Universitätsklinikum Ulm

Klinik für Orthopädie

Ärztlicher Direktor: Prof. Dr. med. Heiko Reichel

Klinisches und radiologisches Outcome der subtalaren Arthrorise mittels Calcaneus-Stopp-Methode für die Therapie von flexiblen kindlichen Knick-Senk-Füßen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Medizin der

Medizinischen Fakultät der Universität Ulm

Emilie Danto

geboren in Langenfeld-Rheinland

2023

Amtierender Dekan: Prof. Dr. T. Wirth

1. Berichterstatter: Prof. M. Faschingbauer

2. Berichterstatter: Prof. K. Schütze

Tag der Promotion: 12.07.2024

In dieser Arbeit wird zu Gunsten der Leserlichkeit auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Alle personenbezogenen Bezeichnungen beziehen sich gleichermaßen auf alle Geschlechter.

I. Inhaltsverzeichnis

I. Inhaltsverzeichnis I
II. Abkürzungsverzeichnis III
1 Einleitung 1
1.1 Der Knick-Senk-Fuß 1
1.2 Der kindliche Knick-Senk-Fuß 1
1.2.1 Der flexible kindliche Knick-Senk-Fuß 2
1.3 Der rigide Knick-Senk-Fuß 6
1.4 Der adulte Knick-Senk-Fuß 6
1.5 Diagnostik und klinisches Erscheinungsbild des kindlichen Knick-Senk-Fußes 6
1.5.1 Anamnese 6
1.5.2 Körperliche Untersuchung 7
1.5.3 Apparative Diagnostik 8
1.6 Therapie des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes 11
1.6.1 Konservative Therapie 11
1.6.2 Operative Therapie 12
1.7 Schematische Zusammenfassung der Einleitung 21
1.8 Zielsetzung der Arbeit 22
2 Material und Methoden 24
2.1 Studiendesign und Datenerhebung 24
2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien 24
2.1.2 Prä-Implantation 26
2.1.3 Implantation 26
2.1.4 Postoperativer Verlauf 28
2.1.5 Explantation 29
2.1.6 Radiologische Winkelmessungen 30
2.2 Datenverarbeitung und statistische Auswertung 34
2.2.1 Statistik der Leitfragen 1-3 35
2.2.2 Statistik der Leitfrage 4 35
3 Ergebnisse 36
3.1 Deskriptive Statistik 36
3.1.1 Auswertung der Rahmenbedingungen 36
3.1.2 Deskriptive Auswertung der Prä-Implantation erhobenen Daten 36
3.1.3 Deskriptive Auswertung der Implantation 37

3.1.4 Deskriptive Auswertung des postoperativen Verlaufes 40
3.1.5 Deskriptive Auswertung der Explantation 43
3.2 Analytische Statistik 44
3.2.1 Radiologische Korrektur des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes 44
3.2.2 Klinische Verbesserung des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes 46
3.2.3 Einflussvariablen auf den Behandlungsverlauf 47
3.3 Zusammenfassung der Hauptergebnisse 53
4 Diskussion 59
4.1 Diskussion des radiologischen Outcomes 59
4.1.1 Datenqualität 59
4.1.2 Bildgebende Verfahren 60
4.1.3 Winkelmessungen am kindlichen Fußskelett 62
4.1.4 Fazit zum radiologischen Outcome der STA 69
4.2 Diskussion des klinischen Outcomes 70
4.2.1 Klinische Verbesserung 70
4.2.2 Klinische Evaluationsmethoden 72
4.2.3 Einflussvariablen auf das klinische Outcome 77
4.3 Schlussfolgerung 84
4.4 Ausblick 85
5 Zusammenfassung 87
6 Literaturverzeichnis 89
III. Anhang 105
Abbildungsverzeichnis 109
Tabellenverzeichnis 110
IV. Danksagung 111
V. Lebenslauf 112

II. Abkürzungsverzeichnis

aKSF ..... *adulter Knick-Senk-Fuß*
ANOVA ..... *Analysis of Variance*
AOFAS ..... *American Orthopedic Foot and Ankle Society Score*
AUC ..... *area under the curve*
BMI ..... *Body-Mass-Index*
Calc-B ..... *Calcaneus-Boden-Winkel*
Calc-MTV ..... *Calcaneus-Metatarsale-V-Winkel*
Costa-B ..... *Moreau-Costa-Bartani-Winkel*
CROMs ..... *clinician-reported outcome measures*
EFM ..... *extrinsische Fußmuskulatur*
EMG ..... *Elektromyografie*
FADI ..... *Foot and Ankle Disability Index*
fkKSF ..... *flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß*
IFM ..... *intrinsische Fußmuskulatur*
kKSF ..... *kindlicher Knick-Senk-Fuß*
KSF ..... *Knick-Senk-Fuß*
Lig. ..... *Ligamentum*
M. ..... *Musculus*
ME ..... *Metallentfernung*
MICE ..... *Multivariate Imputations by Chained Equations*
MLG ..... *mediales Längsgewölbe*
N. ..... *Nervus*
η^2_p ..... *partial eta squared*
nKSF ..... *neurogener Knick-Senk-Fuß*
OxAFQ-C ..... *Oxford Ankle Foot Questionnaire for Children*
PROMs ..... *patient-reported outcome measures*
rkKSF ..... *rigider kindlicher Knick-Senk-Fuß*
rKSF ..... *rigider Knick-Senk-Fuß*
SD ..... *Standardabweichung*
SESA ..... *subtalar extraarticular screw arthroereisis*
sKSF ..... *syndromaler Knick-Senk-Fuß*
STA ..... *subtalare Arthrorise*
TC-dp ..... *dorsoplantarer talocalcanearer Winkel*
TC-lat ..... *seitlicher talocalcanearer Winkel*
T-dekl ..... *Talusdeklination*
TMTIB ..... *Talometatarsale-I-Basis-Winkel*
TMTI-dp ..... *dorsoplantarer Talus-Metatarsale-I-Winkel*
TMTI-lat ..... *seitlicher Talus-Metatarsale-I-Winkel*
TNG ..... *talonaviculare Gelenkabdeckung*
UKU ..... *Universitätsklinikum Ulm*
VAS ..... *visuelle Analogskala*
WHO ..... *World Health Organization*

1 Einleitung

1.1 Der Knick-Senk-Fuß

Der Pes planovalgus ist eine in der Allgemeinbevölkerung verbreitete, dreidimensionale Fußfehlstellung, die sich insbesondere durch eine Abflachung des medialen Längsgewölbes (MLG) des Fußes in der Sagittalebene kennzeichnet [4, 107]. In der Transversalebene zeigt sich dagegen eine Pronation und Abduktion des Vorfußes, bezogen auf den sich in der Frontalebene präsentierenden Rückfußvalgus [85, 94]. Die Gelenkflächen des Calcaneus neigen sich nach medial und der Talus folgt diesen durch Subluxation mit inferiomedialer Rotation und Plantarflexion [94]. Die veränderte Biomechanik führt zu einer Aggravation der Deformität durch eine zunehmende Belastung der medialen anstatt der lateralen Fußsäule [4, 85]. Der Knick-Senk-Fuß (KSF) entwickelt sich in den meisten Fällen im Laufe des Lebens. In seltenen Fällen kann er auch angeboren sein [4]. Einige Autoren halten zur groben Orientierung eine Unterscheidung zwischen kindlichem Knick-Senk-Fuß (kKSF) und adultem Knick-Senk-Fuß (aKSF) für sinnvoll. Beide Entitäten können weiter klassifiziert werden. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem kKSF [10].

1.2 Der kindliche Knick-Senk-Fuß

Der kKSF ist bei 19 % der von Fußbeschwerden Betroffenen die zugrunde liegende Pathologie [44]. Die in der Literatur beschriebenen Prävalenzen unterscheiden sich erheblich und werden auf 0,6 % bis 77 % geschätzt [6]. Das liegt unter anderem daran, dass weiterhin ungeklärt ist, ob der kKSF als eine Normvariante der physiologischen Fußform oder als eine progredient verlaufende Deformität einzustufen ist [22, 69, 138, 140]. Ein quantifizierbares Maß an Veränderung, das diesen Übergang kennzeichnet, fehlt [21, 106].

Klassifikation des kindlichen Knick-Senk-Fußes

Eine international anerkannte, allgemeingültige Klassifikation für den kKSF gibt es auf Grundlage des derzeitigen Forschungsstandes nicht [22, 34]. Angelehnt an die S2k-Leitlinien wird zwischen einem flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fuß (fkKSF) und einem rigiden kindlichen Knick-Senk-Fuß (rkKSF) unterschieden [34]. Beiden Entitäten können unterschiedliche Ursachen zugrunde liegen. Sie können sich klinisch symptomatisch oder asymptomatisch präsentieren [56, 69].

1.2.1 Der flexible kindliche Knick-Senk-Fuß

Der fkKSF hat eine Inzidenz von 5 % [46, 56, 109, 112]. Klinisch muss er so früh wie möglich vom rkKSF abgegrenzt werden, da Letzterer umgehend eine therapeutische Konsequenz nach sich zieht [34]. Dabei unterscheiden sich die beiden Formen darin, dass der fkKSF im Rahmen funktioneller Untersuchungen wie dem Zehenspitzenstand (*heel rise test*) oder unter Dorsalextension der Großzehe (*Jack's test, toe raising test*) kompensiert werden kann [1, 22, 139]. Dies ist auf den Seilwinden-/ Windlass-Mechanismus der Plantarfaszie zurückzuführen [69, 134]. Das abgeflachte MLG richtet sich unter deren Spannung durch die fehlende Gewichtsbelastung auf [69, 139].

1.2.1.1 Physiologische Entwicklung des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes

Zum Zeitpunkt der Geburt hat beinahe jedes Kind einen klinisch imponierenden fkKSF [21, 33, 138]. Morley beschreibt die Prävalenz bei den unter 18-Monaten alten Kindern mit 97 % [101]. Der fkKSF entsteht optisch durch das Spitzy-Fettpolster, welches sich im Bereich des MLG befindet und die mediale Belastungsfläche dominieren lässt. Das Fettpolster löst sich physiologisch im Verlauf der Fußentwicklung auf [10, 22, 69, 130, 143]. Frühere Studien zeigten, dass mit Zunahme des Alters die Prävalenz des fkKSF von 54 % bei den 3-Jährigen auf 26 % bzw. 24 % bei den 3- bis 6-Jährigen abnimmt, sodass besonders diese Zeitspanne als kritische Phase der Fußentwicklung einzustufen ist [69, 138].

Gleichzeitig führt die angeborene varische Beinachse zusammen mit der Antetorsion des Schenkelhalses von 31° zum Zeitpunkt der Geburt zu einem physiologischen Innenrotationsgang im Kleinkindalter [16, 43, 159]. Um nicht über die eigenen Füße zu stolpern, führt das Kind unbewusst eine Pronationsbewegung aus, deren Komponente der Rückfußvalgus ist [69]. Ein weiterer Grund ist die dadurch vergrößerte plantare Kontaktfläche, die durch die höhere Anzahl an angesprochenen Propriozeptoren dem Kleinkind mehr Stabilität verleiht [27]. Problematisch ist dies in der Hinsicht, dass eine Begrenzung der Pronationsbewegung aufgrund mangelnder Ausbildung des muskulären und Band-Stützapparates erst ab dem fünften Lebensjahr möglich ist [10, 36, 91, 130]. Das Resultat ist ein transient als physiologisch zu beurteilender fkKSF.

Mit dem Erlernen des aufrechten Ganges, kommt es zu einer Veränderung der auf die untere Extremität einwirkenden Kräfte [130]. Das bis dahin nur im Sitzen sichtbare Längsgewölbe bildet sich im Verlauf der ersten Lebensdekade in einem Zusammenspiel von

Muskulatur, Bandapparat und Achsausrichtung der unteren Extremität auch im Stehen aus [1, 22, 34, 50, 153].

Mit zunehmender Gewichtsbelastung auf die medialen Wachstumsfugen der Kniegelenke kommt es aktiv zu einer Stimulation des Knochenwachstums und damit zu einer Valgisierung der Beinachse bis zum 3.- 4. Lebensjahr. Ein Gleichgewicht der medial und lateral auf die Wachstumsfugen einwirkenden Kräfte bewirkt schließlich die Ausbildung der physiologischen Beinachse [159]. Die Antetorsion des Schenkelhalses reduziert sich auf rund 15° bis zum Abschluss des Wachstums [76, 130, 159]. Neben den Torsionsbewegungen des Oberschenkels durchläuft die Tibia eine Außenrotation. Die Innenrotation der Malleolaren und der Rückfußvalgus werden damit behoben [159]. Benedetti et al. bringen eine vermehrte Innentorsion der Tibia bei 43,6 % der untersuchten Studienpopulation mit einem symptomatischen fkKSF in Verbindung [8].

Der fkKSF verschwindet meist bis zum Ende der ersten Lebensdekade. Bei 4 % der 10-Jährigen persistiert er darüber hinaus [22, 28, 101]. Während er mehrheitlich asymptomatisch verbleibt, besteht jederzeit die Gefahr der Dekompensation mit Progredienz und potenzieller Rigidität [22, 28]. Klare Zeichen für diesen Übergang fehlen, was eine Therapieindikation erschwert. Die Dekompensation äußert sich bei weniger als 2 % der Betroffenen in Form von Ermüdungserscheinungen und Schmerzen [34]. Ab diesem Zeitpunkt wird von einer pathologischen Entwicklung gesprochen, die eine Indikation für den Interventionsbeginn darstellt [22, 34].

1.2.1.2 Pathomechanismus des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fuß

Warum persistiert der fkKSF bei rund 4 % der Kinder über die erste Lebensdekade hinaus [22, 28, 101]? Der fkKSF kann sich sowohl gesondert, als auch als Teil einer Grunderkrankung präsentieren [61, 71]. Neben Störungen in der physiologischen Entwicklung der unteren Extremität, wie beispielsweise einem genu valgum oder tibia vara, liegen dem persistierenden fkKSF laut Literatur multifaktorielle Ursachen zugrunde [69, 113]. Insbesondere zwei Theorien solcher Ursachen finden derzeit vermehrt Anerkennung. Diese können durch diverse Risikofaktoren beeinflusst werden [22]. Einerseits wird eine muskuläre Hypotonie, andererseits eine generalisierte Hypermobilität durch Bandlaxizität als Ursache postuliert [34, 67].

Generalisierte Hypermobilität bei Bandlaxizität

Bis zum Schulalter ist eine Weichheit des Bandapparates als physiologisch anzusehen [27, 91]. Zurückzuführen ist dies auf die biochemische Zusammensetzung des Bindegewebes. Bei der Geburt übersteigt der Anteil an Proteoglykanen und elastischen Fasern den Anteil der unreifen und nur wenig quervernetzten Kollagenfasern. Das erscheint angesichts der Tatsache, dass dem Kind so während seiner Entwicklung ein maximaler Bewegungsspielraum der Gelenke und minimaler Widerstand geboten wird plausibel. Mit zunehmendem Alter steigt die Zahl der Quervernetzungen der Kollagenfasern bei gegensinniger Entwicklung des Proteoglykananteiles und Zahl der elastischen Fasern [91].

Generalisierte Hypermobilität und eine Schwäche des Bandapparates führen häufiger zu einem fkKSF, da das Längsgewölbe primär ligamentös gesichert ist [22, 41, 88]. Die Ursache kann eine Bindegewebserkrankung sein, wie beispielsweise das Ehlers-Danlos-Syndrom, ein Kollagen-6-Defekt oder das Marfansyndrom [34]. Nicht zu unterschätzen ist gleichermaßen die generalisierte Hypermobilität ohne zugrunde liegende Bindegewebserkrankung, deren Prävalenz auf 5-12 % geschätzt wird [51, 78, 154].

Wird der durch Bandlaxizität verursachte fkKSF nicht therapiert, besteht bei anhaltender Pronation die Gefahr der permanenten Überdehnung bis hin zu einer irreversiblen Elongation der das MLG stabilisierenden Bänder. Der Verschiebung von Knochen ist dann kein Einhalt mehr geboten und das MLG senkt sich ab. Die Folgen können durch veränderte Kraftansatzpunkte der Muskulatur eine progrediente Muskelschwäche der unteren Extremität und eine Achillessehnenverkürzung sein [27].

Muskuläre Hypotonie

Der Abflachung des MLG wirken neben dem Bandapparat auch die extrinsische (EFM) und intrinsische Fußmuskulatur (IFM) entgegen [70]. Die EFM entspringt dem Unterschenkel [110]. Eine das MLG unterstützenden Wirkung wird dabei zahlreichen Muskeln zugeschrieben, primär dem Musculus (M.) tibialis posterior [146]. Da dieser eine Inversion des Rückfußes herbeiführt, ist die Folge seiner Dysfunktion oder traumatischen Ruptur die Valgusstellung der Ferse [17, 92, 110, 146].

Die IFM findet ihren Ursprung und Ansatz innerhalb des Fußes und spannt parallel zur Plantaraponeurose [81, 147]. Insbesondere dem M. abductor hallucis, M. flexor digitorum

brevis und M. quadratus plantae wird eine das MLG unterstützende Wirkung zugeschrieben [45, 48, 70, 80]. Bei zunehmender Gewichtsbelastung werden die Muskeln bei sich erhöhender Muskelaktivität verstärkt rekrutiert, wie durch Elektromyografie (EMG) gezeigt werden konnte [80]. Fiolkowski et al. und Farris et al. beobachteten nach lokalanästhetischer Blockade des die IFM innervierenden Nervus (N.) tibialis posterior eine signifikant stärkere Absenkung des Os naviculare [45, 48]. Dies kann als ein Zeichen einer vermehrten Pronation im Stand gewertet werden. Headlee et al. gelangten bei gleicher Zielgröße zu ähnlichen Ergebnissen durch gezielte, exzessive Beanspruchung der IFM [70].

Eine muskuläre Hypotonie reduziert die Stabilität des MLG und bedarf zusätzlicher Abklärung. Oft kommt eine neurogene Grunderkrankung infrage, z. B. eine primäre kongenitale Myopathie oder hereditäre Neuropathie. Die Rede ist dann von einem neurogenen Knick-Senk-Fuß (nKSF). Weitere Ursachen sind unter anderem die infantile Zerebralparese oder eine Myelomeningozele. Eine weitere Form des kKSF ist der syndromale kindliche Knick-Senk-Fuß (sKSF), bei dem die muskuläre Hypotonie Teil eines Syndroms, z.B. der Trisomie 21, ist [34].

1.2.1.3 Risikofaktoren für die Entwicklung eines flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes

Die Hauptmechanismen, die für die Entwicklung des fkKSF verantwortlich sind, sind weitestgehend bekannt. Faktoren, die auf das Outcome der Therapie Einfluss nehmen, bleiben unbekannt und sind ihm Rahmen aktueller Studien nur wenig untersucht [22, 144]. Insbesondere dieses Wissen könnte in Zukunft das Therapieergebnis verbessern [144]. Studien, die solche Einflussvariablen identifizieren und deren Einfluss auf beispielsweise postoperative Schmerzen oder Komplikationen als Komponenten des klinischen Outcomes untersuchen, fehlen.

Oft tritt der fkKSF gehäuft innerhalb einer Familie auf. Eltern stellen ihre Kinder in der Klinik vor, da sie selbst Beschwerden haben, vor denen sie ihre Kinder bewahren möchten [41, 68, 69, 106, 117]. Bisher konnte beobachtet werden, dass Jungen häufiger von einem fkKSF betroffen sind als Mädchen. Dies ist vermutlich auf ein dickeres und sich langsamer zurückentwickelndes Spitzy-Fettpolster zurückzuführen [39, 100, 117]. Neben einer genetischen Prädisposition und dem Geschlecht tritt der fkKSF zunehmend in Verbindung mit kindlichem Übergewicht bis hin zu Adipositas auf [69, 79, 117]. Dabei ist das Risiko für

einen fkKSF bei übergewichtigen Kindern um 27 % höher und bei adipösen Kindern verdreifacht [117].

1.3 Der rigide Knick-Senk-Fuß

Der fkKSF kann in seltenen Fällen in einen rigiden Knick-Senk-Fuß (rKSF) übergehen [36]. Die Aufrichtung des MLG im Zehenspitzenstand ist dann nicht mehr möglich und die Beweglichkeit des subtalaren Gelenkkomplexes eingeschränkt [22]. Außerdem beruht der rKSF als eigenständige Entität insbesondere auf knöchernen Deformitäten und neurologischen Erkrankungen, beispielsweise einer Coalitio talocalcanearis, calcaneonavicularis oder dem Talus verticalis. Der rKSF kann auch die sekundäre Folge eines infektiösen, posttraumatischen, neoplastischen, rheumatischen oder nekrotischen Geschehens sein [22, 27, 28, 68].

1.4 Der adulte Knick-Senk-Fuß

Die Prävalenz des aKSF liegt bei 19-23 % [38, 58]. Dabei scheint dieser bei der afroamerikanischen Bevölkerung häufiger aufzutreten als in der kaukasischen (38,3 % vs. 23,3 %, n=1691) [38, 58]. Der aKSF kann die Folge der Progression eines unbehandelten kKSF sein. Zusätzlich kommen Traumata und degenerative Veränderungen der das MLG unterstützenden Strukturen, rheumatoide Arthritis und am häufigsten die Dysfunktion oder Ruptur des Ligamentum (Lig.) calcaneonaviculare und M. tibialis posterior als mögliche Ursachen in Frage [60, 92, 146, 148]. Letztere können die Folge einer chronischen Fehlbelastung im Verlauf des Krankheitsbildes sein [10].

1.5 Diagnostik und klinisches Erscheinungsbild des kindlichen Knick-Senk-Fußes

Ziel der Diagnostik des fkKSF ist neben der Unterscheidung zwischen einer physiologischen Entwicklungsstufe und Fußfehlstellung, die differenzialdiagnostische Abklärung dessen Ätiologie. Dies erfolgt mithilfe einer ausführlichen Anamnese und körperlichen Untersuchung, die durch apparative Verfahren unterstützt werden. Oftmals handelt es sich jedoch um eine Blickdiagnose.

1.5.1 Anamnese

Bei der Verdachtsdiagnose fkKSF werden anamnestisch drei Perioden untersucht. Beginnend mit der Geburtsanamnese werden rückblickend die Geburts- und Schwangerschaftsumstände erhoben. Mit Blick auf die infantile Zerebralparese werden Geburtskomplikationen, der Apgar-Score und der Nabelschnur-pH ermittelt [34]. Anschließend

wird die Entwicklungsgeschichte des Kindes erfragt. Als Hilfestellung kann hier das Kinderuntersuchungsheft dienen. Neben den Perzentilenkurven werden die Meilensteine der Entwicklung des Bewegungsapparates aufgearbeitet, wie z.B. der Zeitpunkt des Laufenlernens, um mögliche Hinweis auf eine Entwicklungsverzögerung zu finden. Vom Kind praktizierte sportliche Aktivitäten und Traumata sollten, als zum Pathomechanismus beitragende Faktoren gewertet und als Ursachen für Begleitverletzungen ausgeschlossen werden [34, 86]. Weiterführend werden vorangegangene Operationen oder therapeutische Maßnahmen, wie eine bereits erfolgte Physiotherapie, Einlagenversorgung oder systemische Erkrankungen, z. B. Diabetes mellitus, dokumentiert [86]. Schlussendlich wird die aktuelle Beschwerdesymptomatik betrachtet und eine gezielte Schmerzanamnese durchgeführt. Diese umfasst die Evaluation der Schmerzlokalisation, der Schmerzintensität und des Schmerzcharakters. Es wird geklärt, in welchem zeitlichen Zusammenhang die Schmerzen auftreten und ob diese mit Einschränkungen im Alltag einhergehen [34, 86]. Oftmals präsentieren sich die Patienten mit belastungsabhängigen Ermüdungserscheinungen bei unterschiedlichen Gehstrecken. Diese können je nach Schweregrad der Deformität in einen Ruheschmerz übergehen. Eine häufige Lokalisation ist dabei der mediale oder laterale Fußrand mit Ausstrahlen der Schmerzen nach subpatellar, bedingt durch die Eversionsbewegung des Calcaneus [22]. Folglich kann es zu einer Verkürzung der Wadenmuskulatur und spastischen Kontraktion der Peronealmuskulatur kommen [34]. Einschränkungen im Alltag präsentieren sich meist neben Schwierigkeiten bei sportlicher Belastung und einem vermehrten Umknicken in einem Schuhkonflikt im Sinne eines medial abgetragenen Schuhwerkes sowie Druckstellen. Neben der Schmerz- und Funktionsanamnese sollte deshalb eine Schuhbeurteilung erfolgen [34, 88, 107]. Im Rahmen der Familienanamnese wird das Vorkommen von Fußfehlstellungen und neuromuskulären Grunderkrankungen erfragt [34].

1.5.2 Körperliche Untersuchung

Während der Fuß den Schwerpunkt der körperlichen Untersuchung darstellt, ist es zwingend notwendig, die gesamte untere Extremität in die Untersuchung mit einzubeziehen. Untersucht werden deren aktive und passive Beweglichkeit, Kraft und Koordination sowie Sensibilität und Propriozeption [1, 22, 34]. Den Beginn der körperlichen Untersuchung stellt die Inspektion mit einer Beurteilung des Stand- und Gangbildes beim Barfußgehen und -rennen dar. Das Kind sollte in der Lage sein, einen Zehenspitzen- und Hackengang zu

demonstrieren. Ergänzend kann ein monopedales Hüpfen durchgeführt werden. Der behandelnde Orthopäde inspiziert die Fußform und achtet auf Entzündungszeichen und Mehrbeschwielung, insbesondere am medialen und lateralen Fußrand [34]. Diagnostisch zielführend für den fkKSF ist unter anderem das sich bei Inspektion von dorsal präsentierende *„too many toes oder lost big toe sign“* [1, S. 14]. Ohne Fußfehlstellung sind für den Untersucher von dorsal nur die fünfte und die halbe vierte Zehe sichtbar. Bedingt durch die Vorfußabduktion und den Rückfußvalgus können während Stand und Gang weitere Zehen apparent werden [1, 22]. Die Inspektion wird durch funktionelle Testdiagnostik zur Aufrichtung des MLG ergänzt (siehe 1.2.1.1).

Es folgt die Achsen- und Rotationsbeurteilung des Hüft-, Knie-, oberen und unteren Sprunggelenkes sowie des Rück- und Vorfußes. Dabei erfolgt eine Dokumentation des Bewegungsumfangs nach der Neutral-Null-Methode sowie einer eventuellen bestehenden Beinlängendifferenz. Bewegungseinschränkungen können Hinweise auf eine oft schmerzhafte Coalitio liefern. Neuropädiatrisch erhebt der Untersucher palpatorisch den Muskel- und Bindegewebstonus und überprüft die Reflexe. Da der fkKSF häufig mit einer Verkürzung des Achillessehnenkomplexes einhergeht, sollte dessen Funktionalität beurteilt werden [27]. Dazu eignet sich der *Silfverskjöld-Test*. Das Knie befindet sich zur Entspannung der Wadenmuskulatur in Flexionsstellung und der Untersucher überführt den invertierten Fuß passiv in die Dorsalextension. Die Bewegung wird anschließend im Vergleich bei Knieextension wiederholt. Ist es dem Untersucher bei Knieextension nicht möglich, den Fuß zu extendieren, spricht dies für eine Verkürzung der Achillessehne [22].

1.5.3 Apparative Diagnostik

Bei der klinischen Verdachtsdiagnose eines fkKSF, kann die apparative Diagnostik hinzugezogen werden [34].

1.5.3.1 Pedobarografie

Die Pedobarografie stellt ein Mittel der Diagnostik sowie der Verlaufsdokumentation dar. Anhand statischer und dynamischer plantarer Druckmessungen erfolgt die Analyse des Abrollverhaltens und das Messen von Druckspitzen. Damit können Rückschlüsse auf die Stabilität des Fußes gezogen werden [34]. Sie ermöglicht außerdem die individualisierte Einlagenversorgung. Im Rahmen der Pedobarografie kann der nach Staheli et al. definierte „*arch index*“ berechnet werden, das Verhältnis zwischen der Weite des Fußgewölbes

und der Ferse [138, S. 426]. Der Index korreliert mit dem Rückfußvalgus und nimmt in der Kindheit Werte von 0,7 bis 1,35 an [41, 138]. Gleichzeitig neigen Fußabdruckindices dazu, den Schweregrad der Deformität zu überschätzen. Ihr Stellenwert liegt damit in der Ergänzung der klinischen Untersuchungstechniken und bildgebenden Verfahren [34, 57]. Zur Verlaufsdokumentation eignen sich die Kontaktfläche, Kontaktzeit und das Druck-Zeit-Integral. Studien zeigten eine deutliche Abnahme der medialen zugunsten der lateralen relativen Kontaktfläche, bei gleichsinniger Veränderung der Kontaktzeit und gesamten Kontaktfläche während des Gehens bei Vorliegen eines KSF [79]. Weiterführende Diagnostik ermöglicht die videobasierte 3-D-Ganganalyse [34].

1.5.3.2 Bildgebende Verfahren

Bei schmerzhaftem, rigiden und dekompensiertem Knick-Senk-Fuß soll entsprechend den Empfehlungen der Leitlinien, eine radiologische Abklärung der Beschwerden erfolgen [34]. Dabei ist das Mittel der ersten Wahl eine Röntgenaufnahme des Fußes in zwei Ebenen unter Belastung [14, 15, 34, 61]. Es muss berücksichtigt werden, dass eine Röntgenaufnahme ossifikationsbedingt erst ab einem Alter von 3 Monaten sinnvoll ist [34]. Bei Verdacht auf eine Coalitio wird als Mittel der ersten Wahl eine Magnetresonanztomografie empfohlen, gefolgt von der strahlentechnisch belastenderen Computertomografie. Selten wird eine sonografische Untersuchung empfohlen [34].

1.5.3.3 Radiologische Winkel am kindlichen Fußskelett

Zur Objektivierung der Röntgendiagnostik sind in der Literatur und in den Leitlinien Parameter in Form von Winkeln definiert, die die mehrdimensionale Fußform repräsentieren und Auskunft über das knöcherne Alignment und das MLG geben sollen [34]. Derzeit dienen sie primär der Quantifizierung des Maßes an Korrektur, das durch die therapeutisch ergriffenen Maßnahmen erzielt werden kann. Die publizierten Referenzwerte basieren auf Fallstudien und Erfahrungswerten und weisen eine Streubreite auf [34, 66, 99]. Trotz den Empfehlungen der Leitlinie gibt es keinen Konsens darüber, welche Winkel die Korrektur des fkKSF durch die subtalare Arthrorise (STA) am besten repräsentieren und demnach für die Diagnostik und das therapeutische Vorgehen klinisch relevant sind. Prospektive Studien, die das radiologische Outcome vergleichend bei einer gesunden Kontrollgruppe evaluieren, sind notwendig.

Laterale Projektion

In der streng seitlich erfolgten Röntgenaufnahme wird die Messung des Talus-Metatarsale-I-Winkels (TMTI-lat), talocalcanearen Winkels (TC-lat), Calcaneus-Boden-Winkels (Calc-B) und Moreau-Costa-Bartani-Winkels (Costa-B) als sinnvoll beurteilt [34]. Ein weiterer in der Literatur bekannter und in dieser Studie gemessener Winkel ist der Talus-Boden-Winkel, auch Talusdeklination (T-dekl) genannt [5, 29, 33, 97, 112–114].

Dorsoplantare Projektion

In der dorsoplantaren Projektion wird die Messung des Talus-Metatarsale-I-Winkels (TMTI-dp), talocalcanearen Winkels (TC-dp), Calcaneus-Metatarsale-V-Winkels (Calc-MTV) und der talonavicularen Gelenkabdeckung (TNG) empfohlen [34].

TMT-Index

Obwohl die radiologische Winkeldiagnostik seit Jahrzehnten als gängige Methode Verwendung findet, mangelt es weiterhin an Trennschärfe und Grenzwertfestlegung zwischen dem Pes planovalgus und einem als physiologisch einzustufenden Fuß. Bisherige Winkel betrachten das sich dreidimensional präsentierende knöcherne Alignment in nur einer Röntgenebene und führen bei individueller Ausprägung oft zu Fehlinterpretationen und folglich fehlerhafter Therapieindikation [66]. Des Weiteren vermag der fkKSF in manchen Fällen in der lateralen Röntgenprojektion imponieren, während er sich in der dorsoplantaren Röntgenprojektion vollkommen unauffällig präsentiert und umgekehrt [61]. Die Einführung eines Parameters, der beide Röntgenebene zu gleichen Anteilen berücksichtigt und zukünftige Studienergebnisse vergleichbarer macht, erfolgte durch Hamel et al. [1, 61, 66]. Der TMT-Index, gebildet aus der Summe des Talometatarsale-I-Basis-Winkels (TMTIB) und TMTI-lat, ermöglicht eine klare und sichere Differenzierung der Deformität mit der im Vergleich zu den anderen Winkeln höchsten *area under the curve* von 0,998 [5, 61, 66]. Der TMTIB konstruiert sich dabei aus der Taluslängsachse und einer den Mittelpunkt des Talometatarsale-I-Gelenkes mit dem geografischen Mittelpunkt des Taluskopfes verbindenden Linie [61, 66]. Im Vergleich zum TMTI-dp nehmen Vorfußdeformitäten keinen Einfluss auf den TMTIB. Ein Nachteil des TMTIB besteht in seiner teils eingeschränkten Rekonstruktion bei Überlagerung der Rückfußelemente in der dorsoplantaren Röntgenprojektion [66]. Während die Leitlinien

keinen Referenzwert für den TMT-Index nahelegen, beträgt er in einer früheren Studie in der Gruppe der Normalfüße (n= 22) im Mittel -22°. In der Pes planovalgus Gruppe beträgt er im Vergleich im Mittel -52° (n= 22, $p < 0,01$) [34, 66].

1.6 Therapie des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes

Ausgehend von der Diagnose, kommt die Frage nach Therapiemöglichkeiten und deren Indikationen auf. Wie bei der Winkeldiagnostik besteht ein Mangel an evidenzbasierten Empfehlungen [34]. Während ein Konsens bei sich symptomatisch präsentierenden Kindern besteht, ist der sich in der Praxis vorstellende typische Fall asymptomatisch und physiologisch [33, 69]. Er bedarf neben der regelmäßigen klinischen Verlaufskontrolle zunächst keiner weiterführenden Therapie [33, 34]. Aufgrund des Mangels an prospektiven Studien, die langfristig das Risiko eines unbehandelten fkKSF untersuchen, existieren derzeit keine Hinweise auf mögliche Spätfolgen. Ob das Kind zu einem späteren Zeitpunkt symptomatisch wird, lässt sich nicht vorhersagen [22, 69]. Ziel jeder Therapieform ist die Aufrichtung des MLG und Reformation des knöchernen Alignments mit einer Linderung der Beschwerden.

1.6.1 Konservative Therapie

Sobald das Kind das Laufen beginnt, besteht die Empfehlung für häufiges Barfußgehen und Laufen in ausreichend weiten, größengerechten Schuhen. So wird eine bewusste propriozeptive Stimulation der EFM, IFM und des Bandapparates erreicht [34, 45, 119]. Risikofaktoren für den fkKSF, wie kindliches Übergewicht sollten rechtzeitig erkannt und behandelt werden, um eine uneingeschränkte Ausbildung des MLG zu gewährleisten [68, 114].

Physiotherapie

Kommt es trotz dieser Basismaßnahmen zu Symptomen, Bewegungseinschränkungen und einer unzureichenden Aufrichtung des MLG, kann ab dem 6. Lebensjahr eine ergänzende physiotherapeutische Beübung in Form von spielerischer Fußgymnastik im Alltag erfolgen. Ausnahmen stellen der nKSF und sKSF dar, bei denen die Physiotherapie so früh wie möglich begonnen werden sollte [34]. Zusätzlich zum erlernten, bewussten Aufrichten des MLG, können über Dehnungen und manuelle Redression der gesamten unteren Extremität Bewegungseinschränkungen oder eine verkürzte Wadenmuskulatur behandelt werden [34, 68, 106].

Einlagenversorgung

Rund 10 % der Patienten mit einem fkKSF sind mit Einlagen versorgt [117]. Grundsätzlich indiziert bei einem symptomatischen fkKSF und rkKSF, erfolgt die Einlagenversorgung in der Klinik trotz mangelnder Empfehlung oder Notwendigkeit oft auch bei asymptomatischer Klinik. Einlagen können bettende, stützende und sensomotorische Elemente zu unterschiedlichen Anteilen enthalten [34].

Einlagen wird nachgesagt, dass sie durch die Entlastung von plantaren Druckpunkten zu einer Schmerzreduktion führen und die exzessive Pronationsbewegung des Fußes durch stützende Elemente im Bereich der medialen Fußsohle unterbinden [22]. Im Rahmen einer randomisiert kontrollierten Studie konnte jedoch gezeigt werden, dass diese Annahme anzuzweifeln ist [160]. Untersucht wurden drei Gruppen von Kindern im Alter von sieben bis elf Jahren im Hinblick auf die Endpunkte „*gross motor skills, self-perception, exercise efficiency, and pain*“ [160, S. 715]. Zwei der drei Gruppen litten unter einem fkKSF. Die Kinder wurden mit maßgefertigten oder frei im Handel erwerblichen Einlagen versorgt. Es konnte im Vergleich mit der Kontrollgruppe für keinen der Endpunkte ein signifikanter Unterschied gefunden werden, was vermuten lässt, dass kein Vorteil in der individuellen Einlagenanfertigung oder in der Einlagenversorgung im Allgemeinen besteht [160]. Andere Studien zeigten ähnliche Ergebnisse, bis hin zu einem negativen Einfluss von Einlagen auf die Entwicklung des kindlichen Fußes [37, 90, 157, 158]. Es wird angenommen, dass Studien, bei denen ein Vorteil durch Einlagenversorgung gefunden wurde, dieser vielmehr auf den Effekt der ohnehin stattfindenden, physiologischen Aufrichtung des MLG zurückzuführen ist [158]. Es lässt sich die Hypothese aufstellen, dass die Einlagenversorgung einen teuren Therapieansatz darstellt, bei nicht ausreichend belegter Wirksamkeit. Weitere Studien mit einer ergänzenden Vermessung von Winkelmaßen sind notwendig, um eine abschließende Aussage treffen zu können.

1.6.2 Operative Therapie

Bei Persistenz der Symptomatik und unzureichender Aufrichtung des MLG kann neben konservativen Maßnahmen ein chirurgischer Korrekturversuch erfolgen. Dies ist nur selten notwendig [143]. Die operative Therapie unterscheidet Weichteileingriffe, knöcherne Verfahren und die Arthrorise. Oft ist eine Kombination dieser Techniken für ein zufrieden-

stellendes und langfristiges Korrekturergebnis erforderlich [10, 12, 77, 112, 143]. Während Kombinationseingriffe ein höheres Korrekturpotenzial besitzen und zu besseren Studienergebnissen führen, erschwert deren weitaus häufigere Publikation die klinische Evaluation einzelner Verfahren [29, 77, 96, 97, 112]. Die Entscheidung für ein Verfahren richtet sich nach dem Patientenalter, der Skelettreife, der planaren Ausprägung der Deformität, der Symptomatik und dem bisherigen Krankheitsverlauf [12, 34]. Idealerweise werden operative Eingriffe vor dem vollständigen Verschluss der Wachstumsfugen durchgeführt. Bei einem Funktionsdefizit oder einer frühzeitigen Verschlechterung der Symptomatik, kann die Indikation auch in der ersten Lebensdekade gestellt werden [34]

1.6.2.1 Weichteileingriffe

Weichteileingriffe umfassen eine Reihe an Transferverfahren von Sehnen und Ligamenten sowie die empfohlene Abtragung eines akzessorischen Os naviculare. Dieses sogenannte Os tibiale externum nimmt insbesondere Einfluss auf die den Fuß invertierenden Kräfte des am Os naviculare ansetzenden M. tibialis posterior und kann mit einer erheblichen Schmerzsymptomatik einhergehen [9, 12]. Durch die Abtragung kann eine Aufrichtung des MLG erreicht werden [9, 20]. Ein anderes häufig durchgeführtes Verfahren ist die Verlängerung der Wadenmuskulatur und der Achillessehne bei deren Verkürzung und folglich eingeschränkter Dorsalextension mit Knick- und Spitzfußkomponente im *Silfverskjöld-Test* [34, 74, 98]. Weitere Möglichkeiten bestehen in der Transposition der Sehne des M. tibialis anterior vom Os cuneiforme mediale und Os metatarsale I auf das Os naviculare, auch Navikularumschlingung nach Lowmann genannt [89]. Die Raffung des Lig. calcaneonaviculare in Kombination mit einer Raffung und Distalisierung des M. tibialis posterior ist eine weitere Option [89, 164]. Operative Verfahren des Weichteilgewebes werden heute aufgrund mangelnder Erfolge nur selten isoliert durchgeführt [77, 143]. Langfristig vermögen sie es nicht, das knöcherne Alignment zu verändern und führen oft zu Rezidiven bei Gefahr des Funktionsverlustes der beteiligten Strukturen und Veränderungen des Gangbildes [34, 52, 143].

1.6.2.2 Knöcherne Verfahren

Bei den knöchernen Eingriffen werden die Osteotomien von den Arthrodesen unterschieden [10, 12, 77, 112]. Neben den knöchernen Verfahren muss auf die Möglichkeit, der frühzeitig zu erfolgenden temporären Hemiepiphyseodese der distalen Tibia aufmerksam

gemacht werden. Sie ermöglicht die Korrektur einer bestehenden Valgusdeformität im oberen Sprunggelenk bei noch geöffneter Wachstumsfuge der distalen Tibia [65].

Arthrodese

Unter einer Arthrodese wird die irreversible Versteifung eines Gelenkes beispielsweise mittels Stahlsschrauben verstanden. Im Falle des fkKSF besteht primär die Möglichkeit zur Rückfußversteifung im Sinne einer solitären Versteifung des Subtalargelenkes (Articulatio talocalcanearis), Articulatio talonavicularis und Articulatio calcaneocuboidea oder aller drei Gelenke (Triple Arthrodese) [12, 13]. Eine Sonderform stellt die extraartikuläre Arthrodese nach Grice-Green dar. Hier wird nach Präparation eines Knochenspanbettes, durch Anfrischen der Kortikalis der superioren Calcaneusoberfläche und inferioren Talusoberflächen am Übergang von Corpus zu Collum, ein aus der Facies anteriomedialis der proximalen Tibia gewonnener trikortikaler Knochenspann senkrecht zur Tibiachse in den Sinus tarsi eingebracht [13, 64, 73, 155]. Dieser verhindert die Eversionsbewegung des Talokalkanealgelenkes. Anschließend kann eine temporäre Fixerung mit Kirschner-Drähten erfolgen [64]. Folge der Arthrodese ist die eingeschränkte Mobilität bis hin zu einer vollständigen Immobilität des Rückfußes [143]. Trotz langfristig gutem Korrekturergebnis bleibt die Arthrodese als Korrekturmöglichkeit für den aKSF, nKSF und therapieresistenten fkKSF reserviert, um den Patienten den größtmöglichen Bewegungsumfang während des Wachstums zu gewährleisten [22, 79]. Des Weiteren führen die veränderten Kraftverhältnisse am Fuß zu frühzeitiger Arthritis und degenerativen Veränderungen der nicht versteiften Gelenke [128, 143].

Osteotomie

Das Prinzip der Osteotomie wurde erstmals 1893 durch Gleich beschrieben [85]. Im Verlauf der Jahre wurden seine Prinzipien unter anderem durch Koutsogiannis aufgegriffen [85]. Durch die Technik der Calcaneusverschiebeosteotomie kann die bei Rückfußvalgus medial des Calcaneus zu liegen kommende Belastungsachse der unteren Extremität in der Frontalebene korrigiert werden. Dabei wird der posteriore Calcaneus zunächst durch eine vertikal bogenförmige Osteotomie vom restlichen Anteil des Calcaneus getrennt. Anschließend kann er nach medial verschoben und fixiert werden. Durch Reposition des Calcaneus wird die physiologische, den Rückfuß invertierende Kraft der Achillessehne, wiederhergestellt [12, 85]. Insbesondere bei Deformation in der Transversalebene eignet sich

die Osteotomie nach Evans [12, 42]. Nach parallel zum Articulatio calcaneocuboidea erfolgter Osteotomie im Bereich des anterioren Calcaneus wird ein autologer Knochenspan zwischen die beiden getrennten Calcaneushälften eingebracht und dieser so verlängert. Damit kommt es zu dessen Varisierung und folglich reduzierter Eversion und Vorfußadduktion mit Verbesserung der radiologischen Parameter [42, 83]. Bei sagittaler Dominanz stellt die Cotton-Osteotomie eine Alternative dar [12]. Der Operateur bringt hier einen dorsalen Knochenkeil nach erfolgter vertikaler Osteotomie des Os cuneiforme mediale in das Fußskelett ein. Es kommt zur Korrektur des Vorfußvarus des KSF durch Plantarflexion der medialen Fußsäule [26, 145]. Die Kombination aus Calcaneusverschiebeosteotomie, Calcaneusverlängerung nach Evans und der Open-wedge-Osteotomie nach Cotton wird als tarsale Triple-Osteotomie bezeichnet und eignet sich für die Korrektur augesprägter KSF-Deformitäten [63]. Obwohl die Osteotomie nachweislich zu einer klinischen und radiologischen Verbesserung des fkKSF führt, ohne dabei im Vergleich zu einer Arthrodese die Beweglichkeit des Fußes einzuschränken, ist sie nicht die Methode der ersten Wahl für die Behandlung des idiopathischen fkKSF [42, 83, 93, 156]. Die Osteotomie geht außerdem bei multilokulärem Operationsgebiet, durch Entnahme eines autologen Knochenspans aus dem Beckenkamm, mit einem erhöhten Infektions- und Komplikationsrisiko einher [93].

1.6.2.3 Subtalare Arthrorise

Abgeleitet von den griechischen Wörtern *arthro-,* für Gelenk, und *-ereisai*, stützen/ fest anlehnen, stellt die Arthrorise den operativen Versuch dar, die Beweglichkeit eines Gelenkes zu limitieren. Es handelt sich um die häufigste Operationsmethode zur Korrektur des kKSF [34]. Der Ursprung der Arthrorise geht auf Chambers zurück, dessen Implantation eines Knochenkeils 1946 zwischen Calcaneus und Talus zu einer Korrektur des nKSF führte [24]. Erste, mit dem heutigen Stand der STA vergleichbare Studienergebnisse wurden durch Haraldson und LeLièvre publiziert [67, 87]. Durch die Implantation autologer, frei im Sinus tarsi flottierende Knochenkeile prägten sie den Begriff der lateralen Arthrorise und setzten den entscheidenden Anstoß für deren Weiterentwicklung. Haraldsson kombinierte die STA mit einer Navikularumschlingung und LeLièvre bei unzureichendem Korrekturergebnis mit einer Metatarsalarthrodese [67, 87]. Beginnend mit Subotnick wurden in den folgenden Jahren zahlreiche Implantate variierend in Form, Material und Wirkmechanismus entwickelt [142]. Smith et al.

entwickelten 1983 eine stöpselförmige Polyethylen-Endorthese, die sie unterhalb des Processus lateralis tali in den Calcaneus zementierten [135]. Viladot publizierte 1992 erste Erfolge mit einem weinglasförmigen, endosinotarsal gelegenen Silikonimplantat [150]. Das Prinzip der Schraubenarthrorise wurde erstmals durch Alvarez im Jahre 1970 beschrieben und durch Buruturan et al. veröffentlicht [18]. Giannini et al. entwickelten daraufhin ein expandierendes und bioabsorbierendes Implantat aus Polylactid durch dessen Eigenschaften auf die Explantation des Implantats nach Wachstumsabschluss verzichtet werden kann [53, 55, 56].

Indikation und Kontraindikation für die subtalare Arthrorise

Die Indikation für die STA besteht grundsätzlich bei einem fkKSF mit persistierender Beschwerdesymptomatik trotz ausgereizter konservativer Therapie. Es ist essenziell, dass alle Komponenten der Deformität passiv redressierbar sind, da nur so die mechanische Wirksamkeit der STA gewährleistet werden kann [34]. Kontraindikationen stellen neben einer Arthritis der betroffenen Gelenke, eine signifikante Osteoporose, Allergien auf verwendete Materialien, vorhergegangene Infektionen, ein rKSF sowie ein Talus verticalis dar [15, 94]. Es besteht bisher kein Konsens über das Patientenalter zum Zeitpunkt der Operation. Einige Publikationen schlagen den Zeitraum zwischen dem 9. und 13. Lebensjahr vor. Zu diesem Zeitpunkt ist das Potenzial einer Spontankorrektur bereits gering, bei noch ausreichendem Korrekturpotenzial der STA im Falle von offenen Wachstumsfugen [2, 33, 54, 79]. Es ist zu berücksichtigen, dass die Korrektur mindestens zwei Jahre in Anspruch nimmt, sodass bei einer STA nach dem 12. Lebensjahr meist unzureichende Korrekturergebnisse zu erwarten sind [47]. Die STA wird bis zum Wachstumsabschluss in situ belassen und kann anschließend durch eine sekundäre Operation entfernt werden. Auch nach Explantation der STA hält die Korrektur nachweislich an [33, 131].

Wirkmechanismus und Klassifikation der Implantate nach Vogler

Die heutigen Implantate sind das Ergebnis von mehr als 50 Jahren chirurgischer Evolution. Vogler implementierte 1987 eine noch heute gültige Klassifikation der Implantate [10, 40, 152]. Mithilfe dieser Klassifikation lässt sich der biomechanische Wirkmechanismus der STA nachvollziehen. Es können drei Typen von Implantaten unterschieden werden (siehe Abbildung 1):

1. Implantate, die die Achse des Subtalargelenkes verändern („*axis-altering*“) [97, S. 203]. Sie bestehen aus einem vertikal im Sinus tarsi verankerten Stamm und einem Kopfteil, das unter dem lateralen Talusfortsatz zu liegen kommt. Die subtalare Gelenkachse wird angehoben und die Eversion des Calcaneus verhindert. Ein Beispiel ist die von Smith und Millar entwickelte Polyethylen-Endorthese [97, 107, 135].
2. Implantate, die außerhalb des Sinus tarsi anterior des Processus lateralis tali im Calcaneus oder Talus verankert werden („*impact-blocking*“) [97, S. 203]. Sie verhindern das anteriore Abrutschen und die inferiomediale Rotation des Talus. Hierunter wird die Schraubenarthrorise, auch *subtalar extraarticular screw arthroereisis* (SESA) genannt, gezählt, wie die Calcaneus-Stopp-Methode oder die Talusschraube [79, 97].
3. Implantate, die horizontal im Sinus tarsi positioniert werden („*self-locking*“) [97, S. 203]. Sie unterbinden den Kontakt zwischen dem Sinus tarsi und dem lateralen Talusfortsatz, indem dieser bei Eversion im Subtalargelenk in direkten Kontakt mit dem Implantat kommt. Plantarflexion, Adduktion des Talus und folglich ein Rückfußvalgus werden so verhindert [107]. Beispiele sind das bioresorbierbare Implantat von Giannini et al. oder das Implantat von Maxwell et al. [56, 94, 97].

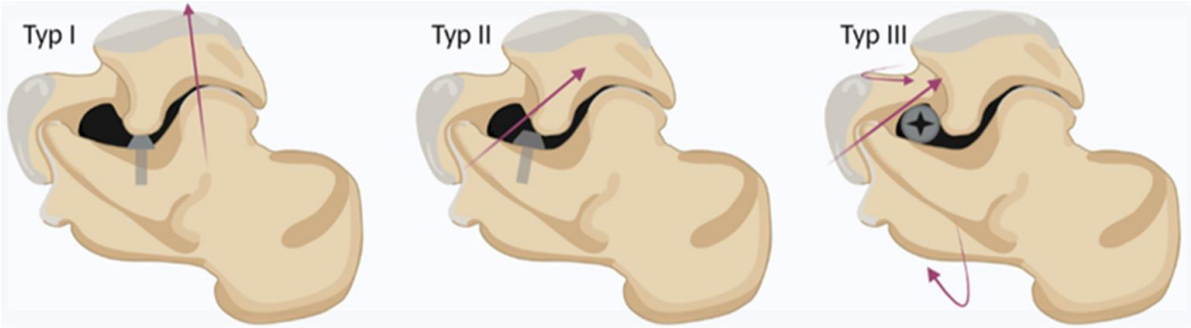


Abbildung 1: Implantattypen der subtalaren Arthrorise und deren biomechanischer Wirkmechanismus *in Anlehnung an: [10, S. 441, 40, S. 148, 95, S. 904]*

In dieser Abbildung sind die nach Vogler zu unterscheidenden Implantattypen dargestellt, die bei der subtalaren Arthrorise zum Einsatz kommen können [152]. Die Pfeile zeigen die Richtung der durch das Implantat generierten Kräfte an. Es können drei Typen von Implantat unterschieden werden. Typ I („axis-altering“): senkrecht im Calcaneus verankerter Stamm mit unter dem Processus lateralis tali zu liegen kommenden Kopfteil [97, S. 203, 107]. Das Implantat führt zu einer Anhebung der subtalaren Gelenkachse. Typ II („impact-blocking“): senkrecht im Calcaneus oder Talus verankertes Implantat mit vor dem Processus lateralis tali zu liegen kommenden Kopfteil. Es verhindert das Abrutschen des Talus nach anterior und dessen inferiomediale Rotation [79, 97, S. 203]. Typ III („self-locking“): endosinotarsal gelegenes Implantat, das den Kontakt zwischen Sinus tarsi und lateralem Talusfortsatz unterbindet. Es folgt die Reduktion der Plantarflexion und Adduktion des Talus sowie die Aufrichtung des Rückfußvalgus [97, S. 203, 107].

Arangio et al. entwickelten 2004 ein biomechanisches Kadavermodell [4]. Sie untersuchten die auf die Strukturen des Fußes wirkenden Kräfte bei 683 N Belastung. Die Untersuchung wurde vergleichend für einen normalen Fuß, einen KSF und einen mittels STA versorgten fkKSF durchgeführt. Die Studie zeigte, dass 15 % der Last bei einem normalen Fuß von den zwei medialen Metatarsalknochen getragen werden, während es bei einem KSF 31 % sind. Mittels STA wurde die Belastung auf 13 % reduziert. Im Vergleich zum physiologischen Fuß nimmt die Kraft, die von der Plantaraponeurose im Faserverlauf von Calcaneus zum Os metatarsale V bzw. Os metatarsale I aufgewendet werden muss, bei einem KSF zu und kann durch die STA reduziert werden bzw. nimmt bei einem KSF ab und kann durch STA erhöht werden. Die STA vermochte außerdem die Belastung des Articulatio talonavicularis zu reduzieren.

Häufig kann bei zunächst einseitig erfolgter Operation eines sich beidseitig präsentierenden fkKSF eine spontane Korrektur der nicht operierten Seite beobachtet werden [122]. Es wird deshalb neben einer direkt mechanischen Wirkung auf die Gelenkparteien ein ergänzender neuropropriozeptiver Wirkmechanismus des Sinus tarsi für die Anpassung und Korrektur des gesamten Gangbildes postuliert [5, 32, 33, 124]. Akiyama et al. identifizierten hier durch neurohistologische Untersuchung des Sinus tarsi freie Nervenendigungen und Mechanorezeptoren mit nozizeptiven Eigenschaften [3]. Der von den Rezeptoren erfasste mechanische Impuls wird in afferente Nervenimpulse umgewandelt, die schlussendlich zu einer Spannungsanpassung der im Sinus tarsi verankerten ligamentösen Strukturen führen. Diese beeinflussen direkt die Biomechanik des unteren Sprunggelenkes [3, 5]. In die ligamentösen Strukturen ziehen Sehnenfasern des M. peroneus tertius, M. extensor digitorum longus, die subtalare Gelenkkapsel, Fasern des Retinaculum extensorum inferius sowie das Lig. talocalcaneum interosseum ein [3, 5]. Die Veränderung dieser wachstumslenkenden und achskorrigierenden Nervenimpulse durch die STA trägt zu deren Erfolg bei.

Vor- und Nachteile der STA im Vergleich mit alternativen operativen Methoden

Im Gegensatz zu einer Arthrodese oder einer Osteotomie handelt es sich bei der STA um ein reversibles Verfahren bei gleichzeitiger Erhaltung der physiologischen Gelenkbeweglichkeit [1, 112]. Das minimalinvasive Vorgehen durch einen 1,5 cm langen Zugangsweg führt dazu, dass die Patienten postoperativ weniger Schmerzen verspüren und sich

schneller erholen [133]. In einigen Fällen konnte die STA sogar unter einfacher Lokalanästhesie durchgeführt werden [35]. Des Weiteren ist eine sofortige Vollbeastung möglich, eine Gipsruhigstellung entfällt und beide Füße können in einem Engriff adressiert werden. Studien zeigten, dass sich die Patienten nach einer STA wieder deutlich häufiger und intensiver sportlich betätigen [15, 31, 113]. Im Vergleich zu einer Osteotomie ist das Infektionsrisiko bei der STA deutlich reduziert [5, 82, 93, 112, 113]. Nachteile der STA liegen in deren Komplikationen. Es liegt in der Hand des Chirurgen zu entschieden, ab wann das Korrekturpotenzial der STA nicht mehr ausreicht und eine Kombination mit weiteren operativen Verfahren oder die vollständige Konversion zu einem anderen knöchernen Verfahren in Erwägung gezogen werden sollten. Dies ist meist problemlos möglich [1, 34, 47].

Mögliche Komplikationen der subtalaren Arthrorise und deren Ätiologie

Patienten und deren Eltern müssen explizit auf die möglichen Komplikationen der STA hingewiesen werden, um diese frühzeitig zu erkennen und schwerwiegende Folgen bis hin zu einer Entfernung des Implantates zu vermeiden [99, 123]. Die Komplikationsrate bleibt nicht eindeutig beschrieben und wird auf 4,8 % bis 18,6 % geschätzt bei der Notwendigkeit zur Entfernung des Implantates in 7,1 % bis 19,3 % der Fälle [99]. Grob werden die allgemeinen von den Implantat-spezifischen Komplikationen unterschieden [107].

Zu den allgemeinen Komplikationen zählen lokale Symptome im Operationsgebiet, wie Narbenschmerz, Wundinfektionen, Wahrnehmungsstörungen bei Verletzung der Hautnerven, Osteonekrosen des Talus und der Peronealspasmus mit und ohne Kontraktur der Muskulatur. Ein Peronealspasmus ist definiert, als eine unwillkürliche Verkrampfung der Peronealmuskulatur, die gleichzeitig mit einem Funktionsverlust des M. tibialis anterior einhergeht [62]. Es konnte gezeigt werden, dass Patienten mit Schmerzen im Bereich des Sinus tarsi eine verlängerte peroneale Reaktionszeit aufweisen. Dies lässt sich theoretisch durch eine Irritation der Mechanorezeptoren des Retinaculum extensorum inferius mit resultierender Fehlfunktion, der die Peronealmuskulatur innervierenden ɣ-Motorneurone erklären [120, 121]. Die Spastik kann durch Gangschulung und Physiotherapie erfolgreich behoben werden. Bei Persistenz ist eine Explantation in Erwägung zu ziehen [10, 33, 112]. Bei Fehlpositionierung des Implantats oder Implantation einer falschen Größe kann es zu einer Über- bzw. Unterkorrektur der Deformität kommen. Dadurch steigt das Risiko für eine aseptische Lockerung und Migration der Schraube oder den Schraubenbruch mit der

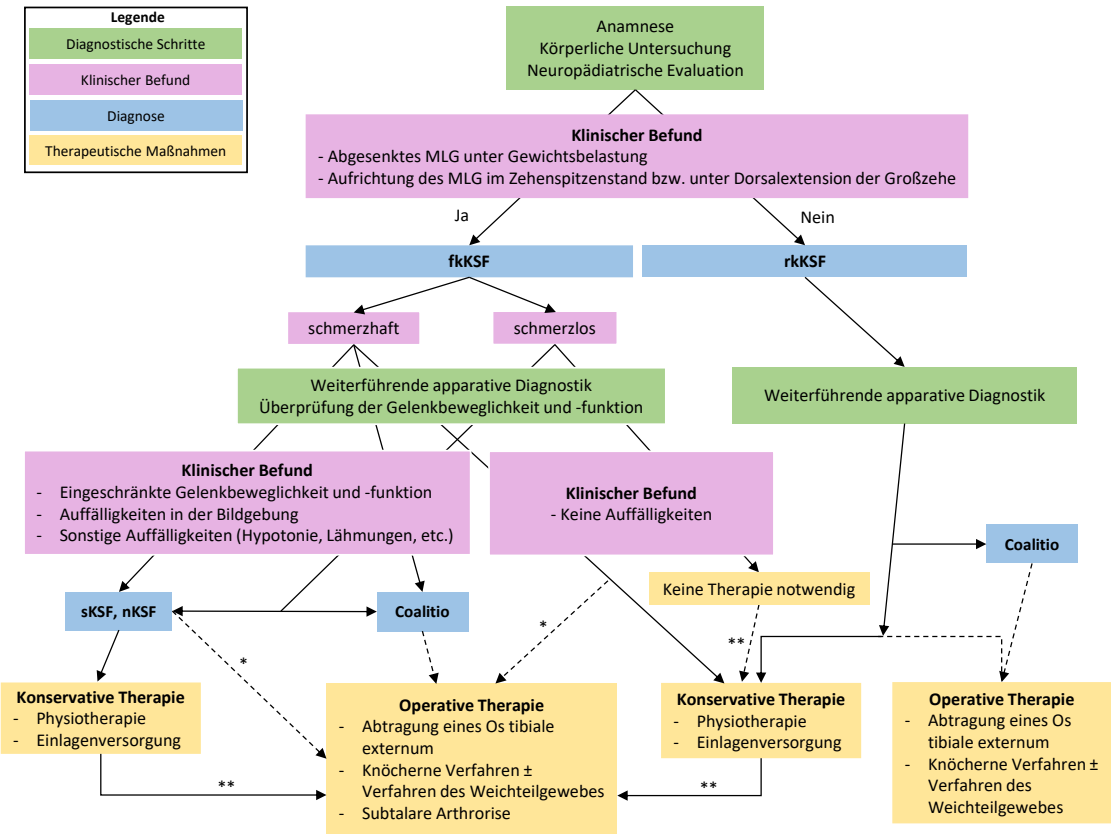
Gefahr einer Fraktur der beteiligten Knochen [1, 10, 22, 33, 107, 113, 126, 131]. Eine der häufigsten Komplikationen ist das Sinus-tarsi-Syndrom. Es kennzeichnet sich primär durch Schmerzen im Bereich des lateralen Fußrückens in Ruhe und bei Belastung, die sich bei manuellem Druck verstärkt provozieren lassen [15, 31, 99, 108, 129, 168]. Es geht einher mit einem Instabilitätsgefühl im Rückfuß [3]. Die Ursache liegt vermutlich in einer Implantat bedingten mechanischen Irritation und damit einhergehenden Fehlfunktion der nozizeptiven Nervenendigungen und ligamentösen Strukturen im Sinus tarsi [3, 31]. Eine andere Ursache ist ein Implantat in der falschen Größe [129, 151, 166]. Eine vollständige Resolution der Beschwerden kann durch die Metallentfernung erreicht werden [31, 99, 108, 133, 168]. Implantat-spezifische Komplikationen lassen sich unter anderem auf dessen Material, Form und biomechanischen Eigenschaften nach Vogler zurückführen [152]. Darunter werden allergische und Abstoßungsreaktionen zusammengefasst sowie die Degradation insbesondere bei bioresorbierbaren Implantaten [107].

Endosinotarsale Implantate (Typ III) vs. Exosinotarsale Implantate (Typ II)

Memeo et al. zeigten, dass im direkten Vergleich zwischen einem endosinotarsalen und exosinotarsalen Implantat beide zu einer statistisch signifikanten klinischen und radiologischen Korrektur des fkKSF führen und zwischen den Korrekturergebnissen kein statistisch signifikanter Unterschied besteht [97]. Die Autoren schlossen daraus, dass die Entscheidung für eines der Verfahren von den Präferenzen und der Expertise des Chirurgen abhängig gemacht werden kann [97]. Dennoch muss darauf hingewiesen werden, dass ein endosinotarsales Implantat im Gegensatz zu einem exosinotarsalen Implantat mit zusätzlichen Komplikationen einhergeht. Eine Komplikation die häufiger bei endosinotarsalen Implantaten auftritt, ist die Über- bzw. Unterkorrektur durch Implantatmigration [15, 31, 129]. Die finale Größe des Implantates wird erst intraoperativ durch die Einschätzung der Größe durch den Operateur und Eindrehen verschiedener Probeimplantate ausgewählt. Diese Entscheidung ist fehleranfällig und kann die höhere Komplikationsrate erklären [15, 31, 129]. Ein entscheidender Vorteil der extraartikulären Implantation ist außerdem, dass die propriozeptiven Strukturen im Sinus tarsi geschont werden [5].

1.7 Schematische Zusammenfassung der Einleitung

Die Abbildung 2 fasst die wichtigsten Erkenntnisse der Einleitung im Hinblick auf die Klinik, die Diagnostik sowie die Therapie des kKSF schematisch zusammen. Die Abbildung trägt außerdem zum Verständnis der in Kapitel 2 geschilderten Methoden bei.



* Bei entsprechender Klinik und fortgeschrittenen Patientenalter kann in seltenen Fällen eine primäre Operationsindikation gestellt werden. Dies sollte unter Berücksichtigung des weiterhin bestehenden intrinsischen Korrekturpotenzials des KSF nach dem 10. Lebensjahr erfolgen.
** Reevaluation der Therapieindikation nach 6 Monaten, Überprüfung der Notwendigkeit für eine Eskalation der Therapie.

Abbildung 2: Diagnose- und Therapiealgorithmus des kindlichen Knick-Senk-Fußes *in Anlehnung an: [34, S. 24]*

Das Flussdiagramm bietet einen Überblick über die Klinik sowie den Diagnose- und Therapiealgorithmus des kKSF. Diagnostische Schritte sind in Grün, klinische Befunde in Rosa, Diagnosen in Blau und therapeutische Maßnahmen in Gelb illustriert. Durchgezogene Pfeile illustrieren Therapiemaßnahmen erster Wahl. Gestrichelte Pfeile weisen auf Therapiemaßnahmen hin, die unter bestimmten Voraussetzungen in Erwägung gezogen werden können. Auf Grundlage der Anamnese, der körperlichen Untersuchung und der neuropädiatrischen Evaluation wird zunächst zwischen einem fkKSF und rkKSF unterschieden. Letzterer kann nach weiterführender Abklärung durch apparative Diagnostik sowohl konservativ als auch operativ behandelt werden. Bei Diagnose eines fkKSF muss unterschieden werden zwischen der symptomatischen und asymptomatischen Form. Bei Letzterer kann eine konservative Therapie in Erwägung gezogen werden. Grundsätzlich ist jedoch keine Therapie notwendig oder indiziert. Unabhängig von der Schmerzsituation sollte eine Abklärung der Ätiologie des fkKSF erfolgen. Bei eingeschränkter Gelenkbeweglichkeit und -funktion oder sonstigen Auffälligkeiten, z.B. in der Bildgebung, kann es sich um einen sKSF, nKSF oder eine Coalito handeln. Eine Coalitio kann operativ abgetragen werden. Ein fkKSF andere Ätiologie kann konservativ oder bei entsprechender Klinik primär operativ behandelt werden (*). Sechs Monate nach Beginn einer konservativen Therapie erfolgt eine Reevaluation der therapeutischen Maßnahmen und des klinischen Befundes. Bei erfolglosem Ausreizen konservativer Maßnahmen kann die Eskalation zu einer operativen Therapie notwendig sein. MLG= mediales Längsgewölbe, kKSF= kindlicher Knick-Senk-Fuß, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, rkKSF= rigider kindlicher Knick-Senk-Fuß, sKSF= syndromaler Knick-Senk-Fuß, nKSF= neurogener Knick-Senk-Fuß.

1.8 Zielsetzung der Arbeit

Die STA ist ein sich ständig weiterentwickelndes Verfahren, welches aufgrund seiner einfachen Umsetzung und der minimalen Belastung für die Betroffenen viele Unterstützer gefunden hat. Eine 2015 durchgeführte Studie zeigte jedoch, dass einer von drei US-amerikanischen Operateuren und einer von fünf Chirurgen außerhalb der USA die STA nicht länger durchführt [133]. Das liegt unter anderem daran, dass die derzeitige Studienlage von Publikationen dominiert wird, die nur kleine Studienpopulationen beobachten. Die Patienten werden häufig Kombinationseingriffen unterzogen und nach der Operation nur selten bis zum Verschluss der Wachstumsfugen begleitet. Es handelt sich bei diesen Studien primär um Fallserien und Metaanalysen und langfristige Korrekturergebnisse fehlen. Das Wissen um Komplikations- und Revisionsraten ist spärlich und divers [75]. Die individualisierte Medizin rückt seit geraumer Zeit zunehmend in den Vordergrund der Behandlungs- und Therapieentscheidungen. Dennoch hat bisher nur eine Studie versucht, in dieser Hinsicht neue Erkenntnisse für die Therapie des fkKSF zu gewinnen und Stellschrauben, die der Optimierung von Diagnostik, Therapie und Outcome der STA dienen können, zu identifizieren [114]. Der wahre Einfluss der STA und ihr Korrekturpotenzial bleiben nur unscharf definiert und die derzeitige Literatur sehr heterogen und stark vom Publikations-Bias beeinflusst. Das bedeutet, dass tendenziell statistisch signifikante und in den Augen der Wissenschaft positive Ergebnisse veröffentlicht werden, was die Studienlage verzerrt.

Ziel dieser Studie war es, Klarheit bezüglich der Grenzen und Möglichkeiten der STA zu schaffen und anhand der Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit neue klinisch relevante Handlungsvorschläge abzuleiten. Dieses Ziel sollte durch die Evaluation einer im Vergleich mit der Literatur großen Studienpopulation und der Beobachtung dieser bis nach der Explantation durch die Beantwortung von vier Leitfragen, welche das klinische und radiologische Outcome beschreiben, realisiert werden:

1. Führt die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode zu einer statistisch signifikanten radiologischen Korrektur des fkKSF?
2. Führt die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF?
3. Welche Variablen beeinflussen die Einschätzung von der STA profitiert zu haben?

4. Welche Variablen nehmen Einfluss auf den Behandlungsverlauf bei der operativen Versorgung des fkKSF durch eine STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode?

Nach einer ausführlichen Literaturrecherche wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich die Winkel im Vergleich zum präoperativen Vorbefund postoperativ verändert zeigen. Über eine statistische Signifikanz dieser Veränderung wurde gemutmaßt. Bezüglich der zweiten Leitfrage wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Mehrheit der Patienten nach der STA eine klinische Verbesserung des fkKSF im Hinblick auf das optische Erscheinungsbild und die Symptomatik zeigt. Hinsichtlich der letzten zwei Leitfragen wurde die Vermutung geäußert, dass Unterschiede im Behandlungsverlauf zwischen den Patienten und deren Einschätzung von der Operation profitiert zu haben bestehen. Es wurde angenommen, dass diese Unterschiede auf den Einfluss unbekannter Variablen zurückführen sind, deren Natur in den individuellen Patienteneigenschaften, wie z. B. dem Geschlecht, vermutet wurde.

2 Material und Methoden

2.1 Studiendesign und Datenerhebung

Bei dieser Studie handelt es sich um eine retrospektive, klinische Datenanalyse zur Untersuchung des klinischen und radiologischen Outcomes bei operativer Versorgung von fkKSF mittels STA (Typ II) in der Klinik für Orthopädie des Universitätsklinikum Ulm (UKU) zwischen dem 12.12.2007 und 02.07.2018. Die Durchführung der Studie wurde durch die Ethikkommission der Universität Ulm genehmigt (Nummer 168/20).

Für die Datenerhebung wurden im Rahmen eines mehrstufigen Verfahrens zunächst alle Patienten in die Studie eingeschlossen, die nach Suchlauf in der klinikeigenen Datenbank mittels STA in der Klinik für Orthopädie des UKU operativ versorgt wurden. Dabei wurden als Schlagworte die Operationsklassifizierung *5-809.1m: Andere offen chirurgische Gelenkoperationen: Arthrorise: Unteres Sprunggelenk* und die ICD-10 Diagnoseschlüssel *Q66: Angeborene Deformität der Füße* und *M21: Sonstige erworbene Deformitäten der Extremitäten* verwendet. Das aus diesem Suchlauf hervorgegangene potenzielle Patientenkollektiv von 397 Patienten (794 Füße) wurde anschließend im Rahmen der chronologischen Aufarbeitung der elektronischen Patientenakten, einer auf klinischen und radiologischen Einschlusskriterien basierenden Prüfung unterzogen. Die zeitgleich zu dieser Prüfung erhobenen Patientendaten wurden in einer dafür mithilfe von *Microsoft® Excel®* (Version 2112) erstellten Datentabelle anonymisiert gesammelt. Die Datenerhebung wurde in vier zeitlich definierte Perioden untergliedert: Prä-Implantation, Implantation, postoperativer Verlauf und Explantation. Die Erhebung der klinischen Daten wurde durch die radiologische Winkeldiagnostik vor der Implantation und der Explantation ergänzt.

2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Um das radiologische Outcome zu untersuchen, war das entscheidende Einschlusskriterium eine vollständige und korrekt durchgeführte radiologische Bildgebung des betroffenen Fußes (siehe 1.5.3.3). Es wurden nur Patienten berücksichtigt, bei denen sich in der präoperativen Bildgebung zeigte, dass die Wachstumsfugen der an der Winkelkonstruktion beteiligten Fußknochen noch geöffnet sind. Somit war ein chirurgisches Korrekturpotenzial bei unvollständiger Skelettreife gegeben. Zur Beurteilung des klinischen Outcomes wurden neben einer vollständigen Verlaufsdokumentation die Diagnose eines idiopathischen fkKSF vorausgesetzt. Der Studienausschluss erfolgte bei Ausprägung weiterer den

fkKSF begleitenden Fußfehlstellungen und Erkrankung des Bindegewebes oder des neuromuskulären Apparates. Um gezielt das Korrekturpotenzial der STA zu beurteilen, erfolgte ein Studienausschluss ebenfalls, wenn bereits ein Korrekturversuch mittels Verfahren des Weichteilgewebes oder knöchernen Verfahren unternommen wurde (siehe Abbildung 3).

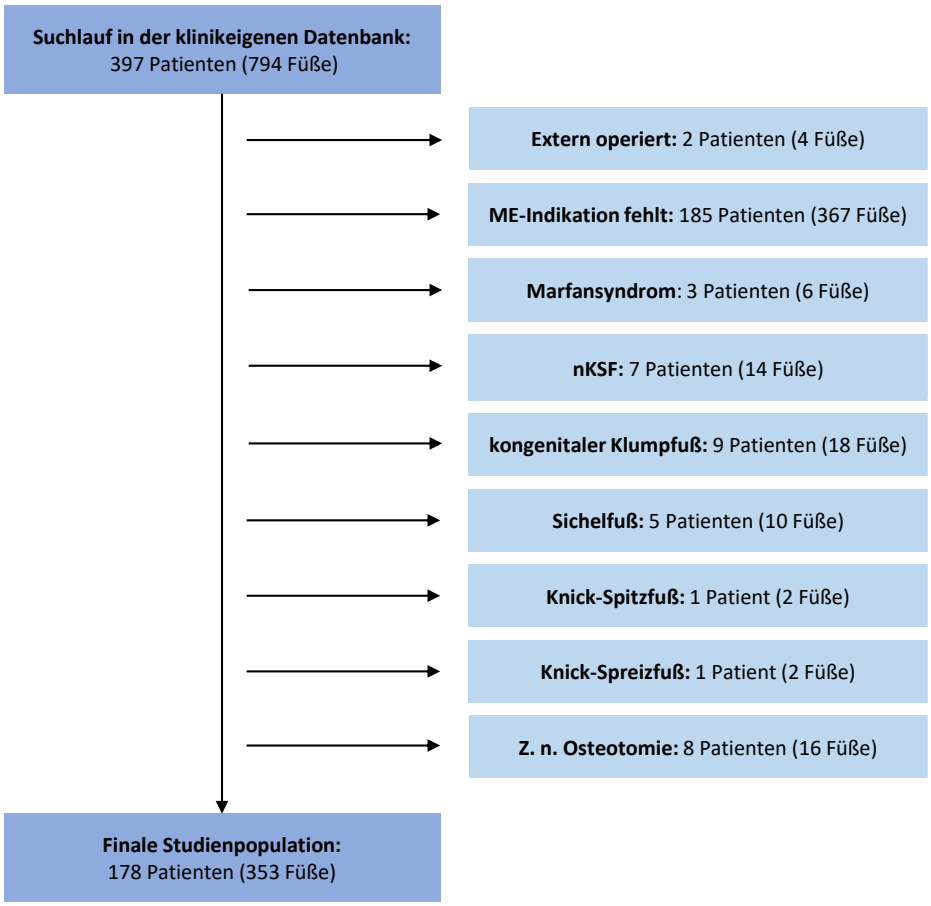


Abbildung 3: Selektionsprozess der Studienpopulation

Das Flussdiagramm bietet eine Übersicht über den Selektionsprozess, der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Studienpopulation. Berücksichtigt wurden alle in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 mittels STA versorgten Patienten mit fkKSF. In Dunkelblau ist die ursprüngliche Studienpopulation nach Suchlauf in der klinikeigenen Datenbank bzw. die finale Studienpopulation nach Überprüfung der Ein- und Ausschlusskriterien illustriert. In Hellblau sind aus der Studie ausgeschlossene Patienten dargestellt mit der entsprechenden Begründung. ME= Metallentfernung, nKSF= neurogener Knick-Senk-Fuß, Z. n.= Zustand nach, UKU= Universitätsklinikum Ulm, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß.

Nach einer Überprüfung der klinischen Einschlusskriterien kam es zum Ausschluss von 2 Patienten (4 Füße), da diese extern operiert wurden. Bei 185 Patienten (367 Füße) fehlte die Indikation zur Metallentfernung (ME) bei noch geöffneten Wachstumsfugen oder unterbliebener Wiedervorstellung der Patienten. Die klinische Dokumentation war damit unvollständig. Der Ausschluss erfolgte bei 3 Patienten (6 Füße) bei Marfansyndrom und 7 Patienten (14 Füße) bei nKSF. Eine begleitende Fußdeformität lag bei insgesamt 17 Pati-

enten vor. Davon litten 9 Patienten (18 Füße) an einem kongenitalen Klumpfuß, 5 Patienten (10 Füße) an einem kongenitalen Sichelfuß und jeweils 1 Patient (2 Füße) an einem Spitzfuß bzw. Spreizfuß. Bei 8 Patienten (16 Füße) wurde neben einer subtalaren Arthrorise eine Calcaneusverschiebeosteotomie nach Koutsogiannis-Gleich durchgeführt, da die STA bei starker Ausprägung des fkKSF überfordert gewesen wäre. Am Ende der Datenerhebung stand ein Patientenkollektiv von 178 Patienten (353 Füße).

2.1.2 Prä-Implantation

Dokumentationsbeginn stellte die erste klinische Präsentation in der kinderorthopädischen Sprechstunde dar. Hier wurden die Patienten gemäß den Empfehlungen der Leitlinie körperlich untersucht und die Krankengeschichte erhoben (siehe 1.5.1 und 1.5.2). Um die Diagnostik zu vervollständigen und den Status der Wachstumsfugen zu eruieren, wurden bei allen Patienten präoperativ Röntgenaufnahmen beider Füße im Stehen unter Belastung in der lateralen und dorsoplantaren Projektion aufgenommen. Nach Ausreizen der konservativen Therapie und bei weiterhin bestehender Beschwerdesymptomatik bestand die Indikation für die operative Versorgung. Bei Einverständnis der Eltern und nach erfolgter Aufklärung vonseiten des behandelnden Orthopäden wurde ein Termin für die stationäre Aufnahme vereinbart. Anschließend stellten sich die Patienten ambulant zur Narkosevoruntersuchung vor. Anhand des Anästhesieprotokolls wurden Gewicht, Größe, Alter und Geschlecht der Patienten erhoben und der Body-Mass-Index (BMI) berechnet. Aus den Ambulanzbriefen konnten Informationen über die bisher ergriffenen Therapiemaßnahmen und die bestehenden Beschwerden gewonnen werden. Dazu zählten eine bestehende Schmerzsymptomatik mit der entsprechenden Lokalisation, eine Verkürzung der Wadenmuskulatur, ein bestehendes Stolperphänomen oder ein Schuhkonflikt. Die Wiedervorstellung der Patienten erfolgte am Morgen des operativen Eingriffs.

2.1.3 Implantation

Schraubentypus

Im Rahmen dieser Studie wurden kanülierte bzw. nicht-kanülierte Spongiosaschrauben aus Stahl verwendet (siehe Abbildung 4). Die Schrauben hatten abhängig von der Höhe des Calcaneus eine Länge von 25-40 mm und einen Durchmesser von 6,5 mm.



Abbildung 4: Kanülierte und nicht-kanülierte Spongiosastahlschraube

Die Abbildung zeigt eine kanülierte (jeweils links) bzw. nicht-kanülierte Spongiosastahlschraube (jeweils rechts), die während des Erhebungszeitraumes (2007-2018) für die operative Versorgung von fkKSF in der Klinik für Orthopädie des UKU mittels STA verwendet wurden. Die Schrauben sind 30 mm lang, bei einem Durchmesser von 6,5 mm. Fotografisch können in der Abbildung verschiedene Perspektiven unterschieden werden. Diese sollen zum Verständnis der in 2.1.3 beschriebene Operationstechnik beitragen und den bautechnischen Unterschied zwischen den zwei Schraubentypen, die Kanülierung, veranschaulichen. UKU= Universitätsklinikum Ulm, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, STA= subtalare Arthrorise.

Operationstechnik

Die Patienten befanden sich für den operativen Eingriff nach durchgeführter Regional- und/oder Allgemeinnarkose und eventueller antibiotischer Prophylaxe in Rückenlage. Nach Anlegen der Oberschenkelblutsperre, operativer Abdeckung und Hautdesinfektion erfolgte ein Hautschnitt von rund 1,5 cm Länge über dem Sinus tarsi entlang der Hautspaltenlinien. Nachfolgend kam es zu einer scharfen Präparation in das Subkutangewebe und Vorarbeiten mittels Präparierschere bis in den Sinus tarsi. Dabei wurde auf die Schonung des sensiblen Astes des N. suralis geachtet. Mittels Luer und Raspatorium konnte die Knochenoberfläche des Calcaneus dargestellt und der Eintrittspunkt für die Schraube lokalisiert werden. Unter radiologischer Kontrolle erfolgte das Vorlegen eines 1,6 mm Kirschner-Drahtes in den Calcaneus bei maximaler manueller Inversion des Fußes. Das Einbohren des Kirschner-Drahtes erfolgte parallel zur Fibula und dem Calcaneocuboidalgelenk. Der Führungsdraht wurde mit einem 3,2 mm kanülierten Bohrer überbohrt und die zuvor abgemessene Spongiosastahlschraube, bei einer kanülierten Schraube über einen 2,0 mm Kirschner-Draht, in den Calcaneus eingedreht, bis diese unter dem Processus lateralis tali zu liegen kam. Nach erneuter Bildwandler-Kontrolle des Schraubenkopf-

überstandes erfolgte eine Lagekontrolle der Schraube in Eversionsbewegung des Calcaneus. Bei weiterhin bestehendem Rückfußvalgus wurde die Unterkorrektion der Schraube durch ein schrittweises Herausdrehen korrigiert. Bei einem bestehenden Rückfußvarus wurde die Schraube zum Unterbinden einer Überkorrektion weiter in dem Calcaneus hineingedreht. Die Blutsperre wurde geöffnet. Auf die Blutstillung und Spülung des Wundgebietes folgte der schichtweise Wundverschluss mittels Subkutannaht und Hautnaht in Rückstichtechnik. Die weitere Wundversorgung erfolgte mittels Auflage von Kompressen und Sofratüll sowie elastokompressiver Wickelung des Unterschenkels. Die Operation wurde durch erneute Bildgebung in dorsoplantarer uns seitlicher Strahlenprojektion vervollständigt und beendet. Der Operationsbericht und der Entlassungsbrief dienten der Erfassung der Dauer des operativen Eingriffs in Minuten und des stationären Aufenthaltes in Tagen, intraoperativen Komplikationen, dem Alter der Patienten zum Zeitpunkt des Eingriffes und dem verwendeten Schraubentypus. Die Weiterbehandlung der Patienten erfolgte stationär.

Nachbehandlungsprotokoll

Unter regelmäßigen Wundkontrollen und Verbandswechseln bestand das weitere Prozedere in einer beschwerdeabhängigen Vollbelastung unter Analgesie. Die Mobilisation wurde postoperativ unter krankengymnastischer Anleitung zunächst am hohen Gehwagen und Unterarmgehstützen durchgeführt. Die Patienten wurden unter Vollmobilisation und bei reizlosen Wundverhältnissen in die ambulante und häusliche Versorgung entlassen mit Bitte um Entfernung des Nahtmaterials bei abgeschlossener Wundheilung ab dem 14. postoperativen Tag durch den weiterbehandelnden Facharzt. Es wurde um Einhaltung einer sechswöchigen Sportkarenz und Wiedervorstellung in der kinderorthopädischen Sprechstunde zur klinischen Verlaufskontrolle sechs Wochen postoperativ gebeten.

2.1.4 Postoperativer Verlauf

Im Rahmen der ersten internen postoperativen Verlaufskontrolle wurde die bis dato stattgefundene Aufrichtung des MLG im Stand, Gang sowie Zehenspitzenstand beurteilt. Davon ausgehend wurde die aktive und passive Beweglichkeit der unteren Extremität untersucht. Anhand der Ambulanzbriefe konnte erhoben werden, ob die Patienten zu diesem Zeitpunkt Schmerzen oder sonstige Beschwerden verspürten, die Sportkarenz eingehalten hatten und ob sie noch Analgetika benötigten. Die Narbenverhältnisse wur-

den beurteilt und ein eventueller Druckschmerz provoziert. Bei unauffälligem Befund wurden die Patienten um eine jährliche Wiedervorstellung gebeten. Dieses Vorgehen wurde wiederholt, bis radiologisch vollständig geschlossene Wachstumsfugen zu erkennen waren, was die Indikation für die Metallentfernung darstellte. Im Falle von Beschwerden oder Komplikationen war die Wiedervorstellung zu jedem Zeitpunkt auch früher möglich. In dem Fall wurde aus dem Ambulanzbrief der Grund für die Vorstellung und die ergriffenen Maßnahmen erhoben. Die Komplikationen wurden in vier Gruppen eingeteilt. Gruppe A: Schmerzen, mit den Untergruppen A1= Schmerzen nach vorhergegangenem Trauma bzw. A2= Schmerzen ohne vorhergegangenes Trauma. Gruppe B: Wundheilungsstörungen, mit den Untergruppen B1: Wundheilungsstörung bei Einliegen von nicht resorbierbarem Nahtmaterial bzw. B2: Wundheilungsstörung bei Einliegen von resorbierbarem Nahtmaterial. Außerdem Gruppe C: Peronealspasmus oder -hypertonie und Gruppe D: Frakturen. Bei Besserung der Beschwerden stellten sich die Patienten wieder regulär jährlich vor. Bei Beschwerdepersistenz wurde nach Ausreizen konservativer Therapiemaßnahmen die Schraubenrevision oder eine Metallentfernung trotz noch geöffneter Wachstumsfugen in Erwägung gezogen.

2.1.5 Explantation

Die Patienten stellten sich am Morgen des Eingriffs in der Klinik vor und das Implantat wurde nach Präparation entlang des alten Operationszuganges manuell mittels eines Schraubendrehers entfernt. Aus dem Operationsbericht konnte das Alter zum Zeitpunkt der Explanation und die Dauer, die das Implantat in situ verblieben war, berechnet werden. Mögliche Komplikationen bei der Metallentfernung wurden dokumentiert. Die Patienten wurden anschließend unter Analgesie, beschwerdeadaptierter Vollbelastung und körperlicher Schonung bis zur kompletten Wundheilung zunächst in die stationäre und dann die ambulante Versorgung entlassen. Eine Sportkarenz war für zwei Wochen vorgesehen und der Fadenzug bei reizlosen Wundverhältnissen zwei Wochen postoperativ. Unter Zusammenschau des Behandlungsverlaufes (postoperative Schmerzen und Komplikationen), dem final klinisch und radiologisch imponierenden Korrekturergebnis, der Symptomatik und der subjektiven Einschätzung der Patienten, wurde mithilfe der klinischen Expertise des behandelnden Orthopäden beurteilt, ob die STA zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF geführt hat und die Patienten somit von der Operation profitiert haben. Mit der letzten Verlaufskontrolle wurde die Datenerhebung beendet.

2.1.6 Radiologische Winkelmessungen

Die Erhebung klinischer Daten wurde durch die radiologische Diagnostik ergänzt. Um das Korrekturpotenzial der STA zu untersuchen, wurden Winkelmessungen an den präoperativ aufgenommenen und denen für die Indikation der Explantation der Schraubbe verwendeten Röntgenaufnahmen durchgeführt. Die Winkel wurden mit dem Röntgendiagnostikprogramm Centricity™ Universal Viewer (Version 6.0, GE Healthcare) gemessen.

2.1.6.1 Laterale Projektion

In der lateralen Projektion wurde der TMTI-lat, Calc-B, Costa-B und die T-dekl gemessen. Der TC-lat fand in dieser Studie keine Verwendung.

Talus-Metatarsale-I-Winkel

Der TMTI-lat wird durch die Längsachse des Talus, auch *Meary's line* genannt, und die Längsachse des Os metatarsale I konstruiert (siehe Abbildung 5) [29, 66, 77]. Entsprechend wird der Winkel auch *Meary's angle* genannt. Die Taluslängsachse wurde unter Zuhilfenahme von zwei die Kortikalis des Corpus und Caput tali senkrecht schneidenden, zueinander parallele Hilfslinien konstruiert. Für die Konstruktion der Längsachse des Os metatarsale I lagen die Hilfslinien im Bereich des proximalen und distalen Knochenschaftes [66]. Als Referenzwerte werden Winkelmaße von 0° (± 4) angegeben [7, 59]. Bei Kindern sind bei einem abgesenkten MLG größere Werte zu erwarten [14, 144].

Calcaneus-Boden-Winkel

Der Calc-B, auch *calcaneal pitch* genannt, wird aus einer Horizontalen und einer sich an die plantare Kontur des Calcaneus anschmiegenden Linie konstruiert (siehe Abbildung 5) [14, 66]. Normwerte werden für Kinder im Bereich von 17° ± 6 angegeben [30]. Nach Verschluss der Wachstumsfugen liegt der Calc-B zwischen 20° und 30° [33].

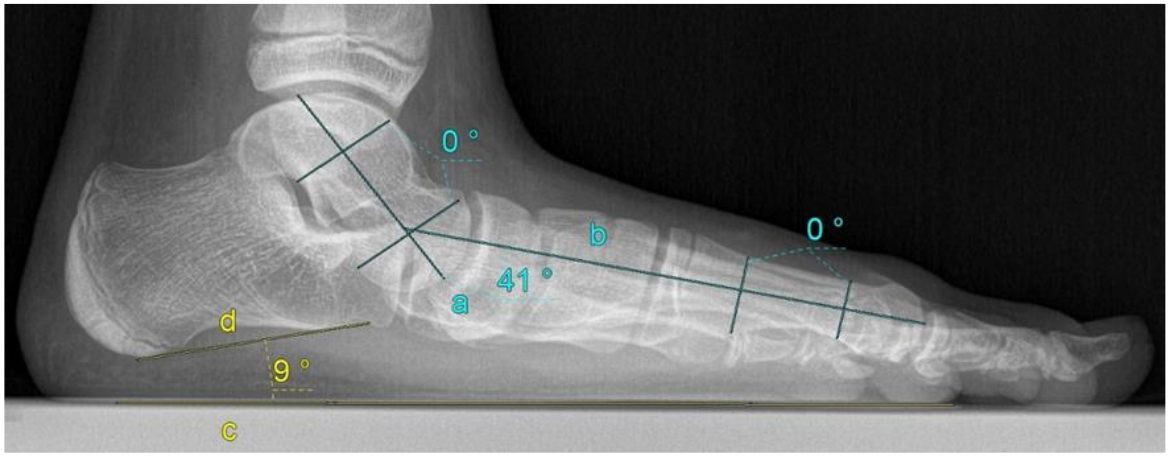


Abbildung 5: Radiologische Konstruktion des TMTI-lat und des Calc-B in der lateralen Röntgenprojektion

Die Abbildung zeigt exemplarisch die Konstruktion des Talus-Metatarsale-I-Winkels (TMTI-lat) (hier 41°) in Blau und des Calcaneus-Boden-Winkels (Calc-B) in Gelb (hier 9°). Dargestellt ist ein linker fkKSF in der lateralen Röntgenprojektion im Stehen unter Belastung, der mittels STA zwischen 2007 und 2018 am UKU versorgt wurde. Es handelt sich um eine präoperativ aufgenommene Röntgenaufnahme aus dem studieneigenen Patientengut. Die Konstruktion des TMTI-lat erfolgt mithilfe der Längsachsen des Talus (a) und des Os metatarsale I (b). Die Längsachsen werden unter Gebrauch von Hilfslinien konstruiert. Für die Taluslängsachse (a) werden dafür zwei die Kortikalis des Talus im Bereich des Caput und Corpus tali senkrecht schneidende, zueinander parallele Hilfslinien eingezeichnet. Für die Längsachse des Os metatarsale I (b) liegen die nach gleicher Vorgehensweise konstruierten Hilfslinien im Bereich des proximalen und distalen Knochenschaftes [29, 66, 77]. Der Calc-B wird durch eine Horizontale (c) und eine Linie entlang der plantaren Kontur des Calcaneus (d) konstruiert [14, 66]. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Moreau-Costa-Bartani-Winkel

Konstruiert wird der Costa-B aus zwei sich schneidenden Linien. Beide beginnen an der plantarsten Stelle des Talus im Talonaviculargelenk (siehe Abbildung 6). Diese wird durch zwei Linien jeweils mit der Auflagefläche des medialen Sesambeines des Os metatarsale I und der Auflagefläche des Calcaneus verbunden. Physiologisch sind Werte zwischen 120° und 125° zu erwarten [33, 97, 126].

Talusdeklination

Die T-dekl konstruiert sich aus dem Winkel zwischen der Taluslängsachse und einer Horizontalen (siehe Abbildung 6) [29]. Wie bei der Konstruktion des TMTI-lat, wurde für die Konstruktion der Taluslängsachse von Hilfslinien Gebrauch gemacht (siehe 2.1.6.1) [66]. Referenzwerte liegen für die T-dekl zwischen 20° und 30° [97].

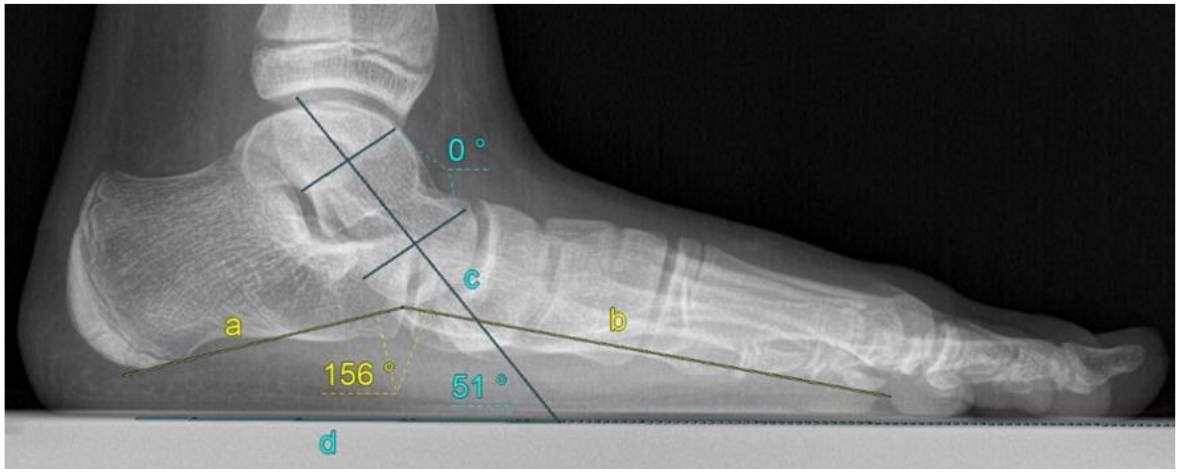


Abbildung 6: Radiologische Konstruktion des Costa-B und der T-dekl in der lateralen Röntgenprojektion

Die Abbildung zeigt exemplarisch die Konstruktion des Moreau-Costa-Bartani-Winkels (Costa-B) in Gelb (hier 156°) und der Talusdeklination (T-dekl) in Blau (hier 51°). Dargestellt ist ein linker fkKSF in der lateralen Röntgenprojektion im Stehen unter Belastung, der mittels STA zwischen 2007 und 2018 am UKU versorgt wurde. Es handelt sich um eine präoperativ aufgenommene Röntgenaufnahme aus dem studieneigenen Patientengut. Die Konstruktion des Costa-B erfolgt mithilfe von zwei von der plantarsten Stelle des Talus im Talonavikulargelenk ausgehenden Verbindungslinien. Die Linien ziehen jeweils zum plantaren Auflagepunkt des Calcaneus (a) und der unteren Kante des medialen Sesambeines des Os metatarsale I (b) [33, 97, 126]. Die T-dekl wird mithilfe der Taluslängsachse (c) und einer Horizontalen (d) konstruiert. Für die Konstruktion der Taluslängsachse (c) werden zwei die Kortikalis des Talus im Bereich des Caput und Corpus tali senkrecht schneidende, zueinander parallele Hilfslinien eingezeichnet [29, 66]. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

2.1.6.2 Dorsoplantare Projektion

In der dorsoplantaren Projektion wurden neben dem TMTI-dp der TC-dp vermessen. In dieser Studie fanden der Calc-MTV, die TNG und der TMT-Index keine Anwendung.

Talus-Metatarsale-I-Winkel

Der TMTI-dp wird wie der TMTI-lat durch die Längsachsen des Talus und des Os metatarsale I konstruiert [96]. Für eine präzise Konstruktion der Längsachsen wurde von denen in 2.1.6.1 beschriebenen Hilfslinien Gebrauch gemacht (siehe Abbildung 7). Der TMTI-dp nimmt bei einem Kinderfuß Werte von 10° ± 7 an [30, 66].

Talocalcanearer Winkel

Der TC-dp, auch *Kite angle* genannt, konstruiert sich durch die sich kreuzenden Längsachsen von Talus und Calcaneus (siehe Abbildung 7) [29]. Die Längsachse des Calcaneus wurde anhand einer entlang der lateralen Calcaneuskontur verlaufenden Linie konstruiert. Bei einem sich in der Projektion prominent präsentierenden Tuberculum peroneale des Calcaneus wurde dieses in der Konstruktion des Winkels nicht berücksichtigt [66]. Der Referenzbereich liegt zwischen 15-35° [33, 126].

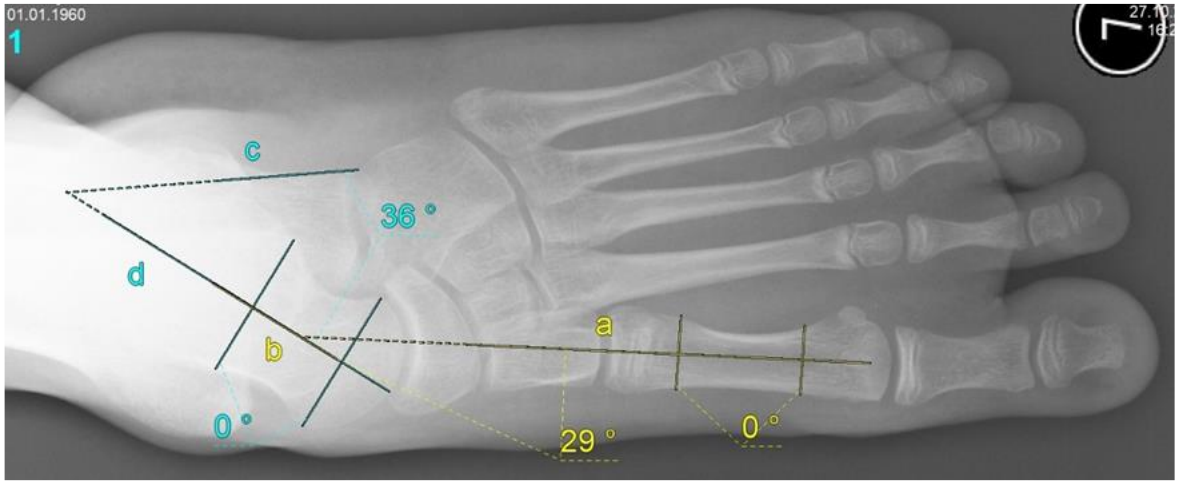


Abbildung 7: Radiologische Konstruktion des TMTI-dp und TC-dp in der dorsoplantaren Röntgenprojektion

Die Abbildung zeigt exemplarisch die Konstruktion des dorsoplantaren Talus-Metatarsale-I-Winkels (TMTI-dp) in Gelb (hier 29°) und des talocalcanearen Winkels in Blau (hier 36°). Dargestellt ist ein linker fkKSF in der dorsoplantaren Röntgenprojektion im Stehen unter Belastung, der mittels STA zwischen 2007 und 2018 am UKU versorgt wurde. Es handelt sich um eine präoperativ aufgenommene Röntgenaufnahme aus dem studieneigenen Patientengut. Die Konstruktion des TMTI-dp erfolgt mithilfe der Längsachsen des Talus (b/d) und des Os metatarsale I (a). Die Längsachsen werden unter Gebrauch von Hilfslinien konstruiert. Für die Taluslängsachse (b/d) werden dafür zwei die Kortikalis des Talus im Bereich des Caput und Corpus tali senkrecht schneidende, zueinander parallele Hilfslinien eingezeichnet. Für die Längsachse des Os metatarsale I (a) liegen die nach gleicher Vorgehensweise konstruierten Hilfslinien im Bereich des proximalen und distalen Knochenschaftes [66, 96]. Der TC-dp wird durch eine Linie entlang der lateralen Calcaneuskontur (c) und der Taluslängsachse (b/d) konstruiert [29]. Bei dem auf der Aufnahme sichtbaren Geburtsdatum handelt es sich um eine fiktives, vom Röntgenprogramm generiertes Geburtsdatum. Der Datenschutz wurde gewahrt. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Die Tabelle 1 bietet eine zusammenfassende Übersicht der genannten Referenzwerte für die gemessenen Winkel und den TMT-Index.

***Tabelle 1: Referenzwerte der radiologischen Winkelmessungen** in Anlehnung an [72, S. 311]*

Die Tabelle bietet eine Übersicht über die primär auf Fallstudien basierenden Referenzwerte der radiologischen Winkel, die im Rahmen der Diagnostik des fkKSF gemessen werden können. Insofern nicht näher bezeichnet, bezieht sich der Referenzbereich auf die bei einem gesunden Fuß nach Wachstumsabschluss zu erwartenden Werte. In dieser Studie wurde der TMT-Index nicht gemessen. Aufgrund seiner Relevanz im Verlauf dieser Arbeit und für zukünftige Studien wurde dieser aufgeführt. fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß.

Laterale Röntgenprojektion		Dorsoplantare Röntgenprojektion	
Talus-Metatarsale-I-Winkel (TMTI-lat)	normal 0° (± 4) [7, 14, 59]	**Talus-Metatarsale-I-Winkel (TMTI-dp)**	normal 0-20° Kinder 10° ± 7 [30, 66]
Calcaneus-Boden-Winkel (Calc-B)	Kinder 17° ± 6 [30] normal 20-30° [33]	**Talocalcanearer Winkel (TC-dp)**	normal 25° (15-35°) [33, 126]
Moreau-Costa-Bartani-Winkel (Costa-B)	normal 120-125° [33, 97, 126]		
Talusdeklination (T-dekl)	normal 20-30° [97]		
TMT-Index		Normalfuß -22°, Pes planovalgus -52° [66]	

2.2 Datenverarbeitung und statistische Auswertung

Die Verarbeitung, statistische Auswertung sowie die grafische Darstellung ausgewählter Daten erfolgte mithilfe von *Microsoft® Excel®* (Version 2112), *IBM SPSS Statistics* (Version 23) und *RStudio* (Version 2021.09.1+372). Die Auswertung erfolgte zunächst durch Methoden der deskriptiven Statistik inklusiver einer Korrelationsanalyse nach Pearson. Der Korrelationskoeffizient (r) wurde bei einem p-Wert < 0,05 als signifikant gewertet. Die Interpretation des Korrelationskoeffizienten erfolgte gemäß den Grenzen in Tabelle 2. Diese wurden in Anlehnung an Rowntree definiert [125]. Insofern nicht anders beschrieben beziehen sich die Angaben auf eine Grundgesamtheit von N= 353 Füße. Für die Körpergröße und das Körpergewicht wurden die für zwei Füße im Anästhesieprotokoll fehlenden Angaben mithilfe von *Multivariate Imputations by chained Equations* (MICE) durch das R-Paket *mice* geschätzt. Mithilfe der Körpergröße, dem Körpergewicht, dem Geschlecht und dem Implantationsalter wurde der BMI gemäß der Empfehlung der *World Health Organization* (WHO) für 5- bis 19-jährige Kinder mittels dem R-Paket *anthroplus* berechnet [161–163]. Die weitere Klassifizierung erfolgte in die von der WHO definierten BMI-Kategorien anhand des Z-Scores, der Anzahl der Standardabweichungen (SD) vom BMI-Median. Dabei können die BMI-Kategorien *thin* (< -2 SD >), *normal*, *overweight* (> +1 SD) und *obese* (> +2 SD) unterschieden werden [161–163]. In Bezug auf die Korrelationsanalyse wurde der BMI ohne weitere Kategorisierung berücksichtigt, um den Gewichtseffekt zu berücksichtigen. Die deskriptive Statistik wurde ergänzt durch an den Fragestellungen orientierten analytische Methoden.

Tabelle 2: Interpretation der Korrelationsanalyse nach Pearson

Die Interpretation der Korrelationsanalyse nach Pearson erfolgt mithilfe des Korrelationskoeffizienten (r). Dieser kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Abhängig von dessen Größe kann bei Werten nahe Null der Zusammenhang zwischen den untersuchten Variablen vernachlässigt werden. Mit Näherung des Betrages in Richtung 1 kann gemäß denen der Tabelle zu entnehmenden Interpretationsgrenzen ein unterschiedlich starker linearer Zusammenhang angenommen werden. Der Zusammenhang kann entsprechend negativ oder positiv sein [125].

Korrelationskoeffizient (r)	Interpretation
$0 \leq \lvert r \rvert \leq 0{,}10$	Zusammenhang zu vernachlässigen
$0{,}10 > \lvert r \rvert \leq 0{,}39$	schwacher linearer Zusammenhang
$0{,}40 \leq \lvert r \rvert \leq 0{,}69$	moderater linearer Zusammenhang
$0{,}70 \leq \lvert r \rvert \leq 0{,}89$	starker linearer Zusammenhang
$0{,}90 \leq \lvert r \rvert \leq 1$	sehr starker linearer Zusammenhang

2.2.1 Statistik der Leitfragen 1-3

Um zu untersuchen, ob die STA zu einer statistisch signifikanten radiologischen Korrektur des fkKSF führt, wurde eine univariate *Analysis of Variance* (ANOVA) für die gemessenen Winkel berechnet. Um zu untersuchen, ob die STA zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF führt und welche Variablen einen Einfluss auf die Einschätzung von der Operation profitiert zu haben nehmen, wurde eine univariate ANOVA berechnet, die die unabhängigen Variablen *Geschlecht, BMI, Implantationsalter, abgenutztes Schuhwerk, verkürzte Wadenmuskulatur, Stolpern, präoperative Schmerzen, bisherige Therapie* und *postoperative Schmerzen* berücksichtigt. Das Alter wurde aufgrund der wenigen jungen Patienten in Altersgruppen zusammengeführt. Es werden die Altersgruppe [5,10], (10,12] und (12,15] unterschieden.

Ein p-Wert < 0,05 wurde als signifikant gewertet. Die Varianzhomogenität wurde mittels Levene-Tests überprüft und war bei p > 0,05 gegeben. Zur Quantifizierung der Effektstärke wurde *partial eta squared* (η^2_p) berechnet. Die Beurteilung erfolgte gemäß den Grenzen nach Cohen mit einem kleinen Effekt bei $\eta^2_p \geq 0{,}01$, mittleren Effekt bei $\eta^2_p \geq 0{,}06$ und großen Effekt bei $\eta^2_p \geq 0{,}14$ [25].

2.2.2 Statistik der Leitfrage 4

Zur Beantwortung der vierten Leitfrage wurde der Behandlungsverlauf durch die klinischen Endpunkte *postoperative Komplikationen* und *postoperativen Schmerzen* repräsentiert und die deskriptive Analyse auf die gemeinsame Ausprägung der ausgewählten Variablen und der klinischen Endpunkte fokussiert. Um zu untersuchen, welche Variablen einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Entwicklung postoperativer Komplikationen und postoperativer Schmerzen nehmen, wurden für einige im Zentrum der weiteren Analysen stehenden Variablen eine univariate ANOVA berechnet (siehe 2.2.1).

3 Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik

3.1.1 Auswertung der Rahmenbedingungen

Analysiert wurden die Daten von 178 Patienten (353 Füße), die zwischen dem 12.12.2007 und 02.07.2018 mittels STA operativ in der Klinik für Orthopädie des UKU versorgt wurden. Der Beobachtungszeitraum erstreckt sich mit 51,47 Monaten ± 20,21 bis zum 22.07.2021 (4-135 Monate). 175 Patienten wurden bilateral operiert, davon bei 170 Patienten beide Füße zum gleichen und fünf Patienten zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Bei drei Patienten konnte nur ein Fuß in die Studie eingeschlossen werden. Eine Übersicht der beschriebenen deskriptiven Daten erfolgt am Ende jedes zeitlichen Abschnittes der Datenerhebung in Tabelle 3-Tabelle 6. Die Korrelationsanalyse nach Pearson ist im Anhang in Tabelle 13-Tabelle 15 dargestellt.

3.1.2 Deskriptive Auswertung der Prä-Implantation erhobenen Daten

Von allen Füßen sind die dazugehörigen Patienten in 52,41 % (n= 185) männlich und 47,59 % (n= 168) weiblich. Bei der Erstvorstellung gaben bei 8,50 % der Füße (n= 30) die Patienten an, unter einem Schuhkonflikt im Sinne eines abgenutzten Schuhwerkes zu leiden. Die Wadenmuskulatur war bei 6,65 % (n= 22) sichtbar verkürzt und ein gehäuftes Stolpern über die eigenen Füße trat bei 1,70 % (n= 6) der Füße auf. Die Beschwerden wurden in 70,54 % (n= 249) der Füße von einer Schmerzsymptomatik begleitet. Das Punctum Maximum der Schmerzen variierte stark und die Lokalisationen sind in Bezug auf alle präoperativ schmerzhaften Füße in Abbildung 8 dargestellt. Mit 40,56 % (n= 101) stellt der mediale Fußrand die am häufigsten genannte Schmerzlokalisation dar.

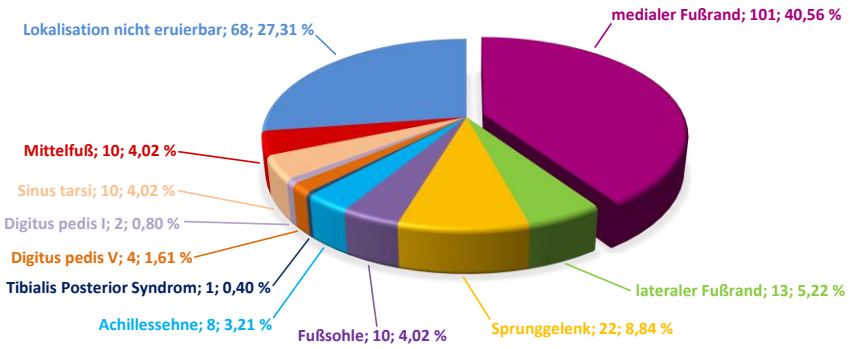


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der präoperativ vor STA erhobenen Schmerzlokalisationen

Das Tortendiagramm zeigt die Häufigkeitsverteilung der präoperativ erhobenen Schmerzlokalisationen. Beurteilt wird diese in Bezug auf die 249 präoperativ schmerzhaften fkKSF, welche am UKU (2007-2018) mittels STA versorgt wurden. Die häufigste Schmerzlokalisation ist der mediale Fußrand. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Unter Zusammenschau der Klinik erfolgte bei persistierenden Schmerzen präoperativ bei 50,14 % (n= 177) der Füße eine konservative Therapie. Diese gestaltete sich bei 90,96 % (n= 161) in Form einer Einlagenversorgung und bei 9,04 % (n= 16) im Sinne einer physiotherapeutischen Beübung der Füße und der unteren Extremität (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Deskriptive Auswertung der Prä-Implantation erhobenen Daten

Die Tabelle bietet eine Übersicht über die Prä-Implantation erhobenen Variablen im Hinblick auf deren absolute und relative Häufigkeit unter den Patienten mit fkKSF, die mittels STA zwischen 2007 und 2018 in der Klinik für Orthopädie des UKU versorgt wurden. Die deskriptive Auswertung der präoperativen Schmerzlokalisationen findet ihre Darstellung in Abbildung 8. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

		N (Füße)	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit
Geschlecht				
	weiblich	353	168	47,59 %
	männlich	353	185	52,41 %
Abgenutztes Schuhwerk				
	Ja	353	30	8,50 %
	Nein	353	323	91,50 %
Verkürzte Wadenmuskulatur				
	Ja	353	22	6,65 %
	Nein	353	331	93,77 %
Stolpern				
	Ja	353	6	1,70 %
	Nein	353	347	98,30 %
Präoperative Schmerzen				
	Ja	353	249	70,54 %
	Nein	353	104	29,46 %
Bisherige Therapie				
unbehandelt		353	176	49,86 %
vorbehandelt		353	177	50,14 %
	Einlagenversorgung	177	161	90,96 %
	Physiotherapie	177	16	9,04 %

3.1.3 Deskriptive Auswertung der Implantation

Nach erfolglosem Ausreizen der konservativen Therapie wurden die Patienten operativ versorgt. Zum Zeitpunkt der Operation waren die Patienten im Durchschnitt 153,34 cm ± 9,77 groß. Das Körpergewicht verteilt sich rechtsschief mit einem mittleren Körpergewicht von 45,16 kg ± 10,65 und einem Median von 43 kg. Dies entspricht einem BMI von 19,02 kg/m^2 ± 3,23. Entsprechend dem BMI der Patienten kann die Mehrheit der Füße der BMI-Kategorie *normal* (67,42 %, n= 238) zugeordnet werden. Weitere 22,38 % (n= 79) der Füße der BMI-Kategorie *overweight*, während Füße der BMI-Kategorien *thin* und *obese* mit 3,40 % (n= 12) und 6,80 % (n= 24) nur selten unter den Patienten vertreten

sind. Die Verteilung der Studienpopulation auf die BMI-Kategorien ist in Abbildung 9 dargestellt.

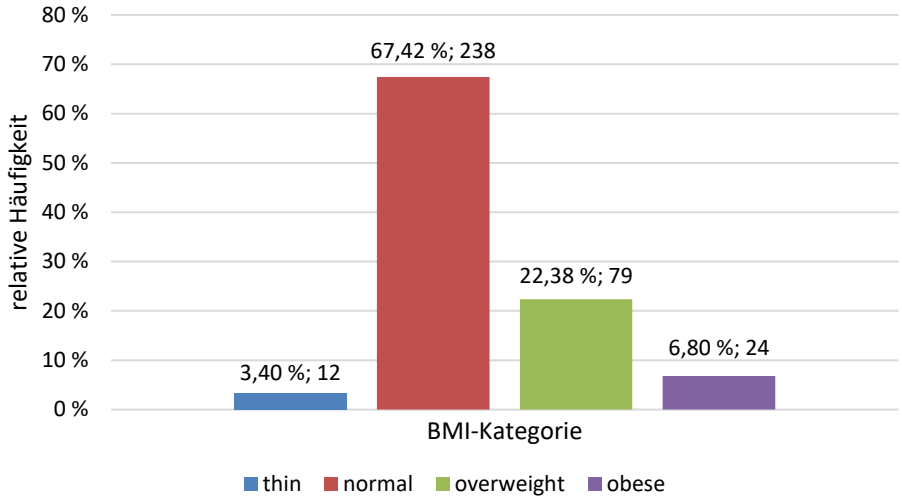


Abbildung 9: Verteilung der nach der WHO definierten BMI-Kategorien

Das Säulendiagramm stellt die Verteilung der nach der WHO definierten BMI-Kategorien unter den Patienten mit fkKSF dar, die mittels STA zwischen 2007 und 2018 in der Klinik für Orthopädie des UKU versorgt wurden. Der BMI wurde gemäß den Empfehlungen für 5- bis 19-Jährige Kinder unter Berücksichtigung von Geschlecht, Körpergewicht, Körpergröße und dem Alter zum Zeitpunkt der Implantation berechnet. Eine Zuteilung zu den Kategorien erfolgte mithilfe des Z-Scores. Unterschieden werden die BMI-Kategorien thin, normal, overweight und obese (siehe 2.2). Die Angaben beziehen sich auf eine Grundgesamtheit von N= 353 Füße. Am häufigsten finden Füße der BMI-Kategorie normal (67,42 %, n= 238). BMI= Body-Mass-Index, WHO= World Health Organization, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Das durchschnittliche Implantationsalter lag bei 11,96 Jahren ± 1,46 (5,67-14,75 Jahre). Die Altersverteilung der Studienpopulation inklusive einer Normalverteilung ist in Abbildung 10 dargestellt. In Bezug auf das Alter der Patienten, gehören 9,35 % (n= 33) der Füße der Altersgruppe [5,10], 37,96 % (n= 134) der Altersgruppe (10,12] und 52,69 % (n= 186) der Altersgruppe (12,15] an. Die Altersgruppe [5,10] korreliert stark positiv mit der Variablen Intervall bis zur Revision ($r = 0{,}74$, $p < 0{,}01$) (siehe Tabelle 14 im Anhang).

Bei 313 Füßen wurde nur die STA während des operativen Eingriffs durchgeführt. Bei 40 Füßen wurde die Möglichkeit einer bereits bestehenden Narkose genutzt, um weitere, das Outcome der STA nicht beeinflussende, Eingriffe vorzunehmen. Der Eingriff dauerte pro Fuß 17,26 Minuten ± 6,32. Die Operation verlief bei 99,36 % der Füße komplikationslos (siehe Tabelle 4). Zwei Füße erlitten intraoperative Komplikationen. Bei einem Fuß brach der vorgebohrte K-Draht und konnte intraoperativ nicht geborgen werden. Er verblieb in situ. Bei dem anderen Fuß war das Vorbohren in den Sinus tarsi erschwert, sodass ein zweiter Hautschnitt notwendig war.

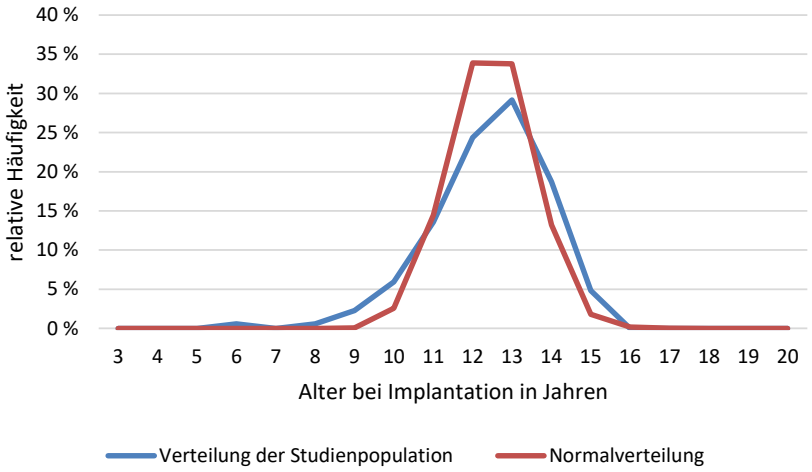


Abbildung 10: Altersverteilung bei Implantation

Dargestellt ist die Altersverteilung der Patienten mit fkKSF, die mittels STA zwischen 2007 und 2018 in der Klinik für Orthopädie des UKU versorgt wurden (in Blau). Vergleichend ist eine Normalverteilung (in Rot) eingezeichnet. Die Angaben beziehen sich auf die Grundgesamtheit von N= 353 Füße. Auf der x-Achse ist das Alter bei Implantation in Jahren dargestellt. Auf der y-Achse die relative Häufigkeit in Prozent. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Im Anschluss an die Operation wurden die Patienten bis zu fünf Tage stationär versorgt. Bei der Mehrheit der Füße verblieben die dazugehörigen Patienten nach der Operation für zwei Tage stationär (56,77 %, n= 172) und wurden anschließend am zweiten postoperativen Tag entlassen. Dies entspricht ebenfalls dem Median, der hier aufgrund der linksschiefen Verteilung als Lagemaß gewählt wurde (siehe Abbildung 11).

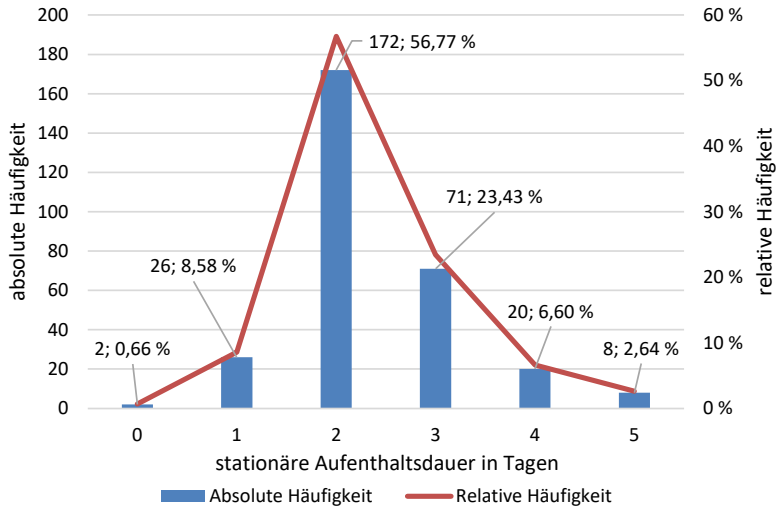


Abbildung 11: Verteilung der stationären Aufenthaltsdauer in Tagen nach subtalarer Arthrorise

Das Diagramm zeigt die Häufigkeitsverteilung der stationären Aufenthaltsdauer in Tagen (x-Achse) nach operativer Versorgung eines fkKSF mittels STA am UKU (2007-2018). Das Säulendiagramm in Blau stellt entsprechend der Skalierung der linken y-Achse die absoluten Häufigkeiten dar. In Rot sind die relativen Häufigkeiten gemäß der Skalierung der rechten y-Achse dargestellt. Die Angaben beziehen sich auf eine Grundgesamtheit von N= 303 Füße. Füße, bei denen neben der STA weitere chirurgischen Eingriffe vorgenommen wurden, wurden nicht berücksichtigt. Bei der Mehrheit der Füße blieben die Patienten im Anschluss an die Operation zwei Tage stationär (56,77 %, n= 172). STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Implantat

Für die Implantation wurde das in 2.1.3 beschriebene Implantat verwendet. Bei 11,05 % der Füße (n= 39) wurde eine kanülierte Schraube und bei 88,95 % der Füße (n= 314) eine nicht-kanülierte Schraube mit einem Durchmesser von 6,5 mm eingesetzt. Es kamen 25 mm (10,20 %, n= 36), 30 mm (75,35 %, n= 266), 35 mm (13,60 %, n= 48) und 40 mm (0,57 %, n= 2) lange Schrauben zum Einsatz (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Deskriptive Auswertung der zum Zeitpunkt der Implantation erhobenen Daten

Diese Tabelle bietet eine Übersicht über die zum Zeitpunkt der Implantation erhobenen Variablen im Hinblick auf deren absolute und relative Häufigkeit. Betrachtet werden Patienten mit fkKSF, die mittels STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 versorgt wurden. Die deskriptive Auswertung der stationären Aufenthaltsdauer und des Body-Mass-Index finden ihre Darstellung in Abbildung 9 und Abbildung 11. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

	N (Füße)	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit
Alter bei Implantation (in Jahren)			
Altersgruppe [5,10]	353	33	9,35 %
Altersgruppe (10,12]	353	134	37,96 %
Altersgruppe (12,15]	353	186	52,69 %
Operativer Eingriff: nur subtalare Arthrorise			
Ja	353	313	88,67 %
Nein	353	40	11,33 %
Intraoperative Komplikationen			
Ja	313	2	0,64 %
Nein	313	311	99,36 %
Implantat			
Schraubentypus			
kanülierte Schraube	353	39	11,05 %
nicht-kanülierte Schraube	353	314	88,95 %
Schraubenlänge (in mm)			
25	353	36	10,20 %
30	353	266	75,35 %
35	353	48	13,60 %
40	353	2	0,57 %

3.1.4 Deskriptive Auswertung des postoperativen Verlaufes

Die erste postoperative Verlaufskontrolle erfolgte ambulanten im Mittel 93,62 Tage nach der Implantation. Im Rahmen der ersten Wiedervorstellung gaben in 38,53 % (n= 136) der Füße die Patienten an, weiterhin Schmerzen zu verspüren. Bei 61,47 % (n= 217) der Füße waren die Patienten schmerzfrei. Missempfindungen bestanden bei 2,83 % (n= 10) der Füße in Form einer Dysästhesie, Parästhesie oder einer Hypästhesie.

Eine außerplanmäßige Vorstellung zwischen der ersten Verlaufskontrolle und der Explantation wurde als Komplikation gewertet. Dazu kam es bei 38,24 % (n= 135) der Füße. Der Behandlungsverlauf der Füße der verbleibenden Patienten (61,76 %, n= 218 Füße) gestal-

tete sich komplikationslos. Die Komplikationen wurden in die in 2.1.4 erläuterten Gruppen eingeteilt. Deren Verteilung inklusive die der Untergruppen ist in Abbildung 12 dargestellt.

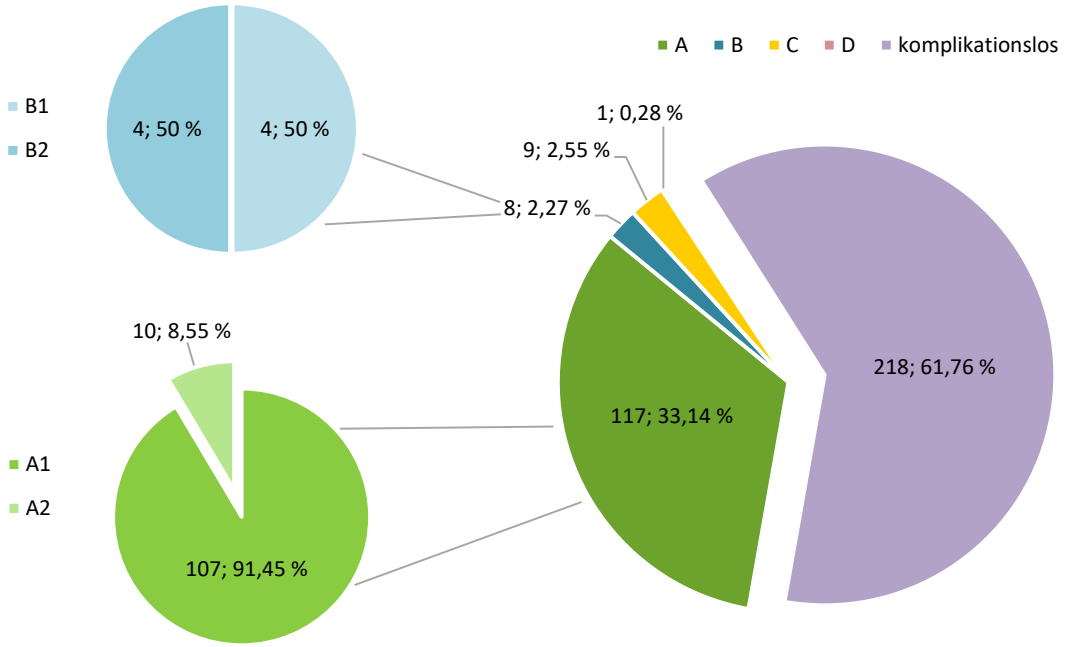


Abbildung 12: Gruppenverteilung der postoperativen Komplikationen

Die Grafik stellt die absolute und relative Häufigkeit der postoperativen Komplikationen im Hinblick auf die zu unterscheidenden Gruppen dar. Betrachte werden die Patienten mit fkKSF, die im Erhebungszeitraum (2007-2018) in der Klinik für Orthopädie des UKU mittels STA versorgt wurden. Gruppe A (Schmerzen) mit Untergruppe A1 (Schmerzen nach vorangegangenem Trauma) und Untergruppe A2 (Schmerzen ohne vorangegangenes Trauma), Gruppe B (Wundheilungsstörung) mit Untergruppe B1 (Wundheilungsstörung bei Einliegen von nicht resorbierbarem Nahtmaterial) und Untergruppe B2 (Wundheilungsstörung bei Einliegen von resorbierbarem Nahtmaterial), Gruppe C (Peronealspasmus oder -hypertonie) und Gruppe D (Fraktur). Die Angaben beziehen sich auf eine Grundgesamtheit von N= 353 Füße für die Gruppen A, B, C, D bzw. N= 117 Füße für die Untergruppen A1 und A2 bzw. N= 8 für die Untergruppen B1 und B2. Die prozentualen Anteile der Untergruppen ergeben addiert nicht 100 %. Die Mehrheit der Füße erleidet während der Behandlung keine Komplikationen (61,76 %, n= 218). Am häufigsten kommt es bei den Komplikationen erleidenden Füßen zu Schmerzen (33,14 %, n= 117). Nur selten kommt es zu schweren Komplikationen wie einer Fraktur (< 1 %). STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Mit 33,14 % (n= 117) der Füße leidet die Mehrheit der Patienten an über die erste postoperative Verlaufskontrolle hinweg bestehenden Schmerzen (Gruppe A). Innerhalb dieser Gruppe konnten die Schmerzen bei 8,55 % (n= 10) der Füße mit einem kurz vorher stattgefundenen Trauma in Verbindung gebracht werden (Gruppe A2), während die Schmerzen bei den verbleibenden 91,45 % (n= 107) ohne ein vorangegangenes Trauma auftraten (Gruppe A1). Eine Wundheilungsstörung trat bei 2,27 % (n= 8) der Füße der von Komplikationen betroffenen Patienten auf (Gruppe B). Dabei lag in jeweils 50 % der betroffenen Füße resorbierbares bzw. nicht resorbierbares Nahtmaterial ein (Gruppe B1 bzw. B2).

Neun Füße (2,55 %) der Patienten konnten bei bestehendem Peronealspasmus bzw. Peronealmuskulaturhypertonie der Gruppe C zugeordnet werden. Bei einem Fuß kam es zu der Fraktur einer subfibularen Talusexostose (0,28 %) (Gruppe D).

In Abhängigkeit der Beschwerden wurden verschieden Maßnahmen ergriffen. Dazu zählten neben einem abwartenden Verhalten, die Verordnung von Physiotherapie, Einlagen oder Antibiotika, eine Belastungsanpassung, die stationäre Aufnahme, die Metallentfernung, die Schraubenrevision oder eine Kombination der genannten Maßnahmen. Schlussendlich kam es bei 74,07 % (n= 100) der Füße zu einer Besserung der Beschwerden.

Tabelle 5: Deskriptive Auswertung des postoperativen Verlaufes

Diese Tabelle bietet eine Übersicht über die im Rahmen der postoperativen Verlaufskontrolle erhobenen Daten in Bezug auf die Patienten mit fkKSF, die zwischen 2007 und 2018 operativ mittels STA in der Klinik für Orthopädie des UKU versorgt wurden. Dargestellt sind die Grundgesamtheit und die absolute sowie relative Häufigkeit (in Prozent) der jeweiligen Variablenausprägung. Die deskriptive Auswertung der postoperativen Komplikationen findet ihre Darstellung in einer eigenen Abbildung (siehe Abbildung 12). STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

	N (Füße)	Absolute Häufigkeit	Relative Häufigkeit
Postoperative Schmerzen			
Ja	353	136	38,53 %
Nein	353	217	61,47 %
Sensibles Defizit postoperativ			
Dysästhesie	353	1	0,28 %
Parästhesie	353	2	0,57 %
Hypästhesie	353	7	1,98 %
Besserung nach ambulanter Versorgung			
Ja	135	100	74,07 %
Nein	135	35	25,93 %
Schraubenrevision			
Ja	353	15	4,25 %
Nein	353	338	95,75 %
Ursache: Korrekturverlust der Schraube	15	7	46,67 %
davon [5,10]	7	4	57,14 %
davon (10,12]	7	2	28,57 %
davon (12,15]	7	1	14,29 %
Ursache: persistierende Schmerzsymptomatik	15	7	46,67 %
Ursache: Schraubenaffektion	15	1	6,67 %

Eine Schraubenrevision war bei 4,25 % (n= 15, 11 Patienten) der Füße innerhalb von 24,20 Monaten ± 23,82 notwendig. Vier Patienten wurden beidseitig revidiert. In jeweils 46,67 % (n= 7) der revidierten Füße, war die Ursache ein Korrekturverlust der Schraube

bzw. eine persistierende Schmerzsymptomatik. Bei einem Fuß kam es zu einer Schraubenaffektion am Processus lateralis tali (6,67 %). Die revisionsbedürftigen Füße wurden denen in 2.2.1 beschriebenen Altersgruppen zugeordnet. Sieben Füße (vier mit einem Korrekturverlust der Schraube) konnten der Altersgruppe [5;10], fünf Füße (zwei mit einem Korrekturverlust der Schraube) der Altersgruppe (10;12] und drei Füße (einer mit einem Korrekturverlust der Schraube) der Altersgruppe (12;15] zugeordnet werden (siehe Tabelle 5).

3.1.5 Deskriptive Auswertung der Explantation

Das Implantat verblieb 49,76 Monate ± 20,37 in situ. Die Patienten waren zum Zeitpunkt der Explantation 16,15 Jahre ± 1,40 alt (10,42-19,76 Jahre) (siehe Tabelle 6). Die Explantation verlief bei allen Patienten komplikationslos.

Tabelle 6: Deskriptive Auswertung der kontinuierlichen Variablen aller Zeitabschnitte der Datenerhebung

Diese Tabelle vervollständigt die deskriptive Datenanalyse und gibt eine Übersicht über die bei den Patienten mit fkKSF und operativer Versorgung mittels STA in der Klinik für Orthopädie des UKU (2007-2018) erhobenen kontinuierlichen Variablen. Dargestellt ist die Grundgesamtheit, der Mittelwert, die Standardabweichung, das Minimum, die 25. Perzentile, der Median, die 75. Perzentile und das Maximum der untersuchten Variablen. Bei der Auswertung von Zeitabschnitt sind diese in Form eines Intervalls [X; Y] dargestellt. X markiert den Anfang des zeitlichen Intervalls und Y das Ende. BMI= Body-Mass-Index. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Variable	N (Füße)	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Pztl. 25	Median	Pztl. 75	Maximum
Körpergröße (cm)	351	153,34	9,77	115,00	147,50	154,00	160,00	179,00
Körpergewicht (kg)	351	45,16	10,65	19,00	38,00	43,00	52,00	78,00
BMI (kg/m^2)	353	19,02	3,23	12,82	16,56	18,49	20,96	32,89
Alter bei Implantation (Jahre)	353	11,96	1,46	5,67	11,08	12,08	13,00	14,75
Operationsdauer pro Fuß (Minuten)	313	17,26	6,32	7,50	13,50	16,50	19,50	69,50
Stationäre Aufenthaltsdauer (Tage)	303	2,35	0,86	0,00	2,00	2,00	3,00	5,00
[Implantation; erste Verlaufskontrolle] (Tage)	353	93,62	178,72	12,00	41,00	43,00	50,00	1289,00
Alter bei Explantation (Jahre)	353	16,15	1,40	10,42	15,42	16,08	16,92	19,76
[Implantation; Explantation] (Monate)	353	49,76	20,37	4,00	36,00	46,00	61,00	135,00
[Implantation; Revision] (in Monaten)	15	24,20	23,82	1,00	2,00	21,00	40,00	70,00
[Implantation; letzte Verlaufskontrolle] (in Monaten)	353	51,47	20,21	4,00	36,00	48,00	62,00	135,00

3.2 Analytische Statistik

3.2.1 Radiologische Korrektur des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes

Um beantworten zu können, ob die STA zu einer statistisch signifikanten radiologischen Korrektur des fkKSF führt, wurden eine univariate ANOVA der gemessenen Winkel berechnet (siehe 2.2.1 und Tabelle 8). Eine übersichtliche Darstellung der für die ANOVA verwendeten Messwerte und deren Veränderung im Behandlungsverlauf bietet die Tabelle 7. Eine Korrelation der Winkel untereinander ist im Anhang in Tabelle 16 zu finden.

Tabelle 7: Deskriptive Auswertung der radiologischen Winkelmessungen

Die Tabelle gibt einen Überblick über die deskriptive Auswertung der bei Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 gemessenen Winkeln. Es wird unterschieden zwischen zwei Messzeitpunkten (präoperativ, postoperativ vor der Explantation) und zwei Röntgenprojektionen (laterale und dorsoplantare Projektion). Die Tabelle gibt Auskunft über die Anzahl, die Spannweite, das Minimum und das Maximum, den Mittelwert und die Standardabweichung der Messungen (in Grad°). Nicht berücksichtigt wurden Füße mit einer unvollständigen oder nicht streng unter Belasung aufgenommenen Bildgebung. TMTI-lat= Talus-Metatarsale-I-Winkel, Calc-B= Calcaneus-Boden-Winkel, Costa-B= Moreau-Costa-Bartani-Winkel, T-dekl= Talusdeklination, TC-dp= Talocalcanearer Winkel, TMTI-dp= dorsoplantarer Talus-Metatarsale-I-Winkel, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

Winkel	N (Füße)	Spannweite	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
				(in Grad °)		
Präoperativ in der lateralen Projektion						
TMTI-lat	341	49	1	50	21,77	8,19
Calc-B	341	32	0	32	15,75	4,33
Costa-B	341	47	112	159	136,83	7,78
T-dekl	341	49	9	58	36,52	6,53
Präoperativ in der dorsoplantaren Projektion						
TC-dp	329	44	6	50	28,73	6,52
TMTI-dp	329	40	0	40	13,65	7,38
Prä-Explantation in der lateralen Projektion						
TMTI-lat	339	40	0	40	14,74	8,22
Calc-B	339	28	4	32	17,92	4,76
Costa-B	339	46	109	155	127,57	7,65
T-dekl	339	37	14	51	32,62	6,26
Prä-Explantation in der dorsoplantaren Projektion						
TC-dp	335	45	2	47	26,19	7,46
TMTI-dp	335	39	0	39	10,65	7,57
Differenz der zwei Messzeitpunkte in der lateralen Projektion						
TMTI-lat	333	55	-35	20	-7,10	7,60
Calc-B	333	24	-11	13	2,10	3,14
Costa-B	333	56	-40	16	-9,31	6,35
T-dekl	333	42	-24	18	-3,97	6,19
Differenz der zwei Messzeitpunkte in der dorsoplantaren Projektion						
TC-dp	318	43	-26	17	-2,48	7,39
TMTI-dp	318	57	-21	36	-2,81	7,99

3.2.1.1 Laterale Projektion

Vor der STA beträgt der TMTI-lat 21,77° ± 8,19. Vor der Explantation zeigt sich eine Reduktion der Messwerte auf 14,74° ± 8,22. Das entspricht einer Differenz von -7,10° ± 7,60. Der Winkel nähert sich damit den Referenzwerten eines gesunden Fußes bei Wachstumsabschluss an. In den Referenzbereich von 0° ± 4 reicht der TMTI-lat nach der STA nicht hinein. Der Calc-B nimmt im Gegensatz zum TMTI-lat im Verlauf der Behandlung um 2,10° ± 3,14 zu. Damit zeigt sich eine Veränderung der präoperativen Messwerte von 15,75° ± 4,33 auf 17,92° ± 4,76 zum Zeitpunkt der Schraubenentfernung. Der Calc-B befindet sich, wie auch vor der STA, im Referenzbereich bei Wachstumsabschluss von 20° bis 30°. Durch die STA reduziert sich der Costa-B um -9,31° ± 6,35. Dies führt dazu, dass die Messergebnisse von 136,83° ± 7,78 präoperativ auf 127,57° ± 7,65 vor der Explantation abnehmen. Der Costa-B liegt anschließend in seinem Referenzbereich von 120° bis 125°. Der letzte in der lateralen Projektion gemessene Winkel, die T-dekl, zeigt präoperativ Werte von 36,52° ± 6,53. Durch eine Differenz von -3,97° ± 6,19, kommt es zu einer Abnahme der Messwerte auf 32,62° ± 6,26 vor der Metallentfernung. Die T-dekl verbleibt damit in ihrem Referenzbereich von 20-30°. Mit Ausnahme der T-dekl ($F(1)= 0,93$, $p > 0,05$) ist die Veränderung der Messwerte, die zwischen den zwei Messzeitpunkten erreicht wird statistisch signifikant ($p < 0,01$) (siehe Tabelle 8).

3.2.1.2 Dorsoplantare Projektion

In der dorsoplantaren Projektion zeigt sich für den TC-dp eine Differenz von -2,48° ± 7,39, was zu einer Veränderung des Winkels von 28,73° ± 6,52 präoperativ auf 26,19° ± 7,46 bei Wachstumsabschluss führt. Er verbleibt damit in seinem Referenzbereich von 15° bis 35°. Für den TMTI-dp zeigt sich eine Veränderung von -2,81° ± 7,99. Damit nimmt der TMTI-dp von 13,65° ± 7,38 präoperativ auf 10,65° ± 7,57 zum Explantationszeitpunkt ab. Der TMTI-dp verbleibt in seinem Referenzbereich (0-20°) und nähert sich durch abnehmende Werte dessen unterer Grenze an. In der ANOVA ist die Veränderung beider Winkel in der dorsoplantaren Projektion statistisch signifikant ($p < 0,01$) (siehe Tabelle 8).

Nach der STA liegen fünf der sechs gemessenen Winkel in ihrem Referenzbereich. Der TMTI-lat ist der einzige Winkel, der seinen Referenzbereich nicht erreicht. Der Effekt ist in der ANOVA für den TMTI-lat als *mittelstark* einzustufen, während der Effekt aller anderen

Winkel als *groß* einzustufen ist. Den stärksten Effekt auf die Aufrichtung des MLG hat die STA auf den Calc-B, gefolgt vom TC-dp und Costa-B.

Tabelle 8: ANOVA radiologisch gemessene Winkel

*Die Tabelle stellt die Ergebnisse der für die Veränderungen der Winkel berechneten ANOVA (Analysis of Variance) dar. Diese soll Auskunft über die statistische Signifikanz dieser Veränderung geben. Die Tabelle untersucht den Zusammenhang an Patienten mit fkKSF bei STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 mittels der Quadratsummen, degrees of freedom (df, Freiheitsgrade), Mittel der Quadrate und der F-Statistik (F). Es wird zwischen den Winkel in der lateralen Projektion und der dorsoplantaren Projektion unterschieden. Die Interpretation erfolgt mithilfe der Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·. Zusätzlich dargestellt ist die Effektstärke. Diese wird anhand von partial eta squared (η2p) interpretiert. Entsprechend den Grenzen nach Cohen kann ein kleiner, mittlerer, großer oder kein Effekt (-) unterschieden werden (siehe 2.2.1, [25]). Mit Ausnahme der T-dekl zeigt sich die Veränderung aller Winkel statistisch signifikant. Der Effekt ist als groß einzustufen bzw. für den TMTI-lat als mittel. TMTI-lat= Talus-Metatarsale-I-Winkel, Calc-B= Calcaneus-Boden-Winkel, Costa-B= Moreau-Costa-Bartani-Winkel, T-dekl= Talusdeklination, TC-dp= Talocalcanearer Winkel, TMTI-dp= dorsoplantarer Talus-Metatarsale-I-Winkel, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

Variable	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	Partial Eta Squared (η2p)	Effekt
Winkel in der lateralen Projektion							
TMTI-lat	1100,12	1	1100,12	26,28	**	0,08	mittel
Calc-B	1958,44	1	1958,44	216,42	**	0,42	groß
Costa-B	1991,49	1	1991,49	66,42	**	0,18	groß
T-dekl	24,35	1	24,35	0,93	.	0,00	-
Winkel in der dorsoplantaren Projektion							
TC-dp	3391,84	1	3391,84	83,88	**	0,22	groß
TMTI-dp	2759,22	1	2759,22	62,92	**	0,17	groß

Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·, kein Effekt -.

3.2.2 Klinische Verbesserung des flexiblen kindlichen Knick-Senk-Fußes

Um zu untersuchen, ob die STA zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF führt, wurden der Behandlungsverlauf, das klinisch und radiologisch imponierende Korrekturergebnis des fkKSF und die Symptomatik der Patienten durch den behandelnden Orthopäden in Rückblick auf den präoperativen Vorbefund retrospektiv beurteilt (siehe 2.1.5). Diese Beurteilung fiel bei 96,30 % (n= 340) der Füße positiv aus, womit die Patienten von der Operation profitieren. Bei 3,70 % (n= 13) der Füße kam es zu keiner klinischen Verbesserung des fkKSF und die dazugehörigen Patienten haben nicht von der STA profitiert. Gründe dafür sind ein weiterhin bestehender fkKSF bei unverändert abgeflachtem MLG, persistierende Schmerzen oder nach wie vor bestehende Einschränkungen im Alltag. Um zu untersuchen, welche Variablen die Einschätzung von der Operation profitiert zu haben statistisch signifikant beeinflussen wurde eine univariate ANOVA berechnet (siehe 2.2.1). Die

Korrelationsanalyse zeigte eine schwach negative Korrelation der Einschätzung von der STA profitiert zu haben mit den Variablen *Altersgruppe [5,10]* (r= -0,20, p < 0,01) und *postoperativen Schmerzen* (r= -0,15, p < 0,01) (siehe Tabelle 15 im Anhang). In der ANOVA erweisen sich beide Variablen als statistisch signifikant (F(1)= 13,97, p < 0,01) bzw. (F(1)= 8,56, p < 0,01). Der Effekt ist für beide Variablen als *klein* einzustufen (η^2_p= 0,04 bzw. η^2_p= 0,02) (siehe Tabelle 9). Für die anderen untersuchten Variablen zeigt sich keine statistische Signifikanz.

Tabelle 9: ANOVA Einschätzung von der Operation profitiert zu haben

*Die Tabelle stellt die Ergebnisse der für den klinischen Endpunkt Einschätzung von der Operation profitiert zu haben berechneten ANOVA (Analysis of Variance) dar. Diese soll Auskunft über die statistische Signifikanz des Einflusses der untersuchten Variablen (erste Spalte) auf den genannten Endpunkt geben. Die Tabelle untersucht den Zusammenhang an Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 mittels der Quadratsummen, degrees of freedom (df, Freiheitsgrade), Mittel der Quadrate und der F-Statistik (F). Die Interpretation erfolgt mithilfe der Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·. Zusätzlich dargestellt ist die Effektstärke, die anhand von partial eta squared (η2p) interpretiert wird. Entsprechend den Grenzen nach Cohen kann ein kleiner, mittlerer, großer oder kein Effekt (–) unterschieden werden (siehe 2.2.1, [25]). Die ANOVA zeigt eine statistische Signifikanz für die Variablen Altersgruppe [5,10] und postoperative Schmerzen. Der Effekt ist bei beiden Variablen als klein einzustufen. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

Variable	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	Partial Eta Squared (η2p)	Effekt
Geschlecht	0,04	1	0,04	1,05	.	0,00	-
Body-Mass-Index							
thin	0,10	1	0,10	2,77	.	0,01	klein
normal	0,01		0,01	0,20	.	0,00	-
overweight	0,06	1	0,06	1,57	.	0,00	-
obese	0,01	1	0,01	0,15	.	0,00	-
Alter bei Implantation (in Jahren)							
[5,10]	0,48	1	0,48	13,97	**	0,04	klein
(10,12]	0,10	1	0,10	2,93	.	0,01	klein
(12,15]	0,01	1	0,01	0,23	.	0,00	-
Präoperative Schmerzen	0,01	1	0,01	0,26	.	0,00	-
Abgenutztes Schuhwerk	0,05	1	0,05	1,26	.	0,00	-
Verkürzte Wadenmuskulatur	0,03	1	0,03	0,89	.	0,00	-
Stolpern	0,01	1	0,01	0,23	.	0,00	-
Bisherige Therapie	0,03	2	0,02	0,42	.	0,00	-
Postoperative Schmerzen	0,30	1	0,30	8,56	**	0,02	klein

Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·, kein Effekt -.

3.2.3 Einflussvariablen auf den Behandlungsverlauf

Um zu untersuchen, welche Variablen einen statistisch signifikanten Einfluss auf den Behandlungsverlauf nehmen, wurden diese deskriptiv und analytisch mittels univariater ANOVA in Bezug auf die den Behandlungsverlauf repräsentierenden klinischen Endpunkte *postoperative Schmerzen* (n= 136) und *postoperative Komplikationen* (n= 135) untersucht (siehe 2.2.2). Die absoluten und relativen Häufigkeiten der gemeinsamen Ausprägung eines Endpunktes und der auf Einfluss zu untersuchenden Variable sind in Tabelle 10 dargestellt. Auf diese Zusammenhänge wird im folgenden Kapitel weiter eingegangen.

Tabelle 10: Deskriptive Auswertung der klinischen Endpunkte postoperative Komplikationen und postoperative Schmerzen

Die Tabelle zeigt die deskriptive Auswertung der den Behandlungsverlauf repräsentierenden klinischen Endpunkte: postoperative Komplikationen und postoperative Schmerzen. Die Auswertung erfolgt im Hinblick auf die gemeinsame Ausprägung der Endpunkte mit einer der auf Einfluss zu untersuchenden Variablen (erste Spalte) bei Patienten mit einem fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018. Dargestellt ist die absolute Häufigkeit und darunter die relative Häufigkeit bezogen auf die Grundgesamtheit N der Zeile (links) / bzw. die Grundgesamtheit N der Spalte (rechts). BMI= Body-Mass-Index, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.

		Postoperative Komplikationen		**Postoperative Schmerzen**	
		Nein	Ja	Nein	Ja
	N (Füße)	218	135	217	136
Geschlecht					
Weiblich	168	92 (54,76 % / 42,20 %)	76 (45,24 % / 56,30 %)	92 (54,76 % / 42,40 %)	76 (45,24 % / 55,88 %)
Männlich	185	126 (68,11 % / 57,80 %)	59 (31,89 % / 43,70 %)	125 (67,57 % / 57,60 %)	60 (32,43 % / 44,12 %)
BMI					
thin	12	8 (66,67 % / 3,67 %)	4 (33,33 % / 2,96 %)	7 (58,33 % / 3,23 %)	5 (41,67 % / 3,68 %)
normal	238	140 (58,82 % / 64,22 %)	98 (41,18 % / 72,59 %)	136 (57,14 % / 62,67 %)	102 (36,04 % / 75,00 %)
overweight	79	58 (73,42 % / 26,60 %)	21 (26,58 % / 15,56 %)	56 (70,89 % / 25,81 %)	23 (29,11 % / 16,91 %)
obese	24	12 (50,00 % / 5,50 %)	12 (50,00 % / 8,89 %)	18 (75,00 % / 8,29 %)	6 (25,00 % / 4,41%)
Alter bei Implantation (in Jahren)					
[5,10]	33	12 (36,36 % / 5,50 %)	21 (63,64 % / 16,56 %)	21 (63,64 % / 9,68 %)	12 (36,36 % / 8,82 %)
(10,12]	134	88 (65,67 % / 40,37 %)	46 (34,33 % / 34,07 %)	77 (57,46 % / 35,48 %)	57 (42,54 % / 41,91 %)
(12,15]	186	118 (63,44 % / 54,13 %)	68 (36,56 % / 50,37 %)	119 (63,98 % / 54,84 %)	67 (36,02 % / 49,26 %)
Präoperative Schmerzen					
Nein	104	77 (74,04 % / 35,31 %)	27 (25,96 % / 20,00 %)	83 (79,81 % / 38,25 %)	21 (20,19 % / 15,44 %)
Ja	249	141 (56,63 % / 64,68 %)	108 (43,37 % / 80,00 %)	134 (53,82 % / 61,75 %)	115 (46,18 % / 84,56 %)
Abgenutztes Schuhwerk					
Nein	323	197 (60,99 % / 90,37 %)	126 (39,01 % / 93,33 %)	194 (60,06 % / 89,40 %)	129 (39,94 % / 94,85 %)
Ja	30	21 (70,00 % / 9,63 %)	9 (30,00 % / 6,67 %)	23 (76,67 % / 10,60 %)	7 (23,33 % / 5,15 %)
Verkürzte Wadenmuskulatur					
Nein	331	205 (61,93 % / 94,04 %)	126 (38,07 % / 93,33 %)	201 (60,73 % / 92,63 %)	130 (39,27 % / 95,59 %)
Ja	23	13 (56,52 % / 5,96 %)	9 (39,13 % / 6,67 %)	16 (69,57 % / 7,37 %)	6 (26,09 % / 4,41 %)
Stolpern					
Nein	347	212 (61,10 % / 97,25 %)	135 (38,90 % / 100 %)	212 (61,10 % / 97,70 %)	135 (38,90 % / 99,26 %)
Ja	6	6 (100,00 % / 2,75%)	0 (0,00 % / 0,00 %)	5 (83,33 % / 2,30 %)	1 (16,67 % / 0,74 %)
Bisherige Therapie					
Unbehandelt	176	105 (59,66 % / 48,17 %)	71 (40,34 % / 52,60 %)	107 (60,80 % / 49,31 %)	69 (39,20 % / 50,74 %)
Vorbehandelt	177	113 (63,84 % / 51,83 %)	64 (36,16 % / 47,40 %)	110 (62,15 % / 50,69 %)	67 (37,85 % / 49,26 %)
Postoperative Schmerzen					
Nein	217	158 (72,81 % / 72,48 %)	59 (27,19 % / 43,70 %)	nicht untersucht	nicht untersucht
Ja	136	60 (44,12 % / 27,52 %)	76 (55,88 % / 56,30 %)	nicht untersucht	nicht untersucht

3.2.3.1 Postoperative Komplikationen

Die Variable *Geschlecht* korreliert schwach negativ mit dem Endpunkt *postoperative Komplikationen* (r= -0,14, $p < 0,05$) (siehe Tabelle 13 im Anhang). Mädchen (45,24 %) erleiden dabei häufiger Komplikationen als Jungen (31,89 %). Unabhängig vom Geschlecht, verläuft die Mehrzahl der Behandlungsverläufe komplikationslos (Mädchen 54,76 % vs. Jungen 68,11 %). Die Mehrheit der unter postoperativen Komplikationen leidenden Füßen gehört Mädchen (56,30 %).

Unter allen an postoperativen Komplikationen leidenden Füßen sind in aufsteigender Reihenfolge Füße der BMI-Kategorie *thin* (2,96 %), *obese* (8,89 %), *overweight* (15,56 %) und am häufigsten der BMI-Kategorie *normal* (72,59 %) vertreten. Ähnlich der Variablen *Geschlecht*, zeigt sich unabhängig vom BMI, dass die Mehrheit der Füße innerhalb der jeweiligen BMI-Kategorien nach der STA keine postoperativen Komplikationen zeigt. In der BMI-Kategorie *obese* ist die Komplikationsrate im Vergleich mit 50% am höchsten.

In der deskriptiven Analyse zeigt sich eine schwach positive Korrelation zwischen der Variablen *Altersgruppe [5,10]* und dem klinischen Endpunkt *postoperative Komplikationen* (r= 0,17, $p < 0,01$) (siehe Tabelle 14 im Anhang). Die *Altersgruppe [5,10]* zeigt Gruppen intern die höchste Komplikationsrate (63,64 %). Im Vergleich dazu kommt es in der *Altersgruppe (10,12]* in 34,33 % der Füße und in der Alters*gruppe (12,15]* in nur 36,56 % der Füße zu postoperativen Komplikationen.

In der Korrelationsanalyse nach Pearson korreliert die Variable *präoperative Schmerzen* schwach positiv mit dem klinischen Endpunkt *postoperative Komplikationen* (r= 0,16, $p < 0,01$) (siehe Tabelle 13 im Anhang). Der Anteil an präoperativ schmerzhaften Füßen an allen unter Komplikationen leidenden Füßen ist mit 80 % höher als der der vor der STA schmerzlosen Füße mit 20 %. Der Großteil der Füße erleidet unabhängig von der präoperativen Schmerzsituation postoperativ keine Komplikationen (präoperativ schmerzhaft 56,63 % vs. präoperativ schmerzlos 74,04 %.

Bezüglich eines abgenutzten Schuhwerkes lässt sich sagen, dass Patienten, bei denen die Füße ein abgenutztes Schuhwerk zeigen nicht häufiger an postoperativen Komplikationen leiden als Füße ohne einen Schuhkonflikt (30 % vs. 39,01 %). Gleichzeitig ist der Anteil an Füßen mit einem abgenutzten Schuhwerk unter allen an postoperativen Komplikationen

leidenden Füße kleiner als der, der Füße ohne einen Schuhkonflikt (6,67 % vs. 93,33 %). Gleiches gilt für die Variablen *verkürzte Wadenmuskulatur* und *Stolpern*.

Der Einfluss der bisherigen Therapie auf die Häufigkeit postoperativer Komplikationen zeigt sich nur geringfügig. Ungefähr die Hälfte aller Füße wurde konservativ vorbehandelt. Diese Verteilung spiegelt sich nahezu im Anteil der vorbehandelten Füße (47,40 %) bzw. unbehandelten Füßen (52,60 %) an den unter Komplikationen leidenden Füßen wider. Unabhängig der Variablenausprägung zeigt sich die Mehrheit der Füße postoperativ keine Komplikationen, wobei vorbehandelte Füße seltener an Komplikationen leiden (63,84 %), als unbehandelte Füße (59,66 %).

Abschließend zeigt sich für den klinischen Endpunkt *postoperative Komplikationen* in der Korrelationsanalyse nach Pearson eine schwach positive Korrelation mit der Variablen *postoperative Schmerzen* ($r= 0,29$, $p < 0,01$) (siehe Tabelle 15 im Anhang). Von allen Füßen, die zum Zeitpunkt der ersten Verlaufskontrolle postoperativ unter Schmerzen litten, kam es bei der Mehrheit auch zu postoperativen Komplikationen (55,88 %). Im Vergleich kam es bei Füßen ohne postoperative Schmerzen nur in 27,19 % zu postoperativen Komplikationen. Unter allen Füßen mit postoperativen Komplikationen litten 56,30 % auch unter postoperativen Schmerzen.

Der Einfluss der untersuchten Variablen auf die Häufigkeit des klinischen Endpunktes *postoperative Komplikationen* zeigt sich in der ANOVA für die Variablen G*eschlecht* ($F(1)= 6,73$, $p < 0,05$), *Altersgruppe [5,10]* ($F(1)= 10,17$, $p < 0,01$), *präoperative Schmerzen* ($F(1)= 9,62$, $p < 0,01$) und *postoperative Schmerzen* ($F(1)= 31,59$, $p < 0,01$) statistisch signifikant. Eine statistische Signifikanz kann nicht für die Variablen *BMI*, *abgenutztes Schuhwerk*, *verkürzte Wadenmuskulatur*, *Stolpern* und *bisherige Therapie* gefunden werden (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: ANOVA postoperative Komplikationen

*Die Tabelle stellt die Ergebnisse der für den Endpunkt postoperative Komplikationen berechneten ANOVA (Analysis of Variance) dar. Diese soll Auskunft über die statistische Signifikanz des Einflusses der untersuchten Variablen (erste Spalte) auf den genannten Endpunkt geben. Die Tabelle untersucht den Zusammenhang an Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 mittels der Quadratsummen, degrees of freedom (df, Freiheitsgrade), Mittel der Quadrate und der F-Statistik (F). Die Interpretation erfolgt mithilfe der Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·. Zusätzlich dargestellt ist die Effektstärke, die anhand von partial eta squared (η2p) interpretiert wird. Entsprechend den Grenzen nach Cohen kann ein kleiner, mittlerer, großer oder kein Effekt (–) unterschieden werden (siehe 2.2.1, [25]). Die ANOVA zeigt eine statistische Signifikanz für die Variablen Geschlecht, Altersgruppe [5,10], präoperative Schmerzen und postoperative Schmerzen. Der Effekt ist mit Ausnahme der Variable postoperative Schmerzen (mittel) bei allen Variablen als klein einzustufen. BMI= Body-Mass-Index, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

Variable	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	Partial Eta Squared (η2p)	Effekt
Geschlecht	1,57	1	1,57	6,73	*	0,02	klein
BMI							
thin	0,09	1	0,09	0,36	.	0,00	-
normal	0,01	1	0,01	0,02	.	0,00	-
overweight	0,06	1	0,06	0,26	.	0,00	-
obese	0,06	1	0,06	0,24	.	0,00	-
Alter bei Implantation (in Jahren)							
[5,10]	2,35	1	2,35	10,17	**	0,03	klein
(10,12]	0,33	1	0,33	1,40	.	0,00	-
(12,15]	0,11	1	0,11	0,47	.	0,00	-
Präoperative Schmerzen	2,22	1	2,22	9,62	**	0,03	klein
Abgenutztes Schuhwerk	0,21	1	0,21	0,90	.	0,00	-
Verkürzte Wadenmuskulatur	0,02	1	0,02	0,07	.	0,00	-
Stolpern	0,89	1	0,89	3,80	.	0,01	klein
Bisherige Therapie	0,69	2	0,34	1,46	.	0,01	klein
Postoperative Schmerzen	6,88	1	6,88	31,59	**	0,08	mittel

Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·, kein Effekt -.

3.2.3.2 Postoperative Schmerzen

In der Korrelationsanalyse nach Pearson korrelierte die Variable *Geschlecht* schwach negativ mit dem klinischen Endpunkt *postoperative Schmerzen* (r= -0,13, $p < 0,05$) (siehe Tabelle 13 im Anhang). Während die Mehrheit aller Füße postoperativ schmerzlos ist (Mädchen 54,76 % vs. Jungen 67,57 %), leiden Mädchen (45,24 %) häufiger unter postoperativen Schmerzen als Jungen (32,43 %). Die Mehrheit der unter postoperativen Schmerzen leidenden Füßen gehört Mädchen (55,88 %).

Im Hinblick auf die Variable *BMI*, machen unter allen postoperativ schmerzhaften Füßen, Füße von Patienten, die der BMI-Kategorie *normal* zugeordent werden können den größten Anteil aus (75 %). In absteigender Reihenfolge kommt es bei Patienten mit Füßen der BMI-Kategorie *thin* (41,67 %), *normal* (36,04 %) *overweight* (29,11 %) und am

seltensten innerhalb der BMI-Kategorie *obese* (25 %) zu postoperativen Schmerzen. Die Mehrheit der Füße ist damit unabhängig der BMI-Kategorie nach der STA schmerzfrei.

Am zweithäufigsten zu postoperativen Schmerzen kommt es innerhalb der Altersgruppe (10,12] mit 42,54 % der Füße im Vergleich zu 36,36 % der Füße in der Altersgruppe [5,10] und 36,02 % der Füße in der Gruppe (12,15]. Die Mehrheit der Füße zeigt postoperativ keine Schmerzen. Bezogen auf alle postoperativen Füße machten die Füße der Gruppe (12,15] den größten Anteil aus mit 49,26 %.

Unabhängig von der präoperativen Schmerzsituation zeigt sich die Mehrheit der Füße der Patienten postoperativ schmerzfrei (53,82 % bei präoperativ bestehenden Schmerzen vs. 79,81 %) bei präoperativ schmerzlosen Füßen. Dennoch ist der Anteil an präoperativ schmerzhaften Füßen an allen postoperativ schmerzhaften Füßen (84,56 %) höher als der der präoperativ schmerzlosen Füße (15,44 %). Gleiches gilt für den relativen Anteil an postoperativ schmerzhaften Füßen bezogen auf alle präoperativ schmerzhaften bzw. nicht schmerzhaften Füße (46,18 % vs. 20,19 %). In der Korrelationsanalyse nach Pearson korreliert die Variable *präoperative Schmerzen* schwach positiv mit dem Endpunkt *postoperative Schmerzen* ($r= 0,24$, $p < 0,01$) (siehe Tabelle 13 im Anhang).

In der deskriptiven Analyse zeigt sich, dass Füße, bei denen die Patienten ein abgenutztes Schuhwerk aufweisen nicht häufiger an postoperativen Schmerzen leiden als Patienten mit Füßen ohne einen Schuhkonflikt (23,33 % vs. 39,94 %). Unter allen von postoperativen Schmerzen Betroffenen, machen Patienten ohne Schuhkonflikt die Mehrheit aus (94,85 %). Gleiches gilt für die Variablen *verkürzte Wadenmuskulatu*r und *Stolpern*.

Ungefähr die Hälfte aller Füße wurde konservativ vorbehandelt. Diese Verteilung spiegelt sich nahezu im Anteil der vorbehandelten Füße an den unter postoperativen Schmerzen leidenden bzw. nicht leidenden Füßen wider (49,26 % vs. 50,74 %). Unabhängig von der Variablenausprägung zeigt sich die Mehrheit der Füße postoperativ nicht schmerzhaft, wobei der Anteil der vorbehandelten Füße mit 62,15 % geringfügig größer ist als der der unbehandelten Füße mit 60,80 %.

In der ANOVA zeigt sich der Einfluss der Variablen *Geschlecht* ($F(1)= 6,17$, $p < 0,05$) und *präoperative Schmerzen* ($F(1)= 22,12$, $p < 0,01$) auf die Varianz des klinischen Endpunktes *postoperative Schmerzen* statistisch signifikant. Die Variable *postoperative Schmerzen*

zeigt eine moderat negative Korrelation mit der *Variablen Intervall bis zur Revision* (r= -0,65, p < 0,01) (siehe Tabelle 15 im Anhang). Für die Variablen *BMI*, *Implantationsalter*, *abgenutztes Schuhwerk*, *verkürzte Wadenmuskulatur* und *Stolpern* kann kein statistisch signifikanter Zusammenhang mit dem Endpunkt *postoperative Schmerzen* gefunden werden (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: ANOVA postoperative Schmerzen

*Die Tabelle stellt die Ergebnisse der für den Endpunkt postoperative Schmerzen berechneten ANOVA (Analysis of Variance) dar. Diese soll Auskunft über die statistische Signifikanz des Einflusses der untersuchten Variablen (erste Spalte) auf den genannten Endpunkt geben. Die Tabelle untersucht den Zusammenhang an Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 mittels der Quadratsummen, degrees of freedom (df, Freiheitsgrade), Mittel der Quadrate und der F-Statistik (F). Die Interpretation erfolgt mithilfe der Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·. Zusätzlich dargestellt ist die Effektstärke, die anhand von partial eta squared (η2p) interpretiert wird. Entsprechend den Grenzen nach Cohen kann ein kleiner, mittlerer, großer oder kein Effekt – unterschieden werden (siehe 2.2.1, [25]). Die ANOVA zeigt eine statistische Signifikanz des Zusammenhanges für die Variablen Geschlecht und präoperative Schmerzen. Der Effekt ist bei beiden Variablen als klein einzustufen. BMI= Body-Mass-Index, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

Variable	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz	Partial Eta Squared (η2p)	Effekt
Geschlecht	1,44	1	1,44	6,17	*	0,02	klein
BMI							
thin	9,92	1	9,92	0,07	.	0,00	-
normal	0,20	1	0,20	0,85	.	0,00	-
overweight	0,23	1	0,23	0,95	.	0,00	-
obese	0,60	1	0,60	2,54	.	0,01	klein
Alter bei Implantation (in Jahren)							
[5,10]	0,02	1	0,02	0,07	.	0,00	-
(10,12]	0,35	1	0,35	1,47	.	0,00	-
(12,15]	0,25	1	0,25	1,04	.	0,00	-
Präoperative Schmerzen	4,96	1	4,96	22,12	**	0,06	klein
Abgenutztes Schuhwerk	0,74	1	0,74	3,14	.	0,01	klein
Verkürzte Wadenmuskulatur	0,30	1	0,30	1,25	.	0,00	-
Stolpern	0,29	1	0,29	1,23	.	0,00	-
Bisherige Therapie	0,61	2	0,31	1,29	.	0,01	klein

Signifikanzlevels: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant ·, kein Effekt -.

3.3 Zusammenfassung der Hauptergebnisse

Führt die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode zu einer statistisch signifikanten radiologischen Korrektur des fkKSF?

Die Auswertung der radiologischen Winkelmessungen zeigt, dass es zu einer in der ANOVA statistisch signifikanten Veränderung der Messungen in Richtung Referenzbereichsmitte bei fünf von sechs gemessenen Winkeln kommt (p < 0,01 für den TMTI-lat, Calc-B, Costa-B, TMTI-dp und TC-dp) (siehe Tabelle 8). Mit Ausnahme des TMTI-lat liegen alle Winkel nach der STA im Referenzbereich (83,33 %) (siehe Tabelle 7). Unter Zusammenschau der Ergebnisse, kann die am Anfang dieser Arbeit formulierte Hypothese, dass sich

die Winkel im Vergleich zum präoperativen Vorbefund postoperativ verändert zeigen, bestätigt werden. Die erste Leitfrage kann abschließend mit „*Ja*“ beantwortet werden, die STA führt zu einer radiologischen statistisch signifikanten Korrektur des fkKSF. Beispiele für ein finales Korrekturergebnis sind in Abbildung 13-Abbildung 15 dargestellt.

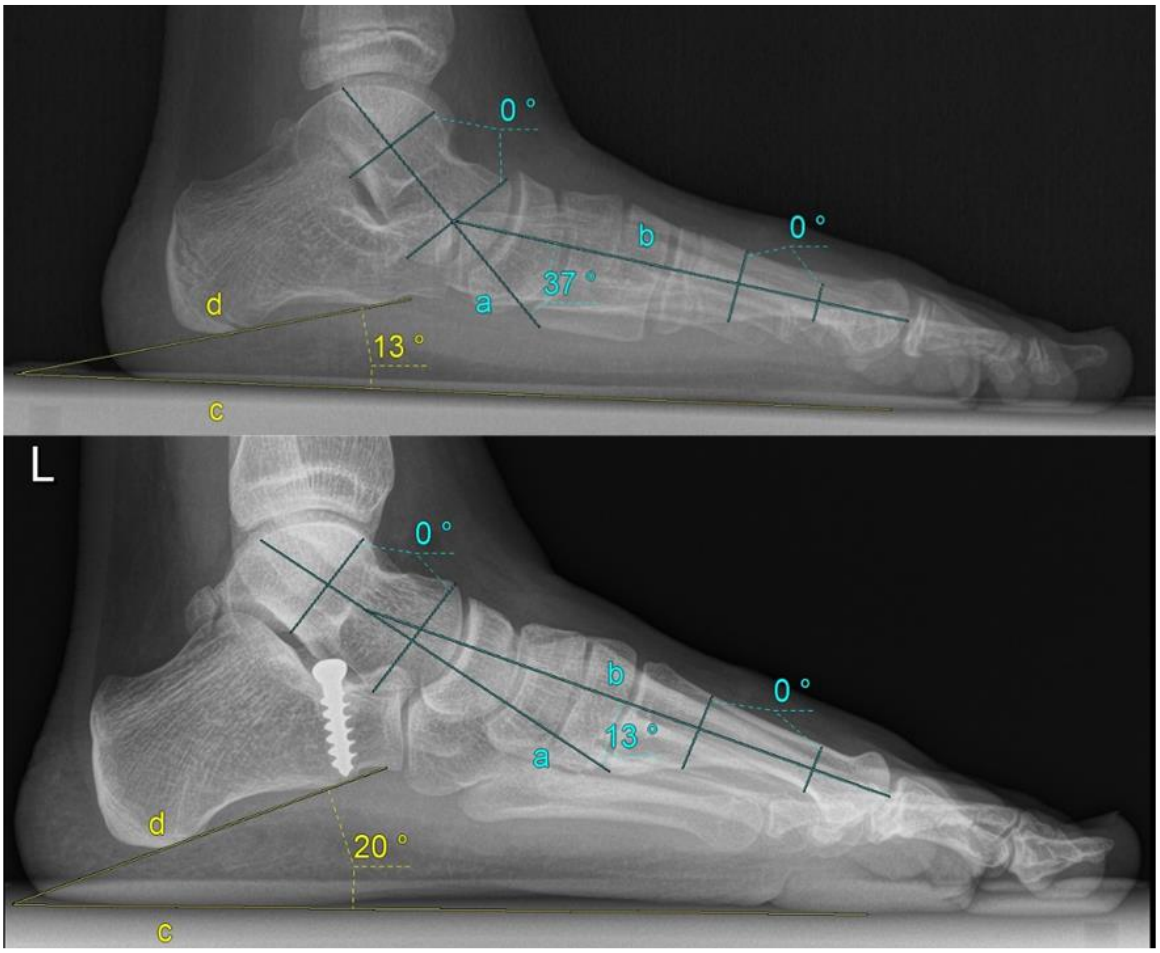


Abbildung 13: Beispiel für ein finales Korrekturergebnis in der lateralen Röntgenprojektion (TMTI-lat und Calc-B)

Die Abbildung zeigt das finale Korrekturergebnis für einen linken fkKSF aus dem studieneigenen Patientengut. Dieser wurde zwischen 2007 und 2018 in der Klinik für Orthopädie des UKU mittels STA versorgt. ***Oben:*** *Präoperativ angefertigte Röntgenaufnahme in der lateralen Röntgenprojektion im Stehen unter Belastung mit Konstruktion des Talus-Metatarsale-I-Winkels (TMTI-lat) in Blau (hier 37°) und dem Calcaneus-Boden-Winkel (Calc-B) in Gelb (hier 13°). Die Konstruktion des TMTI-lat erfolgt mithilfe der Längsachsen des Talus (a) und des Os metatarsale I (b). Die Längsachsen werden unter Gebrauch von Hilfslinien konstruiert. Für die Taluslängsachse (a) werden dafür zwei die Kortikalis des Talus im Bereich des Caput und Corpus tali senkrecht schneidende, zueinander parallele Hilfslinien eingezeichnet. Für die Längsachse des Os metatarsale I (b) liegen die nach gleicher Vorgehensweise konstruierten Hilfslinien im Bereich des proximalen und distalen Knochenschaftes [29, 66, 77]. Der Calc-B wird durch eine Horizontale (c) und eine Linie entlang der plantaren Kontur des Calcaneus (d) konstruiert [14, 66].* ***Unten:*** *Postoperativ angefertigte Röntgenaufnahme mit geschlossenen Wachstumsfugen im Stehen unter Belastung. Eingezeichnet sind der TMTI-lat in Blau (hier 13°) und der Calc-B in Gelb (hier 20°). Das Implantat liegt unter dem Processus lateralis tali in situ. Es zeigt sich eine deutliche Differenz beider Winkel zwischen den Aufnahmezeitpunkten, mit einer Zunahme des Calc-B um 7° und einer Abnahme des TMTI-lat um 24°. Die gezeigte Veränderung spricht für eine Korrektur des knöchernen Alignments und Aufrichtung des MLG durch die subtalare Arthrorise (STA). Beide Winkel nähern sich ihrem Referenzbereich bei Wachstumsabschluss an. Die Messung des Calc-B liegt nach der STA im Referenzbereich (siehe Tabelle 1). MLG= mediales Längsgewölbe, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

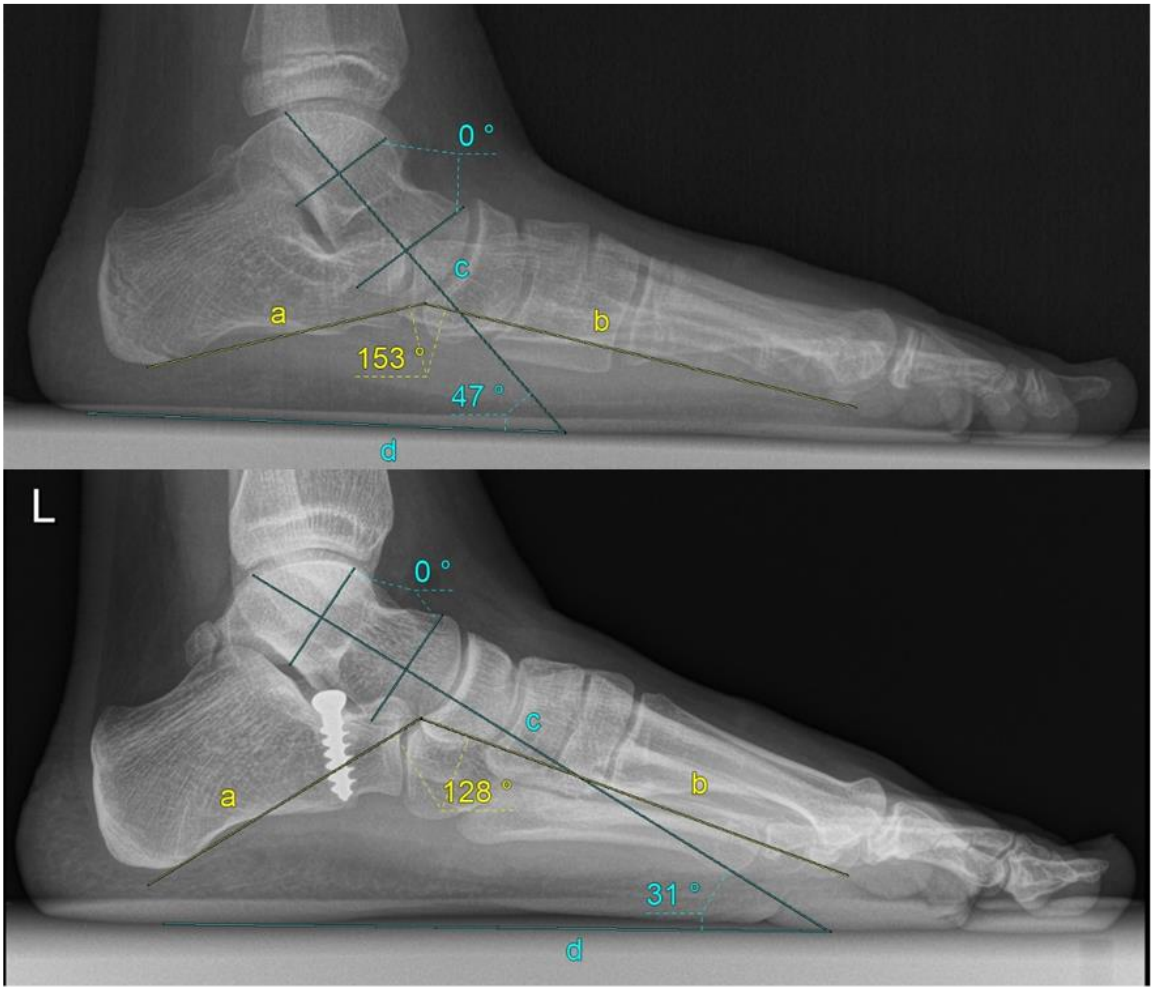


Abbildung 14: Beispiel für ein finales Korrekturergebnis in der lateralen Röntgenprojektion (Costa-B und T-dekl)

Die Abbildung zeigt exemplarisch das finale Korrekturergebnis für einen linken fkKSF aus dem studieneigenen Patientengut. Dieser wurde zwischen 2007 und 2018 in der Klinik für Orthopädie des UKU mittels STA versorgt. ***Oben:*** *Präoperativ angefertigte Röntgenaufnahme im Stehen unter Belastung mit Konstruktion des Moreau-Costa-Bartani-Winkels (Costa-B) in Gelb (hier 153°) und der Talusdeklination (T-dekl) in Blau (hier 47°). Die Konstruktion des Costa-B erfolgt mithilfe von zwei von der plantarsten Stelle des Talus im Talonavikulargelenk ausgehenden Verbindungslinien. Die Linien ziehen jeweils zum plantaren Auflagepunkt des Calcaneus (a) und der unteren Kante des medialen Sesambeines des Os metatarsale I (b) [33, 97, 126]. Die T-dekl wird mithilfe der Taluslängsachse (c) und einer Horizontalen (d) konstruiert. Für die Konstruktion der Taluslängsachse (c) werden zwei die Kortikalis des Talus im Bereich des Caput und Corpus tali senkrecht schneidende, zueinander parallele Hilfslinien eingezeichnet [29, 66].* ***Unten****: Postoperativ angefertigte Röntgenaufnahme mit geschlossenen Wachstumsfugen im Stehen unter Belastung. Eingezeichnet sind der Costa-B in Gelb (hier 128°) und die Talusdeklination (T-dekl) in Blau (hier 31°). Das Implantat liegt unter dem Processus lateralis tali in situ. Es zeigt sich eine deutliche Differenz beider Winkel zwischen den Aufnahmezeitpunkten, mit einer Abnahme des Costa-B um 25° und einer Abnahme der T-dekl um 16°. Die gezeigte Veränderung spricht für eine Korrektur des knöchernen Alignments und Aufrichtung des MLG durch die subtalare Arthrorise. Beide Winkel nähern sich ihrem Referenzbereich bei Wachstumsabschluss an (siehe Tabelle 1). MLG= mediales Längsgewölbe, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

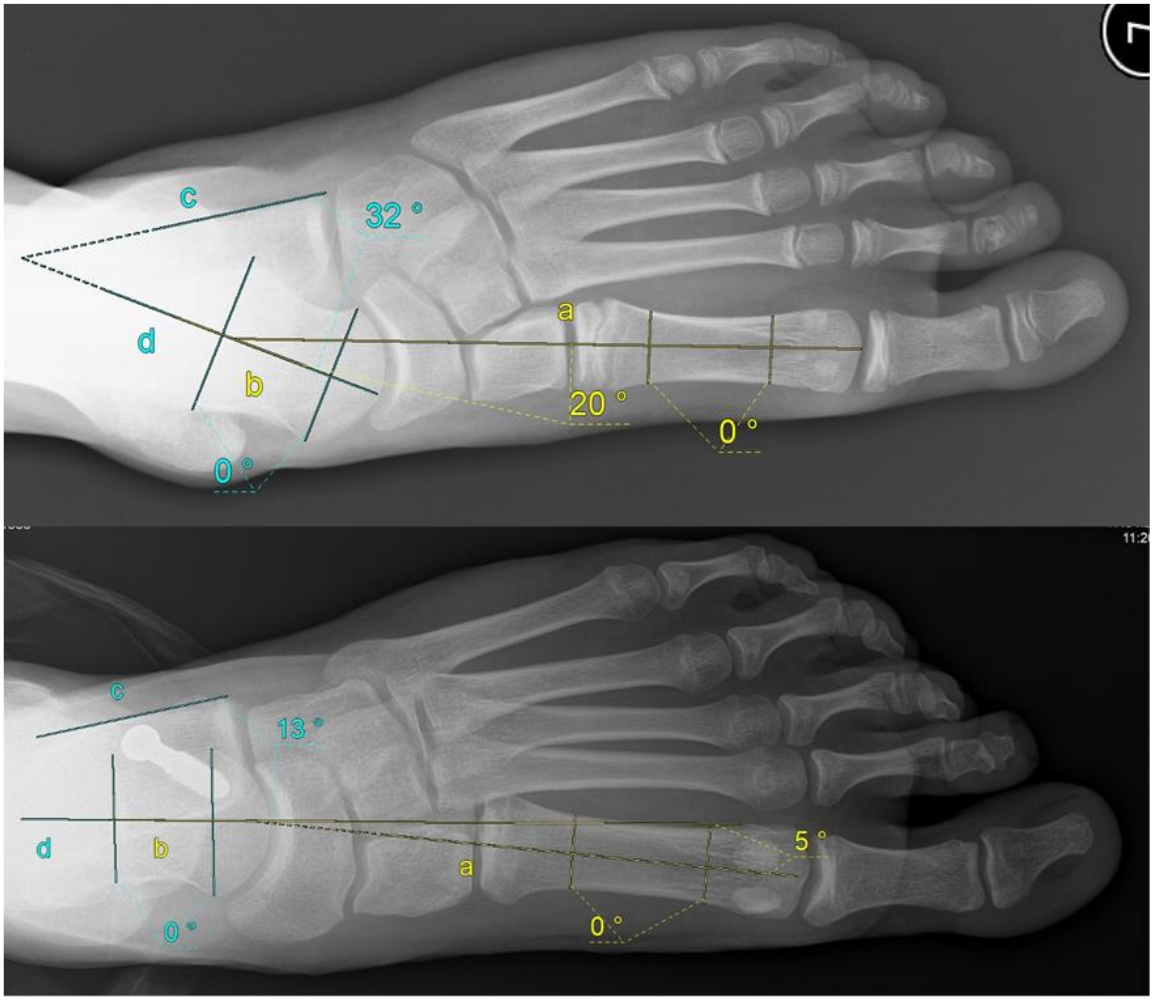


Abbildung 15: Beispiel für ein finales Korrekturergebnis in der dorsoplantaren Röntgenprojektion (TMTI-dp und TC-dp)

Die Abbildung zeigt exemplarisch das finale Korrekturergebnis für einen linken fkKSF aus dem studieneigenen Patientengut. Dieser wurde zwischen 2007 und 2018 in der Klinik für Orthopädie des UKU mittels STA versorgt. ***Oben:*** *Präoperativ angefertigte Röntgenaufnahme in der dorsoplantaren Projektion im Stehen unter Belastung mit Konstruktion des Talus-Metatarsale-I-Winkels (TMTI-dp) in Gelb (hier 20°) und dem talocalcanearen Winkel in Blau (hier 32°). Die Konstruktion des TMTI-dp erfolgt mithilfe der Längsachsen des Talus (b/d) und des Os metatarsale I (a). Die Längsachsen werden unter Gebrauch von Hilfslinien konstruiert. Für die Taluslängsachse (b/d) werden zwei die Kortikalis des Talus im Bereich des Caput und Corpus tali senkrecht schneidende, zueinander parallele Hilfslinien eingezeichnet. Für die Längsachse des Os metatarsale I (a) liegen die nach gleicher Vorgehensweise konstruierten Hilfslinien im Bereich des proximalen und distalen Knochenschaftes [96]. Der TC-dp wird durch eine Linie entlang der lateralen Calcaneuskontur (c) und der Taluslängsachse (b/d) konstruiert [29, 66].* ***Unten:*** *Postoperativ angefertigte Röntgenaufnahme mit geschlossenen Wachstumsfugen im Stehen unter Belastung. Eingezeichnet sind der TMTI-dp in Gelb (hier 5°) und der TC-dp in Blau (hier 13°), das Implantat liegt unter dem Processus lateralis tali in situ. Es zeigt sich eine deutliche Differenz beider Winkel zwischen den Aufnahmezeitpunkten, mit einer Abnahme des TMTI-dp um 15° und einer Abnahme des TC-dp um 19°. Die gezeigte Veränderung spricht für eine Korrektur des knöchernen Alignments und Aufrichtung des MLG durch die subtalare Arthrorise. Die konstruierten Winkel liegen nach der Operation weiterhin in ihrem Referenzbereich und näher an dessen Mitte (siehe Tabelle 1). MLG= mediales Längsgewölbe, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

Führt die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF und welche Variablen beeinflussen die Einschätzung von der STA profitiert zu haben?

Die retrospektive Evaluation des Behandlungsverlaufes durch den behandelnden Orthopäden und das Abschlussgespräch mit den Patienten zeigen, dass es in 96,30 % (n= 340) der Füße zu einer Verbesserung des klinischen Erscheinungsbildes sowie der Symptomatik der Patienten kommt und diese von der STA profitieren (siehe 3.2.2). In der ANOVA zeigen sich die Variablen *Altersgruppe [5,10]* und *postoperative Schmerzen* für den klinischen Endpunkt: *Einschätzung von der STA profitiert zu haben*, statistisch signifikant ($p < 0,01$, siehe Tabelle 9). Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann die zweite Leitfrage abschließend mit „*Ja*“ beantwortet und die am Anfang dieser Studie formulierte Hypothese bestätigt werden. Die STA führt zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF und die Mehrheit der Patienten zeigt sich mit dem Korrekturergebnis der STA zufrieden. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Variablen *Altersgruppe [5,10]* und *postoperative Schmerzen* die Einschätzung von der STA zu profitieren negativ beeinflussen.

Welche Variablen nehmen Einfluss auf den Behandlungsverlauf bei der operativen Versorgung des fkKSF durch eine STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode?

Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich das klinische Outcome in Abhängigkeit der Patienteneigenschaften zwischen den Patienten unterscheidet und es Variablen gibt, die den Behandlungsverlauf beeinflussen. Im Verlauf der Behandlung kam es in 38,24 % der Füße zu Komplikationen. Es zeigt sich eine schwach positive Korrelation zwischen der Variablen *Altersgruppe [5,10]* und dem klinischen Endpunkt *postoperative Komplikationen* ($r= 0,17$, $p < 0,01$) bzw. eine stark positive Korrelation mit der Variablen *Intervall bis zur Revision* ($r= 0,74$, $p < 0,01$) (siehe Tabelle 14 im Anhang und 3.1.4). Füße der *Altersgruppe [5,10]* (63,64 %) und der BMI-Kategorie *obese* (50 %) zeigen außerdem die höchste Komplikationsrate (siehe 3.2.3.1) und die Mehrheit der Füße, die einen Korrekturverlust der Schraube erlitten und revidiert werden mussten, können im Hinblick auf das Implantationsalter der betroffenen Patienten der *Altersgruppe [5; 10]* zugeordnet werden. Mädchen erleiden häufiger postoperative Komplikationen (45,24 % vs. 31,89 %) und postoperative Schmerzen (45,24 % vs. 32,43 %) als Jungen. Füße, die vor der STA schmerzhaft waren, zeigen häufiger postoperative Schmerzen (46,18 % vs. 20,19 %) und erleiden häufiger postoperative Komplikationen (43,37 % vs. 25,96 %) als präoperativ

schmerzlose Füße (siehe 3.2.3.2). Der Einfluss der genannten Variablen auf die Häufigkeit des klinischen Endpunktes *postoperative Komplikationen* zeigt sich in der ANOVA für die Variablen G*eschlecht*, *Altersgruppe [5,10]*, *präoperative Schmerzen* und *postoperative Schmerzen* statistisch signifikant ($p < 0,01$) (siehe Tabelle 11). In der ANOVA zeigt sich der Einfluss der Variablen *Geschlecht* ($p < 0,05$) und *präoperative Schmerzen* ($p < 0,01$) auf die Varianz des klinischen Endpunktes *postoperative Schmerzen* statistisch signifikant (siehe Tabelle 12). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit deuten darauf hin, dass die im Hinblick auf die vierte Leitfrage formulierte Hypothese bestätigt werden kann. Die Variablen *Geschlecht*, *Alter bei Implantation*, *präoperative* und *postoperative Schmerzen* nehmen Einfluss auf den Behandlungsverlauf bei der operativen Versorgung des fkKSF mittels der Calcaneus-Stopp-Methode und scheinen sowohl postoperative Komplikationen als auch Schmerzen zu bedingen.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll im Rahmen der Diskussion auf die Bedeutung der Studienergebnisse näher eingegangen werden.

4 Diskussion

Nach der Darlegung des theoretischen Hintergrundes, der Beschreibung der verwendeten Materialien und der Methoden sowie Darstellung der Untersuchungsergebnisse folgt deren Diskussion und Interpretation im Hinblick auf die aktuelle Studienlage. Es erfolgt zunächst eine Diskussion des radiologischen Outcomes (siehe 4.1), gefolgt von einer Diskussion des klinischen Outcomes (siehe 4.2). Am Ende der Diskussion wird eine Schlussfolgerung aus der vorliegenden Arbeit gezogen (siehe 4.3) und ein Ausblick auf zukünftige Forschungsschwerpunkte gegeben (siehe 4.4).

4.1 Diskussion des radiologischen Outcomes

Im Rahmen der Diskussion des radiologischen Outcomes wird zunächst die Datenqualität thematisiert (siehe 4.1.1). Anschließend erfolgt die Diskussion und kritische Reflektion der in der Literatur gängigen Evaluationsmethode und deren Messbedingungen. Parallel dazu werden Unterschiede zu der Methodik der vorliegenden Arbeit aufgezeigt und begründet (siehe 4.1.2 und 4.1.3). In diesem Kontext werden die radiologisch gewonnenen Daten präsentiert und interpretiert. Bezüglich der Literatur wird der Fokus auf Studien gelegt, die hinsichtlich ihrer Ein- und Ausschlusskriterien, Patienteneigenschaften, wie z. B. dem Implantationsalter, der Ätiologie des fkKSF und der Anwendung der Calcaneus-Stopp-Methode vergleichbar sind [5, 29, 33, 77, 97, 112–114, 124].

4.1.1 Datenqualität

Eine entscheidende Stärke dieser Studie stellt die Größe der untersuchten Studienpopulation, deren Homogenität und die Länge des postoperativen Follow-up dar.

Größe und Homogenität der Studienpopulation

Beobachtet wurden 178 Patienten (353 Füße). Der Vergleich mit der Literatur zeigt, dass mit Ausnahme von Pavone et al. (410 Füße) und De Pellegrin et al. (732 Füße), derzeit keine vergleichbare Studie mehr Probanden betrachtet, als die vorliegende Studie [33, 112]. In die Studienpopulation wurden ausschließlich idiopathische fkKSF eingeschlossen bei denen die Wachstumsfugen der Füße noch offen waren. Ein KSF anderer Ätiologie führte zum Studienausschluss. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, um einen repräsentativen Eindruck vom Korrekturpotenzial der STA zu bekommen (siehe 2.1.1). Marengo et al. konnten zeigen, dass ein fkKSF eine stärkere radiologische Korrektur erreicht als beispielsweise ein nKSF oder sKSF [93]. Der Studieneinschluss von KSF anderer Ätiologie hät-

te damit zu einer Unterschätzung des Korrekturpotenzials der STA führen können. Des Weiteren wurden in dieser Studie nur Füße betrachtet, die ohne weiterführende Weichteileingriffe oder knöcherne Verfahren operativ versorgt wurden. Im Vergleich zu anderen Publikationen, in denen die Kombination operativer Verfahren geläufig ist, stellt die vorliegende Arbeit somit eine Ausnahme dar [29, 77, 97, 112]. Gleichzeitig repräsentieren die Ergebnisse dieser Studie damit das alleinige Korrekturpotenzial der STA ohne zusätzliche Einflüsse.

Implantationsalter und Follow-up

Ein großer Diskussionspunkt in der Literatur ist das Implantationsalter. Vorgeschlagen wird ein Implantationszeitraum zwischen dem 9. und 13. Lebensjahr [2, 33, 54, 79]. Die Korrektur nimmt anschließend mindestens zwei Jahre in Anspruch [47]. Mit einem mittleren Implantationsalter von 11,96 Jahren ± 1,46 und Verbleib der Schraube für 49,76 Monate ± 20,37 in situ, wird die vorliegende Arbeit diesen Anforderungen für eine erfolgreiche Korrektur gerecht. Nach operativer Versorgung mittels STA wurden die Patienten im Mittel 51,47 Monaten ± 20,21 (4,29 Jahre ± 1,68) beobachtet. Die vorliegende Studie ist bezüglich der Beobachtungszeit mit anderen Arbeiten, die die Calcaneus-Stopp-Methode verwenden, vergleichbar [5, 29, 33, 77, 97, 112–114, 124]. In den meisten Studien werden die Patienten zwischen vier und sechs Jahren beobachtet [29, 33, 113, 114, 124]. Einige wenige Studien, wie die von Memeo et al. und Pavone et al., zeigen deutlich längere Beobachtungszeiten [97, 112]. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in der vorliegenden Studie die Nachbeobachtungszeit mit der Entlassung der Patienten nach der Explantation beendet wurde. Bei den genannten Studien fand über den Zeitpunkt der Explantation hinaus eine klinische Evaluation statt.

4.1.2 Bildgebende Verfahren

Es sollte beantwortet werden, ob die STA zu einer radiologischen Korrektur des fkKSF führt. Um eine Antwort auf diese Frage zu finden, wurde sich in der vorliegenden Studie für die einzig bekannte und in der Literatur verbreitete Methode der radiologischen Winkelmessung entschieden [33, 66, 97, 112, 113, 122]. Beim fkKSF handelt es sich um eine dreidimensionale Pathologie. Diese präsentiert sich ausschließlich im Stehen unter Gewichtsbelastung, während sich bei der Entlastung des Fußes das Bild eines aufgerichteten MLG zeigt [1, 22, 69, 139]. Nur das Röntgen kann das Fußskelett im Stehen abbilden und

ist folglich das einzige bildgebende Verfahren, das für eine radiologische Evaluation sinnvoll ist [61]. Andere bildgebende Verfahren, wie die Computertomografie oder Magnetresonanztomografie, sind aufgrund deren Durchführung im Liegen nicht dafür geeignet, die Pathologie sicher darzustellen. Das Röntgen ist des Weiteren die Methode der Wahl in der Basisdiagnostik und differenzialdiagnostische Abklärung der Ätiologie des fkKSF. Eine Evaluation des radiologischen Outcomes kann somit an ohnehin angefertigten Röntgenbildern durchgeführt werden und die Patienten müssen sich keinen zusätzlichen Untersuchungen unterziehen [34, 66]. Von Vorteil ist außerdem, dass das Röntgen im ambulanten Setting ohne große Zeitverzögerung durchgeführt und interpretiert werden kann. Damit wird der Behandlungsprozess beschleunigt und Ressourcen werden geschont. Zudem ist bei fortgeschrittenem Patientenalter eine zeitnahe Implantation der Schraube möglich. Die Aufnahme einer zweiten Ebene, wie in dieser Studie durchgeführt, ist essenziell [5]. Einerseits kann nur so die Dreidimensionalität der Pathologie erfasst und das radiologische Outcome vollständig beurteilt werden. Andererseits kann sich der fkKSF in der lateralen oder dorsoplantaren Ebene vollkommen unauffällig präsentieren, sodass es bei Berücksichtigung von nur einer Röntgenebene zu Fehldiagnosen kommen kann [61, 66]. Die mangelnde Berücksichtigung einer zweiten Röntgenebene ist eine methodische Schwäche der Studien von De Pellegrin et al., Jerosch et al. und Roth et al. [33, 77, 124].

Messbedingungen

Um das Korrekturpotenzial der STA abschließend beurteilen zu können, ist die Aufnahme postoperativer Röntgenbilder und Durchführung erneuter Winkelmessungen für den Vergleich mit präoperativen Befunden notwendig. Eine große Diskrepanz besteht hier in der Literatur im Hinblick auf den Aufnahmezeitpunkt der für diese Messungen verwendeten Röntgenaufnahmen. Da diesbezüglich keine Empfehlungen durch die Leitlinien herausgegeben werden, kann jeder Untersucher ein eigenes Aufnahmeregime wählen [34]. Einige Studien maßen die Winkel an direkt nach der Operation oder im Abstand von wenigen Monaten postoperativ aufgenommen Röntgenbildern [29, 96, 97, 112, 129]. De Pellegrin et al. beobachteten jedoch Schwankungen ihrer Messwerte im postoperativen Verlauf. Direkt im Anschluss an die STA beträgt der Costa-B beim untersuchten Studienkollektiv im Mittel 129° und vor der Explantation im Mittel 123,9° [33]. Derartige Schwankungen der Messwerte konnten neben dem Costa-B auch für den Calc-B, TC-dp und die T-dekl beobachtet werden [33, 114]. Die Folge ist eine eingeschränkte Vergleichbarkeit der Studien-

ergebnisse, unter anderem aufgrund mangelnder Transparenz im Hinblick auf den postoperativen Messzeitpunkt, sowie die Unterschätzung des Korrekturpotenzials bei vorzeitiger Messung und noch geöffneten Wachstumsfugen des Fußskelettes. Damit sind weiteren Veränderungen der Winkel möglich. Eine adäquate Evaluation des radiologischen Outcomes und finalen Korrekturpotenzials der STA ist insofern nur gegeben, wenn die Messungen an Röntgenaufnahmen mit geschlossenen Wachstumsfugen durchgeführt werden. Während dieses Vorgehen mit einem längeren Follow-up verbunden ist, kann so die Strahlenbelastung der Patienten reduziert werden, da gezeigt werden konnte das frühzeitige Messungen nicht repräsentativ sind und bei mangelnden Beschwerden der Patienten mit Ausnahme des Studieninteresse nicht indiziert sind [33, 114]. Eine entscheidende Stärke dieser Studie ist damit, dass für die postoperative Vergleichsmessung, die für die Indikation zur Metallentfernung aufgenommenen Röntgenbilder verwendet wurden. Diese ist abgesehen von einer Revision nur indiziert, wenn die Wachstumsfugen geschlossen sind (siehe 2.1.6). Ein entsprechendes Vorgehen wählten auch Indino et al. und De Pellegrin et al. [33, 75].

Bezüglich der Frage, wer die Messungen vornehmen soll, besteht kein Konsens. Eine Stärke dieser Studie ist, dass die Messungen nach ausführlicher Schulung zu drei unabhängigen Zeitpunkten von Personen unterschiedlichen Ausbildungsstandes durchgeführt wurden: dem geschäftsführenden Oberarzt der Klinik für Orthopädie des UKU, einem Assistenzarzt im vierten Ausbildungsjahr und einer Medizinstudentin im dritten Ausbildungsjahr. Dadurch konnte das Risiko für Fehlkonstruktionen zusätzlich reduziert und die Objektivität und Validität der Messungen erhöht werden.

4.1.3 Winkelmessungen am kindlichen Fußskelett

Winkel stellen ein gutes Maß für die Quantifizierung der mittels STA erreichten radiologischen Korrektur des fkKSF dar. Die adäquate Messung der Winkel kann schwer sein. Da die Wachstumsfugen bei denen für die STA infrage kommenden Patienten noch nicht geschlossen sind, können die Ossifikationszentren in ihrer Lage und Form von der zu erwartenden Position abweichen und exzentrisch liegen [5, 69]. Diese Problematik kann nicht vermieden werden, da offene Wachstumsfugen für eine erfolgreiche Korrektur zu Therapiebeginn notwendig sind. Ein Nachteil im Hinblick auf die Interpretation der Winkelmessungen ist der Mangel an einheitlich anerkannten Referenzwerten. Hier besteht eine gro-

ße Streubreite, da diese primär auf Fallstudien beruhen [34, 66, 99]. Im Folgenden werden die gemäß den Leitlinien empfohlenen Winkel und die durch deren Konstruktion erhobenen Daten diskutiert.

4.1.3.1 Laterale Projektion

Talus-Metatarsale-I-Winkel

Der TMTI-lat ist ein gebräuchlicher Winkel in der Diagnostik des fkKSF [61]. Seine Messwerte stellen ein Maß für die durch den Pathomechanismus des fkKSF verursachte Plantarflexion, inferiomediale Rotation des Talus und die Subluxation des Articulatio talonaviculare dar [61, 66, 96]. Abgesehen davon, dass der TMTI-lat die knöchernen Veränderungen bei einem fkKSF gut darzustellen vermag, wurde er in dieser Studie gemessen, da Younger et al. zeigen konnten, dass der TMTI-lat eine hohe Intra- und Interobserver-Korrelation sowie Trennschärfe in der Unterscheidung zwischen einem fkKSF und normalen Fuß besitzt [165]. Eine methodische Stärke und Besonderheit dieser Studie ist die Verwendung von Hilfslinien für die Konstruktion der Längsachsen von Talus und Os metatarsale I (siehe 2.1.6.1 und Abbildung 5). Durch die Rotation des Talus ist dessen ursprüngliche Längsachse häufig verschoben. Ohne richtungsweisende Strukturen, die diese Rotation in dessen zweidimensionaler Konstruktion berücksichtigen, ist lediglich eine eingeschränkte Validität der Messwerte gegeben. Bei der Konstruktion ohne Hilfslinien kann es zu großen Abweichungen zwischen zwei Messungen kommen (Reliabilität). Dies kann sich in einer Veränderung der Winkel von mehreren Grad zwischen den Messungen äußern. Aufgrund dessen, dass keine der zum Vergleich des radiologischen Outcomes herangezogene Studien ein solches Vorgehen für die Konstruktion des TMTI-lat beschreibt, sind die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit aussagekräftiger und repräsentativer was das wahre Korrekturpotenzial der STA betrifft [5, 29, 33, 77, 97, 112–114, 124]. Gleiches gilt für die Messungen der T-dekl. Der TMTI-lat wurde neben dieser Studie von Arbab et al., Das et al., Roth et al. und Jerosch et al. gemessen [5, 29, 77, 124]. In allen Studien konnte gezeigt werden, dass es durch die STA zu einer Aufrichtung des MLG und Stabilisierung des ersten Metatarsalstrahles kommt [5, 29, 61, 77, 96, 124, 144]. Das et al. zeigten, dass es zu einer signifikanten Abnahme des TMTI-lat von 32,70° ± 0,43 auf 18° ± 0,41 kommt [29]. Die Differenz des TMTI-lat fiel in dieser Arbeit mit einer Abnahme des TMTI-lat von 21,77° ± 8,19 auf 14,74° ± 8,22 geringer aus. Diese Diskrepanz der Messergebnisse lässt sich unter anderem dadurch erklären, dass Das et al. neben der STA zusätzlich ein Weich-

teilverfahren durchführten. Mit der Kombination der operativen Verfahren kann ein größerer Korrekturerfolg erzielt werden [29, 77, 97, 112]. Ein zweiter Erklärungsansatz für die Diskrepanz der Ergebnisse könnte in der erneuten Gefahr für Konstruktionsfehler bei der Zweidimensionalität der Röntgenaufnahmen liegen. Hier kann es zu einer Überlagerung des Os metatarsale I mit den Mittelfußknochen II-V kommen. In der vorliegenden Studie konnten die für die Konstruktion des TMTI-lat notwendigen anatomischen Strukturen mithilfe der Bearbeitungsoptionen des Röntgenprogramms Centricity™ Universal Viewer, in Hinsicht auf z. B. Kontrast und Helligkeit, sicher identifiziert und abgrenzt werden. Messungenauigkeiten wurden somit zusätzlich reduziert.

Calcaneus-Boden-Winkel

Der Calc-B findet insbesondere aufgrund seiner einfachen und unter den Studien einheitlichen Konstruktion breite Akzeptanz in der Literatur. Sensiba et al. konnten zeigen, dass der Calc-B die höchste Interobserver Reliabilität unter allen untersuchten Winkeln besitzt [132]. Der Calc-B zeigte in dieser Studie die geringfügigste Veränderung. Dennoch kam es nach der STA zu einer Aufrichtung des MLG mit einer erwarteten Zunahme des Calc-B von 15,75° ± 4,33 auf 17,92° ± 4,76 (siehe Abbildung 13) [144]. Die Ergebnisse dieser Studie sind in dieser Hinsicht mit denen der Literatur vergleichbar. De Pellegrin et al. verzeichneten eine Zunahme von 11° ± 6 auf 14° ± 5 und Pavone et al. von 12,6° ± 2,3 auf 16,3° ± 1,3 [33, 113]. Weitere vergleichbare Studien zeigten bei einem summierten Korrektureffekt durch die Kombination der STA mit einem Weichteilverfahren eine mittleren Veränderung von über 4° [29, 97, 112, 114]. In der Publikation von De Pellegrin et al. veränderte sich der Costa-B und die T-dekl stärker als der Calc-B [33]. Diese Beobachtung konnte auch in dieser Arbeit gemacht werden. Die Ursache dafür wird, wie auch von den Kollegen, in der Lokalisation der Schraube im Subtalargelenk vermutet. Dabei wird ein stärkerer Einfluss der STA auf die Stellung des Talus, anstatt der des Calcaneus angenommen. Dieser Zusammenhang stellt sich eher in den Messwerten der T-dekl und des Costa-B dar als in denen des Calc-B. Trotz der hohen Vergleichbarkeit für den Calc-B zwischen den Studien, muss darauf hingewiesen werden, dass Messwerte für den Calc-B auch bei stark ausgeprägtem fkKSF im Referenzbereich liegen können. Der Calc-B kann nicht zuverlässig zwischen einem Pes planovalgus und der kindlichen Normvariante differenzieren [66].

Moreau-Costa-Bartani-Winkel

Neben dem Calc-B gehört der Costa-B zu den in Studien am häufigsten gemessenen Winkeln. Auch er ist ein gutes Maß für die Abflachung des MLG und die Subluxation des Articulatio talonaviculare. Im Hinblick auf den Pathomechanismus des fkKSF sind vor der STA stumpfe Winkel zu erwarten [144]. Der Costa-B zeigte in dieser Studie eine Veränderung der Messwerte von 136,83° ± 7,78 präoperativ auf 127,57° ± 7,65 postoperativ. Entsprechend der biomechanischen Wirkung der STA erfüllt diese Reduktion die Erwartungen dieser Studie. Eine solche statistisch signifikante Veränderung konnte, mit Ausnahme von Roth et al. und Jerosch et al., auch in allen anderen zum Vergleich herangezogenen Publikationen beobachtet werden [5, 29, 33, 97, 112–114]. Memeo et al. zeigten beispielsweise eine Veränderung des Costa-B von 136,72° ± 3,62 auf 123,37° ± 6,28. Andere Studien, wie die von De Pellegrin et al. oder Pavone et al., zeigten teilweise eine im Vergleich zu der vorliegenden Arbeit deutlich stärkere Veränderung [33, 113]. Ein möglicher Erklärungsansatz findet sich in den deutlich höheren präoperativen Ausgangswerten des Costa-B in den genannten Studien. Pavone et al. maßen für den Costa-B präoperativ Werte von 156,1° ± 4,2 [113]. Damit besteht bei größerem Abstand zum Referenzbereich grundsätzlich ein größeres Korrekturpotenzial. In der vorliegenden Studie konnte mit unmittelbarer Nähe der Ausgangswerte zum Referenzbereich (120-125°) von Beginn an eine geringere Korrektur erreicht werden, da das knöcherne Alignement hier geringere Unterschiede zu dem eines physiologischen Fußes zeigt und die STA schneller an ihre Grenzen kommt [34, 97, 126]. Die Diskrepanz der vorliegenden Ergebnisse mit denen anderer Arbeiten kann außerdem auf der Annahme von Konstruktionsfehlern begründet werden. Die Konstruktion des Costa-B kann fehleranfällig sein, da diese aufgrund des oft nicht sichtbaren medialen Os sesamoideum in der präoperativen Röntgenaufnahme, Erfahrung und Übung benötigt (siehe Abbildung 6) [66]. Bei Fehlen des Os sesamoideum kann es zu Messungenauigkeiten kommen.

Talusdeklination

Die Messung der T-dekl wird von den Leitlinien nicht empfohlen [34]. In der Literatur findet der Winkel allerdings breite Anwendung und Anerkennung [5, 29, 33, 96, 97, 112, 113]. Aus diesem Grund und da die primären Stellungsveränderungen bei einem fkKSF zwischen dem Talus und den subtalaren Fußstrukturen stattfinden, welche durch die Konstruktion der T-dekl abgebildet werden, wurde sich in dieser Studie dazu entschlossen,

die T-dekl entgegen den Empfehlungen der Leitlinien zu messen (siehe Abbildung 6) [66]. Vor der STA sind Messwerte oberhalb des Referenzbereichs zu erwarten. Pavone et al. konnten mittels der STA eine Reduktion der T-dekl von 44,2° ± 6,3 auf 30,6° ± 3,2 erzielen [113]. Damit zeigten die Kollegen und die vorliegende Arbeit, dass durch die STA der Talus zunehmend in eine horizontale Position gebracht werden kann. Der Winkel wird spitzer und nimmt entsprechend der reduzierten Plantarflexion ab. Das zeigte sich in dieser Studie durch eine Reduktion der Messungen für die T-dekl von 36,52° ± 6,53 auf 32,62° ± 6,26 [96]. Memeo et al. lagen mit einem Ausgangswert von 34,64° ± 4,19 nahe am Referenzbereich (20-30°) [97]. Damit kam es zu einer im Vergleich geringeren Reduktion der T-dekl auf 29,79° ± 4,97 [97]. Während in dieser Studie die Veränderung der T-dekl nicht statistisch signifikant war, was mit den Ergebnissen von Arbab et al. übereinstimmt, konnte gezeigt werden, dass in anderen Studien durchaus eine statistische Signifikanz besteht [5, 29, 33, 97, 112–114]. Im Hinblick auf diese Ergebnisse sollte in Erwägung gezogen werden, die T-dekl in die Empfehlungen der Leitlinie aufzunehmen [34]. Nachteile der T-dekl wurden im Hinblick auf die Konstruktion der Taluslängsachse bereits mit dem TMTI-lat diskutiert.

TC-lat

In dieser Studie wurde der TC-lat nicht gemessen. Indino et al. vermuteten, dass die Korrektur des fkKSF sich nicht in einer Veränderung des TC-lat, sondern primär in der anderer Winkel zeigt [75]. Bourdet et al. zeigten, dass trotz klinisch apparentem Rückfußvalgus, der TC-lat nicht mit diesem korreliert [14]. Der TC-lat findet keine Akzeptanz in der Literatur und wurde von keiner mit dieser Arbeit vergleichbaren Studie gemessen [5, 29, 33, 77, 97, 112–114, 124]. Angesichts dieser Erkenntnisse und im Hinblick auf die Leitfragen dieser Studie, ist davon auszugehen, dass die Messung des TC-lat keine zusätzlichen Erkenntnisse für die Beantwortung der ersten Leitfrage gebracht hätte.

4.1.3.2 Dorsoplantare Projektion

Die Aufnahme einer zweiten Röntgenebene ist essenziell (siehe 4.1.2). Einige Autoren empfinden die in dieser Studie gewählte dorsoplantare Ebene als ungeeignet. Es wird postuliert, dass Vorfußdeformitäten, wie z. B. ein Hallux valgus, zu einer fehlerhaften Messungen des TMTI-dp führen [61, 66, 106]. Angesichts der Anatomie dieser Vorfußdeformitäten erscheint diese Überlegung nicht unwesentlich. In dieser Studie wurde dieser

Überlegung Folge getragen, in dem Patienten mit begleitenden Fußdeformitäten aus der Studie ausgeschlossen wurden, um Konstruktionsfehler zu vermeiden (siehe 2.1.1).

Talus-Metatarsale-I-Winkel

Der TMTI-dp quantifiziert insbesondere die Diskrepanz zwischen der Taluslängsachse und der des Os metatarsale I. Durch die Vorfußabduktion und den Rückfußvalgus bei medialer Talusrotation ist zu erwarten, dass der Winkel bei einem fkKSF oberhalb des Referenzbereiches für einen gesunden Fuß liegt. Eine begleitende Vorfußdeformität verfälscht die Messung des TMTI-dp [61, 66, 106]. Aus diesem Grund findet der TMTI-dp nur selten Anwendung in Studien und derzeit existieren keine mit dieser Studie vergleichbare, die Calcaneus-Stopp-Methode anwendenden Publikationen, die valide Messergebnisse für den TMTI-dp liefern. Ein Vergleich ist ausschließlich mit einer ein endosinotarsales Implantat verwendenden Studie, wie der von Megremis et al., möglich [96]. Hier wird im Vergleich zu dieser Studie (2,81° ± 7,99) eine mittlere Reduktion des TMTI-dp um 28,6° beschrieben. Damit herrscht eine deutliche Diskrepanz zwischen den Studienergebnissen [96]. Ein möglicher Erklärungsansatz für die durch Megremis et al. erzielte Korrektur könnte deren kleinere Studienpopulation von 28 Füßen und die Kombination der STA mit einer Achillessehnenverlängerung sein. Bei einer kleineren Studienpopulation kommen starke Winkelveränderungen einzelner Patienten eher im Mittelwert zum Ausdruck, als dies bei dieser Studie oder denen von De Pellegrin et al., Memeo et al. und Pavone et al. der Fall wäre [33, 97, 112]. Ein Indiz für die Plausibilität dieses Argumentes, würde eine hohe Standardabweichung liefern. Diese wurde im Hinblick auf die erreichte mittlere Differenz durch die Autoren nicht angegeben. Abgesehen davon, machen Megremis et al. keine Angaben dazu, ob Patienten mit einer begleitenden Vorfußdeformität aus der Studie ausgeschlossen wurden [96]. Damit bleibt offen, inwiefern eine Validität der Messwerte gegeben ist.

Talocalcanearer Winkel

Der TC-dp ist einer der wenigen Winkel, der in der Literatur in der dorsoplantaren Projektion gemessen wird. Trotz der Ergebnisse von Bourdet et al. wurde sich dazu entschlossen, den TC-dp aufgrund seiner pathophysiologischen Assoziation mit dem fkKSF zu messen (siehe 4.1.3.1) [14]. Es konnte gezeigt werden, dass die STA der divergierenden Bewegung von Talus und Calcaneus Einhalt gebietet. Dies zeigte sich in einer Abnahme des

TC-dp um 2,48° ± 7,39. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind vergleichbar mit denen anderer Studien [97].

Calcaneus-Metatarsale-V-Winkel

Der Calc-MTV wurde entgegen den Empfehlungen der Leitlinie in dieser Studie nicht gemessen. Gemäß Hamel et al. kann der Calc-MTV nicht für die Beurteilung des fkKSF empfohlen werden, da er nicht dazu in der Lage ist, zwischen einem normalen Fuß und dem fkKSF zu unterscheiden [66]. Der Calc-MTV wurde von keiner mit dieser Studie vergleichbaren Publikation gemessen [5, 29, 33, 77, 97, 112–114, 124].

Talonaviculare Gekenkabdeckung

Für die radiologische Konstruktion der TNG werden zunächst der mediale und der laterale Endpunkt der jeweiligen Gelenkflächen des Os naviculare und des Taluskopfes miteinander verbunden [66]. Der Winkel, der zwischen den Linien der Gelenkfläche der beiden Knochen entsteht, wird als TNG bezeichnet und kann in Prozent oder in Grad angegeben werden [66, 75]. Bei einem gesunden kindlichen Fuß misst die TNG 20° ± 9,8 [34]. Die TNG ist ein Maß für die Quantifizierung talarer Subluxation durch Plantarflexion und Rückfußvalgus [15]. Durch Überlagerungsphänomene insbesondere der Tibia, des Calcaneus und des Talus, die durch die Rotation des Taluskopfes und schlechte Aufnahmebedingungen verstärkt werden, ist der Übergang von Taluskopf zu Talushals oft nur schwer auszumachen [66]. Da die TNG aber für die Differenzierung des fkKSF geeignet ist und Schwierigkeiten in der Konstruktion durch in 4.1.3.1 genannten Maßnahmen reduziert werden können, ist die mangelnde Berücksichtigung der TNG für die Evaluation des radiologischen Outcomes eine methodische Schwäche dieser Studie [66].

4.1.3.3 TMT-Index

Der TMT-Index ist der einzige Röntgenparameter, der beide Röntgenebenen berücksichtigt. Er kann am besten zwischen einem fkKSF und einem normalen Fuß differenzieren und seine Messgenauigkeit wird nicht von Vorfußdeformitäten beeinflusst (siehe 1.5.3.3) [61, 66]. Angesichts dessen, ist es eine methodische Schwäche dieser Studie, den TMT-Index nicht gemessen und berechnet zu haben. Der TMTI-lat ist bereits fester Bestandteil der Methodik dieser Studie, damit hätte die Messung des TMTIB nur einen geringen zusätzlichen Aufwand bedeutet. Weshalb der TMT-Index keinen Eingang in die radiologische Evaluation dieser Arbeit gefunden hat, hat zwei Gründe. Zum Zeitpunkt der ersten den

TMT-Index beschreibenden Publikation durch Hamel et al. (2006) wurden erste Erfahrungen mit dem Index gesammelt und nur 30 fkKSF im Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe von 15 Füßen untersucht [61]. Damals wurde diskutiert, dass zunächst weiterführende Studien an einem größeren Studienkollektiv notwendig sind, um die Relevanz der Ergebnisse, die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit des TMT-Index zu untersuchen. Seit der Veröffentlichung dieser Studie, wurden Messungen des TMT-Index nur in zwei weiteren Studien publiziert [5, 61, 122]. Arbab et al. untersuchten eine größere Studienpopulation von 73 Füßen, zogen aber keinen Vergleich zu einer gesunden Kontrollgruppe [5]. Richter et al. untersuchten eine mit der von Hamel et al. vergleichbar große Studienpopulation von 31 Füßen, schlossen jedoch ebenfalls keine Kontrollgruppe in ihr Studiendesign mit ein [61, 122]. Erste sinnvolle Analysen, die eine Begründung für die feste Implementierung des TMT-Index in die radiologische Evaluation geliefert hätten, erfolgten durch eine von Hamel et al. selbst online publizierten Studie im August 2020 [66]. Zunehmende Aufmerksamkeit erlangte die Publikation erst mit deren Erscheinen in einer Fachzeitschrift im Juni 2021. Zu diesem Zeitpunkt war die radiologische Datenerhebung dieser Studie jedoch abgeschlossen, sodass der TMT-Index nicht in dieser Arbeit implementiert werden konnte.

4.1.4 Fazit zum radiologischen Outcome der STA

Nach der operativen Versorgung mittels STA lagen fünf der in dieser Arbeit gemessenen sechs Winkeln in ihrem Referenzbereich (83,33 %). Mit Ausnahme von Memeo et al. (100 %), die im Vergleich nur vier Winkel maßen (Costa-B, Calc-B, T-dekl, TC-dp), zeigt keine andere vergleichbare Studien einen derartigen Korrekturerfolg [97]. Nicht im Referenzbereich lag der TMTI-lat. Auch keine der anderen zum Vergleich herangezogenen und den TMTI-lat messenden Studien erreichte eine ausreichend große Veränderung dieses Winkels, um dessen Referenzbereich von 0° ± 4 zu erreichen [5, 29, 77, 124]. Eine Besonderheit dieser Studie, ist die Berechnung der Effektstärke. Der Effekt der STA auf die Winkelveränderung und damit die Aufrichtung des MLG ist für den TMTI-lat als *mittelstark* und für die restlichen Winkel als *groß* zu interpretieren. Den stärksten Effekt hat die STA auf den Calc-B, gefolgt vom TC-dp und dem Costa-B (siehe Tabelle 8). Angesichts der Tatsache, dass der Calc-B absolut betrachtet die geringste Veränderung zeigt, scheint dieser Zusammenhang Effektstärke zunächst verwunderlich. Die Erklärung findet sich in den Standardabweichungen der mittleren Differenzen der signifikant veränderten Winkel

(siehe Tabelle 7). Während die absolute Veränderung des Calc-B geringer ist, als die der anderen Winkel, zeigt diese dennoch eine im Verhältnis zu diesen deutlich geringere Streuung. Folglich sind die drei gemessenen Winkel im Hinblick auf Vorhersagen bezüglich der zu erreichenden Korrektur aussagekräftiger und verlässlicher als der TMTI-lat, die T-dekl oder der TMTI-dp. Ungeachtet der Stärken und Schwächen der Evaluationsmethode, stellt die radiologische Winkelmessung eine geeignete Methode dar, um das radiologische Outcome der STA zu quantifizieren. Die statistisch signifikante Veränderung der gemessenen Winkel zeigt, dass es durch die STA zu einer Aufrichtung des MLG und Wiederherstellung des knöchernen Alignments kommt. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie vermitteln einen repräsentativen Eindruck für das Korrekturvermögen der STA.

4.2 Diskussion des klinischen Outcomes

Nach der Diskussion des radiologischen Outcomes (siehe 4.1) folgt nun die Diskussion des klinischen Outcomes. Die Gliederung ist an der zweiten bis vierten Leitfrage dieser Arbeit orientiert (siehe 1.8). Zunächst wird die in dieser Studie zum Einsatz kommende Evaluationsmethode für die das klinischen Outcome beschreibenden Parameter (klinischen Verbesserung und Patientenzufriedenheit) kritisch reflektiert und alternative Evaluationsmethoden vergleichend dargestellt (siehe 4.2.1 und 4.2.2). Anschließend erfolgt die Diskussion möglicher Einflussvariablen auf den Behandlungsverlauf mit einer Interpretation der Ergebnisse und Ableitung klinisch relevanter Handlungsvorschläge (siehe 4.2.3.).

4.2.1 Klinische Verbesserung

In dieser Studie wurde im Rahmen der zweiten Leitfrage untersucht, ob die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF führt. Um diese Frage zu beantworten, wurden der Behandlungsverlauf, das klinisch und radiologisch imponierende Korrekturergebnis und die Symptomatik der Patienten im Zuge der letzten ambulanten Verlaufskontrolle durch den behandelnden Orthopäden und den Patienten retrospektiv beurteilt (siehe 2.1.5). Es konnte eruiert werden, dass es bei 96,30 % (n= 340) aller Füße zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF kommt (siehe 3.2.2). Damit wurde auf die Patientenzufriedenheit geschlossen, insofern diese nicht direkt durch die Patienten geäußert wurde.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind mit denen der Literatur vergleichbar. De Pellegrin et al. beurteilten das Korrekturergebnis ihrer Patienten in 93,7 % der Fälle als *gut* [33]. Diese

Einschätzung erforderte das Erfüllen verschiedener dieser Studie ähnlichen Kriterien: radiologische Korrektur der Winkel, normale postoperative Fußfunktion, Verbesserung des klinischen Erscheinungsbildes inklusive des Fußabdruckes und ein Behandlungsverlauf ohne Komplikationen oder weitere chirurgische Eingriffe. Arbab et al. gaben an, dass 95 % ihrer Patienten mit dem Ergebnis der STA zufrieden sind, 96 % würden die Operation erneut durchführen lassen und 95 % verspüren nach der STA keine Einschränkungen im Alltag [5]. Diese Ergebnisse wurden mit einem durch die Autoren erstellten Fragebogen erhoben. Roth et al. und Pavone et al. ließen die Patientenzufriedenheit anhand einer visuellen Analogskala (VAS) von 0 bis 10 einschätzen [112, 124]. Roth et al. berichteten von einer Zufriedenheit der Patienten, die anhand der VAS in 91,49 % der Patienten als *gut* (6 bis 8 auf der VAS) oder *exzellent* (9 und 10 auf der VAS) beurteilt werden kann [124]. Pavone et al. zeigten, dass die Zufriedenheit der Patienten in 81,71 % als *exzellent*, 15,12 % als *gut* und 3,17 % als *unzureichend* (0 bis 5 auf der VAS) zu bewerten ist [112].

Der Vergleich mit der Literatur zeigt, dass die Studien im Hinblick auf den Anteil zufriedenen Patienten bzw. den der Patienten mit einer klinischen Verbesserung durch die STA, mit dieser Arbeit vergleichbare Ergebnisse liefern. Dennoch ist eine Vergleichbarkeit aufgrund dessen, dass jede Publikation eine andere Evaluationsmethode wählt, verschiedene Endpunkte in der Beurteilung des klinischen Outcomes definiert, sowie verschiedene Kriterien für das Erfüllen dieser Endpunkte benennt, nur bedingt gegeben. Arbab et al., Pavone et al. und Roth et al. betrachteten für die Evaluation des klinischen Outcomes ausschließlich den Aspekt der Patientenzufriedenheit [5, 112, 124]. De Pellegrin et al. hingegen betrachteten ausschließlich die klinische Verbesserung und gingen nicht weiter auf die Patientenzufriedenheit ein. Eine Evaluationsmethode, die universell genutzt, empfohlen und akzeptiert wird, existiert nicht [84].

In dieser Arbeit wurden beide der genannten Endpunkte untersucht, was eine Stärke dieser Studie darstellt. Eine methodische Schwäche dieser Untersuchung ist dennoch die mangelnde Differenzierung zwischen der Verbesserung der Klinik des fkKSF einerseits und der Zufriedenheit der Patienten andererseits. Den Patienten mangelt es an Expertise und thematischem Hintergrundwissen zu ihrem Krankheitsbild. Sie können die klinische Verbesserung des fkKSF nicht objektiv bewerten. In ihren Augen kann es zu einer Veränderung gekommen sein, diese reicht ihnen aber nicht aus, um mit dem Ergebnis der STA

zufrieden zu sein, oder von einer Verbesserung zu sprechen. Insbesondere bei einer Implantation im jungen Alter, können sich die Patienten möglicherweise nicht mehr an den präoperativen Befund erinnern und neigen bei Beschwerdefreiheit dazu, auf die Nachfrage nach Zufriedenheit oder dem Gefühl der Verbesserung mit *„Ja“* zu antworten. Dies kann auch der Fall sein, wenn sich die Patienten angesichts der Anwesenheit der Eltern und des behandelnden Arztes in der Beantwortung der Frage unter Druck gesetzt fühlen. Der behandelnde Orthopäde kann hier aus einer objektiven und neutralen Position differenziert urteilen. Gleichzeitig vermag es dieser aber nicht, die Zufriedenheit der Patienten zu beurteilen und ist möglicherweise in der Beurteilung der klinischen Verbesserung voreingenommen, da er das Interesse der Klinik im Hinterkopf hat. Des Weiteren wurde in der Beurteilung der Patientenzufriedenheit und klinischen Verbesserung keine weitere Differenzierung der Antwortmöglichkeiten vorgenommen, im Sinne einer separaten Beurteilung der Endpunkte im Hinblick auf verschiedene Parameter wie z. B. der Funktionalität im Alltag oder Schmerzen [29, 113, 114]. Damit waren sowohl der behandelnde Orthopäde als auch die Patienten in ihrer Beurteilung limitiert. Bei Unzufriedenheit Letzterer war es nicht möglich, eine genaue Ursache für die Unzufriedenheit zu identifizieren.

Die genannten Fehlerquellen in der Beurteilung des klinischen Outcomes und die Annahme eines kausalen Zusammenhanges zwischen der klinischen Verbesserung und der Zufriedenheit der Patienten, führen zu der Vermutung, dass der wahre Prozentwert an Patienten, die mit dem Ergebnis der STA zufrieden sind und/oder eine klinische Verbesserung zeigen unter 96,30 % liegt. Demzufolge ist zukünftig eine getrennte Betrachtung der klinischen Endpunkte notwendig. Im Folgenden sollen alternative Evaluationsmethoden aus der Literatur dargestellt, diskutiert und eine differenzierte Meinung bezüglich einer geeigneten Methode abgegeben werden.

4.2.2 Klinische Evaluationsmethoden

Es muss zwischen *patient-reported outcome measures* (PROMs) und *clinician-reported outcome measures* (CROMs) unterschieden werden [141].

4.2.2.1 Evaluation des optischen Erscheinungsbildes

Die Numerische Komponentenerfassung

Eine alternative Möglichkeit die Verbesserung des optischen Erscheinungsbildes nachvollziehbar zu beurteilen und zu quantifizieren, besteht in der Erfassung der absoluten und

relativen Häufigkeiten der optischen Komponenten mit denen sich der fkKSF in der Klinik präsentiert [33, 40, 112]. Anschließend kann bei postoperativer Messwiederholung die Verteilung der Komponenten innerhalb der Studienpopulation zwischen den Messzeitpunkten miteinander verglichen werden [33, 112]. Pavone et al. konnten mit dieser Methode eine Abnahme der Vorfußabduktion (65,61 % auf 8,53 %) und des Rückfußvalgus (100 % auf 2,92 %) innerhalb der untersuchten Studienpopulation feststellen [112]. Diese Ergebnisse sind mit denen von De Pellegrin et al. vergleichbar und sprechen für eine klinische Verbesserung des fkKSF [33]. Grundsätzlich ist die Messung des Rückfußvalgus eine einfache Evaluationsmethode, da die Achillessehne immer senkrecht zur belasteten Ebene steht und die Abweichung des Rückfußvalgus folglich leicht zu erkennen ist. Eine Schwäche dieser Methode ist die Tatsache, dass es sich bei den Komponenten des fkKSF um Blickdiagnosen handelt und der behandelnde Orthopäde durch den klinischen Alltag bedingt zwischen den Messzeitpunkten variieren kann. Wenn möglich, sollte die Evaluation deswegen durch denselben Beobachter erfolgen. Die Komponenten sollten außerdem durch objektive Messtechniken, wie z.B. der Neutral-Null-Methode mittels Goniometer, diagnostiziert werden. Pavone et al. und De Pellegrin et al. machen bezüglicher der Methodik keine Angaben [33, 112]. In dieser Studie konnte die Evaluationsmethode nicht angewendet werden, da diese Arbeit bei einem retrospektiven Studiendesgin an die Informationen der Verlaufsdokumentation gebunden war. Hieraus ging im Detail nicht hervor, inwiefern die einzelnen Komponenten ausgeprägt waren.

Pedobarografie

Die Abflachung des MLG kann alternativ mit der Pedobarografie quantifiziert werden. Viele Autoren vergleichen die prä- und postoperativ angefertigten Aufnahmen und berechnen den nach Staheli et al. definierten *„arch index“* [138, S. 426]. Alternativ werden die Fußabdrücke nach Viladot klassifiziert (siehe 1.5.3) [33, 56, 77, 97, 149]. Viladot unterscheidet mittels der plantaren Auflagefläche in der Pedobarografie vier Schweregrade, wobei die Schweregrade 3 und 4 mit einer vollständigen Absenkung des MLG einhergehen und bei den Schweregraden 1 und 2 das MLG intakt ist [149]. In einer Studie von Giannini et al. waren präoperativ 25 % der Füße als Grad 3 und 12,5 % der Füße als Grad 4 klassifiziert [56]. Postoperativ war der Grad 4 innerhalb der Studienpopulation nicht mehr vertreten, 4,5 % konnte nach der STA als Grad 3 identifiziert werden. Die restlichen Füße zeigten ein intaktes MLG. Die Pedobarografie gehört im UKU nicht zur Basisdiagnostik des

fkKSF. Sie wird vielmehr für die Anfertigung von maßgeschneiderten Einlagen verwendet. Bei mangelnder Anzahl an präoperativen Aufnahmen und somit fehlenden Vergleichsbefunden durch das retrospektive Studiendesign, wurde die Pedobarografie nicht als Evaluationsmethode verwendet.

4.2.2.2 Evaluation der klinischen Symptomatik und der Patientenzufriedenheit

Die klinische Verbesserung des fkKSF äußert sich nicht nur in der Verbesserung des optischen Erscheinungsbildes, sondern auch in der Verbesserung der klinischen Symptomatik. In der Literatur kommen für die Evaluation der klinischen Symptomatik und der Patientenzufriedenheit häufig kurze Fragebögen zum Einsatz. Diese können zeiteffizient während der Wartezeiten beantwortet werden und sind leicht verständlich [103]. Die Anwendung von validierten Fragebögen zur Evaluation des klinischen Outcomes scheint die einzige Methode zu sein, die in Zukunft eine Vergleichbarkeit unter den Studien gewährleisten kann. Dass ein solcher Fragebogen keinen Eingang in diese Studie gefunden hat, hat zwei Gründe. Zum Implantationszeitpunkt des ersten in diese Studie eingeschlossenen Patienten (Dezember 2007) gab es keinen für die Anwendung an Kindern mit Fußproblemen validierten Fragebogen, der verwendet hätte werden können [5, 19, 84, 102–104, 137]. Im Verlauf der Datenerhebung hätte somit bei einem Großteil der Patienten nur ein postoperativer Befund vorgelegen. Es wäre nicht möglich gewesen zu beurteilen, ob die Patienten postoperativ zufriedener sind und in welchen Bereichen sich diese Zufriedenheit äußert. Die mangelnde Evaluation der klinischen Symptomatik und Patientenzufriedenheit anhand eines validierten Fragebogens wird auch als Schwäche von anderen Studien diskutiert [5, 33, 77, 97, 124]. Der am häufigsten zur Anwendung kommenden Fragebogen ist der *American Orthopedic Foot and Ankle Society Score* (AOFAS) [19]. Großer Beliebtheit erfreut sich außerdem der *Oxford Ankle Foot Questionnaire for Children* (OxAFQ-C) [29, 102–104]. Weitere in der Literatur vereinzelt aufgeführte Evaluationsmethoden sind der *Foot and Ankle Disability Index* (FADI), der *Child Health Questionnaire*, der *Yoo et al. Score*, die *Mosca Kriterien* oder die *Short Form 36* Umfrage (SF-36) [93, 105, 109, 113, 114]. Unabhängig davon, ob die Behandlung der Patienten im Rahmen einer Studie erfolgt oder nicht, sollten validierte Fragebögen Eingang in die klinische Praxis finden. Sie bieten eine interne Möglichkeit des direkten Feedbacks sowohl für den Patienten als auch für die Klinik.

American Orthopedic Foot and Ankle Society Score (AOFAS)

Der 1994 durch die *American Orthopedic Foot and Ankle Society* eingeführte AOFAS ist einer aus vier voneinander unabhängigen Ratingskalen bestehendes Messinstrument für den Fuß [84]. Jede Ratingskala ist für eine der vier anatomischen Regionen des Fußes bestimmt. Der AOFAS existiert für den Rückfuß, den Mittelfuß, den ersten Vorfußstrahl und die Vorfußstrahlen 2-5. Unabhängig der verwendeten Skala, ist ein entscheidender Vorteil des AOFAS, dass es sich um einen rein klinischen Score handelt. Er kann ohne zusätzliche apparative Diagnostik oder radiologische Parameter beantwortet werden. Für die Evaluation des klinischen Outcomes der STA eignet sich der Rückfuß-AOFAS. Dieser besteht aus drei unterschiedlich gewerteten Kategorien: *Schmerz* (40 Punkte), *Funktionalität* (50 Punkte) und *Alignment* (10 Punkte). Innerhalb der einzelnen Kategorien werden anschließend verschieden Aspekte dieser Überbegriffe abgefragt, wie z.B. in der Kategorie Funktionalität die maximal zu erreichende Gehstrecke. Insgesamt können 100 Punkte erreicht werden [84]. Während die Patienten die Fragen der ersten beiden Kategorien selbst beantwortet, ist es Aufgabe der behandelnden Orthopäden, den AOFAS durch Ergänzung der letzten Kategorie zu vervollständigen [84, 113]. Damit gehört der AOFAS zu den CROMs. Pavone et al. konnten eine Veränderung des AOFAS in der Gruppe der normalgewichtigen Patienten von 80,3 ± 5,2 Punkte (präoperativ) auf 96,4 ± 5,1 Punkte (drei Jahre postoperativ) messen [114]. Der AOFAS kann nicht nur für die Evaluation der STA verwendet werden, sondern gewährleistet auch eine Vergleichbarkeit mit anderen operativen Verfahren, z. B. der Osteotomie [84, 93]. Eine Schwäche des AOFAS ist, dass dieser nicht die Patientenzufriedenheit misst [84]. Weiterhin bleibt unklar, wie stark sich der AOFAS verändern muss, damit von klinischer Signifikanz gesprochen werden kann [23]. In der Beurteilung des AOFAS muss außerdem darauf hingewiesen werden, dass dessen Reliabilität und Validität in den letzten Jahren mehrfach begründet angezweifelt wurde. Er korreliert unter anderem nur wenig mit denen durch andere Skalen erhobenen Ergebnissen, wie dem SF-36 [19, 23, 96, 99, 137]. SooHoo et al. bemängelten außerdem, dass der AOFAS nicht präzise genug ist, da er die Kategorie Schmerzen mit einer einzigen Frage abbildet und durch die Verteilung von 40 Punkten überbewertet [137]. Einige Studien greifen deshalb neben dem AOFAS auf alternative Fragebögen zurück [29, 112–114].

Oxford Ankle Foot Questionnaire for Children (OxAFQ-C)

Der OxAFQ-C gehört zu den sogenannten PROMs und wurde durch Morris et al. über Jahre hinweg entwickelt und erprobt [102–104]. Im Gegensatz zum AOFAS berücksichtigt er neben der klinischen Symptomatik die Patientenzufriedenheit. Der OxAFQ-C basiert auf von Fokusgruppen im Alter von 5 bis 16 Jahre als wichtig erachteten Lebensbereichen, in denen sie Einschränkungen aufgrund diverser Fußprobleme erfahren haben [102–104]. Er besteht aus 14 Fragen, die jeweils einer der drei Domänen „*Physical*“ (6 Fragen), „*School and Play“* (4 Fragen) und „*Emotional“* (4 Fragen) zugeordnet werden können [103, S. 1454]. In der Domäne „*Physical“* wird exemplarisch danach gefragt, ob innerhalb der letzten Woche Schmerzen im Bereich des Fußes verspürt wurden [103, S. 1454]. Jede Frage besitzt fünf unterschiedlich bepunktete Antwortmöglichkeiten: „*always“* (0), „*very often“* (1), „*quite often“* (2), „*rarely“* (3) und „*never“* (4) [103, S. 1451]. Je niedriger die Gesamtpunktzahl, desto stärker ist die erfahrene Einschränkung. Nicht in der Gesamtbewertung berücksichtigt, wird die Frage 15. In dieser wird danach gefragt, ob die Patienten durch ihr Fußprobleme darin gehindert werden, bestimmte Schuhe zu tragen [103]. Eine Besonderheit des OxAFQ-C ist, dass dieser über zwei gesonderte Fragebögen durch den Patienten und dessen Erziehungsberechtigten beantwortet wird. Die Erziehungsberechtigten versuchen, das Ausmaß der Einschränkungen des Patienten einzuschätzen. Die Angaben der Erziehungsberechtigten sind konsistent mit denen der Kinder, Differenzen sind nicht statistisch signifikant und die Angaben reliabel [103, 104]. Im Gegensatz zum AOFAS, ist der OxAFQ-C in seiner Anwendung an Kindern longitudinal validiert [103, 104]. Bei Verwendung des OxAFQ-C als Evaluationstool kann eine weitere Frage implementiert werden [104]. Beide Parteien werden darin gefragt, wie sie die Veränderung der Problematik auf einer Skala von 0 *(„‘a lot’ […] worse“*), über 4 (*same*) bis 7 (*„‘a lot’ better“*) einschätzen [49, 104]. Im Vergleich mit dem AOFAS scheint der OxAFQ-C eine aussagekräftigere Alternative für die Evaluation des klinischen Outcomes zu sein, da er die Patientenzufriedenheit berücksichtigt. Hier sei darauf hingewiesen, dass es derzeit keine deutsche Version des OxAFQ-C gibt [111].

4.2.2.3 Fazit zu den Evaluationsmethoden des klinischen Outcomes

Unabhängig der Grenzen und Schwächen der Methodik dieser Studie, konnte abschließend gezeigt werden, dass die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode zu einer klinischen Verbesserung des fkKSF führt und mit einer hohen Patientenzufriedenheit einher-

geht. Um das klinische Outcome vollständig und abschließend evaluieren zu können, ist es zwingend notwendig, die genannten Methoden zu kombinieren. In den Augen dieser Studie, wäre eine geeignete Kombination, den fkKSF prä- und postoperativ zunächst klinisch zu untersuchen und das optische Erscheinungsbild durch eine numerische Komponentenerfassung nach De Pellegrin et al. und Pedobarografie nach Viladot zu quantifizieren [33, 149]. Anschließend kann die klinische Symptomatik des fkKSF mittels dem OxAFQ-C, inklusive der Fragen 15 und 16 für die Patientenzufriedenheit, erfasst werden. Ein solches Vorgehen ermöglicht eine umfassende klinische Evaluation. Gleichzeitig ist dies mit einem großen Aufwand verbunden, sodass die Umsetzung dieser Evaluationsmethoden außerhalb eines Studienrahmens im Hinblick auf die Ressourcen des Gesundheitssystem derzeit nicht möglich erscheint. Die Hauptproblematik, dass es keine in Deutschland validierte Evaluationsmethode für die gemeinsame Untersuchung der klinischen Verbesserung und Patientenzufriedenheit gibt bleibt weiterhin bestehen. Bis zu deren Einführung ist eine vollständige Vergleichbarkeit der Studien nicht gegeben.

4.2.3 Einflussvariablen auf das klinische Outcome

Variablen, die auf das klinische Outcome der STA Einfluss nehmen, sind noch immer unerforscht [22, 144]. Mit dem Ziel, diesbezüglich neue Erkenntnisse zu gewinnen wurde versucht, solche Einflussvariablen zu identifizieren (siehe 3.2.3). Neben Pavone et al. ist die vorliegende Studie die Erste, die dieser Forschungsfrage nachgeht [114]. Während sich Pavone et al. auf die Untersuchung der Variablen *BMI* beschränken, wird in dieser Studie darüber hinaus auf weitere Variablen eingegangen (siehe 2.2.2). Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Arbeit diskutiert und mit der derzeitigen Studienlage verglichen. Im Anschluss erfolgt die Methodendiskussion.

4.2.3.1 Postoperative Komplikationen

In dieser Studie kam es bei 38,24 % der Füße zu postoperativen Komplikationen. Damit ist die Komplikationsrate auf den ersten Blick höher als die anderer Arbeiten. Pavone et al. geben eine Komplikationsrate von 12,5 % an [113]. De Pellegrin et al. beschreiben eine Komplikationsrate von 6,3 % [33]. Die Diskrepanz zwischen den Studien ist auf eine unterschiedliche Definition von Komplikationen zurückzuführen. Ein Vergleich kann deshalb nur auf Ebene der einzelnen Komplikationsgruppen erfolgen, die in dieser Arbeit in Anlehnung an De Pellegrin et al. definiert wurden [33]. Pavone et al. beschrieb Wundhei-

lungsstörungen bei 2,9 % der Füße und De Pellegrin et al. bei 1,3 % der Patienten [33, 113]. Mit Wundheilungsstörungen bei 2,27 % aller Füße ordnet sich die vorliegende Studie dazwischen ein. Ein Peronealsehnenspasmus oder eine -hypertonie trat bei 2,55 % der Füße auf. De Pellegrin et al. konnte einen Spasmus bei 3,60 % der Patienten beobachten [33]. In der vorliegenden Arbeit kam es bei 0,28 % der Füße zu einer Fraktur der beteiligten Knochen. Damit liegt die Frakturrate unterhalb der Werte der Literatur (0,75 %) [33]. Mit 33,14 % erklärt die Komplikationsgruppe A (Schmerzen) die hohe Komplikationsrate dieser Studie. Schmerzen wurden als Komplikation gewertet, wenn diese über sechs Wochen postoperativ hinaus bestanden. Retrospektiv, hätte hier ein anderes Zeitintervall gewählt werden sollen, da Schmerzen bis zu 12 Wochen postoperativ zu erwarten sind. Damit ist davon auszugehen, dass die Komplikationsrate niedriger ausgefallen wäre. Pavone et al. beschrieben beispielsweise Schmerzen bei 6,6 % der Füße [113]. Es wurden keine Angaben gemacht, zu welchem Zeitpunkt des Behandlungsverlaufes die Schmerzen durch die Patienten geäußert wurden. Schmerzen werden außerdem von einigen Studien nicht als Komplikationen erfasst, was eine zusätzliche Erklärung für die niedrigeren Komplikationsraten in anderen Arbeiten liefert [5, 77, 97, 124]. Eine weitere Komplikation ist die Revision der STA. Eine Revision war in dieser Studie in 4,25 % der Füße notwendig, was im Vergleich mit anderen Studien häufig ist. Roth et al. mussten in nur 2 % der Füße revidieren, obwohl es in 10 % der Füße zu einem Schraubenbruch kam [124]. In dieser Studie lag die Ursache für die Schraubenrevision vielmehr in einem Korrekturverlust oder persistierenden Schmerzen. Zu keinem Zeitpunkt kam es zum Bruch einer Schraube oder deren Dislokation. Eine mögliche Erklärung für die im Vergleich hohe Revisionsrate ist der hohe Anteil an jungen Patienten dieser Studie (siehe 4.2.3.5).

Nachbehandlungsprotokoll

Während sich die Autoren einig sind bezüglich der Notwendigkeit einer raschen Vollmobilisation und dem Einhalten einer Sportkarenz, unterscheiden sich die Studien in deren Umsetzung. In dieser Studie war es den Patienten erlaubt, innerhalb der ersten 24 Stunden nach der Operation die Füße beschwerdeabhängig voll zu belasten (siehe 2.1.3). Die Vollbelastung wurde spätestens zum Zeitpunkt der Entlassung, die im Median 2 Tage postoperativ erfolgte, erreicht. Die meisten Autoren gingen entsprechend vor [35, 112–114, 124]. Einige Autoren wählten ein schonenderes Vorgehen [5, 29, 33]. De Pellegrin et al., welche die Füße im Abstand von im Mittel sechs Monaten operierten, erlaubten zu-

nächst nur eine Teilbelastung des Fußes bis zum 5. postoperativen Tag. Es folgte die Steigerung bis zu einer Vollbelastung am 8. bis 11. postoperativen Tag [5, 33]. Memeo et al. erlaubten ein Teilbelastung an Gehstützen frühstens zwei Wochen nach der Operation [97]. Die Patienten der vorliegenden Arbeit wurden gebeten, postoperativ für sechs Wochen eine Sportkarenz für Stoß- und Sprungbelastungen einzuhalten. De Pellegrin et al. reduzierten diese Empfehlung auf vier Wochen [33]. Roth et al. erlaubten eine sportliche Betätigung, sobald die Patienten schmerzfrei waren [124]. Pavone et al. baten ihrer Patienten darum, mindestens acht Wochen keinen Sport zu machen [113].

Abschließend lässt sich sagen, dass eine immense Variabilität zwischen den Arbeiten besteht. Welches Nachbehandlungsprotokoll überlegen ist, bleibt ungeklärt. Erfolgsquoten und Komplikationsraten sind zwischen den Studien nicht vergleichbar (siehe 4.2.3.1). Bei fehlendem Korrekturerfolg der STA oder hohen Komplikationsraten kann nicht auf eine Kausalität des Nachbehandlungsprotokolls geschlossen werden. In dieser Studie trat keine der postoperativen Komplikationen im Zusammenhang mit der postoperativen Vollbelastung der Patienten auf. Mit Sicherheit kann gesagt werden, dass die Entscheidung für die operative Versorgung mit einem endosinotarsalen Implantat oder alternativen operativen Methoden, eine längere Immobilisation und Sportkarenz, als bei der Calcaneus-Stopp-Methode bedeutet [29, 31, 77, 93, 96, 97, 112, 122, 156]. Bei der Implantation eines endosinotarsalen Implantates soll so sichergestellt werden, dass das umliegende Weichteilgewebe genügend Zeit bekommt, um zu heilen und das Implantat in den Sinus tarsi zu integrieren. Dadurch wird das Risiko für ein Versagen der STA reduziert [96]. Die Patienten müssen bis zu 90 Tage auf sämtliche sportliche Aktivitäten verzichten [97]. Bei den genannten Studien, die die STA in Kombination mit einem Weichteilverfahren durchführten, war, mit Ausnahme von Memeo et al., die Anlage eines Gipsverbandes oder Air Walker für drei Wochen postoperativ indiziert [29, 77, 97, 112]. Bei einer Osteotomie kann es notwendig sein, einen Unterschenkelgips oder Air Walker bis zu acht Wochen postoperativ zu tragen. Daran anschließend ist eine Teilbelastung möglich [93, 156]. Angesichts des Alters der behandelten Patienten muss berücksichtigt werden, dass bei einer Teilbelastung bis hin zu einem Belastungsverbot mit einer reduzierten Compliance der Patienten gerechnet werden muss. Dies erhöht bei einem endosinotarsalen Implantat oder einer Osteotomie das Verletzungsrisiko. Bei der Implantation eines exosinotarsalen

Implantates, wie das in der vorliegenden Studie, besteht dieses Risiko nicht, was einen entscheidenden Vorteil der Calcaneus-Stopp-Methode darstellt.

4.2.3.2 Postoperative Schmerzen

Sechs Wochen postoperativ traten bei 38,53 % (n= 136) der Füße Schmerzen auf. Ein Vergleich mit anderen Studien ist aufgrund mangelnder Transparenz und ungenauer Angaben zum Messzeitpunkt der Schmerzraten nicht möglich. Es konnte gezeigt werden, dass postoperative Schmerzen schwach positiv mit dem klinischen Endpunkt *postoperative Komplikationen* korrelieren. Außerdem zeigte sich eine schwach negative Korrelation mit der *Einschätzung von der Operation profitiert zu haben* und moderat negative Korrelation mit dem *Intervall bis zur Revision* (siehe Tabelle 15 im Anhang). Die statistische Signifikanz in der ANOVA deutet darauf hin, dass die Variable *postoperative Schmerzen* einen statistisch signifikanten Risikofaktor für den klinischen Endpunkt *postoperative Komplikationen* und die Einschätzung von der Operation profitiert zu haben darstellt (siehe Tabelle 9 und Tabelle 11). Für die Praxis bedeutet dies, dass im Verlauf der Behandlung frühzeitig auf eine adäquate Analgesie zu achten ist, um das Risiko für postoperative Komplikationen und eine frühzeitige Revision zu reduzieren. Gleichzeitig müssen postoperative Schmerzen sechs Wochen nach einer STA als mögliches Indiz für eine Komplikation im Auge behalten werden, da gezeigt werden konnte, dass Patienten mit postoperativen Schmerzen dafür anfälliger sind und tendenziell dazu neigen, nicht von der STA zu profitieren.

4.2.3.3 Geschlecht

Es konnte gezeigt werden, dass das Geschlecht sowohl mit der Variable *postoperative Komplikationen* als auch der Variablen *postoperative Schmerzen* schwach negativ korreliert (siehe Tabelle 13 im Anhang). In dieser Studie äußerte sich diese Korrelation darin, dass Mädchen häufiger unter postoperativen Schmerzen und Komplikationen litten als Jungen (siehe Tabelle 10). Studien konnten zeigen, dass Patientinnen häufiger und unter deutlich stärkeren Schmerzen leiden als männliche Patienten [11, 116, 118, 127]. Es konnte außerdem gezeigt werden, dass Frauen postoperativ deutlich länger unter Schmerzen leiden als gleichalte Männer [115, 167]. Stärkere, länger anhaltende postoperative Schmerzen können eine längere Immobilisation bedeuten und gehen mit einem erhöhten Risiko für chronische Schmerzen einher [115, 167]. Da chronische

Schmerzen in dieser Studie als Komplikationen gewertet wurden, könnte dies eine Erklärung für den Zusammenhang zwischen der Variablen *Geschlecht* und dem klinischen Endpunkt *postoperative Komplikationen* sein. Die Analysen dieser Arbeit deuten darauf hin, dass das Geschlecht einen statistisch signifikanten Risikofaktor für postoperative Schmerzen und postoperative Komplikationen darstellt (siehe Tabelle 11). In der Praxis bedeutet das, dass bei Mädchen die Schmerzmedikation bei einem unterschiedlichen Schmerzempfinden und -gedächtnis bei Bedarf höher anzusetzen ist als bei Jungen. Außerdem sollte bei einem erhöhten Risiko frühzeitig an eine postoperative Komplikation gedacht werden.

4.2.3.4 Body-Mass-Index

Pavone et al. sind neben dieser Arbeit die einzigen, die den Einfluss des BMI auf das klinische Outcome untersuchen [114]. Der BMI wurde bei 105 Patienten (174 Füße) identisch dem Vorgehen dieser Arbeit und gemäß den WHO-Empfehlungen für 5- bis 19-jährige Kinder berechnet und die Patienten gleichmäßig auf die BMI-Kategorien *normal*, *overweight* und *obese* verteilt (siehe 2.2). Pavone et al. zeigten, dass das klinische Outcome der Patienten der BMI-Kategorie *obese* (AOFAS 95.97 ± 4.95) ein Jahr postoperativ schlechter ist, als das der Patienten der BMI-Kategorien *normal* (AOFAS 95.4 ± 5.1, p= 0,014) und *overweight* (AOFAS 92.7 ± 5.9, p= 0,045). Fünf Jahre postoperativ besteht zwischen den BMI-Kategorien kein statistisch signifikanter Unterschied mehr. In dieser Studie zeigten Patienten der BMI-Kategorie *obese* im Vergleich zu den anderen BMI-Kategorien die höchste Komplikationsrate (50 %). Hier unterschieden sich die Ergebnisse der vorliegenden Studie von denen der Kollegen, bei denen Füße der BMI-Kategorie *overweight* die höchste (22,86 %) und Patienten der BMI-Kategorie *obese* die kleinste Komplikationsrate zeigen (14,29 %) [114]. Wie auch diese Arbeit konnten Pavone et al. keine Korrelation oder sonstige Zusammenhänge zwischen dem BMI und dem klinischen Endpunkt *postoperativen Komplikationen* messen. Deshalb und da die Mehrheit der Patienten unabhängig von ihrem BMI keine Komplikationen erleidet, scheint ein Zusammenhang zwischen BMI und postoperative Komplikationen empirisch unwahrscheinlich, wovon auch Pavone et al. ausgehen [114]. Unabhängig der Diskrepanz der Ergebnisse wird deutlich, dass in der Praxis kindliches Übergewicht rechtzeitig diagnostiziert und behandelt werden sollte. Einerseits, da gezeigt werden konnte, dass dieses mit einer höheren Inzidenz für den fkKSF assoziiert ist, andererseits, um das bestmögliche klinische Outcome

zu erreichen und das Kind vor eventuellen Komplikationen und persistierenden Schmerzen zu schützen (siehe 1.2.1.3) [117]. Eine weitere Überlegung für die Praxis ist das Screening auf einen fkKSF nach dem 10. Lebensjahr in dieser Risikopopulation [6].

4.2.3.5 Implantationsalter

In der Studienpopulation der vorliegenden Arbeit konnte gezeigt werden, dass Patienten der Altersgruppe [5,10] im Vergleich mit den anderen Altersgruppen am häufigsten unter postoperativen Komplikationen leiden. Die Ergebnisse der ANOVA deuten darauf hin, dass die Variable *Altersgruppe [5,10]* einen statistisch signifikanten Risikofaktor für postoperative Komplikationen darstellt (siehe Tabelle 11). Außerdem macht diese Altersgruppe den größten Anteil unter den Füßen mit der Revisionsursache „Korrekturverlust der Schraube“ aus. De Pellegrin et al. kamen zu einem ähnlichen Ergebnis [33]. Unter den Füßen, die in dieser Arbeit einen Korrekturverlust erlitten, wurde in sieben von neun Füßen die STA zwischen dem fünften und zehnten Lebensjahr durchgeführt. Wie auch von den Kollegen wird die Ursache für einen häufigeren Korrekturverlust der Schraube bei jungem Implantationsalter in der Tatsache vermutet, dass die Schraube somit während starker Wachstumsphasen in situ verbleibt. Der Verlust des mechanischen Effekts der Schraube wird begünstigt [33]. Neben diesem Zusammenhang deuten die Ergebnisse der ANOVA darauf hin, dass die Altersgruppe [5,10] einen statistisch signifikanten Risikofaktor für die Einschätzung von der STA nicht profitiert zu haben darstellt (siehe Tabelle 9). Es ist davon auszugehen, dass ein frühes Implantationsalter das Risiko für postoperative Komplikationen, insbesondere einen Korrekturverlust der Schraube mit Revisionsbedarf statistisch signifikant erhöht. In der Praxis sollte das intrinsische Korrekturpotenzial des fkKSF deshalb vollständig ausgeschöpft werden und bei jungen Patienten zunächst auf eine operative Versorgung verzichtet werden, insofern dies mit der Klinik der Patienten zu vereinbaren ist [2, 33, 47, 54, 79].

4.2.3.6 Präoperative Schmerzen

Es konnte gezeigt werden, dass präoperativ schmerzhafte Füße im Vergleich zu präoperativ schmerzfreien Füßen häufiger mit postoperativen Schmerzen und Komplikationen einhergehen (siehe Tabelle 10). Die Variable *präoperative Schmerzen* scheint einen statistisch signifikanten Risikofaktor für diese beiden klinischen Endpunkte darzustellen. Eine mögliche Erklärung für diese Zusammenhänge könnte sein, dass bei präoperativ schmerz-

haften Füßen die Deformität bereits stärker ausgeprägt ist. Es ist anzunehmen, dass die STA es binnen sechs Wochen nicht schafft, die durch den Pathomechanismus des fkKSF geschädigten Strukturen vollständig zu regenerieren. Diese müssen sich zunächst an die durch die STA herbeigeführt neue Biomechanik des fkKSF anpassen. Außerdem ist der Körper neben den bereits präoperativ schmerzhaften Strukturen mit dem Heilungsprozess, der durch den operativen Zugangsweg geschädigten Strukturen stärker belastet. Ein zweiter Erklärungsansatz könnte sein, dass die präoperativen Schmerzen durch jahrelanges Gehen mit abgesenktem MLG chronifiziert sind. Dass präoperativ chronische Schmerzen das Risiko für postoperative Schmerzen aufgrund einer veränderten Schmerzantwort erhöhen, konnte gezeigt werden [167]. In der Praxis bedeutet dies, dass Patienten bei präoperativen Schmerzen darauf hingewiesen werden sollten, dass ihr Risiko für Komplikationen im Behandlungsverlauf und länger andauernde Schmerzen erhöht ist.

4.2.3.7 Methodendiskussion

In dieser Studie konnten die Variablen *BMI*, *abgenutztes Schuhwerk*, *verkürzte Wadenmuskulatur*, *Stolpern* und *bisherige Therapie* nicht als statistisch signifikante Einflussvariablen auf einen der klinischen Endpunkte oder die Einschätzung von der STA profitiert zu haben ausgemacht werden. Eine Erklärung dafür liegt möglicherweise in den methodischen Schwächen dieser Arbeit: Nur wenige Patienten haben in der vorliegenden Studie nicht von der STA profitiert. Das führte dazu, dass eine inhomogene Verteilung vorlag und der Einfluss der ausgewählten Variablen nur auf einen kleinen Teil der Studienpopulation untersucht wurde. Gleichzeitig waren einige Variablen oder deren Ausprägungen unter den nicht von der STA profitierenden Patienten unterrepräsentiert, z. B. die BMI-Kategorie *thin*. Dies kann erklären, warum die ANOVA oder die Korrelationsanalyse nach Pearson keine statistisch signifikanten Zusammenhänge erkannt hat. Es muss darauf hingewiesen werden, dass für die ANOVA primär dichotomisierte Variablen berücksichtigt wurden. Damit kann ein Effekt der Variablen auf die Varianz der untersuchten Endpunkte gemessen werden. Es kann aber nicht differenziert werden, auf welche Variablenausprägung dieser Effekt zurückzuführen ist, wie z. B. bei der Variablen Geschlecht. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit können deswegen nur als ein Indiz für klinische Zusammenhänge gewertet werden. Des Weiteren bestanden viele Korrelationen geringer Stärke, die aber im Kontext der Leitfragen dieser Studie, der Klinik und der angesprochenen Häufigkeit der Ausprägungen keine klinische Relevanz haben und damit auch nicht weiter be-

schrieben oder diskutiert wurden (siehe Tabelle 13-Tabelle 16 im Anhang zu Illustration der Korrelationen).

Abschließend kann bezüglich der vierten Leitfrage gesagt werden, dass die Variablen *Altersgruppe [5,10]* und *postoperative Schmerzen*, für die die Einschätzung von der STA profitiert zu haben und die Variablen *Geschlecht* und *präoperative Schmerzen* als potenzielle Risikofaktoren für postoperative Schmerzen identifiziert werden konnten. Alle der genannten Variablen sind potenzielle Risikofaktoren für postoperative Komplikationen und die Zusammenhänge statistisch signifikant. Pavone et al. konnten außerdem zeigen, dass ein BMI oberhalb der BMI-Kategorie *normal* zu einem statistisch signifikant reduzierten klinischen Outcome führt [114].

4.3 Schlussfolgerung

Die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode ist eine minimalinvasive, effiziente und zufriedenstellende operative Methode für die Korrektur des fkKSF. Sie führt zu einer statistisch signifikanten radiologischen Korrektur des MLG in zwei Ebenen, einer Verbesserung der klinischen Symptomatik und des optischen Erscheinungsbildes und zusammenfassend zu einer Aufrichtung des MLG. Die STA kann betroffenen Kindern und deren Erziehungsberechtigten als Alternative zu einer oder nach einer ausgereizten konservativen Therapie empfohlen werden. Die Studienergebnisse dieser Arbeit deuten darauf hin, dass nicht jedes Kind ohne Weiteres für die STA infrage kommt und einige Kinder mehr von ihr profitieren als andere. Wie auch von anderen Autoren, wird empfohlen bis zum 10. Lebensjahr auf die STA bei erhöhtem Risiko für einen Korrekturverlust der Schraube und postoperative Komplikationen zu verzichten [33]. Das intrinsische Korrekturpotenzial sollte vollständig ausgeschöpft werden, weshalb eine Empfehlung für Barfußgehen zur Aktivierung der Fußmuskulatur und die rechtzeitige Behandlung von Risikofaktoren für den fkKSF besteht [34, 45, 119]. Dazu gehört insbesondere kindliches Übergewicht, dass sich negativ auf das klinische Outcome auswirken kann [114]. Im Anschluss an die STA ist auf eine adäquate Analgesie zu achten und der Einfluss von präoperativen Schmerzen und dem weiblichen Geschlecht auf eine postoperativ veränderte Schmerzantwort zu berücksichtigen. Damit soll das Risiko für postoperative Schmerzen, Komplikationen und eine Revision minimiert werden. Ein junges Implantationsalter und postoperative Schmerzen

können dazu führen, dass die Patienten tendenziell nicht von der Operation profitieren. Alle Hypothesen dieser Arbeit konnten bestätigt werden.

4.4 Ausblick

Bei einem retrospektiven Studiendesign war diese Studie in vieler Hinsicht limitiert. Es mangelte an einer Kontrollgruppe und einer validierten, vergleichbaren Methode für die Evaluation des klinischen Outcomes. Die TNG und der TMT-Index wurden in dieser Arbeit nicht gemessen. Die Ergebnisse könne lediglich als Indiz und Tendenzen und nicht als absolute Aussagen gewertet werden. Nachdem nahezu jede Studie, die das Outcome der STA untersucht, retrospektiver Natur ist, sind diese Art von Lücken im Studiendesign kein Einzelfall. Damit besteht ein grundsätzlicher Bedarf an prospektiven Studien, damit zukünftig Fehler dieser Art vermieden und neue Erkenntnisse gewonnen werden können. Darauf, dass die Evaluation des klinischen Outcomes auch außerhalb von Studien, für die den fkKSF behandelnden Institutionen von Interesse sein sollte, wurde bereits hingewiesen. Inhalt solcher zukünftigen Untersuchungen könnten weiterführende Analysen zu Einflussvariablen auf das klinische und insbesondere auf das radiologische Outcome sein, um die Erkenntnisse dieser Arbeit weiterführend zu belegen. Pavone et al. sind die ersten, die versucht haben, in dieser Hinsicht Erkenntnisse zu gewinnen, indem Sie den Einfluss des BMI auf die Korrektur von Winkeln im Röntgen untersucht haben [114]. Sie konnten zeigen, dass es unabhängig von der Körperkonstitution zu keinen statistisch signifikanten Unterschieden in der Veränderung der Winkel kommt. Daneben gibt es keine Studie, die die STA mit anderen operativen Methoden oder mit konservativen Behandlungsstrategien vergleicht. Angesichts der Tatsache, dass eine mangelnde Wirksamkeit von Einlagen und Weichteilverfahren bereits belegt ist, besteht hier ein ethischer Konflikt (siehe 1.6.1) [37, 90, 157, 158]. Dem Patienten würde dabei die für ihn beste Therapie vorenthalten werden. Bei Vergleich mit anderen knöchernen Techniken muss die Indikation dafür strengstens beachtet werden (siehe 1.6.2.2). Von besonderem Interesse sind Studien, die das Langzeitoutcome im Erwachsenenalter evaluieren, beispielsweise durch Anfertigung von Röntgenaufnahmen im zeitlichen Abstand von einigen Jahren nach erfolgter Explantation der Schraube [22, 28, 136]. Damit könnte untersucht werden, ob die Korrektur auch nach Entfernung des Implantates anhält. Auch hier steht die Forschung vor einem ethischen Konflikt. In der Praxis ist bei fehlenden Beschwerden und nachgewiesener Korrektur das Anfertigen von

Röntgenaufnahmen außerhalb des Forschungsinteresses im Sinne der quartären Prävention nicht zu rechtfertigen. Studien, die den Einfluss eines fkKSF auf das Gangbild und die Veränderungen, die durch die STA erzielt werden können, untersuchen, sind spärlich und von zukünftigem Interesse [29, 35]. Weiterhin umschrieben bleibt der neuropropriozeptive Wirkmechanismus der STA [3, 33]. Erkenntnisse auf diesem Gebiet könnten das Korrekturergebnis nachhaltig beeinflussen. Abschließen sei darauf hingewiesen, dass nach über fünf Jahren erst kürzlich aktualisierte Leitlinien für den kKSF veröffentlicht wurden [34]. Mit Ausnahme einiger Neuerungen auf dem Gebiet der funktionellen Diagnostik des kKSF, bleibt der Großteil der Leitlinien jedoch unverändert und insbesondere neue Erkenntnisse hinsichtlich der Evaluationsmethoden des klinischen und radiologischen Outcomes nicht angesprochen [34, 72]. Wünschenswert wäre die Überarbeitung der für die radiologische Evaluation empfohlenen Winkel mit Aufnahme der T-dekl in diese Empfehlungen. Außerdem sollte neben der reinen Empfehlung dargestellt werden, wie die Winkel zu konstruieren sind, um die Vergleichbarkeit zwischen den Studien zu erhöhen. Empfehlungen bezüglich validierter in Deutschland zertifizierter Methoden für die Evaluation des klinischen Outcomes wären hilfreich.

5 Zusammenfassung

Hintergrund Der flexible kindliche Knick-Senk-Fuß (fkKSF) ist eine mit einer Inzidenz von 5 % in der Bevölkerung verbreitete, dreidimensionale Fußfehlstellung. Er präsentiert sich klinisch durch einen Rückfußvalgus und die Absenkung des medialen Längsgewölbes unter Belastung. Nahezu jedes Kind wird mit einem fkKSF geboren. Während sich dieser im Laufe der ersten Lebensdekade physiologisch unter Entwicklung der unteren Extremität zurückbildet, bleibt er bei 4 % der Kinder über das 10. Lebensjahr hinaus bestehen. Meist ist er asymptomatisch. Selten kann es zu belastungsabhängigen Schmerzen und Einschränkungen der Funktionalität des Fußes kommen. Therapeutisch kommen konservative und operative Verfahren infrage. Insbesondere die subtalare Arthrorise (STA) erfreut sich zunehmender Beliebtheit. Ziel dieser Studie war es zu untersuchen, ob die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode zu einer radiologischen Korrektur und klinischen Verbesserung des fkKSF führt. Außerdem sollte beantwortet werden, welche Variablen die Einschätzung von der STA profitiert zu haben und den Behandlungsverlauf beeinflussen.

Material und Methoden Retrospektiv wurden die Daten von 178 Patienten (353 Füße), die zwischen dem 12.12.2007 und 02.07.2018 mittels STA in der Klinik für Orthopädie des Universitätsklinikums Ulm versorgt wurden, untersucht (Beobachtungszeit 51,47 Monate ± 20,21). Begleitende Weichteilverfahren wurden nicht durchgeführt. In die Studie eingeschlossen wurden nur Patienten mit einem idiopathischen fkKSF bei radiologisch noch geöffneten Wachstumsfugen des Fußes. Ein rigider, neurogener, syndromaler Knick-Senk-Fuß, Voroperationen oder begleitende Fußpathologien führten zum Studienausschluss. Zum Zeitpunkt der Implantation waren die Patienten 11,96 Jahre ± 1,46 alt. Die Evaluation des radiologischen Outcomes erfolgte durch die Vermessung des Talus-Metatarsale-I-Winkels (TMTI-lat), Calcaneus-Boden-Winkels (Calc-B), Moreau-Costa-Bartani-Winkels (Costa-B) und der Talusdeklination (T-dekl) in der lateralen Röntgenprojektion und dem Talus-Metatarsale-I-Winkel (TMTI-dp) und talocalcanearer Winkel (TC-dp) in der dorsoplantaren Projektion. Die Messungen erfolgten präoperativ und vor der Explantation. Die Evaluation des klinischen Outcomes erfolgte gemeinschaftlich durch den behandelnden Orthopäden und den Patienten durch eine vergleichende Beurteilung des prä- und postoperativ imponierenden klinischen Erscheinungsbild, der Symptomatik sowie Erfassung der Patientenzufriedenheit. Für die Beantwortung der Leitfragen wurden neben deskriptiven Analysen die Methode der *Analysis of Variance* (ANOVA) genutzt.

Ergebnisse Mit Ausnahme der T-dekl kam es zu einer statistisch signifikanten Veränderung aller gemessenen Winkel ($p < 0,01$). Eine Reduktion der Werte zeigte sich für den TMTI-lat (21,77° ± 8,19 auf 14,74° ± 8,22), den Costa-B (136,83° ± 7,78 auf 127,57° ± 7,65), die T-dekl (36,52° ± 6,53 auf 32,62° ± 6,26), den TC-dp (28,73° ± 6,52 auf 26,19° ± 7,46) und den TMTI-dp (13,65° ± 7,38 auf 10,65° ± 7,57). Beim Calc-B kam es zu einer Zunahme der Messwerte (15,75° ± 4,33 auf 17,92° ± 4,76). Vor der Explantation lagen fünf der sechs gemessenen Winkel in ihrem Referenzbereich (83,33 %). Klinisch haben sich in 96,30 % (n= 340) der Füße das klinische Erscheinungsbild und die Symptomatik verbessert und die Patienten von der Operation profitiert. Die Variablen *Altersgruppe [5,10]* und *postoperative Schmerzen* zeigten sich in der ANOVA für die Einschätzung von der STA profitiert zu haben statistisch signifikant. Die Variablen *Geschlecht* und *präoperative Schmerzen* zeigten sich in der ANOVA für postoperativen Schmerzen statistisch signifikant. Alle vier Variablen zeigten sich in der ANOVA für postoperative Komplikationen statistisch signifikant.

Diskussion und Schlussfolgerung Die Evaluation einer im Vergleich großen Studienpopulation konnte zeigen, dass die STA zu einer statistisch signifikanten radiologischen Korrektur des fkKSF führt. Die radiologische Winkelmessung am kindlichen Fußskelett stellt die am geeignetste und aussagekräftigste Evaluationsmethode des radiologischen Outcomes dar. Die Mehrheit der Patienten zeigte nach der STA eine klinische Verbesserung des fkKSF und war mit dem Korrekturergebnis zufrieden. Dennoch mangelt es weiterhin an universell verwendeten und für die Anwendung an Kindern validierten Evaluationsmethoden für das klinische Outcome, was die Vergleichbarkeit zwischen den Studien einschränkt. Die Ergebnisse dieser Studie deuten darauf hin, dass ein junges Implantationsalter [5,10] das Risiko für einen Korrekturverlust der Schraube und postoperative Komplikationen erhöht. Letzteres gilt auch für das Geschlecht sowie prä- und postoperative Schmerzen. Präoperative Schmerzen und das Geschlecht scheinen außerdem das Risiko für postoperative Schmerzen zu erhöhen. Bei einem jungen Implantationsalter und postoperativen Schmerzen neigen die Patienten dazu, nicht von der STA zu profitieren. Abschließend stellt die STA mittels der Calcaneus-Stopp-Methode eine minimalinvasive operative Therapie für die Korrektur des fkKSF ab dem 10. Lebensjahr dar. Schwere Komplikationen sind selten. Vor der operativen Versorgung mittels der STA sollten das natürliche Korrekturpotenzial des Fußes ausgeschöpft und Risikofaktoren, wie kindliches Übergewicht, für ein optimales Outcome der Patienten behandelt werden.

6 Literaturverzeichnis

1. Abbara-Czardybon M, Wingenfeld C, Arbab D, Frank D (2013) Möglichkeiten und Grenzen der subtalaren Arthrorise im Kindesalter. Orthopade 42:12–19. doi: 10.1007/s00132-012-1986-8
2. Abbara-Czardybon M, Frank D, Arbab D (2014) Die Talus-Stopp-Schraubenarthrorise beim flexiblen kindlichen Pes planovalgus. Oper Orthop Traumatol 26:625–631. doi: 10.1007/s00064-013-0243-6
3. Akiyama K, Takakura Y, Tomita Y, Sugimoto K, Tanaka Y, Tamai S (1999) Neurohistology of the sinus tarsi and sinus tarsi syndrome. J Orthop Sci 4:299–303. doi: 10.1007/s007760050107
4. Arangio GA, Reinert KL, Salathe EP (2004) A biomechanical model of the effect of subtalar arthroereisis on the adult flexible flat foot. Clin Biomech (Bristol, Avon) 19:847–852. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2003.11.002
5. Arbab D, Frank D, Bouillon B, Lüring C, Wingenfeld C, Abbara-Czardybon M (2018) Die subtalare Schraubenarthrorise zur Behandlung des symptomatischen, flexiblen Pes planovalgus - Ergebnisse und eine aktuelle Literaturübersicht. Z Orthop Unfall 156:93–99. doi: 10.1055/s-0043-120071
6. Asencio JMM, Medina-Alcántara MF, Ortega-Avila AB, Jimenez-Cebrian AM, Moguer JP, Cervera-Marin JA, Gijon-Nogueron G (2019) Anthropometric and Psychomotor Development Factors Linked to Foot Valgus in Children Aged 6 to 9 Years. J Am Podiatr Med Assoc 109:30–35. doi: 10.7547/16-108
7. Benedetti MG, Berti L, Straudi S, Ceccarelli F, Giannini S (2010) Clinicoradiographic assessment of flexible flatfoot in children. J Am Podiatr Med Assoc 100:463–471. doi: 10.7547/1000463
8. Benedetti MG, Ceccarelli F, Berti L, Luciani D, Catani F, Boschi M, Giannini S (2011) Diagnosis of flexible flatfoot in children: a systematic clinical approach. Orthopedics 34:94. doi: 10.3928/01477447-20101221-04
9. Bennett GL, Weiner DS, Leighley B (1990) Surgical treatment of symptomatic accessory tarsal navicular. J Pediatr Orthop 10:445–449. doi: 10.1097/01241398-199007000-00003

10. Bernasconi A, Lintz F, Sadile F (2017) The role of arthroereisis of the subtalar joint for flatfoot in children and adults. EFORT Open Rev 2:438–446. doi: 10.1302/2058-5241.2.170009
11. Bingefors K, Isacson D (2004) Epidemiology, co-morbidity, and impact on health-related quality of life of self-reported headache and musculoskeletal pain - a gender perspective. Eur J Pain 8:435–450. doi: 10.1016/j.ejpain.2004.01.005
12. Blitz NM, Stabile RJ, Giorgini RJ, DiDomenico LA (2010) Flexible pediatric and adolescent pes planovalgus: conservative and surgical treatment options. Clin Podiatr Med Surg 27:59–77. doi: 10.1016/j.cpm.2009.09.001
13. Bollmann C, Franz A, Raabe J (2015) Die extraartikuläre Arthrodese nach Grice und Green mit Implantation eines Fibulaspans - Nachuntersuchung von 92 Patienten. Z Orthop Unfall 153:93–98. doi: 10.1055/s-0034-1396245
14. Bourdet C, Seringe R, Adamsbaum C, Glorion C, Wicart P (2013) Flatfoot in children and adolescents. Analysis of imaging findings and therapeutic implications. Orthop Traumatol Surg Res 99:80–87. doi: 10.1016/j.otsr.2012.10.008
15. Brancheau SP, Walker KM, Northcutt DR (2012) An analysis of outcomes after use of the Maxwell-Brancheau Arthroereisis implant. J Foot Ankle Surg 51:3–8. doi: 10.1053/j.jfas.2011.10.019
16. Bruderer-Hofstetter M, Fenner V, Payne E, Zdenek K, Klima H, Wegener R (2015) Gait deviations and compensations in pediatric patients with increased femoral torsion. J Orthop Res 33:155–162. doi: 10.1002/jor.22746
17. Bubra PS, Keighley G, Rateesh S, Carmody D (2015) Posterior tibial tendon dysfunction: an overlooked cause of foot deformity. J Family Med Prim Care 4:26–29. doi: 10.4103/2249-4863.152245
18. Buruturan JM (1979) El calcaneo-stop para el tratamiento del valgo de talon infatil. Chirurgia del piede 3:319–322.
19. Button G, Pinney S (2004) A meta-analysis of outcome rating scales in foot and ankle surgery: is there a valid, reliable, and responsive system? Foot Ankle Int 25:521–525. doi: 10.1177/107110070402500802
20. Cao H, Tang K, Deng Y, Tan X, Zhou B, Tao X, Chen L, Chen Q (2012) Excision of accessory navicular with reconstruction of posterior tibial tendon insertion on navicular

for treatment of flatfoot related with accessory navicular. Zhongguo Xiu Fu Chong Jian Wai Ke Za Zhi 26:686–690.

21. Cappello T, Song KM (1998) Determining treatment of flatfeet in children. Curr Opin Pediatr 10:77–81. doi: 10.1097/00008480-199802000-00016
22. Carr JB, Yang S, Lather LA (2016) Pediatric Pes Planus: A State-of-the-Art Review. Pediatrics 137:e20151230. doi: 10.1542/peds.2015-1230
23. Ceccarelli F, Calderazzi F, Pedrazzi G (2014) Is there a relation between AOFAS ankle-hindfoot score and SF-36 in evaluation of Achilles ruptures treated by percutaneous technique? J Foot Ankle Surg 53:16–21. doi: 10.1053/j.jfas.2013.09.005
24. Chambers EFS (1946) An operation for the correction of flexible flat feet of adolescents. West J Surg Obstet Gynecol 54:77–86.
25. Cohen J (1988) The Effect Size Index: f. In: Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences, 2nd ed. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, New Jersey, pp 274–288
26. Cotton FJ (1936) Foot Statics and Surgery. N Engl J Med 214:353–362. doi: 10.1056/NEJM193602202140804
27. D'Amico JC (1984) Developmental flatfoot. Clin Podiatry 1:535–546. doi: 10.1016/b978-0-443-06208-7.50017-8
28. Dare DM, Dodwell ER (2014) Pediatric flatfoot: cause, epidemiology, assessment, and treatment. Curr Opin Pediatr 26:93–100. doi: 10.1097/MOP.0000000000000039
29. Das SP, Das PB, Ganesh S, Sahu MC (2017) Effectiveness of surgically treated symptomatic plano-valgus deformity by the calcaneo stop procedure according to radiological, functional and gait parameters. J Taibah Univ Med Sci 12:102–109. doi: 10.1016/j.jtumed.2016.11.009
30. Davids JR, Gibson TW, Pugh LI (2005) Quantitative segmental analysis of weight-bearing radiographs of the foot and ankle for children: normal alignment. J Pediatr Orthop 25:769–776. doi: 10.1097/01.bpo.0000173244.74065.e4
31. de Bot RTAL, Stevens J, Hermus JPS, Staal HM, van Rhijn LW, Witlox AM (2019) Clinical and Radiological Outcomes of Subtalar Kalix II Arthroereisis for a Symptomatic Pediatric Flexible Flatfoot. Foot Ankle Spec 14:9-18. doi: 10.1177/1938640019892062
32. De Pellegrin M (2005) Die subtalare Schrauben-Arthrorise beim kindlichen Plattfuss. Orthopade 34:941-53. doi: 10.1007/s00132-005-0835-4

33. De Pellegrin M, Moharamzadeh D, Strobl WM, Biedermann R, Tschauner C, Wirth T (2014) Subtalar extra-articular screw arthroereisis (SESA) for the treatment of flexible flatfoot in children. J Child Orthop 8:479–487. doi: 10.1007/s11832-014-0619-7
34. Deutsche Gesellschaft für Orthopädie und Unfallchirurgie e.V.: Kindlicher Knick-Senkfuß: Version 4.0 (15.06.2022). https://register.awmf.org/assets/guidelines/187-053l_S2k_Kindlicher-Knick-Senkfuss_2022-11.pdf. Accessed 13 Dec 2022
35. Dibello D, Di Carlo V, Pederiva F (2022) Are Pedobarographic and Gait Analyses Useful Tools to Evaluate Outcomes of Anterograde Calcaneo-Stop Procedure in Pediatric Symptomatic Flexible Flatfoot? Children (Basel) 9:366. doi: 10.3390/children9030366
36. Döderlein L, Wenz W, Schneider U (2002) Der primäre oder idiopathische Knickplattfuß. In: Fussdeformitäten, 1. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp 9–109
37. Driano A, Staheli L, Staheli LT (1998) Psychosocial development and corrective shoewear use in childhood. J Pediatr Orthop 18:346–349. doi: 10.1097/00004694-199805000-00014
38. Dunn JE, Link CL, Felson DT, Crincoli MG, Keysor JJ, McKinlay JB (2004) Prevalence of foot and ankle conditions in a multiethnic community sample of older adults. Am J Epidemiol 159:491–498. doi: 10.1093/aje/kwh071
39. Echarri JJ, Forriol F (2003) The development in footprint morphology in 1851 Congolese children from urban and rural areas, and the relationship between this and wearing shoes. J Pediatr Orthop B 12:141–146. doi: 10.1097/01.bpb.0000049569.52224.57
40. Elmarghany M, Abd El-Ghaffar TM, Elgeushy A, Elzahed E, Hasanin Y, Knörr J (2020) Is subtalar extra articular screw arthroereisis (SESA) reducing pain and restoring medial longitudinal arch in children with flexible flat foot? J Orthop 20:147–153. doi: 10.1016/j.jor.2020.01.038
41. El O, Akcali O, Kosay C, Kaner B, Arslan Y, Sagol E, Soylev S, Iyidogan D, Cinar N, Peker O (2006) Flexible flatfoot and related factors in primary school children: a report of a screening study. Rheumatol Int 26:1050–1053. doi: 10.1007/s00296-006-0128-1
42. Evans D (1975) Calcaneo-valgus deformity. J Bone Joint Surg Br 57:270–278. doi: 10.1302/0301-620X.57B3.270

43. Fabry G, Cheng LX, Molenaers G (1994) Normal and abnormal torsional development in children. Clin Orthop Relat Res 302:22–26. doi: 10.1097/00003086-199405000-00005
44. Fabry G (2010) Clinical practice. Static, axial, and rotational deformities of the lower extremities in children. Eur J Pediatr 169:529–534. doi: 10.1007/s00431-009-1122-x
45. Farris DJ, Kelly LA, Cresswell AG, Lichtwark GA (2019) The functional importance of human foot muscles for bipedal locomotion. Proc Natl Acad Sci USA 116:1645–1650. doi: 10.1073/pnas.1812820116
46. Ferciot CF (1972) The etiology of developmental flatfoot. Clin Orthop Relat Res 85:7–10. doi: 10.1097/00003086-197206000-00003
47. Fernández de Retana P, Alvarez F, Viladot R (2010) Subtalar arthroereisis in pediatric flatfoot reconstruction. Foot Ankle Clin 15:323–335. doi: 10.1016/j.fcl.2010.01.001
48. Fiolkowski P, Brunt D, Bishop M, Woo R, Horodyski M (2003) Intrinsic pedal musculature support of the medial longitudinal arch: an electromyography study. J Foot Ankle Surg 42:327–333. doi: 10.1053/j.jfas.2003.10.003
49. Fitzpatrick R, Davey C, Buxton MK, Jones DR (1998) Evaluating patient-based outcome measures for use in clinical trials. Health Technol Assess 2:1–69. doi: 10.3310/hta2140
50. Forriol F, Pascual J (1990) Footprint analysis between three and seventeen years of age. Foot Ankle 11:101–104. doi: 10.1177/107110079001100208
51. Gedalia A, Person DA, Brewer EJ, Giannini EH (1985) Hypermobility of the joints in juvenile episodic arthritis/arthralgia. J Pediatr 107:873–876. doi: 10.1016/s0022-3476(85)80178-5
52. Gianakos A, Yasui Y, Murawski CD, Kennedy JG (2016) Effects of gastrocnemius recession on ankle motion, strength, and functional outcomes: a systematic review and national healthcare database analysis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 24:1355–1364. doi: 10.1007/s00167-015-3939-3
53. Giannini S, Girolami M, Ceccarelli F (1985) The surgical treatment of infantile flat foot. A new expanding endo-orthotic implant. Ital J Orthop Traumatol 11:315–322.
54. Giannini S (1998) Operative treatment of the flatfoot: Why and How. Foot Ankle Int 19:52–58. doi: 10.1177/107110079801900111

55. Giannini S, Ceccarelli F, Benedetti MG, Catani F, Faldini C (2001) Surgical treatment of flexible flatfoot in children a four-year follow-up study. J Bone Joint Surg Am 83-A:73–79. doi: 10.2106/00004623-200100022-00003
56. Giannini S, Cadossi M, Mazzotti A, Persiani V, Tedesco G, Romagnoli M, Faldini C (2017) Bioabsorbable Calcaneo-Stop Implant for the Treatment of Flexible Flatfoot: A Retrospective Cohort Study at a Minimum Follow-Up of 4 Years. J Foot Ankle Surg 56:776–782. doi: 10.1053/j.jfas.2017.02.018
57. Gijon-Nogueron G, Marchena-Rodriguez A, Montes-Alguacil J, Evans AM (2020) Evaluation of the paediatric foot using footprints and foot posture index: A cross-sectional study. J Paediatr Child Health 56:201–206. doi: 10.1111/jpc.14558
58. Golightly YM, Hannan MT, Dufour AB, Jordan JM (2012) Racial differences in foot disorders and foot type. Arthritis Care Res (Hoboken) 64:1756–1759. doi: 10.1002/acr.21752
59. Gould N (1982) Graphing the adult foot and ankle. Foot Ankle 2:213–219. doi: 10.1177/107110078200200407
60. Gutteck N, Schilde S, Delank KS, Arbab D (2020) Ätiologie, Pathogenese, Klinik, Diagnostik und konservative Therapie des adulten erworbenen Plattfußes. Orthopade 49:942–953. doi: 10.1007/s00132-020-03995-5
61. Hamel J, Kinast C (2006) Der TMT-Index zur radiologischen Quantifizierung von Planovalgus-Deformitäten. FussSprungg 4:221–226. doi: 10.1007/s10302-006-0244-y
62. Hamel J (2010) Die Calcaneostop-Arthrorise - eine retrospektive klinische Studie mit Komplikations-Analyse. FussSprungg 8:35–41. doi: 10.1016/j.fuspru.2009.11.001
63. Hamel J (2019 a) Der flexible Knicksenkfuß. In: Operative Behandlung von Fuß und Sprunggelenk im Kindes- und Jugendalter, 1. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 93–136
64. Hamel J (2019 b) Neurogene Deformitäten (außer Kavovarus-Deformität). In: Operative Behandlung von Fuß und Sprunggelenk im Kindes- und Jugendalter, 1. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 173–189
65. Hamel J (2019 c) Supramalleoläre Fehlstellungen. In: Operative Behandlung von Fuß und Sprunggelenk im Kindes- und Jugendalter, 1. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 221–234

66. Hamel J, Hörterer H, Harrasser N (2021) Der Talometatarsalindex („TMT-Index“): Ein wertvoller Röntgenparameter zur Differenzierung zwischen Normalfuß und Plano-valgusdeformität beim Kind und Jugendlichen. Orthopade 50:481–488. doi: 10.1007/s00132-020-03954-0
67. Haraldsson S (1965) Pes plano-valgus staticus juvenilis and its operative treatment. Acta Orthop Scand 35:234–256. doi: 10.3109/17453676508989356
68. Harris EJ, Vanore JV, Thomas JL, Kravitz SR, Mendelson SA, Mendicino RW, Silvani SH, Gassen SC (2004) Diagnosis and treatment of pediatric flatfoot. J Foot Ankle Surg 43:341–373. doi: 10.1053/j.jfas.2004.09.013
69. Harris EJ (2010) The Natural History and Pathophysiology of Flexible Flatfoot. Clin Podiatr Med Surg 27:1–23. doi: 10.1016/j.cpm.2009.09.002
70. Headlee DL, Leonard JL, Hart JM, Ingersoll CD, Hertel J (2008) Fatigue of the plantar intrinsic foot muscles increases navicular drop. J Electromyogr Kinesiol 18:420–425. doi: 10.1016/j.jelekin.2006.11.004
71. Hefti F (1999) Fußschmerzen. Orthopade 28:173–179. doi: 10.1007/PL00003594
72. Hell AK, Döderlein L, Eberhardt O, Hösl M, von Kalle T, Mecher F, Simon A, Stinus H, Wilken B, Wirth T (2018) S2-Leitlinie: der kindliche Knick-Senk-Fuß. Z Orthop Unfall 156:306–315. doi: 10.1055/s-0044-101066
73. Høiness PR, Kirkhus E (2009) Grice arthrodesis in the treatment of valgus feet in children with myelomeningocele: a 12.8-year follow-up study. J Child Orthop 3:283–290. doi: 10.1007/s11832-009-0183-8
74. Holtmann JA, Südkamp NP, Schmal H, Mehlhorn AT (2017) Gastrocnemius Recession Leads to Increased Ankle Motion and Improved Patient Satisfaction After 2 Years of Follow-Up. J Foot Ankle Surg 56:589–593. doi: 10.1053/j.jfas.2017.01.037
75. Indino C, Villafañe JH, D'Ambrosi R, Manzi L, Maccario C, Berjano P, Usuelli FG (2020) Effectiveness of subtalar arthroereisis with endorthesis for pediatric flexible flat foot: a retrospective cross-sectional study with final follow up at skeletal maturity. Foot Ankle Surg 26:98–104. doi: 10.1016/j.fas.2018.12.002
76. Jani L (1986) Der kindliche Knick-Senkfuss. Orthopade 15:199–204.
77. Jerosch J, Schunck J, Abdel-Aziz H (2009) The stop screw technique-a simple and reliable method in treating flexible flatfoot in children. Foot Ankle Surg 15:174–178. doi: 10.1016/j.fas.2009.01.004

78. Jessee EF, Owen DS, Sagar KB (1980) The benign hypermobile joint syndrome. Arthritis Rheum 23:1053–1056. doi: 10.1002/art.1780230914
79. Kellermann P, Roth S, Gion K, Boda K, Tóth K (2011) Calcaneo-stop procedure for paediatric flexible flatfoot. Arch Orthop Trauma Surg 131:1363–1367. doi: 10.1007/s00402-011-1316-3
80. Kelly LA, Cresswell AG, Racinais S, Whiteley R, Lichtwark G (2014) Intrinsic foot muscles have the capacity to control deformation of the longitudinal arch. J R Soc Interface 11:20131188. doi: 10.1098/rsif.2013.1188
81. Kelly LA, Lichtwark G, Cresswell AG (2015) Active regulation of longitudinal arch compression and recoil during walking and running. J R Soc Interface 12:20141076. doi: 10.1098/rsif.2014.1076
82. Kendal AR, Khalid A, Ball T, Rogers M, Cooke P, Sharp R (2015) Complications of minimally invasive calcaneal osteotomy versus open osteotomy. Foot Ankle Int 36:685–690. doi: 10.1177/1071100715571438
83. Kim HY, Cha YH, Lee JS, Kil K-M, Choy WS (2020) Changes in Gait and Radiographic and Clinical Results of Calcaneal Lengthening Osteotomy in Children with Idiopathic Flexible Flatfoot. Clin Orthop Surg 12:386–395. doi: 10.4055/cios19150
84. Kitaoka HB, Alexander IJ, Adelaar RS, Nunley JA, Myerson MS, Sanders M (1994) Clinical rating systems for the ankle-hindfoot, midfoot, hallux, and lesser toes. Foot Ankle Int 15:349–353. doi: 10.1177/107110079401500701
85. Koutsogiannis E (1971) Treatment of mobile flat foot by displacement osteotomy of the calcaneus. J Bone Joint Surg Br 53:96–100. doi: 10.1302/0301-620X.53B1.96
86. Leiß F, Schwarz T, Baier C, Grifka J (2019) Klinische Untersuchung des Fußes. Orthopade 48:541–552. doi: 10.1007/s00132-019-03748-z
87. LeLièvre J (1970) Current concepts and correction in the valgus foot. Clin Orthop Relat Res 70:43–55. doi: 10.1097/00003086-197005000-00005
88. Lin CJ, Lai KA, Kuan TS, Chou YL (2001) Correlating factors and clinical significance of flexible flatfoot in preschool children. J Pediatr Orthop 21:378–382. doi: 10.1097/01241398-200105000-00022
89. Lowman CL (1923) An operative method for correction of certain forms of flatfoot. JAMA 81:1500–1502. doi: 10.1001/jama.1923.02650180018007

90. MacKenzie AJ, Rome K, Evans AM (2012) The efficacy of nonsurgical interventions for pediatric flexible flat foot: a critical review. J Pediatr Orthop 32:830–834. doi: 10.1097/BPO.0b013e3182648c95
91. Maier E, Killmann M (2003) Der Fuß in der Menschheitsgeschichte. In: Kinderfuß und Kinderschuh: Entwicklung der kindlichen Beine und Füße und ihre Anforderungen an fußgerechte Schuhe, 1. Aufl. Neuer Merkur, München, pp 13–84
92. Mann RA, Thompson FM (1985) Rupture of the posterior tibial tendon causing flat foot. Surgical treatment. J Bone Joint Surg Am 67:556–561. doi: 10.2106/00004623-198567040-00009
93. Marengo L, Canavese F, Mansour M, Dimeglio A, Bonnel F (2017) Clinical and radiological outcome of calcaneal lengthening osteotomy for flatfoot deformity in skeletally immature patients. Eur J Orthop Surg Traumatol 27:989–996. doi: 10.1007/s00590-017-1909-9
94. Maxwell JR, Carro A, Sun C (1999) Use of the Maxwell-Brancheau arthroereisis implant for the correction of posterior tibial tendon dysfunction. Clin Podiatr Med Surg 16:479–489.
95. Maxwell JR, Cerniglia MW (2001) Subtalar joint arthroereisis. In: Banks AS, Downey MS, Martin DE, Miller SJ (eds) McGlamry's Comprehensive Textbook of Foot and Ankle Surgery, 3rd ed. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, pp 901–914
96. Megremis P, Megremis O (2019) Arthroereisis for Symptomatic Flexible Flatfoot Deformity in Young Children: Radiological Assessment and Short-Term Follow-Up. J Foot Ankle Surg 58:904–915. doi: 10.1053/j.jfas.2019.01.012
97. Memeo A, Verdoni F, Rossi L, Ferrari E, Panuccio E, Pedretti L (2019) Flexible Juvenile Flat Foot Surgical Correction: A Comparison Between Two Techniques After Ten Years' Experience. J Foot Ankle Surg 58:203–207. doi: 10.1053/j.jfas.2018.07.013
98. Messerschmidt C, Netto A, Barfield WR, Gross C, McKibbin W (2018) Functional Outcomes of Isolated Gastrocnemius Recession. J Surg Orthop Adv 27:125–130.
99. Metcalfe SA, Bowling FL, Reeves ND (2011) Subtalar joint arthroereisis in the management of pediatric flexible flatfoot: a critical review of the literature. Foot Ankle Int 32:1127–1139. doi: 10.3113/FAI.2011.1127

100. Mickle KJ, Steele JR, Munro BJ (2008) Is the foot structure of preschool children moderated by gender? J Pediatr Orthop 28:593–596. doi: 10.1097/bpo.0b013e318173f782
101. Morley AJ (1957) Knock-knee in children. Br Med J 2:976–979. doi: 10.1136/bmj.2.5051.976
102. Morris C, Liabo K, Wright P, Fitzpatrick R (2007) Development of the Oxford ankle foot questionnaire: finding out how children are affected by foot and ankle problems. Child Care Health Dev 33:559–568. doi: 10.1111/j.1365-2214.2007.00770.x
103. Morris C, Doll HA, Wainwright A, Theologis T, Fitzpatrick R (2008) The Oxford ankle foot questionnaire for children: scaling, reliability and validity. J Bone Joint Surg Br 90:1451–1456. doi: 10.1302/0301-620X.90B11.21000
104. Morris C, Doll H, Davies N, Wainwright A, Theologis T, Willett K, Fitzpatrick R (2009) The Oxford Ankle Foot Questionnaire for children: responsiveness and longitudinal validity. Qual Life Res 18:1367–1376. doi: 10.1007/s11136-009-9550-7
105. Mosca VS (1995) Calcaneal lengthening for valgus deformity of the hindfoot. Results in children who had severe, symptomatic flatfoot and skewfoot. J Bone Joint Surg Am 77:500–512. doi: 10.2106/00004623-199504000-00002
106. Mosca VS (2010) Flexible flatfoot in children and adolescents. J Child Orthop 4:107–121. doi: 10.1007/s11832-010-0239-9
107. Needleman RL (2005) Current topic review: subtalar arthroereisis for the correction of flexible flatfoot. Foot Ankle Int 26:336–346. doi: 10.1177/107110070502600411
108. Needleman RL (2006) A surgical approach for flexible flatfeet in adults including a subtalar arthroereisis with the MBA sinus tarsi implant. Foot Ankle Int 27:9–18. doi: 10.1177/107110070602700103
109. Nelson SC, Haycock DM, Little ER (2004) Flexible flatfoot treatment with arthroereisis: radiographic improvement and child health survey analysis. J Foot Ankle Surg 43:144–155. doi: 10.1053/j.jfas.2004.03.012
110. O'Connor KM, Hamill J (2004) The role of selected extrinsic foot muscles during running. Clin Biomech (Bristol, Avon) 19:71–77. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2003.09.001
111. Oxford University Innovation The Oxford Ankle Foot Questionnaire for Children (OxAFQ-C). https://innovation.ox.ac.uk/wp-content/uploads/2014/09/OxAFQ-C_language-list_May2022.pdf. Accessed 30 Jul 2022

112. Pavone V, Costarella L, Testa G, Conte G, Riccioli M, Sessa G (2013) Calcaneo-stop procedure in the treatment of the juvenile symptomatic flatfoot. J Foot Ankle Surg 52:444–447. doi: 10.1053/j.jfas.2013.03.010
113. Pavone V, Vescio A, Di Silvestri CA, Andreacchio A, Sessa G, Testa G (2018) Outcomes of the calcaneo-stop procedure for the treatment of juvenile flatfoot in young athletes. J Child Orthop 12:582–589. doi: 10.1302/1863-2548.12.180032
114. Pavone V, Vescio A, Canavese F, Costa D, Sessa G, Testa G (2019) Effects of body weight on the clinical and radiological outcomes of children with flexible flatfeet managed with the 'calcaneo-stop' procedure. J Pediatr Orthop B 28:228–234. doi: 10.1097/BPB.0000000000000590
115. Perttunen K, Tasmuth T, Kalso E (1999) Chronic pain after thoracic surgery: a follow-up study. Acta Anaesthesiol Scand 43:563–567. doi: 10.1034/j.1399-6576.1999.430513.x
116. Peterson CK, Humphreys BK, Hodler J, Pfirrmann CWA (2012) Gender differences in pain levels before and after treatment: a prospective outcomes study on 3,900 Swiss patients with musculoskeletal complaints. BM Central Musculoskelet Disord 13:241. doi: 10.1186/1471-2474-13-241
117. Pfeiffer M, Kotz R, Ledl T, Hauser G, Sluga M (2006) Prevalence of flat foot in preschool-aged children. Pediatrics 118:634–639. doi: 10.1542/peds.2005-2126
118. Pieretti S, Di Giannuario A, Di Giovannandrea R, Marzoli F, Piccaro G, Minosi P, Aloisi AM (2016) Gender differences in pain and its relief. Ann Ist Super Sanita 52:184–189. doi: 10.4415/ANN_16_02_09
119. Rao UB, Joseph B (1992) The influence of footwear on the prevalence of flat foot. A survey of 2300 children. J Bone Joint Surg Br 74:525–527. doi: 10.1302/0301-620X.74B4.1624509
120. Rein S, Hanisch U, Zwipp H, Fieguth A, Lwowski S, Hagert E (2013 a) Comparative analysis of inter- and intraligamentous distribution of sensory nerve endings in ankle ligaments: a cadaver study. Foot Ankle Int 34:1017–1024. doi: 10.1177/1071100713480862
121. Rein S, Hanisch U, Hagert E, Lwowski S, Fieguth A, Zwipp H (2013 b) Immunohistochemical analysis of sensory nerve endings in ankle ligaments: a cadaver study. Cells Tissues Organs 197:64–76. doi: 10.1159/000339877

122. Richter M, Zech S (2013) Arthrorisis with calcaneostop screw in children corrects Talo-1st Metatarsal-Index (TMT-Index). Foot Ankle Surg 19:91–95. doi: 10.1016/j.fas.2012.11.008
123. Rockett AK, Mangum G, Mendicino SS (1998) Bilateral intraosseous cystic formation in the talus: A complication of subtalar arthroeresis. Foot Ankle Surg 37:421–425. doi: 10.1016/S1067-2516(98)80052-5
124. Roth S, Sestan B, Tudor A, Ostojic Z, Sasso A, Durbesic A (2007) Minimally invasive calcaneo-stop method for idiopathic, flexible pes planovalgus in children. Foot Ankle Int 28:991–995. doi: 10.3113/FAI.2007.0991
125. Rowntree D (1981) Analysing relationships. In: Statistics Without Tears: A Primer for Non-mathematicians, 1st ed. Charles Scribner's Sons, New York, pp 155–184
126. Ruiz-Picazo D, Jiménez-Ortega P, Doñate-Pérez F, Gaspar-Aparicio N, García-Martín V, Ramírez-Villaescusa J, Losa-Palacios S (2019) Radiographic and Functional Results following Subtalar Arthroereisis in Pediatric Flexible Flatfoot. Adv Orthop 9:5061934. doi: 10.1155/2019/5061934
127. Rustøen T, Wahl AK, Hanestad BR, Lerdal A, Paul S, Miaskowski C (2004) Gender differences in chronic pain--findings from a population-based study of Norwegian adults. Pain Manag Nurs 5:105–117. doi: 10.1016/j.pmn.2004.01.004
128. Saltzman CL, Fehrle MJ, Cooper RR, Spencer EC, Ponseti IV (1999) Triple arthrodesis: twenty-five and forty-four-year average follow-up of the same patients. J Bone Joint Surg Am 81:1391–1402. doi: 10.2106/00004623-199910000-00004
129. Scharer BM, Black BE, Sockrider N (2010) Treatment of painful pediatric flatfoot with Maxwell-Brancheau subtalar arthroereisis implant a retrospective radiographic review. Foot Ankle Spec 3:67–72. doi: 10.1177/1938640010362262
130. Schmidt C, Parsch K (2003) Der kindliche Knick-Senk-Fuss. Orthopade 32:253-262. doi: 10.1007/s00132-003-0452-z
131. Schon LC (2007) Subtalar arthroereisis: a new exploration of an old concept. Foot Ankle Clin 12:329-39. doi: 10.1016/j.fcl.2007.03.011
132. Sensiba PR, Coffey MJ, Williams NE, Mariscalco M, Laughlin RT (2010) Inter- and intraobserver reliability in the radiographic evaluation of adult flatfoot deformity. Foot Ankle Int 31:141–145. doi: 10.3113/FAI.2010.0141

133. Shah NS, Needleman RL, Bokhari O, Buzas D (2015) 2013 Subtalar Arthroereisis Survey: The Current Practice Patterns of Members of the AOFAS. Foot Ankle Spec 8:180–185. doi: 10.1177/1938640015578514
134. Sheikh Taha AM, Feldman DS (2015) Painful Flexible Flatfoot. Foot Ankle Clin 20:693–704. doi: 10.1016/j.fcl.2015.07.011
135. Smith SD, Millar EA (1983) Arthrorisis by means of a subtalar polyethylene peg implant for correction of hindfoot pronation in children. Clin Orthop Relat Res 181:15–23. doi: 10.1097/00003086-198312000-00004
136. Smolle MA, Svehlik M, Regvar K, Leithner A, Kraus T (2022) Long-term clinical and radiological outcomes following surgical treatment for symptomatic pediatric flexible flat feet: a systematic review. Acta Orthop 93:367–374. doi: 10.2340/17453674.2022.2254
137. SooHoo NF, Shuler M, Fleming LL (2003) Evaluation of the validity of the AOFAS Clinical Rating Systems by correlation to the SF-36. Foot Ankle Int 24:50–55. doi: 10.1177/107110070302400108
138. Staheli LT, Chew DE, Corbett M (1987) The longitudinal arch. A survey of eight hundred and eighty-two feet in normal children and adults. J Bone Joint Surg Am 69:426–428. doi: 10.2106/00004623-198769030-00014
139. Staheli LT (1999) Planovalgus foot deformity. Current status. J Am Podiatr Med Assoc 89:94–99. doi: 10.7547/87507315-89-2-94
140. Steel MW, Johnson KA, DeWitz MA, Ilstrup DM (1980) Radiographic measurements of the normal adult foot. Foot Ankle 1:151–158. doi: 10.1177/107110078000100304
141. Steinbeck V, Ernst S-C, Pross C (2021) Patient-Reported Outcome Measures (PROMs): ein internationaler Vergleich, 1. Aufl. Bertelsmann Stiftung, Gütersloh, pp 15-18
142. Subotnick SI (1974) The subtalar joint lateral extra-articular arthroereisis: a preliminary report. J Am Podiatry Assoc 64:701–711. doi: 10.7547/87507315-64-9-701
143. Sullivan JA (1999) Pediatric flatfoot: evaluation and management. J Am Acad Orthop Surg 7:44–53. doi: 10.5435/00124635-199901000-00005
144. Tan JHI, Tan SHS, Lim AKS, Hui JH (2020) The outcomes of subtalar arthroereisis in pes planus: a systemic review and meta-analysis. Arch Orthop Trauma Surg 141:761–773. doi: 10.1007/s00402-020-03458-8

145. Tankson CJ (2007) The Cotton osteotomy: indications and techniques. Foot Ankle Clin 12:309-315. doi: 10.1016/j.fcl.2007.03.006
146. Thordarson DB, Schmotzer H, Chon J, Peters J (1995) Dynamic support of the human longitudinal arch. A biomechanical evaluation. Clin Orthop Relat Res 316:165–172. doi: 10.1097/00003086-199507000-00022
147. Tosovic D, Ghebremedhin E, Glen C, Gorelick M, Mark Brown J (2012) The architecture and contraction time of intrinsic foot muscles. J Electromyogr Kinesiol 22:930–938. doi: 10.1016/j.jelekin.2012.05.002
148. Toullec E (2015) Adult flatfoot. Orthop Traumatol Surg Res 101:11-17. doi: 10.1016/j.otsr.2014.07.030
149. Viladot A (1954) Nuevo método de exploración estática del pie: el fotopodograma. Clinical Laboratory 57:114 –154.
150. Viladot A (1992) Surgical treatment of the child's flatfoot. Clin Orthop Relat Res 283:34–38. doi: 10.1097/00003086-199210000-00005
151. Viladot R, Pons M, Alvarez F, Omaña J (2003) Subtalar arthroereisis for posterior tibial tendon dysfunction: a preliminary report. Foot Ankle Int 24:600–606. doi: 10.1177/107110070302400806
152. Vogler HM (1987) Subtalar joint blocking operations for pathological pronation syndromes. In: McGlamry ED, McGlamry R (eds) Comprehensive Textbook of Foot Surgery, 1st ed. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, London, Los Angeles, pp 447–465
153. Volpon JB (1994) Footprint analysis during the growth period 14:83–85. doi: 10.1097/01241398-199401000-00017
154. Vougiouka O, Moustaki M, Tsanaktsi M (2000) Benign hypermobility syndrome in Greek schoolchildren. Eur J Pediatr 159:628. doi: 10.1007/pl00008391 (Research Letter)
155. Waizy H, Plaass C, Brandt M, Herold D, Stukenborg-Colsman C, Windhagen H, Claassen L (2013) Extraartikuläre Arthrorise nach Grice/Green vs. Kalkaneusverlängerungsosteotomie nach Evans: Retrospektiver Vergleich zur Therapie des neurogenen Pes planovalgus. Orthopade 42:409–417. doi: 10.1007/s00132-013-2090-4

156. Wapner K, Freeland E, Kirwan G, Baldwin K (2021) A Retrospective Radiographic Evaluation of a Modified Method of Lateral Column Lengthening. Foot Ankle Spec 14:386–392. doi: 10.1177/1938640020919187
157. Wenger DR, Leach J (1986) Foot Deformities in Infants and Children. Pediatr Clin North Am 33:1411–1427. doi: 10.1016/S0031-3955(16)36151-X
158. Wenger DR, Mauldin D, Speck G, Morgan D, Lieber RL (1989) Corrective shoes and inserts as treatment for flexible flatfoot in infants and children. J Bone Joint Surg Am 71:800–810. doi: 10.2106/00004623-198971060-00002
159. Westhoff B, Wild A, Krauspe R (2002) Entwicklung der Beinachse im Kindesalter und Therapieoptionen bei kniegelenknahen Fehlstellungen. Orthopade 31:1198-1208. doi: 10.1007/s00132-002-0391-0
160. Whitford D, Esterman A (2007) A randomized controlled trial of two types of in-shoe orthoses in children with flexible excess pronation of the feet. Foot Ankle Int 28:715–723. doi: 10.3113/FAI.2007.0715
161. WHO Multicentre Growth Reference Study Group (2006) Assessment of differences in linear growth among populations in the WHO Multicentre Growth Reference Study. Acta Paediatr Suppl 450:56–65. doi: 10.1111/j.1651-2227.2006.tb02376.x
162. World Health Organization BMI-for-age-BOYS 5 to 19 years (z-scores). https://cdn.who.int/media/docs/default-source/child-growth/growth-reference-5-19-years/bmi-for-age-(5-19-years)/bmifa-boys-5-19years-z.pdf?sfvrsn=b74e5f9a_4. Accessed 10 Aug 2022
163. World Health Organization BMI-for-age-GIRLS 5 to 19 years (z-scores). https://cdn.who.int/media/docs/default-source/child-growth/growth-reference-5-19-years/bmi-for-age-(5-19-years)/bmifa-girls-5-19years-z.pdf?sfvrsn=8f7e5b11_4. Accessed 10 Aug 2022
164. Yontar NS, Ogut T, Guven MF, Botanlioglu H, Kaynak G, Can A (2016) Surgical treatment results for flexible flatfoot in adolescents. Acta Orthop Traumatol Turc 50:655–659. doi: 10.1016/j.aott.2016.02.002
165. Younger AS, Sawatzky B, Dryden P (2005) Radiographic assessment of adult flatfoot. Foot Ankle Int 26:820–825. doi: 10.1177/107110070502601006
166. Zaret DI, Myerson MS (2003) Arthroerisis of the subtalar joint. Foot Ankle Clin 8:605–617. doi: 10.1016/S1083-7515(03)00041-X

167. Zheng H, Schnabel A, Yahiaoui-Doktor M, Meissner W, van Aken H, Zahn P, Pogatzki-Zahn E (2017) Age and preoperative pain are major confounders for sex differences in postoperative pain outcome: A prospective database analysis. PLoS One 12:e0178659. doi: 10.1371/journal.pone.0178659
168. Zhu Y, Xu X-Y (2015) Treatment of Stage II Adult Acquired Flatfoot Deformity With Subtalar Arthroereises. Foot Ankle Spec 8:194–202. doi: 10.1177/1938640014548320

III. Anhang

Tabelle 13: Korrelationsanalyse nach Pearson für die Prä-Implantation erhobenen Variablen

*Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Pearson für die präoperativ an Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 erhobenen Variablen. Die Interpretation erfolgt mittels des Korrelationskoeffizienten (r), auf Grundlage dessen ein unterschiedlich starker linearer Zusammenhang angenommen werden kannn (siehe Tabelle 2). Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen und der Zusammenhang entsprechend negativ oder positiv sein. Die Einordnung der Relevanz der Korrelationen erfolgt durch die Berechnung der Signifikanzlevels: 0,05 *, 0,01 **, nicht signifikant ·. BMI= Body-Mass-Index, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

	Körper-größe (in cm)	Körper-gewicht (in kg)	BMI	Ge-schlecht	Präoperative Schmerzen	Abgenutz-tes Schuhwerk	Verkürzte Wadenmusku-latur	Stol-pern	Bisherige Therapie
Körpergröße (in cm)	1,00	0,70 **	0,27 **	-0,01 .	0,04 .	0,04 .	0,06 .	0,07 .	0,00 .
Körpergewicht (in kg)	0,70 **	1,00	0,87 **	-0,02 .	0,03 .	0,02 .	0,20 **	0,12 *	0,02 .
BMI	0,27 **	0,87 **	1,00	-0,02 .	0,03 .	0,04 .	0,21 **	0,11 *	0,03 .
Geschlecht	-0,01 .	-0,02 .	-0,02 .	1,00	-0,08 .	0,07 .	0,06 .	0,04 .	-0,06 .
Präoperative Schmerzen	0,04 .	0,03 .	0,03 .	-0,08 .	1,00	-0,14 *	0,06 .	-0,11 *	0,03 .
Abgenutztes Schuhwerk	0,04 .	0,02 .	0,04 .	0,07 .	-0,14 *	1,00	-0,08 .	0,04 .	-0,07 .
Verkürzte Wadenmuskulatur	0,06 .	0,20 **	0,21 **	0,06 .	0,06 .	-0,08 .	1,00	-0,03 .	0,05 .
Stolpern	0,07 .	0,12 *	0,11 *	0,04 .	-0,11 *	0,04 .	-0,03 .	1,00	0,01 .
Bisherige Therapie	0,00 .	0,02 .	0,03 .	-0,06 .	0,03 .	-0,07 .	0,05 .	0,01 .	1,00
Alter bei Implantation (in Jahren)	0,68 **	0,47 **	0,19 **	0,09 **	-0,43 .	-0,13 *	0,11 *	-0,02 .	0,01 .
[5,10]	-0,56 **	-0,35 *	-0,12 *	-0,01 .	-0,05 .	0,11 *	-0,08 .	-0,04 .	-0,03 .
(10,12]	-0,19 **	-0,20 **	-0,12 *	-0,12 *	0,01 .	0,01 .	-0,01 .	0,08 .	-0,02 .
(12,15]	0,52 **	0,40 **	0,19 **	0,12 *	0,02 .	-0,08 .	0,06 .	-0,05 .	0,04 .
Stationäre Aufenthaltsdauer (in Tagen)	0,12 *	-0,05 .	0,02 .	0,12 *	-0,09 .	-0,04 .	0,01 .	0,07 .	0,09 .
Schraubentypus	0,02 .	-0,01 .	-0,04 .	-0,03 .	0,05 .	0,02 .	0,10 .	-0,05 .	0,05 .
Einschätzung von der STA profitiert zu haben	0,07 .	0,04 .	0,01 .	0,06 .	-0,03 .	0,06 .	0,05 .	0,03 .	0,02 .
Postoperative Schmerzen	0,04 .	-0,06 .	-0,10 .	-0,13 *	0,24 **	-0,09 .	-0,06 .	-0,06 .	0,04 .
Postoperative Komplikationen	-0,16 **	-0,08 .	-0,02 .	-0,14 *	0,16 **	-0,05 .	0,01 .	-0,10 .	-0,08 .
Intervall zur Revision (in Monaten)	-0,79 **	-0,61 *	-0,32 .	0,11 .	-0,29 .	0,75 **	-0,25 .	c	0,44 .
Alter bei Explantation (in Jahren)	0,17 **	0,14 *	0,07 .	0,21 **	-0,16 **	0,03 .	0,02 .	-0,04 .	0,00 .

Signifikanzlevel: 0,01 **, 0, 05 *, nicht signifikant · ; Nicht berechenbar da mindestens eine der beiden Variablen konstant ist [c].

0 ≤|r|≤ 0,10	Zusammenhang zu vernachlässigen
0,10 >|r|≤ 0,39	schwacher linearer Zusammenhang
0,40 ≤|r|≤ 0,69	moderater linearer Zusammenhang
0,70 ≤|r|≤ 0,89	starker linearer Zusammenhang
0,90 ≤|r|≤ 1	sehr starker linearer Zusammenhang

Tabelle 14: Korrelationsanalyse nach Pearson der zum Zeitpunkt der Implantation erhobenen Variablen

*Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Pearson für die zum Zeitpunkt der Implantation an Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 erhobenen Variablen. Dargestellt ist der Korrelationskoeffizient (r). Die Interpretation erfolgt mittels des Korrelationskoeffizienten (r), auf Grundlage dessen ein unterschiedlich starker linearer Zusammenhang angenommen werden kann (siehe Tabelle 2). Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen und der Zusammenhang entsprechend negativ oder positiv sein. Die Einordnung der Relevanz der Korrelationen erfolgt durch die Berechnung der Signifikanzlevels: 0,05 *, 0,01 **, nicht signifikant ·. BMI= Body-Mass-Index, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

	Alter bei Implantation (in Jahren)	[5,10]	(10,12]	(12,15]	Stationäre Aufenthaltsdauer (in Tagen)	Schraubentypus
Körpergröße (in cm)	0,68 **	-0,56 **	-0,19 **	0,52 **	0,12 *	0,02 .
Körpergewicht (in kg)	0,47 **	-0,35 *	-0,20 **	0,40 **	-0,05 .	-0,01 .
BMI	0,19 **	-0,12 *	-0,12 *	0,19 **	0,02 .	-0,04 .
Geschlecht	0,09 **	-0,01 .	-0,12 *	0,12 *	0,12 *	-0,03 .
Präoperative Schmerzen	-0,43 .	-0,05 .	0,01 .	0,02 .	-0,09 .	0,05 .
Abgenutztes Schuhwerk	-0,13 *	0,11 *	0,01 .	-0,08 .	-0,04 .	0,02 .
Verkürzte Wadenmuskulatur	0,11 *	-0,08 .	-0,01 .	0,06 .	0,01 .	0,10 .
Stolpern	-0,02 .	-0,04 .	0,08 .	-0,05 .	0,07 .	-0,05 .
Bisherige Therapie	0,01 .	-0,03 .	-0,02 .	0,04 .	0,09 .	0,05 .
Alter bei Implantation (in Jahren)	1,00	-0,66 **	-0,39 **	0,77 **	-0,04 .	0,04 .
[5,10]	-0,66 **	1,00	-0,25 **	-0,34 **	0,09 .	-0,05 .
(10,12]	-0,39 **	-0,25 **	1,00	-0,83 **	0,02 .	-0,07 .
(12,15]	0,77 **	-0,34 **	-0,83 **	1,00	-0,07 .	0,10 .
Stationäre Aufenthaltsdauer (in Tagen)	-0,04 .	0,09 .	0,02 .	-0,07 .	1,00	-0,08 .
Schraubentypus	0,04 .	-0,05 .	-0,07 .	0,10 .	-0,08 .	1,00
Einschätzung von der STA profitiert zu haben	0,01 .	-0,20 **	0,09 .	0,03 .	-0,11 *	0,07 .
Postoperative Schmerzen	0,00 .	-0,01 .	0,06 .	-0,05 .	-0,06 .	-0,17 **
Postoperative Komplikationen	-0,13 .	0,17 **	-0,06 .	-0,04 .	0,01 .	0,00 .
Intervall zur Revision (in Monaten)	-0,78 **	0,74 **	-0,41 .	-0,44 .	0,35 .	0,34 .
Alter bei Explantation (in Jahren)	0,35 **	-0,26 **	-0,14 **	0,28 **	-0,02 .	-0,03 .

Signifikanzlevel: 0,01 **, 0, 05 *, nicht signifikant · ; Nicht berechenbar da mindestens eine der beiden Variablen konstant ist [c].

0 ≤|r|≤ 0,10	Zusammenhang zu vernachlässigen
0,10 >|r|≤ 0,39	schwacher linearer Zusammenhang
0,40 ≤|r|≤ 0,69	moderater linearer Zusammenhang
0,70 ≤|r|≤ 0,89	starker linearer Zusammenhang
0,90 ≤|r|≤ 1	sehr starker linearer Zusammenhang

Tabelle 15: Korrelationsanalyse nach Pearson für die im postoperativen Verlauf bis einschließlich zum Zeitpunkt der Explantation erhobenen Variablen

*Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der Korrelationsanalyse nach Pearson für die im postoperativen Verlauf bis einschließlich bei der Explantation an Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 erhobenen Variablen. Die Interpretation erfolgt mittels des Korrelationskoeffizienten (r), auf Grundlage dessen ein unterschiedlich starker linearer Zusammenhang angenommen werden kann (siehe Tabelle 2). Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen und der Zusammenhang entsprechend negativ oder positiv sein. Die Einordnung der Relevanz der Korrelationen erfolgt durch die Berechnung der Signifikanzlevels: 0,05 *, 0,01 **, nicht signifikant ·. BMI= Body-Mass-Index, STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

	Postoperative Schmerzen	Sensibles Defizit postoperativ	Postoperative Komplikationen	Einschätzung von der STA profitiert zu haben	Intervall zur Revision (in Monaten)	Explantationsalter (in Jahren)
Körpergröße (in cm)	0,04 .	-0,35 .	-0,16 **	0,07 .	-0,79 **	0,17 **
Körpergewicht (in kg)	-0,06 .	-0,88 **	-0,08 .	0,04 .	-0,61 *	0,14 *
BMI	-0,01 .	-0,77 **	-0,02 .	0,01 .	-0,32 .	0,07 .
Geschlecht	-0,13 .	0,62 .	-0,14 *	0,06 .	0,11 .	0,21 **
Präoperative Schmerzen	0,24 **	-0,31 .	0,16 **	-0,03 .	-0,29 .	-0,16 **
Abgenutztes Schuhwerk	-0,09 .	c	-0,05 .	0,06 .	0,75 **	0,03 .
Verkürzte Wadenmuskulatur	-0,06 .	0,21 .	0,01 .	0,05 .	-0,25 .	0,02 .
Stolpern	-0,06 .	c	-0,10 .	0,03 .	c	-0,04 .
Bisherige Therapie	0,04 .	0,53 .	-0,08 .	0,02 .	0,44 .	0,00 .
Alter bei Implantation (in Jahren)	0,00 .	0,42 .	-0,13 .	0,01 .	-0,78 **	0,35 **
[5,10]	-0,01 .	c	0,17 **	-0,20 **	0,74 **	-0,26 **
(10,12]	0,06 .	-0,31 .	-0,06 .	0,09 .	-0,41 .	-0,14 **
(12,15]	-0,05 .	-0,31 .	-0,04 .	0,03 .	-0,44 .	0,28 **
Stationäre Aufenthaltsdauer (in Tagen)	-0,06 .	0,00 .	0,01 .	-0,11 *	0,35 .	-0,02 .
Schraubentypus	-0,17 **	c	0,00 .	-0,11 *	0,34 .	-0,03 .
Einschätzung von der STA profitiert zu haben	-0,15 **	c	-0,09 .	0,07 .	0,38 .	0,20 **
Postoperative Schmerzen	1,00	-0,51 .	0,29 **	1,00	0,38 .	-0,17 **
Postoperative Komplikationen	0,29 **	-0,76 *	1,00	-0,09 .	c	-0,17 **
Intervall zur Revision (in Monaten)	-0,65 **	c	c	0,38 .	1,00	0,40 .
Alter bei Explantation (in Jahren)	-0,18 **	0,35 .	-0,17 **	0,20 **	0,40 .	1,00

Signifikanzlevel: 0,01 **, 0, 05 *, nicht signifikant · ; Nicht berechenbar da mindestens eine der beiden Variablen konstant ist [c].

0 ≤|r|≤ 0,10	Zusammenhang zu vernachlässigen
0,10 >|r|≤ 0,39	schwacher linearer Zusammenhang
0,40 ≤|r|≤ 0,69	moderater linearer Zusammenhang
0,70 ≤|r|≤ 0,89	starker linearer Zusammenhang
0,90 ≤|r|≤ 1	sehr starker linearer Zusammenhang

Tabelle 16: Korrelationsanalyse nach Pearson für die radiologisch gemessenen Winkel

*Die Tabelle zeigt die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse nach Pearson für den TMTI-lat= Talus-Metatarsale-I-Winkel, Calc-B= Calcaneus-Boden-Winkel, Costa-B= Moreau-Costa-Bartani-Winkel, T-dekl= Talusdeklination, TC-dp= talocalcanearer Winkel und TMTI-dp= dorsoplantarer Talus-Metatarsale-I-Winkel. Diese wurden an Patienten mit fkKSF und STA in der Klinik für Orthopädie des UKU zwischen 2007 und 2018 gemessen. Es wird unterschieden zwischen den präoperativen Winkelmessungen und deren Differenz im Hinblick auf den postoperativen Befund zum Zeitpunkt der Explantation. Die Interpretation erfolgt mittels des Korrelationskoeffizienten (r), auf Grundlage dessen ein unterschiedlich starker linearer Zusammenhang der Winkel angenommen werden kann (siehe Tabelle 2). Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und 1 annehmen und der Zusammenhang entsprechend negativ oder positiv sein. Die Stärke des Zusammenhanges ist farblich gekennzeichnet (siehe Farblegende). Eine Einordnung der Relevanz der Korrelationen erfolgt durch die Berechnung von Signifikanzlevels: 0,05 *, 0,01 **, nicht signifikant ·. STA= subtalare Arthrorise, fkKSF= flexibler kindlicher Knick-Senk-Fuß, UKU= Universitätsklinikum Ulm.*

Winkel (in Grad°)	TMTI-lat	Calc-B	Costa-B	T-dekl	TC-dp	TMTI-dp
Korrelation der präoperativen Winkelmessungen						
TMTI-lat	1,00	-0,42 **	0,74 **	0,91 **	0,15 *	0,38 **
Calc-B	-0,42 **	1,00	-0,60 **	-0,34 **	-0,05 .	-0,26 **
Costa-B	0,74 **	-0,60 **	1,00	0,61 **	0,12 *	0,30 **
T-dekl	0,91 **	-0,34 **	0,61 **	1,00	0,17 **	0,34 **
TC-dp	0,15 *	-0,05 .	0,12 *	0,17 **	1,00	0,40 **
TMTI-dp	0,38 **	-0,26 **	0,30 **	0,34 **	0,40 **	1,00
Korrelation der Winkeldifferenzen						
TMTI-lat	0	-0,37 **	0,69 **	0,92 **	0,03 .	0,16 **
Calc-B	-0,37 **	1,00	-0,44 **	-0,34 **	0,04 .	0,00 .
Costa-B	0,69 **	-0,44 **	1,00	0,65 **	0,10 .	0,16 *
T-dekl	0,92 **	-0,34 **	0,65 **	1,00	0,08 .	0,17 **
TC-dp	0,03 .	0,04 .	0,10 .	0,08 .	1,00	0,30 **
TMTI-dp	0,16 **	0,00 .	0,16 *	0,17 **	0,30 **	1,00

Signifikanzlevel: 0,01 **, 0,05 *, nicht signifikant .

0 ≤|r|≤ 0,10	Zusammenhang zu vernachlässigen
0,10 >|r|≤ 0,39	schwacher linearer Zusammenhang
0,40 ≤|r|≤ 0,69	moderater linearer Zusammenhang
0,70 ≤|r|≤ 0,89	starker linearer Zusammenhang
0,90 ≤|r|≤ 1	sehr starker linearer Zusammenhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Implantattypen der subtalaren Arthrorise und deren biomechanischer Wirkmechanismus 17

Abbildung 2: Diagnose- und Therapiealgorithmus des kindlichen Knick-Senk-Fußes 21

Abbildung 3: Selektionsprozess der Studienpopulation..... 25

Abbildung 4: Kanülierte und nicht-kanülierte Spongiosastahlschraube 27

Abbildung 5: Radiologische Konstruktion des TMTI-lat und des Calc-B in der lateralen Röntgenprojektion 31

Abbildung 6: Radiologische Konstruktion des Costa-B und der T-dekl in der lateralen Röntgenprojektion 32

Abbildung 7: Radiologische Konstruktion des TMTI-dp und TC-dp in der dorsoplantaren Röntgenprojektion 33

Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der präoperativ vor STA erhobenen Schmerzlokalisationen 36

Abbildung 9: Verteilung der nach der WHO definierten BMI-Kategorien 38

Abbildung 10: Altersverteilung bei Implantation 39

Abbildung 11: Verteilung der stationären Aufenthaltsdauer in Tagen nach subtalarer Arthrorise 39

Abbildung 12: Gruppenverteilung der postoperativen Komplikationen 41

Abbildung 13: Beispiel für ein finales Korrekturergebnis in der lateralen Röntgenprojektion (TMTI-lat und Calc-B)..... 54

Abbildung 14: Beispiel für ein finales Korrekturergebnis in der lateralen Röntgenprojektion (Costa-B und T-dekl) 55

Abbildung 15: Beispiel für ein finales Korrekturergebnis in der dorsoplantaren Röntgenprojektion (TMTI-dp und TC-dp)..... 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Referenzwerte der radiologischen Winkelmessungen 33

Tabelle 2: Interpretation der Korrelationsanalyse nach Pearson 34

Tabelle 3: Deskriptive Auswertung der Prä-Implantation erhobenen Daten 37

Tabelle 4: Deskriptive Auswertung der zum Zeitpunkt der Implantation erhobenen Daten 40

Tabelle 5: Deskriptive Auswertung des postoperativen Verlaufes 42

Tabelle 6: Deskriptive Auswertung der kontinuierlichen Variablen aller Zeitabschnitte der Datenerhebung 43

Tabelle 7: Deskriptive Auswertung der radiologischen Winkelmessungen 44

Tabelle 8: ANOVA radiologisch gemessene Winkel 46

Tabelle 9: ANOVA Einschätzung von der Operation profitiert zu haben 47

Tabelle 10: Deskriptive Auswertung der klinischen Endpunkte postoperative Komplikationen und postoperative Schmerzen 48

Tabelle 11: ANOVA postoperative Komplikationen 51

Tabelle 12: ANOVA postoperative Schmerzen 53

Tabelle 13: Korrelationsanalyse nach Pearson für die Prä-Implantation erhobenen Variablen 105

Tabelle 14: Korrelationsanalyse nach Pearson der zum Zeitpunkt der Implantation erhobenen Variablen 106

Tabelle 15: Korrelationsanalyse nach Pearson für die im postoperativen Verlauf bis einschließlich zum Zeitpunkt der Explantation erhobenen Variablen 107

Tabelle 16: Korrelationsanalyse nach Pearson für die radiologisch gemessenen Winkel . 108

IV. Danksagung

An erster Stelle bedanke ich mich bei meinem Betreuer Prof. Dr. med. Martin Faschingbauer und Farouk Khury, MD. Ohne eure zuverlässige Beratung in allen Belangen, euer Engagement sowie Geduld in der Beantwortung meiner vielen Fragen, wäre diese Dissertation bereits an der Einleitung gescheitert. Ein besonderer Dank gilt außerdem meiner Familie und meinen Freunden, insbesondere meinen Eltern und meiner Schwester, die mich seit Jahren auf dem Weg zur Ärztin bedingungslos unterstützen. Danke für eure motivierenden Worte und euer Verständnis in arbeitsintensiven Phasen. Ganz besonders aber für euren Glauben an mich in Zeiten, in denen ich es nicht getan habe.

Ohne eure Hilfe und tatkräftige Unterstützung wäre ich nicht so weit gekommen und die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

V. Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Emilie Danielle Clara Danto
Geburtsjahr	1999
Geburtsort	Langenfeld-Rhld.

Akademischer Werdegang

Juni 2024	Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung (2,0)
April 2023	Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung (2,0)
September 2019	Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung (2,0)
2017-2024	Studium der Humanmedizin an der Universität Ulm
2009-2017	Dietrich-Bonhoeffer-Gymnasium Hilden (Abitur 1,6)

Wissenschaftliche Tätigkeiten und Publikationen

März 2022	Anteiliger Vortrag bisheriger Studienergebnisse der Dissertation auf der 41. Jahresversammlung der Israelischen Gesellschaft für Orthopädie (The 41th Annual Meeting of the Israel Orthopedic Association)

Ulm, den 12.07.2024