

**Aus dem Med. Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie**

Geschäftsführender Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. Steffen Ruchholtz

Medizinische Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. Susanne Fuchs-Winkelmann

des Fachbereichs Medizin der Philipps-Universität Marburg

Titel der Dissertation:

Funktionelle Evaluation von OP-Verfahren in der  
Kinderfußchirurgie mittels videogestützter Ganganalyse und  
Pedobarografie

Kumulative Dissertation zur Erlangung des  
Doktorgrades der Medizinwissenschaften (Dr. rer. med.)  
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von  
Lasse Hagen  
Geboren in Eckernförde

Marburg, 2019

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am:

06.12.2019

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs Medizin

Dekan:	Herr Prof. Dr. H. Schäfer
Referent:	Herr PD Dr. med. C.-D. Peterlein
1. Korreferent:	Herr PD Dr. med. R. Vahdad

Originaldokument gespeichert auf dem Publikationsserver der  
Philipps-Universität Marburg  
<http://archiv.ub.uni-marburg.de>



Dieses Werk bzw. Inhalt steht unter einer  
Creative Commons  
Namensnennung  
Keine kommerzielle Nutzung  
Weitergabe unter gleichen Bedingungen  
3.0 Deutschland Lizenz.

Die vollständige Lizenz finden Sie unter:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/>

*Für meine Familie*

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	VI
1. Einleitung.....	1
1.1    Juveniler flexibler Knick-Senkfuß .....	2
1.2    Operationsverfahren.....	2
1.3    Untersuchungsmethoden .....	3
1.3.1    Pedobarografie.....	3
1.3.2    Zweidimensionale Ganganalyse .....	4
1.3.3    Klinische Fragebögen.....	4
1.4    Zielsetzung.....	5
2. Zusammenfassung der publizierten Ergebnisse.....	6
2.1    Pedobarografische Veränderungen nach subtalarer extra-artikulärer Schraubenarthrorise.....	6
2.1.1    Zusammenfassung.....	6
2.1.2    Angabe der eigenen Anteile .....	7
2.2    2D-Ganganalyse bei der subtalaren extra-artikulären Schraubenarthrorise.....	8
2.2.1    Zusammenfassung.....	8
2.2.2    Angabe der eigenen Anteile .....	9
2.3    Funktionelle Langzeitergebnissen nach subtalarer extra-artikulärer Schraubenarthrorise.....	10
2.3.1    Zusammenfassung.....	10
2.3.2    Angabe der eigenen Anteile .....	12
2.4    Vorstellung auf wissenschaftlichen Kongressen .....	12
3. Diskussion.....	14
3.1    Eignung der gewählten Untersuchungsmethoden .....	14
3.1.1    Pedobarografie.....	14
3.1.2    Zweidimensionale Ganganalyse .....	15
3.1.3    AOFAS-Score & VAS-FA .....	16
3.2    Bewertung des Operationsverfahren.....	18
3.3    Schlussfolgerung .....	19
Zusammenfassung.....	20
Summary .....	22
Referenzen .....	24
Anhang .....	

## Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
AOFAS	American Orthopaedic Foot & Ankle Society
CPEI	Center of Pressure Excursion Index
CRO	clinician-reported-outcome
Post1J	ein Jahr postoperativ
Post4W	vier Wochen postoperativ
Prä	präoperativ
PROM	patient-reported-outcome-measures
SESA	subtalare extraartikuläre Schraubenarthrorise
VAS-FA	Visual Analog Scala Fuß und Sprunggelenk

# 1. Einleitung

Eine wesentliche Problematik in der Chirurgie des kindlichen Fußes besteht darin, dass operative Eingriffe nicht selten vor dem Abschluss des Wachstums erfolgen. Kommt es trotz erfolgreicher Operation zu einer funktionellen Beeinträchtigung der Biomechanik, kann dies zu weitreichenden Störungen im Wachstum und in der Motorik führen [53].

Obwohl auf dem Gebiet der Kinderorthopädie und Fußchirurgie biomechanische Analysen des Gangbildes für Studienzwecke bereits des Öfteren Anwendung finden [21, 24], werden diese funktionellen Untersuchungen routinemäßig nur vereinzelt eingesetzt, um den Operationserfolg zu verifizieren. Dass der Einsatz funktioneller Ganguntersuchungen allerdings auch einen Benefit für den herkömmlichen Klinikeinsatz aufweist, soll in dieser Arbeit ausführlicher dargestellt werden.

Am Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie des Universitätsklinikums der Philipps-Universität Marburg besitzt der Bereich der Kinderchirurgie einen besonderen Stellenwert. Ein wichtiger Schwerpunkt der Institution ist die Behandlung des juvenilen Knick-Senkfußes. Das präferierte Operationsverfahren, bei passender Indikation, ist die subtalare extraartikuläre Schrauben-Arthrorise (SESA) nach De Pellegrin [36–38]. Hierbei wird eine Spongiosa-Schraube im Kalkaneus fixiert, um somit die Eversion im *Articulatio subtalaris* zu limitieren (siehe Anhang 2, Abbildung 1). Obgleich dieses Operationsverfahren in abgewandelter Form schon seit über 45 Jahren praktiziert wird, ist die Datenlage noch sehr lückenhaft [2, 9]. Um eine umfangreichere Bewertung zu gewährleisten, rekrutierten wir ein Probandenkollektiv aus Kindern und Jugendlichen bei denen diese Operationstechnik indiziert war. Anhand der biomechanischen Messungen sollten die mit dem Eingriff verbundenen Änderungen des Gangbilds und der Körperstatik aufgezeichnet werden. Abschließend sollte evaluiert werden, ob hierdurch ein Mehrwert für die Therapie und den postoperativen Verlauf entsteht.

## **1.1 Juveniler flexibler Knick-Senkfuß**

Die zugrundeliegende Pathologie im Zusammenhang der durchgeführten Untersuchungen war der juvenile flexible Knick-Senkfuß. Die zwei Hauptmerkmale des Knick-Senkfußes sind das abgeflachte Längsgewölbe und die Valgusstellung im Rückfuß [23]. Häufig geht der Knick-Senkfuß mit einer Abduktion und Supination im Vorfuß, der Verkürzung der Achillessehne, einer Bandlaxizität und einer Hypertonie des musculus tibialis posterior einher [14, 33]. Da in der kindlichen Entwicklung ein Knick-Senkfuß in einem gewissen Alter als physiologisch zu betrachten ist [51], ist es nicht immer ganz einfach zwischen Normvariante und Pathologie zu differenzieren [9, 33]. Grundsätzlich geht man davon aus, dass sich das Längsgewölbe des Fußes bis ungefähr zum sechsten Lebensjahr ausgebildet haben sollte [4, 16, 51]. Bis etwa zum zehnten Lebensjahr sollte die Valgusstellung der Ferse annähernd das Normalmaß eines Erwachsenen erreicht haben [16, 38].

Zur effektiven Beurteilung der Merkmale der Fußentwicklung wurden konkrete Ein- und Ausschlusskriterien für unser Studienvorhaben definiert. Eine wesentliche Voraussetzung für das Operationsvorhaben und somit auch für die Teilnahme an unseren Studien war dabei das Vorhandensein von Schmerzen und das Scheitern konservativer Therapieansätze. Des Weiteren ist zu beachten, dass das angewandte Operationsverfahren nur für flexible Knick-Senkfüße ausgelegt ist. Demnach wurden rigide Knick-Senkfüße und Koalitionen der Fußknochen für unser Untersuchungsvorhaben ausgeschlossen.

## **1.2 Operationsverfahren**

Das in unserer Forschung überprüfte Operationsverfahren ist die subtalare extraartikuläre Schraubenarthrorise (SESA) nach De Pellegrin. Die Schraubenarthrorise wurde von Alvarez Anfang der 1970er Jahre entwickelt und erstmals 1979 von Buruturan [7] publiziert. Seit einigen Jahren erlebt die Schraubenarthrorise – auch dank der erneuten Publikation der modifizierten Variante des Verfahrens durch De Pellegrin – ein neues Aufleben [36–38].

Neben der Variante nach De Pellegrin, bei der mittels Fixierung einer Spongiosa-Schraube im lateralen Kalkaneus die Pronationsbewegung im



unteren Sprunggelenk limitiert wird (eine detailliertere Beschreibung des Operationsvorgangs und der postoperativen Nachsorge ist dem Anhang 1 zu entnehmen), gibt es eine Vielzahl an Techniken der Arthrorise, die sich hauptsächlich durch Art und Einbauweise des Implantats unterscheiden [2, 32]. Da der Eingriff minimalinvasiv durchgeführt wird, ist die Methode sehr schonend und geht mit einer sehr geringen postoperativen Ausfalldauer einher [9].

Im Zentrum für Orthopädie und Unfallchirurgie der Philipps-Universität Marburg zählt dieses Verfahren als die präferierte operative Methode zur Behandlung des symptomatischen juvenilen flexiblen Knick-Senkfußes. Obwohl dieses Operationsverfahren einige Vorteile hat und als minimalinvasiv gilt, wird die Anwendung der Arthrorise in Fachkreisen noch teils kontrovers diskutiert [2, 9].

### **1.3 Untersuchungsmethoden**

Für die biomechanischen Untersuchungen haben wir uns entschieden Methoden auszuwählen, die einfach in der Handhabung sind, um sie gut in den Klinikalltag integrieren zu können. Außerdem soll eine möglichst kostengünstige Anschaffung gewährleistet sein. Dementsprechend waren die Nutzung einer Druckmessplatte und ein zweidimensionales Kamerasetup für die Ganganalyse Mittel der Wahl. Zum Vergleich mit den funktionellen Parametern haben wir validierte, klinische Fragebögen verwendet.

#### **1.3.1 Pedobarografie**

Bei der Pedobarografie werden die Belastungsflächen des Fußes und die Druckverteilung während des Gehens und Stehens gemessen. Hieraus lässt sich die Größe und Form der Abdruckfläche des Fußes ermitteln. Außerdem können Fehlbelastungen und Störungen in der Abrollbewegung veranschaulicht werden [5, 17].

Wir haben dieses Verfahren ausgewählt, da es bereits in zahlreichen Publikationen bei Pathologien rund um den Fuß zum Einsatz gekommen ist [5, 12, 45]. Demzufolge wurde auch der Knick-Senkfuß bereits mehrfach in Studien pedobarografisch untersucht [3, 17, 25, 47]. Zur Dokumentation des Effekts der Arthrorise wurden pedobarografische Messungen bereits vereinzelt eingesetzt [8, 15]. Deren Ergebnisse sind allerdings nur wenig detailliert beschrieben.

Da es bei der Auswertung der Pedobarografie eine Vielzahl von Möglichkeiten und Parametern gibt, beschränken wir uns primär auf die Kraft- und Flächenveränderungen in den einzelnen Bereichen des Fußes (genauer siehe Anhang 1).

### **1.3.2 Zweidimensionale Ganganalyse**

Um Winkelstellungen der unteren Extremitäten zu bestimmen, haben wir uns für eine videogestützte, zweidimensionale (2D) Ganganalyse entschieden. Hierbei haben wir Verfahrensweisen verwendet, die bereits in der gängigen Praxis angewandt werden [27, 30]. Für die Auswertung haben wir uns hier auf die dorsalen Winkel des Rückfußes und der Beinachse fokussiert, da wir hier den größten Einfluss durch die SESA vermuteten (genauer siehe Anhang 2). Beim Knick-Senkfuß wurde in der Literatur bisher hauptsächlich der Fersenbodenwinkel und der Rückfußwinkel betrachtet [26, 31, 46, 52]. In Studien zur Arthrorise finden bisher hauptsächlich radiologische Winkelstellungen zur Verifizierung des Operationserfolgs Anwendung [2, 32]. Eine funktionelle Untersuchung der Winkelstellungen des Gangbildes nach Arthrorise wurde bisher nicht dokumentiert.

### **1.3.3 Klinische Fragebögen**

Um das klinische Outcome zu evaluieren verwendeten wir zwei Fragebögen: Die Visual Analog Scala Fuß und Sprunggelenk (VAS-FA) beschreibt das subjektive Patientenempfinden (*patient-reported-outcome-measure*, kurz: PROM). Demgemäß füllt der Proband selbstständig 20 verschiedene Analogskalen zu den Bereichen „Schmerz“, „Funktion“ und „Sonstiges“ aus. Aus den Angaben kann abschließend ein Gesamtscore ermittelt werden. Die VAS-FA wird bereits zahlreich bei verschiedensten Fußpathologien angewendet, allerdings bisher selten im Rahmen einer Arthrorise [11, 40]. Die Validierung der VAS-FA wurde anhand einer Korrelation mit dem bereits validierten SF-36® Fragebogen [6] durchgeführt, der allerdings nicht fußspezifisch ist [41]. Gegenwärtig stehen auch bereits Normdaten für den gesunden und den pathologischen Fuß bereit [49].

Der AOFAS-Score ist ein weltweit geachteter und zahlreich angewendeter Fragebogen zur Beurteilung der Funktion und von Beschwerden des Fußes. Während die VAS-FA ein rein subjektiver, vom Patienten ausgefüllter Fragebogen ist, beschreibt der AOFAS-Score das *clinician-reported outcome* (CRO) und schließt dementsprechend die objektive Sicht des Untersuchers ein. Aus diesem Grund sehen wir den AOFAS als gute Ergänzung zur VAS-FA. Beim AOFAS wird der Fuß in vier Sektionen aufgeteilt: Rückfuß, Mittelfuß, erster Vorfußstrahl, Vorfußstrahl 2-5. Jede Sektion wird für sich einzeln betrachtet und bewertet. Da es keinen Gesamtscore gibt, lassen sich somit auch einzelne Sektionen unabhängig voneinander verwenden. Im Rahmen der Arthrorise berichten mehrere Autoren von der Anwendung des AOFAS-Scores [1, 11, 19, 35]. Trotz der häufigen Verwendung fehlt jedoch bisher eine international anerkannten Validierung des Fragebogens [41].

## 1.4 Zielsetzung

Die Auswirkungen der subtalaren Schraubenarthrorise nach de Pellegrin auf das Gangbild wurden bisher nur unzureichend untersucht. Dementsprechend haben wir folgende Fragestellungen aufgestellt, welche das Hauptaugenmerk dieser Dissertation sind:

- Kommt es durch die SESA zu einer Verbesserung funktioneller Gangparameter?
- Lässt sich mittels der von uns ausgewählten biomechanischen Analysen der Behandlungserfolg der Operation auch funktionell ordnungsgemäß darstellen?
- Liefern die Analysen einen Mehrwert im postoperativen Monitoring und lassen sich gegebenenfalls Problemfälle identifizieren?
- Bleiben funktionelle Gangveränderungen, die durch die Operation erzielt wurden, auch langfristig aufrechterhalten?

Die zusammengefasste Forschungsarbeit gibt einen Einblick in biomechanische Analysen im Klinikalltag und hat die bedeutsame Aufgabe die Datenlage zur subtalaren Schraubenarthrorise mit funktionellen Untersuchungen zu ergänzen.

## 2. Zusammenfassung der publizierten Ergebnisse

### 2.1 Pedobarografische Veränderungen nach subtalarer extra-artikulärer Schraubenarthrorise

**Pedobarographic changes during first month after subtalar extra-articular screw arthroereisis (SESA) operation of juvenile flexible flatfoot**

Hagen L, Pape JP, Kostakev M, Peterlein C-D

Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery **2019**; [Epub ahead of print]

**DOI:** 10.1007/s00402-019-03230-7

#### 2.1.1 Zusammenfassung

In dieser Studie haben wir den Einfluss der SESA auf die pedobarografische Druckverteilung im Stand und im Gang untersucht. Wir wollten herausfinden, ob sich die funktionellen Veränderungen des Gangbildes im ersten Monat nach der Operation mittels Pedobarografie darstellen lassen und sich weitere Schlussfolgerungen für die Operation und den Heilungsprozess ziehen lassen. Es wurden sieben Kinder (13 Füße) im Alter von  $12,43 \pm 1,27$  Jahren operiert und analysiert. Die Untersuchungen fanden präoperativ, sowie 3, 14 und 28 Tage postoperativ statt. Für die Auswertung wurde der Fuß in sechs Abschnitte unterteilt – Vor-, Mittel-, und Rückfuß jeweils in seine lateralen und medialen Anteile. Die plantare Aufdruckfläche und die wirkenden Kräfte wurden für die einzelnen Abschnitte ermittelt. Des Weiteren haben wir mit dem *Center of Pressure Excursion Index* (CPEI) das Abrollverhalten des Fußes bestimmt. Statistisch wurden die zeitlichen Veränderungen dieser Parameter mittels rANOVA ausgewertet.

Bei den insgesamt 13 Operationen konnten keine Infektionen oder ernsthafte Komplikationen festgestellt werden. Ein Proband beklagte sich über leichte subtalare Schmerzen und ein Proband konnte aufgrund einer Erkältung nicht an der Testung nach 14 Tagen teilnehmen. Präoperativ konnten zwei pedobarografische Muster des Knick-Senkfußes erkannt werden: Bei stark

ausgeprägter Senkfußkomponente wurde eine übermäßige Aufdruckfläche im medialen Mittelfuß wahrgenommen; bei Füßen mit primärer Knickfußkomponente zeichnete sich häufig das Fehlen der Aufdruckfläche im gesamten Mittelfußbereich ab. Nach der Operation konnte sowohl im Stand, als auch im Gang ein signifikanter lateraler Shift der wirkenden Kräfte und der Aufdruckfläche festgestellt werden. Dies bestätigt auch der CPEI. In den ersten Untersuchungen wiesen die Werte auf eine funktionelle Überkorrektur hin. Während sich die Parameter im Vor- und Rückfuß im zeitlichen Verlauf wieder den präoperativen Ausgangswerten annäherten, blieben die Kraft und die Aufdruckfläche im lateralen Mittelfuß erhöht und im medialen Mittelfuß reduziert. Wir interpretierten dies als mögliche Korrektur der Valgusstellung und als mögliche Ausbildung des Fußlängsgewölbes.

Während die Pedobarografie eine gute Grundlage für ein Monitoring der SESA darstellt, konnten wir feststellen, dass sie als Diagnostik-Tool des Knickfußes wenig reliabel erscheint. Außerdem lässt sich mit der Pedobarografie hauptsächlich die Senkfußkomponente des Fußes darstellen. Die Änderungen in der Knickfußkomponente erfordern einen größeren Interpretationsspielraum und können nicht quantitativ bestimmt werden. Mit 13 Operationen ist die Generalisierbarkeit der Studie zwar eingeschränkt, dennoch konnten wir die funktionellen Auswirkungen der SESA im ersten postoperativen Monat gut darstellen, was einen durchaus positiven Einfluss auf die Visualisierung der Wirksamkeit der Operation im Gespräch mit Eltern und den operierten Kindern hatte.

### **2.1.2 Angabe der eigenen Anteile**

In Zusammenarbeit mit PD Dr. med. Christian-Dominik Peterlein habe ich das Studiendesign konzipiert, als auch Methoden und Zielparameter bestimmt. Bei den Untersuchungen und der Datenerhebung wurde ich von Jonas Paul Pape, Mark Kostakev unterstützt. Ich habe die Daten aufbereitet und visualisiert, das Manuskript geschrieben, überarbeitet und editiert. Dr. Christian-Dominik Peterlein war der behandelnde Orthopäde und operierende Chirurg. Er hat die Projektadministration übernommen, das Projekt betreut und ist beratend tätig gewesen.

## 2.2 2D-Ganganalyse bei der subtalaren extra-artikulären Schraubenarthrorise

**Are there benefits of a 2D gait analysis in the evaluation of the subtalar extra-articular screw arthroereisis? Short-term investigation in children**

Hagen L, Kostakev M, Pape JP, Peterlein C-D

Clinical Biomechanics (Bristol, Avon) **2019**; 63: 73–78

DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2019.02.019

### 2.2.1 Zusammenfassung

In dieser Studie wurden biokinetische Veränderungen des Rückfußes und der Beinachse nach Knickfuß-Operation mittels SESA evaluiert. Ziel der Studie war es, funktionelle Änderungen der Winkelverläufe im Gangbild zu analysieren und individuelle Auffälligkeiten aufzuzeigen.

Es nahmen 14 Kinder (27 operierte Füße) im Alter von  $12,28 \pm 1,40$  Jahren, bei denen das Operationsverfahren der SESA durchgeführt wurde, an der Untersuchung teil.

Hierbei wurden die relevanten Winkelstellungen mittels zweidimensionaler Ganganalyse erhoben. Es wurde der Fersenbodenwinkel, der Achillessehnenwinkel, der Winkel der dorsalen Beinachse, sowie die Schrittlänge bei selbstgewählter Geschwindigkeit ermittelt. Für die Winkelstellungen wurden dabei vorab Zielkorridore aufgestellt, die das erwünschte Korrekturziel widerspiegeln sollten. Die Überprüfung des Gangbildes wurde präoperativ und vier Wochen postoperativ durchgeführt.

Der Fersenbodenwinkel hat sich im Mittelwert statisch signifikant von  $10,04^\circ \pm 3,45^\circ$  auf  $3,00^\circ \pm 3,51^\circ$  und dynamisch von  $7,93^\circ \pm 3,15^\circ$  auf  $0,74^\circ \pm 3,12^\circ$  reduziert. Ein ähnlicher Effekt konnte beim Achillessehnenwinkel festgestellt werden (statisch von  $12,49^\circ \pm 2,74^\circ$  auf  $3,63^\circ \pm 3,29^\circ$  und dynamisch von  $12,65^\circ \pm 2,56^\circ$  auf  $4,58^\circ \pm 3,03^\circ$ ). In der Beinachse konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Da in der Schrittlänge und der Gehgeschwindigkeit kein signifikanter Unterschied zwischen der präoperativen

und der postoperativen Untersuchung festgestellt werden konnte, lässt sich vermuten, dass der Heilungsverlauf nahezu abgeschlossen war. Da die Streuung der Werte allerdings erhöht war, gehen wir davon aus, dass einzelne Probanden zu diesem Zeitpunkt noch nicht wieder voll genesen waren. Dies bestätigen die intraindividuellen Analysen. Wir haben fünf Füße identifiziert, deren Winkelstellungen nach den vier Wochen nur unzureichend in den Zielkorridoren gelandet sind. Es gab zwei Unterkorrekturen und drei Überkorrekturen. Alle Einzelfälle wurden stärker gemonitort. In dem Fuß mit den größten Abweichungen in der Fersenstellung wurde die Schraube nachjustiert, da die Überkorrektur in diesem Fall mit Schmerzen am Processus lateralis tali einherging.

Als einen limitierenden Faktor der Studie sollte man erwähnen, dass die Messmethode der 2D-Ganganalyse bei zu starken Rotationsstellungen zu Parallaxenfehler neigt, was eine Ungenauigkeit der Messwerte hervorruft. Außerdem haben wir keine Vergleiche zum klinischen Outcome oder zu Schmerzscores gezogen. Dennoch konnten wir den Einfluss der SESA auf die funktionelle Fuß- und Beinachsenstellung äußerst detailliert dokumentieren. Dabei war es uns möglich Problemfälle zu identifizieren und in einem Fall durch eine schnelle Schraubennachjustierung eine frühzeitige Metallentfernung zu umgehen.

### **2.2.2 Angabe der eigenen Anteile**

In Zusammenarbeit mit PD Dr. med. Christian-Dominik Peterlein habe ich das Studiendesign konzipiert, als auch Methoden und Zielparameter bestimmt. Bei den Untersuchungen und der Datenerhebung wurde ich von Jonas Paul Pape, Mark Kostakev unterstützt. Ich habe die Daten aufbereitet und visualisiert, das Manuskript geschrieben, überarbeitet und editiert. Dr. Christian-Dominik Peterlein war der behandelnde Orthopäde und operierende Chirurg. Er hat die Projektadministration übernommen, das Projekt betreut und ist beratend tätig gewesen.

## 2.3 Funktionelle Langzeitergebnissen nach subtalarer extra-artikulärer Schraubenarthrorise

### **Screw-arthroereisis in pediatric flatfoot - Postoperative changes in gait, pain and function - 1-year results**

Peterlein C-D, Hagen L, Pape JP, Kostakev M, Debus F

in preparation / unpublished raw data

DOI: t.b.a.

#### 2.3.1 Zusammenfassung

Da in den vorangegangenen Studien bisher nur kurzzeitige Veränderungen nach der SESA dokumentiert wurden, haben wir für diese Publikation unseren Forschungszeitraum um ein Jahr verlängert. Um die funktionellen Veränderungen mit dem klinischen Outcome (CRO) und dem patientenberichteten Outcome (PROM) vergleichbar zu machen, wurden in dieser Publikation zusätzlich Veränderungen im AOFAS-Score und dem VAS-FA beschrieben.

Für die Untersuchungen haben wir die Messzeitpunkte auf präoperativ (prä), vier Wochen postoperativ (post4W) und ein Jahr postoperativ (post1J) festgelegt.

In der Pedobarografie konnten wir feststellen, dass der laterale Shift der Druckverteilung des gesamten Fußes zwar über ein Jahr aufrechterhalten bleibt, im Vergleich zur vierten postoperativen Woche jedoch geringfügig abgenommen hat. Dennoch bleiben die Auftrittfläche und die vertikale Kraft im medialen Mittelfuß reduziert und man kann keinen signifikanten Unterschied zwischen der vierten postoperativen Wochen und dem 1-Jahres-Follow-up erkennen.

In der Ganganalyse bleibt statisch nach einem Jahr die Korrektur des Achillessehnenwinkels (prä:  $12,44 \pm 2,80$ ; post4W:  $4,36 \pm 2,73$ ; post1J:  $4,28 \pm$



2,85) und des Fersenbodenwinkels unverändert (prä:  $10,16 \pm 3,60$ ; post4W:  $3,00 \pm 3,51$ ; post1J  $2,66 \pm 2,49$ ). Dynamisch besteht die Tendenz, dass der Achillessehnenwinkel wieder etwas zunimmt, sich allerdings immer noch signifikant vom präoperativen Zustand unterscheidet.

Im AOFAS-Score konnte bereits vier Wochen nach der Operation ein signifikanter Anstieg in den Bereichen Rückfuß und Mittelfuß festgestellt werden. Im 1-Jahres-Follow-up konnte abermals ein signifikanter Anstieg erfasst werden.

In der VAS-FA erzielten wir 4 Wochen postoperativ einen höheren, allerdings nicht signifikant höheren Wert im Vergleich zur Ausgangstestung. Erst im 1-Jahres-Follow-up ist ein signifikanter Anstieg festzustellen. Es konnte präoperativ eine hohe Streuung festgestellt werden, sodass es in der VAS-FA statistisch schwieriger war, signifikante Ergebnisse zu erzielen.

Die durch die SESA hervorgerufene Besserung in der VAS-FA (Gesamt, Schmerz und Funktion) korreliert stark mit der Korrektur der dynamischen Rückfuß- und Fersenwinkel. In der Rückfußsektion des AOFAS-Scores ist eine mittlere Korrelation mit denselben Winkeln zu erkennen. Die Änderungen der Winkelstellungen (Rückfuß- und Fersenwinkel, statisch und dynamisch) korrelieren auch weitestgehend untereinander. Auch die Rückfuß- und Mittelfußsektion des AOFAS-Scores korrelieren mittel bis stark mit den einzelnen Bereichen „Funktion“ und „Schmerz“ und dem Gesamtscore der VAS-FA. Die Pedobarografie korreliert lediglich in Parametern in sich: Der laterale Shift des gesamten Fußes korreliert mittel bis stark mit dem lateralen Shift der einzelnen Fußabschnitte.

Zusammenfassend konnten wir mit dieser Studie belegen, dass die positiven funktionellen Veränderungen des Gangbildes durch die SESA weitestgehend auch nach einem Jahr noch aufrechterhalten bleiben und sich sowohl das CRO als auch das PROM folgend verbessert hat. Funktionelle Gangparameter aus den dynamischen Messungen korrelieren gut mit den Ergebnissen des AOFAS-Scores und der VAS-FA.

### **2.3.2 Angabe der eigenen Anteile**

In Zusammenarbeit mit PD Dr. med. Christian-Dominik Peterlein habe ich das Studiendesign konzipiert, als auch Methoden und Zielparameter bestimmt. Bei den Untersuchungen und der Datenerhebung wurde ich von Jonas Paul Pape, Mark Kostakev unterstützt. Jonas Paul Pape hat unter Anleitung von mir die Daten aufbereitet und visualisiert. Dr. Christian-Dominik Peterlein schreibt zusammen mit Dr. Med. Florian Debus das Manuskript, überarbeitet und editiert es. Dr. Christian-Dominik Peterlein war der behandelnde Orthopäde und operierende Chirurg. Er hat mit Dr. Florian Debus die Projektadministration übernommen. Ich habe das Projekt mit Dr. Christian-Dominik Peterlein betreut und bin beratend tätig gewesen.

### **2.4 Vorstellung auf wissenschaftlichen Kongressen**

Teilergebnisse aus den genannten Studien wurden von der Arbeitsgruppe auf den folgenden Kongressen (Anhang 3-5) vorgestellt. Beim *Kongress der Gesellschaft für die Analyse Menschlicher Motorik in ihrer klinischen Anwendung* (Gamma) fungierte ich als Referierender.

#### **31. Jahrestagung der Vereinigung für Kinderorthopädie (VKO) 2017 (Vortrag):**

Subtalar extra-articular screw arthroreisis for the treatment of flatfoot – analysis of gait, pain and functional outcome – a prospective pilot study.

Peterlein C-D, Kostakev M, Hagen L, Ruden J

#### **Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU) 2018 (Vortrag):**

Schraubenarthrorise nach de Pellegrin beim kindlichen Knick-Senkfuß - prä- und postoperative Veränderungen des Gangbildes, der Schmerzen und der Funktion.

Peterlein C-D, Kostakev M, Hagen L, Fuhrmann R

#### **Gesellschaft für die Analyse Menschlicher Motorik in ihrer klinischen**

#### **Anwendung (Gamma) Kongress 2018 (Vortrag):**

Die Verifizierung des Operationserfolgs der subtalaren extra-artikulären Schraubenarthrorise beim juvenilen flexiblen Knick-Senkfuß mittels Pedobarografie und 2D-Ganganalyse

Hagen L, Kostakev M, Pape J, Peterlein C-D

**Deutscher Kongress für Orthopädie und Unfallchirurgie (DKOU) 2019**

***(angenommen als Poster):***

Schraubenarthrorise nach de Pellegrin beim kindlichen Knick-Senkfuß - prä- und postoperative Veränderungen des Gangbildes, der Schmerzen und der Funktion - 1-Jahresergebnisse

Peterlein C-D, Pape J, Kostakev M, Fuhrmann R, Hagen L

### **3. Diskussion**

Die von uns durchgeführten biomechanischen Analysen helfen den Verlauf und Erfolg der operativen Intervention beim kindlichen Knick-Senkfuß ordnungsgemäß darzustellen.

Obwohl die Arthrorise-Schraube während der Operation unter Fluoroskopie so eingestellt wurde, dass die Eversion des Subtalargelenks möglichst in Neutral-Nullstellung blockiert wird, konnten wir in unseren funktionellen Untersuchungen vereinzelt Abweichungen feststellen. Der sensomotorische Effekt, der der SESA nachgesagt wird [38], könnte bei den Überkorrekturen möglicherweise ein Grund für diese Abweichungen sein.

Im postoperativen Monitoring konnte festgestellt werden, dass es direkt nach der Operation zu einer funktionellen Überkorrektur oder einem Schongang kommt. Vermutlich ist dies auf die postoperative Schwellung, Schmerzen und das Wundgewebe zurückzuführen. Gewöhnlich kommt es binnen der ersten vier Wochen zur Normalisierung des Ganges. Ein längeres Anhalten des auffälligen Gangbildes weist auf einen verzögerten postoperativen Verlauf und ein mögliches Problem hin. Aus diesem Grund sollte die Auffälligkeit klinisch genauer evaluiert werden. Gegebenenfalls sollte je nach Abweichung entsprechend interveniert werden – beispielsweise durch eine Nachjustierung der Schraube.

Die Ergebnisse der Operation konnten sich auch weitestgehend langfristig aufrechterhalten, sodass nach einem Jahr ähnliche oder sogar noch bessere Werte, als vier Wochen nach der Operation erzielt wurden.

Wie bereits in anderen Studien zum Nutzen biomechanischer Ganguntersuchungen in der Kinder- und Fußorthopädie berichtet wurde [21, 24], sind wir davon überzeugt, dass durch eine funktionelle Betrachtungsweise das Operationsergebnis fundierter dargestellt und verifiziert werden kann.

#### **3.1 Eignung der gewählten Untersuchungsmethoden**

##### **3.1.1 Pedobarografie**

Während die Pedobarografie beim Monitoring des postoperativen Heilungsverlaufs einen deutlichen lateralen Shift der wirkenden Kräfte mit einer

Reduzierung der Belastungsfläche im medialen Mittelfuß aufzeigt (siehe Anhang 1), konnten wir feststellen, dass die Pedobarografie hingegen zur Diagnostik des Knick-Senkfußes eher ungeeignet erscheint. Ähnliches beschreibt auch Choi et al. [12] zum diagnostischen Wert der Pedobarografie. Zwar konnte mit der Druckverteilung eine Veränderung der Belastungsflächen dokumentiert werden, allerdings ist es schwer Sollwerte für eine gelungene Operation festzulegen. Objektive Parameter zur Bewertung von Fußabdrücken wie beispielsweise der von Cavangh [10] vorgestellte Arch Index scheinen bei dem vorliegenden Patientenkollektiv ungeeignet, da es je nach Ausprägung der Valgusstellung des Rückfußes zu einem Abheben des lateralen Fußrandes führt, was den Index verfälscht. Während es somit bei der Pedobarografie schwierig ist, eine quantitative Bewertung des Operationsergebnisses vorzunehmen, sehen wir hier den größeren Vorteil der Dokumentation der qualitativen Verbesserung der Aufdrucksfläche des Fußes. Im Normalfall sollte die Belastungsfläche im medialen Mittelfuß ausgespart sein und die Druckverteilung im restlichen Fuß möglichst gleichmäßig verteilt [5]. Die rein visuellen Veränderungen der Belastungsfläche und Druckverteilung in Richtung eines normalen Fußes ließ sich in allen Fällen verdeutlichen. Diese grafische Darstellung der Pedobarografie hilft ebenfalls in den Nachgesprächen mit den Patienten und deren Eltern. Unmissverständlich ist die Pedobarografie eine gute Ergänzung im postoperativen Management der SESA. Isoliert betrachtet sind ihre Ergebnisse in der Aussagekraft jedoch begrenzt.

### **3.1.2 Zweidimensionale Ganganalyse**

Die 2D-Ganganalyse bietet im Gegensatz zur Pedobarografie die bessere Möglichkeit zur quantitativen Bewertung der SESA. Mit Normwerten aus der Literatur [46, 52] konnten von uns Zielkorridore festgelegt werden, um einen Operationserfolg zu verifizieren. Dementsprechend war es für uns möglich, vier Wochen nach der Operation Füße zu identifizieren, die funktionell immer noch auffällig waren und wir konnten entsprechende Maßnahmen frühzeitig einleiten (siehe Anhang 2).

Trotz klinisch-funktionell guter Ergebnisse ist es wichtig sich die Limitationen der 2D-Ganganalyse vor Augen zu führen. Mit Hilfe der Ganganalyse konnten wir lediglich die Knickfußkomponente und nicht die Senkfußkomponente der

Patienten bestimmen. In unserem Kamera-Setup war es für uns nicht möglich Parameter wie die Längsgewölbehöhe zu erheben. Da das Operationsverfahren allerdings primär auf die Limitierung der Rückfußversion abzielt [38], erachteten wir die Knickfußkomponente als zentral zu betrachtenden Parameter.

In der Literatur [26, 31] wird beschrieben, dass kein signifikanter Unterschied zwischen statischer und dynamischer Rückfußstellung herrscht. Demnach könnte man schlussfolgern, dass eine statische Winkelbestimmung der Fersenstellung ausreicht. Wir konnten allerdings feststellen, dass intraindividuell sehr wohl Unterschiede vorliegen und auf eine dynamische Analyse nicht verzichtet werden kann. Des Weiteren scheinen die dynamischen Winkelstellungen besser mit den Ergebnissen der klinischen Fragebögen zu korrelieren, als die statischen Werte.

Aufgrund von Parallaxenfehlern können bei der 2D-Ganganalyse genaue Winkelstellungen lediglich bei Bewegungen mit geringer Rotation erhoben werden [44]. Hier wäre eine 3D-Analyse deutlich vorteilhafter, allerdings ist diese angesichts ihrer Komplexität und hohen Anschaffungskosten in den wenigsten Kliniken einsetzbar.

Trotz der genannten Limitationen erachten wir die Verwendung einer kameragestützten Gangüberprüfung als ein durchaus vorteilhaftes Verfahren im postoperativen Management der SESA.

### **3.1.3 AOFAS-Score & VAS-FA**

Die Verwendung des AOFAS-Score wird in der Literatur kontrovers betrachtet. Zum Vergleich mit unseren biomechanischen Untersuchungen wählten wir den Score dennoch, da er einer der weltweit am häufigsten angewandten Fragebögen ist, um das CRO (Clinician-reported-outcome) zu berichten. Obgleich fehlt bisher eine anerkannte Validierung des Scores. Während einige Autoren für verschiedene Abschnitte oder Übersetzungen des Scores die Validität belegen [28, 42], wird in weiteren Studien eine gute Validität angezweifelt [22, 29, 48].

Für die einzelnen Sektionen liegen bereits Normdaten für den gesunden, erwachsenen Patienten vor [43]. Es liegen jedoch keine Daten für einzelne

Pathologien vor. Im Rahmen der Schraubenarthrorise erwähnten schon Abbara-Czardybon et al. die Verwendung des AOFAS-Scores, dokumentierten allerdings keine klaren Ergebnisse [1]. Pavone et al. konnten bei der retrospektiven Untersuchung von 68 jugendlichen Athleten eine Verbesserung in der AOFAS Rückfußsektion von  $79,3 \pm 5,7$  zu  $97,3 \pm 4,5$  feststellen [35]. Obwohl unsere Patienten einen geringeren Ausgangswert besaßen ( $67,4 \pm 17,9$ ) konnten wir innerhalb eines Jahres ähnliche Zielgrößen erreichen ( $95,5 \pm 5,5$ ). Diese Werte liegen auch oberhalb des Normwerts im Erwachsenenalter [43]. Obwohl die alleinige Nutzung des AOFAS-Scores fraglich ist, gehen wir aufgrund der Korrelationen mit einiger unserer funktionellen Parameter davon aus, dass unsere biomechanischen Analysen die Auswirkungen der SESA gut widerspiegeln konnten. Für die praktische Anwendung sollte die Rückfußsektion und eventuell die Mittelfußsektion des AOFAS-Scores ausreichen.

Gegenwärtig nimmt die Verwendung des PROM (Patient-reported-outcome-measure) in der Fußchirurgie einen immer höheren Stellenwert ein [18]. Daher wurde von uns die VAS-FA in unsere Untersuchungen implementiert.

Bisher wurde die VAS-FA von Richter & Zech bei der Schraubenarthrorise angewendet [40]. Die Autoren konnten durch die Operation eine Besserung des VAS-FA Gesamtscores von 82 präoperativ zu 94 bei der Kontrolluntersuchung nach 2,5 Jahren feststellen. Ceccarini et al. haben bei einer Arthrorise mit einem anderen Implantat nach 3 Jahren eine Besserung von 61,5 zu 83,2 Punkten festgestellt [11]. Wir konnten bereits nach einem Jahr einen Anstieg von  $74,4 \pm 16,5$  auf  $92,7 \pm 6,6$  feststellen. Hiermit liegen wir nach Stüber et al. im Normbereich eines nicht-pathologischen Fußes [49]. Dass unsere Auswertung in der VAS-FA vier Wochen postoperativ noch keinen signifikanten Anstieg zeigt, ist ein Anzeichen dafür, dass der Heilungsverlauf zu diesem Zeitpunkt noch nicht bei allen Patienten komplett abgeschlossen ist. Im Mittel liegt der Score allerdings bereits höherer als die Ausgangswerte.

Die VAS-FA ist validiert [41], es liegen Normdaten vor [49] und wir konnten hohe Korrelationen zu den dynamischen Rückfuß- und Fersenwinkeln feststellen. Da wir mit der VAS-FA den Schmerzzustand des Patienten genauer ermitteln können, denken wir, dass die subjektive Datenerhebung die optimale Ergänzung zu unseren biomechanischen Analysen bietet.

### **3.2 Bewertung des Operationsverfahren**

Für die chirurgische Behandlung des Knick-Senkfußes gibt es eine Vielzahl an Techniken und Prozeduren. Grob lassen sich diese in Osteotomien, Arthrodesen, Arthrorisen und Weichteiloperationen aufteilen [9, 33]. Die Arthrorise wird zwar weltweit angewandt, muss jedoch aufgrund des geringen Evidenzgrades der vorhandenen Studien kritisch betrachtet werden [2]. Oftmals wird der Arthrorise eine hohe Komplikationsrate nachgesagt [9, 32]. Da allerdings auch hier mehrere Techniken und Implantate Anwendung finden, ist dies schwer zu pauschalisieren. Die zwei häufigsten Komplikationen sind Schmerzen auf Höhe des Sinus tarsi – häufig hervorgerufen durch eine Überkorrektur – und die Implantatmigration [32, 50]. Bei der von uns durchgeführten SESA nach de Pellegrin wird die Schraube im Kalkaneus fixiert. Somit ist das Implantat fest verankert und kann nicht wandern. Überkorrekturen wurden mit Hilfe unserer biomechanischen Untersuchungen frühzeitig identifiziert und konnten, falls nötig, behoben werden. Generell liegt die Komplikationsrate der Schraubenarthrorisen zwischen 0% und 6,3% [20, 34, 38]. Lediglich Hamel berichtet von einer höheren Komplikationsrate von 19,5%, was allerdings auf zusätzlich durchgeführte Weichteiloperationen und besonders zu Beginn, auf die Unerfahrenheit des Operateurs bei der Platzierung der Schraube zurückzuführen ist [15]. Im aktuellen systematischen Review von Suh et al. aus dem Jahr 2019 wird die Arthrorise der Evans Osteotomie gegenübergestellt [50]. Während die Evans Osteotomie bessere radiologische Winkelkorrekturen hervorruft, ist die Arthrorise komplikationsärmer und erzielt bessere Werte in der Patientenzufriedenheit. Aufgrund der Patientenheterogenität ist die Aussagekraft des Reviews allerdings limitiert. Die Autoren empfehlen die Evans Osteotomie vor allem bei Patienten mit starker Vorfußabduktion und bei bereits abgeschlossenem Skelettwachstum.

Die SESA ist eine minimal-invasive Technik. Demnach ist die Heilungsdauer, im Vergleich zu anderen Operationstechniken, deutlich verkürzt. Während bei den Osteotomien und Arthrodesen ein Gips und eine Teilbelastung des Fußes in



den ersten fünf bis sechs Wochen üblich sind [13, 39], dürfen die Patienten der SESA den Fuß sofort schmerzabhängig belasten.

Die Schwierigkeit bei der Vielzahl an Operationstechniken besteht momentan darin, die bestehenden Techniken in der Indikationsstellung voneinander abzugrenzen, sodass je nach Fall die optimale Methode gewählt wird. Wir betrachten die SESA als ausgesprochen effizientes Verfahren bei juvenilen, flexiblen Knick-Senkfüßen mit stark ausgeprägtem Fersenvalgus und dies auch in Kombination mit einem abgeflachten Längsgewölbe. Bei starker Vorfußabduktion oder Verkürzung des Musculus triceps surae ist die SESA allein nur bedingt geeignet, kann allerdings auch mit spezifischen Weichteiloperationen kombiniert werden.

### **3.3 Schlussfolgerung**

Durch eine funktionelle Betrachtungsweise, können biomechanische Untersuchungen des Gangbildes in der Kinderfußchirurgie bedeutende Vorteile erzielen. Da operative Eingriffe vor allem vor Abschluss des Wachstums tiefgreifende Einflüsse auf die gesamte Biomechanik des Kindes haben können, ist es durchaus relevant das jeweilige Operationsergebnis auch funktionell zu bewerten.

Während der Untersuchungen konnten wir feststellen, dass die einzelnen Untersuchungsmethoden seine Vor- und Nachteile mit sich bringen. Je nach Pathologie und Operationstechnik muss dementsprechend überlegt werden, welche biomechanische Untersuchungsmethode angewandt werden kann, um eine gute Beurteilung des Operationsergebnisses zu erzielen. Im Rahmen der SESA konnten wir feststellen, dass unsere Analysen jeweils nur einen Teilaspekt der Pathologie und deren operativer Korrektur wiedergeben. Für uns war hierbei die dynamische Winkelbestimmung mittels videogestützter Ganganalyse für die funktionelle Evaluation des Operationserfolgs der SESA am aussagekräftigsten. Aus unserer Sicht bietet die Kombination mit der VAS-FA den größten Benefit für die Einschätzung des Operationsergebnisses der SESA.

## Zusammenfassung

Bei Eingriffen in der Kinderfußchirurgie kann es trotz klinisch gutem Operationsergebnis zu einer funktionellen Beeinträchtigung des Gangbildes kommen. Wird diese Abweichung nicht frühzeitig erkannt, können im Laufe des Wachstums Probleme in der Motorik und Biomechanik des Kindes auftreten.

In der vorliegenden Promotionsschrift soll der Nutzen von biomechanischen Untersuchungen im Klinikalltag zur Evaluation des Operationsergebnisses erörtert werden.

Es wurden von der Arbeitsgruppe mehrere Studien publiziert, die mit Hilfe von videogestützten Ganganalysen, Pedobarografien, dem AOFAS-Score und der VAS-FA das Operationsergebnis der subtalaren extra-artikulären Schraubenarthrorise nach de Pellegrin beim juvenilen flexiblen Knick-Senkfuß bewerten. Diese Arbeit fasst die einzelnen Ergebnisse der Studien zusammen und diskutiert die Verwendbarkeit der ausgewählten Untersuchungsmethoden.

Es kann studienübergreifend gezeigt werden, dass die Kinder im Schnitt vier Wochen brauchen, um sich von der Operation zu regenerieren. Die ganganalytischen und pedobarografischen Hauptzielparameter zeigen bereits nach den vier Wochen eine signifikante Verbesserung der Fußstellung. Während der AOFAS-Score ebenfalls eine signifikante Verbesserung des klinischen Outcomes nach dem ersten postoperativen Monat aufzeigt, kann bei der VAS-FA kein signifikanter Anstieg gezeigt werden. Allerdings wird im Mittel ein höherer Wert erzielt, als bei der Ausgangstestung. Die erzielten biomechanischen Ergebnisse bleiben auch im 1-Jahres-Follow-up weitestgehend erhalten. Im AOFAS-Score und der VAS-FA wurden nach einem Jahr signifikant bessere Ergebnisse erzielt, als vier Wochen postoperativ.

Bei Betrachtung der individuellen Veränderungen, lassen sich Auffälligkeiten in den ganganalytischen Winkelstellungen einzelner Probanden feststellen. Diese Probanden wurden stärker gemonitort. Bei einem Patienten musste die Schraube nachjustiert werden, da sich die Winkelstellung nicht normalisiert hat und die Fehlstellung mit Schmerzen einherging.

Wir konnten feststellen, dass jede einzelne Untersuchungsmethode Stärken und Schwächen aufweist. So kann die Pedobarografie grafisch deutliche Veränderungen der Auftrittfläche und der Druckbelastung darstellen. Zur

Diagnostik des Knick-Senkfußes ist sie allerdings nur eingeschränkt verwendbar. Da es bei der Pedobarografie schwierig erscheint zwischen Pathologie und Norm zu unterscheiden, konnten wir auch keine Zielwerte festlegen, die das Operationsverfahren quantitativ bewerten.

Die videogestützte Ganganalyse liefert konkrete Zahlenwerte für gewisse Winkelstellungen. Da bereits in der Literatur Normwerte erhoben wurden, lässt sich der Operationserfolg mit diesem Verfahren deutlich objektiver bewerten. Limitationen bestehen bei der zweidimensionalen Ganganalyse in den durch Parallaxenfehler verursachten Bias. Winkelstellungen, bei denen eine starke Gelenkrotation beteiligt ist, können nicht sauber erhoben werden. Eine dreidimensionale Ganganalyse ist in der Anschaffung sehr teuer und ist für den Klinikalltag meist zu aufwendig.

Der AOFAS-Score gibt eine Kombination aus Schmerzempfinden und Befundung des Untersuchers wieder. Allerdings fehlt dem Score eine internationale Validierung.

Die VAS-FA ist validiert und liefert Erkenntnisse zum patientenberichteten Outcome. Wir konnten bei der VAS-FA eine hohe Korrelation mit den dynamischen Winkelstellungen feststellen. Bisher wurde die VAS-FA im Rahmen der Arthrorise allerdings erst selten eingesetzt.

Es ist hervorzuheben, dass biomechanische Untersuchungen einen deutlichen Vorteil in der Kinderfußchirurgie mit sich bringen. Für die Schraubenarthrorise empfehlen wir daher eine Kombination aus zweidimensionaler Ganganalyse und VAS-FA. Für andere Operationstechniken und Pathologien müssen gegebenenfalls die passenden Analysen gewählt werden, um die Operation hinreichend bewerten zu können.

## Summary

In pediatric foot surgery there is a risk that even if the surgery went well, there are still functional gait disturbances due to the intervention. If these disturbances are not identified early, they can lead to major complications in motor functions and gait biomechanics during growth.

The present work describes the advantages of biomechanical testings in the evaluation of operational results, especially in pediatric foot surgery. The participating research group published studies evaluating the subtalar extra-articular screw arthroereisis indicated for children with juvenile flexible flatfoot. We used pedobarographic investigations, video-based gait analyses, the AOFAS-Score and the VAS-FA in these studies. This cumulative thesis sums up the major results and discusses the usability of the selected examination methods.

On average it took four weeks for the children to recover from surgery. After this time we recorded significant improvements in pedobarographic pressure distribution, heel and rearfoot angles collected during gait analysis and in AOFAS-Score. Only the VAS-FA did not improve significantly, even if the mean value was enhanced. In the 1-Year-Follow-up the biomechanical improvements of pedobarography and gait analysis did not change significantly. The results of the AOFAS-Score and the VAS-FA got even better compared the examination four weeks after surgery.

Taking a look at the individual development we identified a few patients showing overcorrected or undercorrected angular positions of the foot. These patients were monitored more closely. In one foot where the overcorrection did not normalize and the patient complained about pain at the sinus tarsi, we had to adjust the screw to avoid an early implant removal.

Within our research we identified advantages and disadvantages of all our selected examination methods. The pedobarographic investigations were proficient in showing visual changes of the footprints. Certainly, the pedobarography shows difficulties in the diagnosis of the flexible flatfoot. Accordingly, we were not able to determine target values to differentiate between good and less satisfying results of the surgery.

The video-based gait analysis provides specific numerical values. Using the normative data from literature we were able to set target corridors to evaluate the surgical results. For a fact, a two-dimensional gait analysis is limited to movements without a lot of joint rotation due to parallax errors. Though, a three-dimensional gait analysis is costly and usually too complex for clinical routine.

The AOFAS-Score includes a combination of the sensation of pain and a clinician expertise. Nevertheless, an international validation of the score is missing.

The VAS-FA is validated and provides information about the patient reported outcome. In our investigations it correlates well with the dynamic heel and rearfoot angles of the gait analysis. However, the VAS-FA has not been used that much in accordance of the arthroereisis.

In conclusion biomechanical testings can provide much beneficial information to evaluate the surgical outcome in the pediatric foot surgery. For the subtalar extra-articular screw arthroereisis we recommend implementing a combination of a two-dimensional gait analysis and the VAS-FA in clinical routine. Other surgical techniques and pathologies might benefit more from different functional analyses.

## Referenzen

- [1] Abbara-Czardybon M, Frank D, Arbab D. Die Talus-Stopp-Schraubenarthrorise beim flexiblen kindlichen Pes planovalgus. *Operative Orthopädie und Traumatologie* 2014;26(6):625–31.
- [2] Bernasconi A, Lintz F, Sadile F. The role of arthroereisis of the subtalar joint for flatfoot in children and adults. *EFORT open reviews* 2017;2(11):438–46.
- [3] Bertani A, Cappello A, Benedetti MG, Simoncini L, Catani F. Flat foot functional evaluation using pattern recognition of ground reaction data. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)* 1999;14(7):484–93.
- [4] Bosch K, Gerss J, Rosenbaum D. Development of healthy children's feet--nine-year results of a longitudinal investigation of plantar loading patterns. *Gait & posture* 2010;32(4):564–71.
- [5] Bowen TR, Miller F, Castagno P, Richards J, Lipton G. A method of dynamic foot-pressure measurement for the evaluation of pediatric orthopaedic foot deformities. *Journal of Pediatric Orthopaedics* 1998;18(6):789–93.
- [6] Bullinger, M. & Kirchberger, I. SF-36.: Fragebogen zum Gesundheitszustand. *Zeitschrift für Klinische Psychologie und Psychotherapie* 1998;28(2):143–5.
- [7] Buruturan JM. El calcaneo-stop para el tratamiento del valgo detalon infantil. *Chirurgia del piede* 1979;3:319–22.
- [8] Caravaggi P, Lullini G, Berti L, Giannini S, Leardini A. Functional evaluation of bilateral subtalar arthroereisis for the correction of flexible flatfoot in children: 1-year follow-up. *Gait & posture* 2018;64:152–8.
- [9] Carr JB, Yang S, Lather LA. Pediatric Pes Planus: A State-of-the-Art Review. *Pediatrics* 2016;137(3):e20151230.
- [10] Cavanagh PR, Rodgers MM. The arch index: a useful measure from footprints. *Journal of biomechanics* 1987;20(5):547–51.
- [11] Ceccarini P, Rinonapoli G, Gambaracci G, Bisaccia M, Ceccarini A, Caraffa A. The arthroereisis procedure in adult flexible flatfoot grade IIA due to insufficiency of posterior tibial tendon. *Foot and ankle surgery official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons* 2018;24(4):359–64.
- [12] Choi YR, Lee HS, Kim DE, Lee DH, Kim JM, Ahn JY. The diagnostic value of pedobarography. *Orthopedics* 2014;37(12):e1063-7.
- [13] Evans D. Calcaneo-valgus deformity. *The Journal of bone and joint surgery. British volume* 1975;57(3):270–8.
- [14] Haendlmayer KT, Harris NJ. (ii) Flatfoot deformity: an overview. *Orthopaedics and Trauma* 2009;23(6):395–403.
- [15] Hamel J. Die Calcaneostop-Arthrorise – eine retrospektive klinische Studie mit Komplikations-Analyse. *Fuß & Sprunggelenk* 2010;8:35–41.
- [16] Hefti F. *Kinderorthopädie in der Praxis*. 3rd ed. Berlin Germany: Springer; 2015.
- [17] Hillstrom HJ, Song J, Kraszewski AP, Hafer JF, Mootanah R, Dufour AB et al. Foot type biomechanics part 1: structure and function of the asymptomatic foot. *Gait & posture* 2013;37(3):445–51.
- [18] Hunt KJ, Hurwit D. Use of patient-reported outcome measures in foot and ankle research. *The Journal of bone and joint surgery. American volume* 2013;95(16):e118(1-9).

- [19] Jay RM, Din N. Correcting pediatric flatfoot with subtalar arthroereisis and gastrocnemius recession: a retrospective study. *Foot & ankle specialist* 2013;6(2):101–7.
- [20] Jerosch J, Schunck J, Abdel-Aziz H. The stop screw technique--a simple and reliable method in treating flexible flatfoot in children. *Foot and ankle surgery official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons* 2009;15(4):174–8.
- [21] Klöpfer-Krämer I, Augat P. Instrumentelle Ganganalyse. *Trauma und Berufskrankheit* 2015;17(1):10–4.
- [22] Kostuj T, Schaper K, Baums MH, Lieske S. Eine Validierung des AOFAS-Ankle-Hindfoot-Scale für den deutschen Sprachraum. *Fuß & Sprunggelenk* 2014;12(2):100–6.
- [23] Kothari A, Dixon PC, Stebbins J, Zavatsky AB, Theologis T. Are flexible flat feet associated with proximal joint problems in children? *Gait & posture* 2016;45:204–10.
- [24] Lampe R, Mitternacht J, Schrödl S, Gerdesmeyer L, Nathrath M, Gradinger R. Einsatz des Ganglabors bei klinisch-orthopädischen Fragestellungen in der Kinderorthopädie. *Klin Padiatr* 2004;216(02):72–8.
- [25] Ledoux WR, Hillstrom HJ. The distributed plantar vertical force of neutrally aligned and pes planus feet. *Gait & posture* 2002;15(1):1–9.
- [26] Lvinger P, Gilleard W. Relationship between static posture and rearfoot motion during walking in patellofemoral pain syndrome: effect of a reference posture for gait analysis. *Journal of the American Podiatric Medical Association* 2006;96(4):323–9.
- [27] Ludwig O. *Ganganalyse in der Praxis: Anwendung in Prävention, Therapie und Versorgung*. 2nd ed. Geislingen: C. Maurer; 2015.
- [28] Madeley NJ, Wing KJ, Topliss C, Penner MJ, Glazebrook MA, Younger AS. Responsiveness and validity of the SF-36, Ankle Osteoarthritis Scale, AOFAS Ankle Hindfoot Score, and Foot Function Index in end stage ankle arthritis. *Foot & ankle international* 2012;33(1):57–63.
- [29] Malviya A, Makwana N, Laing P. Correlation of the AOFAS scores with a generic health QUALY score in foot and ankle surgery. *Foot & ankle international* 2007;28(4):494–8.
- [30] Marquardt M, Ansh P (eds.). *Laufen und Laufanalyse: 26 Tabellen*. Stuttgart, New York: Thieme; 2012.
- [31] McPoil TG, Cornwall MW. Relationship between three static angles of the rearfoot and the pattern of rearfoot motion during walking. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy* 1996;23(6):370–5.
- [32] Metcalfe SA, Bowling FL, Reeves ND. Subtalar joint arthroereisis in the management of pediatric flexible flatfoot: a critical review of the literature. *Foot & ankle international* 2011;32(12):1127–39.
- [33] Mosca VS. Flexible flatfoot in children and adolescents. *Journal of children's orthopaedics* 2010;4(2):107–21.
- [34] Pavone V, Costarella L, Testa G, Conte G, Riccioli M, Sessa G. Calcaneo-stop procedure in the treatment of the juvenile symptomatic flatfoot. *The Journal of foot and ankle surgery official publication of the American College of Foot and Ankle Surgeons* 2013;52(4):444–7.
- [35] Pavone V, Vescio A, Di Silvestri CA, Andreacchio A, Sessa G, Testa G. Outcomes of the calcaneo-stop procedure for the treatment of juvenile flatfoot in young athletes. *Journal of children's orthopaedics* 2018;12(6):582–9.
- [36] Pellegrin M. 15-jährige Erfahrung mit der subtalaren Schrauben-Arthrorise beim kindlichen Plattfuß. *Fuß & Sprunggelenk* 2007;5(1):12–20.

- [37] Pellegrin M de. Die subtalare Schrauben-Arthrorise beim kindlichen Plattfuß. *Der Orthopade* 2005;34(9):941-53, quiz 954.
- [38] Pellegrin M de, Moharamzadeh D, Strobl WM, Biedermann R, Tschauner C, Wirth T. Subtalar extra-articular screw arthroereisis (SESA) for the treatment of flexible flatfoot in children. *Journal of children's orthopaedics* 2014;8(6):479–87.
- [39] Rathjen KE, Mubarak SJ. Calcaneal-cuboid-cuneiform osteotomy for the correction of valgus foot deformities in children. *Journal of Pediatric Orthopaedics* 1998;18(6):775–82.
- [40] Richter M, Zech S. Arthrorisis with calcaneostop screw in children corrects Talo-1st Metatarsal-Index (TMT-Index). *Foot and ankle surgery official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons* 2013;19(2):91–5.
- [41] Richter M, Zech S, Geerling J, Frink M, Knobloch K, Krettek C. A new foot and ankle outcome score: Questionnaire based, subjective, Visual-Analogue-Scale, validated and computerized. *Foot and Ankle Surgery* 2006;12(4):191–9.
- [42] Sayyed-Hosseini S-H, Hassankhani GG, Bagheri F, Alavi N, Shojaie B, Mousavian A. Validation of the Persian Version of the American Orthopedic Foot and Ankle Society Score (AOFAS) Questionnaire. *The archives of bone and joint surgery* 2018;6(3):233–9.
- [43] Schneider W, Jurenitsch S. Normative data for the American Orthopedic Foot and Ankle Society ankle-hindfoot, midfoot, hallux and lesser toes clinical rating system. *International orthopaedics* 2016;40(2):301–6.
- [44] Schurr SA, Marshall AN, Resch JE, Saliba SA. Two-dimensional Video Analysis Is Comparable to 3d Motion Capture in Lower Extremity Movement Assessment. *International Journal of Sports Physical Therapy* 2017;12(2):163–72.
- [45] Skopljak A, Muftic M, Sukalo A, Masic I, Zunic L. Pedobarography in diagnosis and clinical application. *Acta informatica medica AIM journal of the Society for Medical Informatics of Bosnia & Herzegovina casopis Drustva za medicinsku informatiku BiH* 2014;22(6):374–8.
- [46] Sobel E, Levitz S, Caselli M, Brentnall Z, Tran MQ. Natural history of the rearfoot angle: preliminary values in 150 children. *Foot & ankle international* 1999;20(2):119–25.
- [47] Song J, Hillstrom HJ, Secord D, Levitt J. Foot type biomechanics. comparison of planus and rectus foot types. *Journal of the American Podiatric Medical Association* 1996;86(1):16–23.
- [48] SooHoo NF, Shuler M, Fleming LL. Evaluation of the validity of the AOFAS Clinical Rating Systems by correlation to the SF-36. *Foot & ankle international* 2003;24(1):50–5.
- [49] Stüber J, Zech S, Bay R, Qazzaz A, Richter M. Normative data of the Visual Analogue Scale Foot and Ankle (VAS FA) for pathological conditions. *Foot and ankle surgery official journal of the European Society of Foot and Ankle Surgeons* 2011;17(3):166–72.
- [50] Suh DH, Park JH, Lee SH, Kim HJ, Park YH, Jang WY et al. Lateral column lengthening versus subtalar arthroereisis for paediatric flatfeet: a systematic review. *International orthopaedics* 2019;43(5):1179–92.
- [51] Volpon JB. Footprint Analysis During the Growth Period. *Journal of Pediatric Orthopaedics* 1994;14(1):83–5.
- [52] Waldecker U, Drewitz S. Untersuchung zur Verteilung der Rückfußwinkel bei 550 Probanden. *Fuß & Sprunggelenk* 2005;3(4):224–8.
- [53] Willert H-G, Pieper H-G (eds.). *Korrekturingriffe am wachsenden Skelett*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin; 1990.



## **Anhang 1**

*Anmerkung:* Aus lizenzrechtlichen Gründen wurde der Anhang für den Druck entfernt.

## **Anhang 2**

*Anmerkung:* Aus lizenzrechtlichen Gründen wurde der Anhang für den Druck entfernt.

## **Anhang 3**

*Anmerkung:* Aus lizenzrechtlichen Gründen wurde der Anhang für den Druck entfernt.

## **Anhang 4**

*Anmerkung:* Aus lizenzrechtlichen Gründen wurde der Anhang für den Druck entfernt.

## **Anhang 5**

*Anmerkung:* Aus lizenzrechtlichen Gründen wurde der Anhang für den Druck entfernt.

## **Verzeichnis der akademischen Lehrer/-innen**

Meine akademischen Lehrenden waren in Gießen die Damen/Herren:

Adams, Becker, Brombach, Coch, Danisch, Deinzer, Despegel, Drowing, Eder, Frech, Gegenfurtner, Grasmueck, Hermann, Hegele, Hietzge, Hultsch, Kindermann, Krawinkel, Krüger, Lange, Maurer, Madare, Mooren, Müller, Munzert, Naumann, Neuhäuser-Berthold, Pilat, Pilgramm, Pons-Kühnemann, Reiser, Schindler, Schmitt, Schubert, Schulz, Schwarzer, Segieth, Wagner, Wenzel

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den nachfolgenden Personen bedanken, ohne deren Hilfe und Unterstützung die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

Zuerst möchte ich mich bei Herrn PD Dr. med. Christian-Dominik Peterlein, meinem Doktorvater, für die Betreuung der Arbeit bedanken. Ich verdanke ihm darüber hinaus ausgiebige, hilfreiche Unterstützung und viele anregende Diskussionen. Jede Phase dieser Arbeit wurde von ihm intensiv, professionell, aber auch kollegial begleitet. Er ermöglichte intensive Forschungssitzungen mit der Arbeitsgruppe, zum gegenseitigen Austausch und zur gegenseitigen Motivation.

In dem Zuge geht auch besonderer Dank an die gesamte Arbeitsgruppe – insbesondere an Jonas Paul Pape und Mark Kostakev – für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und stete Hilfsbereitschaft, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ich möchte mich herzlich bei meiner Freundin Laura bedanken, dass sie sich immer Zeit für mich genommen hat und auch in schwierigen Phasen mit viel Geduld und Hilfsbereitschaft zur Seite stand.

Vielen Dank an meine Freunde, die mich immer seelisch unterstützt haben und wenn nötig im Alltag für kleine Ablenkungen gesorgt haben.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern, Almut und Wolfgang, und meinen Geschwistern bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für mich hatten.