsenfehlstellungen Knie. In: Ruchholtz S, Wirtz D (Hrsg): Orthopädie und Unfallchirurgie essentials. 3. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2019, S. 611–618.
- Schomacher J (2008) Gütekriterien der visuellen Analogskala zur Schmerzbewertung. *Physioscience* 4 (3): 125–133.
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U: 1. Knochen, Bänder und Gelenke. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH (Hrsg): PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: Lernatlas der Anatomie. 5. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2018a, S. 442–453.
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U: 4. Systematik der Leitungsbahnen. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH (Hrsg): PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: Lernatlas der Anatomie. 5. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2018b, S. 536–546.
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U: 5. Topografie der Leitungsbahnen. In: Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker KH (Hrsg): PROMETHEUS Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem: Lernatlas der Anatomie. 5. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2018c, S. 551–553.
- Schwesig R, 2006. Das posturale System in der Lebensspanne [Habilitationsschrift]. Halle. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- Schwesig R, Becker S, Lauenroth A, Kluttig A, Leuchte S, Esperer HD (2009) A novel posturographic method to differentiate sway patterns of patients with Parkinson's disease from patients with cerebellar ataxia. *Biomed Tech (Berl)* 54 (6): 347–356.
- Schwesig R, Fischer D, Kluttig A (2013) Are there changes in postural regulation across the lifespan? *Somatosens Mot Res* 30 (4): 167–174.
- Schwesig R, Becker S, Fischer D (2014a) Intraobserver reliability of posturography in healthy subjects. *Somatosens Mot Res* 31 (1): 16–22.
- Schwesig R, Fischer D, Becker S, Lauenroth A (2014b) Intraobserver reliability of posturography in patients with vestibular neuritis. *Somatosens Mot Res* 31 (1): 28–34.

- Schwesig R, Hollstein L, Plontke SK, Delank K-S, Fieseler G, Rahne T (2017) Comparison of intraobserver single-task reliabilities of the Interactive Balance System (IBS) and Vertiguard in asymptomatic subjects. *Somatosens Mot Res* 34 (1): 9–14.
- Sharma L, Song J, Dunlop D, Felson D, Lewis CE, Segal N, Torner J, Cooke TD, Hietpas J, Lynch J, Nevitt M (2010) Varus and valgus alignment and incident and progressive knee osteoarthritis. *Ann Rheum Dis* 69 (11): 1940–1945.
- So SY, Lee SS, 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 Arthroscop* 28 (5): 1516–1525.
- Spahn G (2004) Complications in high tibial (medial opening wedge) osteotomy. *Arch Orthop Trauma Surg* 124 (10): 649–653.
- Spahn G, Kirschbaum S, Kahl E (2006) Factors that influence high tibial osteotomy results in patients with medial gonarthrosis: a score to predict the results. *Osteoarthritis Cartilage* 14 (2): 190–195.
- Spahn G, Mückley T, Kahl E, Klinger HM, Steinhauser E, Hofmann G (2007) Biomechanical investigation of uniplanar and biplanar cuts in openingwedge high tibial osteotomy. *BIOmaterialien* 8 (2): 272–279.
- Spahn G, Klinger HM, Harth P, Hofmann GO (2012) Cartilage regeneration after high tibial osteotomy. Results of an arthroscopic study. *Z Orthop Unfall* 150 (3): 272–279.
- Spahn G, Marintschev I, Hofmann G. O.: (2015) The joint-preserving high valgus-osteotomy in knee osteoarthritis. *OUP* 4 (6): 324–332.
- Sprangers MA, Regt EB de, Andries F, van Agt HM, Bijl RV, Boer JB de, Foets M, Hoeymans N, Jacobs AE, Kempen GI, Miedema HS, Tjihuis MA, Haes HC de (2000) Which chronic conditions are associated with better or poorer quality of life? *J Clin Epidemiol* 53 (9): 895–907.
- Stensdotter AK, Bjerke J, Djupsjöbacka M (2015) Postural sway in single-limb and bilateral quiet standing after unilateral total knee arthroplasty. *Gait Posture* 41 (3): 769–773.
- Stöve J: Gonarthrose: S2k-Leitlinie. Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Orthopädische Chirurgie. https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/033-004I_S2k_Gonarthrose_2018-01_1.pdf, 2018, Zugegriffen: 18. März 2020
- 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 (1): 136–141.
- Thomas E, Martines F, Bianco A, Messina G, Giustino V, Zangla D, Iovane A, Palma A (2018) Decreased postural control in people with moderate hearing loss. *Medicine (Baltimore)* 97 (14): [Epub ahead of print].
- 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* (2013) 77 (4): 256–262.
- Tjörnstrand B, Svensson K, Thorngren KG (1985) Prediction of long-term outcome of tibial osteotomy in medial gonarthrosis. *Arch Orthop Trauma Surg* 103 (6): 396–401.
- Turbanski S, 2005. Zur posturalen Kontrolle bei Morbus Parkinson: Biomechanische Diagnose und Training [Inauguraldissertation]. Frankfurt am Main. Johann Wolfgang Goethe-Universität

- van den Bekerom M, Patt T, Kleinhout M, van der Vis H, Albers G (2008) Early complications after high tibial osteotomy: a comparison of two techniques. *J Knee Surg* 21 (1): 68–74.
- van der Woude JAD, Wiegant K, van Heerwaarden RJ, Spruijt S, van Roermund PM, Custers RJH, Mastbergen SC, Lafeber, F. P. J. G.: (2017) Knee joint distraction compared with high tibial osteotomy: a randomized controlled trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 25 (3): 876–886.
- van Raaij TM, Reijman M, Furlan AD, Verhaar JAN (2009) Total knee arthroplasty after high tibial osteotomy. A systematic review. *BMC Musculoskelet Disord.* 10 (20): 88–97.
- Waldt S, Eiber M, Wörtler K: Beinachse. In: Waldt S, Eiber M, Wörtler K (Hrsg): *Messverfahren und Klassifikationen in der muskuloskelettalen Radiologie: Kniegelenk*. 2. Aufl., 2017, S. 1–5.
- Woollacott MH, Shumway-Cook A, Nashner LM (1986) Aging and posture control: changes in sensory organization and muscular coordination. *Int J Aging Hum Dev* 23 (2): 97–114.
- Wurzinger LJ: Hüfte, Oberschenkel und Knie. In: Aumüller G, Aust G, Engele J, Kirsch J, Maio G, Mayerhofer A, Mense S, Reißig D, Salvetter J, Schmidt W, Schmitz F, Schulte E, Spanel-Borowski K, Wennemuth G, Wolff W, Wurzinger LJ, Zilch HG (Hrsg): *Duale Reihe Anatomie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2017, S. 374.
- Yokoyama M, Nakamura Y, Onishi T, Hirano K, Doi M (2016) Healing period after open high tibial osteotomy and related factors: Can we really say that it is long? *SpringerPlus* 5: [Epub ahead of print].
- Young WR, Mark Williams A (2015) How fear of falling can increase fall-risk in older adults: applying psychological theory to practical observations. *Gait Posture* 41 (1): 7–12.
- 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 Y, Jordan MJ (2010) Epidemiology of Osteoarthritis. *Clin Ger Med* 26: 355–369.
- Zhang Z, Lion A, Chary-Valckenaere I, Loeuille D, Rat AC, Paysant J, Perrin PP (2015) Diurnal variation on balance control in patients with symptomatic knee osteoarthritis. *Arch Gerontol Geriatr* 61 (1): 109–114.

8 Thesen

1. Die operative Beinachsenkorrektur führte 6 Monate postoperativ zu signifikanten Verbesserungen im Bereich des Gewichtsverteilungsindex und zu einer ausbalancierteren mediolateralen Lastverteilung links versus rechts.
2. Innerhalb der prozentualen Vorfuß-Rückfuß-Belastung zeigten sich 6 Monate postoperativ geringgradige Verschlechterungen (Links: ~1%; Rechts: ~2%) der anteriorposterioren Lastverteilung im Vergleich zur präoperativen Ausgangssituation.
3. Die Beinachsenkorrektur führte 6 Monate postoperativ auf Produktebene nicht zu einer erhöhten posturalen Stabilität.
4. Kurzfristige Verringerungen seitens der Somatosensorik (F 5 - 6) zum MZP 2 sind vermutlich auf die operative Rezeptorschädigung zurückzuführen, so dass eine langfristige Beobachtung (MZP 5: 1,5 Jahre postoperativ; MZP 6: 2 Jahre postoperativ) unter Umständen notwendig ist, um die Auswirkungen auf die posturale Stabilität vollumfänglich prüfen zu können.
5. Alle Subskalen des Short Form-36 wiesen 12 Wochen postoperativ (MZP 3) höhere Mittelwerte im Vergleich zum präoperativen Zustand auf, so dass die Patienten mit steigendem postoperativen Zeitintervall deutlich an einem Zugewinn der subjektiv beurteilten Lebensqualität profitierten.
6. Innerhalb von 6 Monaten nach erfolgter hoher additiver tibialer Umstellungsosteotomie zeigte sich eine signifikante Reduktion der Schmerzintensität ($p < 0,001$; $\eta_p^2 = 0,438$).
7. Es wurde eine Reduktion des Dauerschmerzcharakters hinzu Schmerzattacken mit Intervallen vollständiger Schmerzfreiheit eruiert, wobei die Frequenz als auch zeitliche Länge der Attacken innerhalb des Studienverlaufs deutlich zurückgingen.
8. Trotz der postoperativ verringerten tageszeitlichen Abhängigkeit des Schmerzgeschehens, präsentierten Patienten mit Beschwerdepersistenz Schmerzspitzen vor allem in den Morgen- und Abendstunden.

9. Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Einflusssysteme und -faktoren des Posturalen Systems.....	8
Abb. 2:	Gelenkwinkel - anatomische Beinachse.....	11
Abb. 3:	Gelenkwinkel - mechanische Beinachse.....	11
Abb. 4:	Analyse des Ursprungs der Fehlstellung anhand Bestimmung: mLDFW und mMPTW.....	12
Abb. 5:	Röntgenbefund - Varusgonarthrose.....	14
Abb. 6:	Arthroskopischer Befund - Arthrose.....	14
Abb. 7:	Einteilung des Tibiaplateau.....	17
Abb. 8:	Planungsmethode nach Miniaci	18
Abb. 9:	Bestimmung des Korrekturwinkels (α)	18
Abb. 10:	Messplatz.....	27
Abb. 11:	Postural Summary Sheet.....	29
Abb. 12:	Synchronisation (Synch) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz.....	38
Abb. 13:	Gewichtsverteilungsindex (WDI) [MW \pm SD]; alters- und geschlechts- adjustierte Referenz.....	38
Abb. 14:	Stabilitätsindikator (ST) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz.....	41
Abb. 15:	Visuell-nigrostriatales System (F 1) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz.....	41
Abb. 16:	Peripher-vestibuläres System (F 2 - 4) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz.....	41
Abb. 17:	Somatosensorisches System (F 5 - 6) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz.....	42
Abb. 18:	Cerebelläres System (F 7 - 8) [MW \pm SD]; alters- und geschlechtsadjustierte Referenz.....	42
Abb. 19:	SF-36-Subskale: Körperliche Funktionsfähigkeit (KÖFU) [MW \pm SD].....	44
Abb. 20:	SF-36-Subskale: Körperliche Rollenfunktion (KÖRO) [MW \pm SD].....	44
Abb. 21:	SF-36-Subskale: Körperlicher Schmerz (SCHM) [MW \pm SD].....	44
Abb. 22:	SF-36-Subskale: Allgemeine Gesundheitswahrnehmung (AGES) [MW \pm SD].....	44
Abb. 23:	SF-36-Subskale: Vitalität (VITA) [MW \pm SD].....	45
Abb. 24:	SF-36-Subskale: Soziale Funktionsfähigkeit (SOFU) [MW \pm SD].....	45
Abb. 25:	SF-36-Subskale: Emotionale Rollenfunktion (EMRO) [MW \pm SD].....	46
Abb. 26:	SF-36-Subskale: Psychisches Wohlbefinden (PSYC) [MW \pm SD].....	46
Abb. 27:	Körperliche SF-36-Summenskala [MW \pm SD].....	47
Abb. 28:	Psychische SF-36-Summenskala [MW \pm SD].....	47
Abb. 29:	SF-36-Summenskalen Alter: 41-50 Jahre, n=6 [MW \pm SD].....	48
Abb. 30:	SF-36-Summenskalen Alter: 51-60 Jahre, n=17 [MW \pm SD].....	48
Abb. 31:	SF-36-Summenskalen Alter: 61-70 Jahre, n=9 [MW \pm SD].....	49
Abb. 32:	Längsschnittliche Darstellung VAS-Werte (gesamte Studien-population) [MW: x].....	49
Abb. 33:	Längsschnittliche Darstellung VAS-Werte (altersstratifizierte) [MW: x].....	49

Abb. 34: Dauerschmerzen versus Schmerzattacken.....	50
Abb. 35: Durchschnittliche Anzahl der Schmerzattacken.....	50
Abb. 36: Durchschnittliche Dauer der Schmerzattacken.....	51
Abb. 37: Tageszeitliche Abhängigkeit der Schmerzen.....	51

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Komponenten der zentralen vestibulären Verschaltung.....	6
Tab. 2: Literaturrecherche Korrekturwinkel bei varischer Fehlstellung.....	16
Tab. 3: Literaturrecherche Pubmed zu „high tibial osteotomy and posture“	23
Tab. 4: Übersicht Anzahl Studienteilnehmer.....	25
Tab. 5: Ein- und Ausschlusskriterien der Studie.....	26
Tab. 6: Posturographische Testpositionen.....	27
Tab. 7: Frequenzbereiche der posturalen Subsysteme.....	28
Tab. 8: Messparameter des IBS.....	29 f.
Tab. 9: Messparameter des SF-36.....	32 f.
Tab. 10: Stichprobencharakteristik: Alter und anthropometrische Daten; n=32 [MW ± SD, (Spannweite)] und dominantes Bein.....	37
Tab. 11: anteriorposteriore und mediolaterale Lastverteilung [MW ± SD].....	39
Tab. 12: Vorfuß-Rückfuß-Ratio und Seitigkeit bei links-/rechtsseitiger Umstellungsosteotomie [MW ± SD], Messwerte mit der geringsten Differenz zum Idealwert von 50% fett hervorgehoben.....	39
Tab. 13: SF-36-Skalenwert: Gesundheitsveränderung (GVER), Maxima fett hervorgehoben.....	46

Anlage 1: Einwilligungserklärung

2

Einwilligungserklärung

zur Teilnahme an der Studie

Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur (hohe tibiale additive Osteotomie) auf die posturale Stabilität und Regulation

Name: _____ Vorname: _____

Ich bin über Wesen, Bedeutung und Tragweite der geplanten Studie aufgeklärt worden. Dazu wurde mir ein Exemplar der Patienteninformation ausgehändigt. Zu dem Ablauf und den möglichen Risiken konnte ich Fragen stellen. Die mir erteilten Informationen habe ich inhaltlich verstanden.

Mir ist bekannt, dass ich meine Einwilligung jederzeit ohne Angaben von Gründen widerrufen kann, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen.

Mir ist bekannt, dass für die Teilnahme an den Untersuchungen keine Wegevversicherung besteht.

Datenschutz

- Ich willige ein, dass für den Zweck der oben genannten Studie meine personenbezogenen Daten, insbesondere Angaben über meine Gesundheit, erhoben und gespeichert sowie weitere Daten aus meinen Krankenunterlagen entnommen werden dürfen. Diese Daten dürfen in pseudonymisierter (d.h. verschlüsselter) Form zur wissenschaftlichen Auswertung an die Sportklinik Halle und das Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie des Universitätsklinikums Halle (Saale) weitergegeben werden.
- Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Daten nach Beendigung der Studie mindestens 15 Jahre aufbewahrt werden. Anschließend werden die Daten, inklusive der Schlüsseliste, gelöscht.
- Ich bin darüber aufgeklärt worden, dass ich Auskunft (einschließlich unentgeltlicher Überlassung einer Kopie) über die mich betreffenden personenbezogenen Daten erhalten sowie ggf. deren Berichtigung oder Löschung verlangen kann.
- Ich bin darüber aufgeklärt worden, dass ein Beschwerderecht bei der Datenschutz-Aufsichtsbehörde besteht (Kontakt siehe S. 2).
- Ich bin darüber aufgeklärt worden, dass ich meine Einwilligung ohne Angabe von Gründen jederzeit widerrufen kann. Beim Widerruf werden auf mein Verlangen die erhobenen Daten gelöscht.

Einwilligungserklärung, Version 2 vom 05.07.2018



Universitätsklinikum
Halle (Saale)

Department für Orthopädie,
Unfall- und Wiederherstellungs-
chirurgie

Universitätsklinik und Poliklinik
für Orthopädie
Direktor:
Prof. Dr. Karl-Stefan Delank

Hausanschrift:
Ernst-Grube-Str. 40
06120 Halle (Saale)

orthopaedie@uk-halle.de

www.medizin.uni-halle.de/orth

Stellvertreter des Klinikdirektors:
Telefon: 0345 557-4825
Telefax: 0345 557-4809

Ambulanz:
Telefon: 0345 557-4370
Telefax: 0345 557-4879

Station 1:
Telefon: 0345 557-4910
Telefax: 0345 557-4819

Station 2:
Telefon: 0345 557-4820
Telefax: 0345 557-4829

Station für minimal-invasive
Chirurgie:
Telefon: 0345 557-4830
Telefax: 0345 557-4839

Station 4 (Klinikum Kollwitz):
Telefon: 0345 557-5203
Telefax: 0345 557-5202

Tagesstation:
Telefon: 0345 557-4940
Telefax: 0345 557-4774

Kontaktadressen

Datenverarbeitung in dieser Studie:

apl. Prof. Dr. René Schwesig
Medizinische Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Department für Orthopädie, Unfall- und Wiederherstellungschirurgie
Labor für Experimentelle Orthopädie & Sportmedizin
Ernst-Grube-Str. 40
06120 Halle (Saale)
Tel.: +49 (345) 557-1317

Datenschutzbeauftragte:

Sandra Wulff
Datenschutzbeauftragte des Universitätsklinikums Halle (Saale)
Kiefernweg 34
06120 Halle (Saale)
Tel.: +49 (345) 557-5755

Landesdatenschutzbeauftragte:

Landesbeauftragter für den Datenschutz Sachsen-Anhalt
Geschäftsstelle und Besucheradresse: Leninstraße 9, 39104 Magdeburg
Postadresse: Postfach 1947, 39009 Magdeburg
Tel.: +49 (361) 81803-0

Ich erkläre mich hiermit bereit, freiwillig an der Studie

„Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur (hohe tibiale additive Osteotomie) auf die posturale Stabilität und Regulation“ und den damit verbundenen Untersuchungen teilzunehmen.

Ort, Datum

Unterschrift des Probanden

Ort, Datum

Unterschrift des Aufklärenden

Einwilligungserklärung, Version 2 vom 05.07.2018

Anlage 2: Short Form - 36 (SF-36)

2

Ausgefüllt am:

UM
(Wird durch Personal ausgefüllt.)

Fragebogen zum Gesundheitszustand (SF-36)

In diesem Fragebogen geht es um Ihre Beurteilung Ihres Gesundheitszustandes. Der Bogen ermöglicht es, im Zeitverlauf nachzuvollziehen, 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. 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 Ausführung (z.B. ich mußte mich besonders anstrengen)	1	2

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 Zelle nur eine Zahl an)

AUSSAGEN	Trifft ganz zu	Trifft weitgehend zu	Weiß nicht	Trifft weitgehend nicht zu	Trifft überhaupt nicht zu
a. Ich scheine 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

Anlage 3: Visuelle Analogskala (VAS)

Visuelle Analogskala

Bitte markieren Sie auf der Skala wie stark Sie im jetzigen Moment Ihre Schmerzen empfinden.

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



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

Anlage 4: 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
 2) Dauerschmerzen mit starken Schwankungen
 3) Schmerzattacken, dazwischen schmerzfrei
 4) Schmerzattacken, auch dazwischen Schmerzen

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 einmal täglich mehrfach wöchentlich
 einmal wöchentlich mehrfach monatlich einmal monatlich
 seltener:

c) Wie lange dauern diese Attacken durchschnittlich? Sekunden Minuten
 Stunden bis zu drei Tagen länger als drei Tage

d) Sind Ihre Schmerzen zu bestimmten Tageszeiten besonders stark? Ja nein
 wenn ja: morgens mittags nachmittags abends nachts

Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel:

„Einfluss der Tibia vara und der operativen Beinachsenkorrektur mittels hoher tibialer additiver Osteotomie auf die posturale Stabilität und Regulation.“

unter der Betreuung von Univ.- Prof. Dr. med. Karl-Stefan Delank und Herrn apl. Prof. Dr. phil. Schwesig selbst angefertigt habe.

Die Ergebnisse wurden bisher weder im In- noch Ausland in gleicher oder ähnlicher Weise publiziert noch anderen Prüfungsbehörden vorgelegt.

Halle (Saale), 25.01.2022

Ort, Datum



Unterschrift

Erklärung über frühere Promotionsversuche

Ich erkläre hiermit, dass ich dato keine andere Promotion verfasst und eingereicht habe.

Halle (Saale), 25.01.2022
Ort, Datum


Unterschrift

Danksagung

Ich bedanke mich bei all den Personen, die mich maßgeblich in der Anfertigung dieser Arbeit begleiteten.

Besonders möchte ich Herrn apl. Prof. Dr. phil. Schwesig erwähnen, der mich über zwei Jahre fortwährend und unermüdlich entscheidend am Entstehungsprozess dieser Dissertation förderte. Danke!

Ebenfalls möchte ich lobend Herrn Dr. med. Brehme, das Team der Sportklinik Halle und Herrn Dr. med. Hagel aus dem DOUW des Universitätsklinikums Halle benennen, ohne deren Hilfe in der Patientenrekrutierung diese Studie nicht möglich gewesen wäre.

Mein besonderer Dank gilt zudem den Patienten, welche sich bereitklärten prä- und postoperativ an dieser Studie teilzunehmen.

Darüber hinaus möchte ich meiner Familie für die vielseitige und ausdauernde Unterstützung danken, welche sie mir während des Verfassens dieser Arbeit zukommen ließ.