

Klinik und Poliklinik für
Orthopädie und Sportorthopädie
des Klinikums rechts der Isar
der Technischen Universität München
(Direktor: Univ.-Prof. Dr. R. v. Eisenhart-Rothe)

Der Klumpfuß

Langzeituntersuchung des operierten idiopathischen Klumpfußes: Pedobarographie und MRT-Analyse der Unterschenkelmuskulatur

Lorenz Marius Johannes von Pfister

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Medizin

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. E. J. Rummeny

Prüfer der Dissertation:

1. Priv.-Doz. Dr. R. H. H. Burgkart
2. Univ.-Prof. Dr. R. von Eisenhart-Rothe

Die Dissertation wurde am 30.01.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Medizin am 09.07.2014 angenommen.

I. Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. Burgkart für die Vergabe des Themas und hilfreichen Anregungen.

Frau Prof. Dr. Renée Lampe für die intensive Betreuung sowie große Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

Herrn Diplom Physiker Jürgen Mitternacht für das große Engagement und die zahlreichen Hilfestellungen bei der Auswertung der Messdaten.

Herrn Prof. Dr. v. Eisenhart-Rothe für die Möglichkeit, die Arbeit an der von ihm geleiteten Klinik und Poliklinik für Orthopädie und Sportorthopädie der Technischen Universität München durchzuführen.

Herrn Dr. Markus Settles für die Durchführung und Erstellung der Kernspintomographie-Bilder.

Den Patienten und Probanden für die bereitwillige Unterstützung und die interessierte Teilnahme an den durchgeführten Messungen.

II. Inhaltsverzeichnis

I. Danksagung	1
II. Inhaltsverzeichnis	2
1 Einleitung.....	4
1.1 Fragestellungen.....	7
1.2 Grundlagen der Anatomie, Physiologie & Entwicklung des Fußes.....	8
1.3 Das Krankheitsbild des idiopathischen Klumpfußes.....	11
1.3.1 Epidemiologie	11
1.3.2 Ätiologie.....	12
1.3.3 Anatomie des Klumpfußes	13
1.3.4 Klassifikation nach Diméglio.....	15
1.3.5 Therapie des idiopathischen Klumpfußes	18
1.3.6 Klumpfußrezidive, Unter- und Überkorrektur.....	21
2 Material und Methodik	23
2.1 Patientenkollektiv	23
2.2 Kontrollkollektiv	27
2.3 Messtechnik	28
2.3.1 Pedobarographie im Ganglabor	28
2.3.2 MRT-Untersuchungen bei Patienten mit Klumpfuß und gesunden Probanden.....	37
2.4 Statistik.....	40
3 Ergebnisse.....	41
3.1 Altersabhängige Veränderungen des Kontrollkollektivs in der Pedobarographie	41

3.2	Typische Lastverteilung der operierten Klumpfüße in der Pedobarographie	45
3.3	Charakterisierung der Klumpfüße mittels Pedobarographie im Vergleich zum Kontrollkollektiv	47
3.4	Langzeitverläufe im Pedogramm	50
3.4.1	Patient 01	50
3.4.2	Patient 02	54
3.4.3	Patient 04	57
3.4.4	Patient 05	60
3.5	Muskelvolumen-Messung.....	64
3.5.1	Unterschenkelmuskulatur beim Klumpfuß und beim gesunden Fuß... 64	
3.5.2	Intraindividuellem Vergleich bei Kindern mit einseitigem Klumpfuß..... 67	
3.6	Zusammenhang von Muskelvolumen und Pedobarographie	68
3.6.1	Korrelation zwischen plantarer Druckverteilung & Muskelvolumina.... 68	
3.6.2	Korrelation zwischen Drehmomenten des oberen und unteren Sprunggelenkes und Muskelvolumina am Unterschenkel	70
3.6.3	Korrelation zwischen Achillessehnenlänge und M. surae	72
3.7	Vergleich zwischen den angewandten Operationsverfahren, anhand von typischen Parametern in der Pedobarographie und Muskelvolumina am Unterschenkel.....	73
4	Diskussion.....	75
5	Zusammenfassung	90
III.	Abkürzungsverzeichnis	92
IV.	Literaturverzeichnis	93

1 Einleitung

Der kongenitale Klumpfuß gehört mit einer Inzidenz von 1-2 pro 1000 Geburten und einem Geschlechtsverhältnis von 3:1 m/w zu einer der häufigsten Fehlbildungen im Kindesalter (Westhoff, Weimann-Stahlschmidt & Krauspe, 2008). Die Ursachen des Klumpfußes sind trotz vielfältiger Untersuchungen und Studien nicht eindeutig geklärt und viele Faktoren werden im Zusammenhang mit der Entstehung der komplexen Fußdeformität diskutiert (Nordin, Aidura, Razak & Faisham, 2002).

Der idiopathische Klumpfuß setzt sich aus folgenden 4 Teilfehlstellungen im Fuß zusammen: Spitzfußstellung, Rückfußvarus, Vorfußsupination und Sichelfußstellung des Mittel- und Vorfußes. Zusammenfassend liegt eine Fehlstellung des Fußes vor, die als *Pes equino-varus adductus et supinatus* oder *Pes talipes equino-varus* bezeichnet wird (Exner, Anderhuber, Waldi-Brändle, Jacob & Windisch, 2005).

Es existieren unterschiedliche Theorien zur Pathogenese des kongenitalen Klumpfußes. Weimann-Stahlschmidt et al. fassen verschiedene Hypothesen über die Ursachen der Fehlentwicklung zusammen, wie knöcherner Deformitäten, muskuläre Dysbalancen und Veränderungen des Kollagens sowie Veränderungen der Gefäßversorgung (Weimann-Stahlschmidt, Krauspe & Westhoff, 2010).

Um die Pathogenese des Fußes besser zu verstehen, eignen sich neben den klinischen Untersuchungen pedobarographische Messungen (Hutchinson, Betts, Donnan & Saleh, 2001; Jeans & Karol, 2010; Pauk, Daunoraviciene, Ihnatouski, Griskevicius & Raso, 2010; Sinclair, Bosch, Rosenbaum & Böhm, 2009). Hierbei kann der Fuß in Echtzeit beim Abrollen betrachtet werden. Dabei werden pathologische Fehlbelastungen in Pedogrammen sichtbar. Es ist nützlich zur Betrachtung der Restdeformitäten des Fußes, diesen in mehrere sogenannte „areas of interests“ zu unterteilen. Dies erleichtert die Verlaufsbeurteilung der Fußfehlstellung (Liu, Thometz, Tassone, Barker & Lyon, 2005). Im Vergleich zur klinischen Ganganalyse lassen sich in der Pedobarographie genaue und objektive Details der dynamischen Fußbewegung detektieren und typische Charakteristika einzelner Fußdeformitäten zuordnen.

Im Zusammenhang mit Muskeldysbalancen wurden beim idiopathischen Klumpfuß Entwicklungsanomalien der Muskeln, insbesondere ein schwächerer und fibrosierter M. tibialis posterior mit einer verdickten und verkürzten Sehne beschrieben (Ippolito, 1995; Ippolito & Ponseti, 1980; Irani & Sherman, 1972). Es gibt jedoch wenige Studien, die Auswirkungen der pathologischen Fehlstellungen auf Sehnen, Bindegewebe und Muskeln quantitativ untersuchen. Messungen des Muskelvolumens können bei der Ermittlung von unterschiedlichen pathologischen Eigenschaften sowie bei Behandlungsstrategien und klinischen Nachkontrollen hilfreich sein (Duce, D'alessandro, Du, Jagpal, Gilbert, Crichton et al., 2013; Itohara, Sugamoto, Shimizu, Ohno, Tanaka, Nakajima et al., 2005). In einer Studie von Lampe et al. wurden ebenfalls MRT Untersuchungen und Muskelvolumenmessungen bei Patienten mit Hemiparese und Fußfehlstellungen durchgeführt, um Kenntnisse zur Entwicklung des neurogenen Klumpfußes zu erlangen. Es zeigten sich in Abhängigkeit von den neurogenen Fußdeformitäten signifikante Differenzen einzelner Muskelvolumina am Unterschenkel (Lampe, Grassl, Mitternacht, Gerdesmeyer & Gradinger, 2006).

In dieser Arbeit wurden die oben beschriebenen Methoden angewendet, um Langzeitverläufe von Kindern mit kongenitalen Klumpfüßen zu untersuchen. Insgesamt nahmen an der Studie 12 Kinder teil, die im Alter zwischen 3-6 Monaten operiert wurden. Von allen wurden pedobarographische Messungen abgeleitet, von 4 Patienten sogar über einen Zeitraum von mindestens 7,0 bis maximal 9,8 Jahren. Von 10 Kindern wurden zusätzlich MRT-Untersuchungen der Unterschenkelmuskulatur angefertigt. Die individuelle Entwicklung der Füße, unter besonderer Beachtung der Zunahme von Fehlstellungen, wurde mit der Pedobarographie untersucht und mit einem Kontrollkollektiv aus 38 gesunden Kindern verglichen. Unterschiede in der Merkmalsausprägung der Fußcharakteristika und die Biomechanik des Abrollens des Fußes konnten mit der Pedobarographie zu verschiedenen Zeitpunkten objektiv evaluiert werden.

Inwieweit aber auch die Unterschenkelmuskulatur pathologische Auffälligkeiten zeigen und durch muskuläre Dysbalance zur Fehlstellung beitragen, war in dieser Studie Anlass, MRT Untersuchungen zur Volumenbestimmung beim idiopathischen Klumpfuß durchzuführen.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf Darstellung und Interpretation von biomechanischen und morphologischen Veränderungen des idiopathischen Klumpfußes während des Wachstums im Kinder- und Jugendalter. Aus pedobarographischen Daten wurden biomechanische Abläufe dargestellt und diese in Beziehung zu den Muskelvolumina gebracht. Mit diesen Erkenntnissen konnten dynamische Entwicklungs- und Anpassungsprozesse der Muskulatur und der Fußstruktur beim operierten Klumpfuß aufgezeigt werden. Die Resultate dieser Studie tragen zu einem besseren Verständnis von Pathologie und Biomechanik des idiopathischen Klumpfußes im Kindesalter bei.

1.1 Fragestellungen

Der Fuß durchläuft bei der Entwicklung und Wachstum des Kleinkinds bis zu dem Wachstumsabschluss typische Veränderungen in seiner Morphologie und in seiner Funktion im Gangablauf. In der folgenden Studie soll anhand der Messmethodik der Pedobarographie und MRT geklärt werden, bis zu welchem Grad der kongenitale Klumpfuß noch Fehlstellungen und Pathologien aufweist und ob er sich mit dem Wachstum einer physiologischen Entwicklung annähert bzw. diese bereits erreicht hat.

Die MRT Untersuchungen und die Pedobarographie sollen ebenfalls dazu beitragen, anhand funktioneller und biomechanischer Daten und der muskulären Anatomie, Rückschlüsse auf die Pathogenese sowie die Pathophysiologie des Klumpfußes zu ziehen.

1.2 Grundlagen der Anatomie, Physiologie & Entwicklung des Fußes

Um Vergleiche zwischen gesunden Füßen und Klumpfüßen durchführen zu können, sind Grundkenntnisse der Entwicklung sowie der Anatomie und Physiologie des Fußes notwendig.

Während des Wachstums erfährt der Fuß eine Gestaltänderung mit Aufrichtung des Rückfußes und Torsion des supinierten Fußes mit pronatorischer Drehung des Vorfußes, sodass auch der 1. Strahl Kontakt zum Boden findet (Maier & Killmann, 2003). Bis zu den ersten Stehversuchen ist die Belastung gering, sie steigt anschließend sprunghaft an. Das sog. Spitzzy Fettpolster an der Fußsohle vergrößert die Auflagefläche und reduziert den Druck pro Fläche am Fuß, es schützt die knorpelig angelegten Fußknochen vor Überlastung. Mit der Aufrichtung des Rückfußes vollzieht sich die Längswölbung innerhalb der ersten 2 Lebensjahre (Schlegel, W. & Krämer, 1994). Die Aufrichtung des Rückfußes wird von mehreren Vorgängen bewirkt, hierzu zählen Veränderungen knöcherner Anteile, die Außenrotation der Knöchelgabel, die Straffung des Bindegewebes und die Ausbildung der aufrichtenden Muskulatur (Maier et al., 2003).

Die Entwicklung und das Wachstum der Beine sind unmittelbar mit der Fußmorphologie und mit der Fußstellung verbunden. Die physiologische Antetorsion des Schenkelhalses führt zu einem Innenrotationsgang bei Kleinkindern, die korrigierend ihre Füße nach außen drehen, um nicht über ihre eigenen Füße zu stolpern (Hefti & Brunner, 1999).

Im Verlauf des Wachstums entwickelt sich aus einer physiologischen O-Beinstellung des Säuglings eine passagere X-Beinstellung des Kleinkindes. Diese ist physiologisch und im Alter von 3 Jahren am stärksten ausgeprägt und im Alter von etwa 6 Jahren meist wieder verschwunden. Mit der Ausbildung des physiologischen X-Beins entwickelt sich ein physiologischer Knick-Senk-Fuß. Die Fußlängswölbung richtet sich mit zunehmender Entwicklung und physiologischer Detorsion des Schenkelhalses spontan auf (Niethard & Carstens, 1997).

Nach physiologischer Aufrichtung des Fußes und physiologischer Korrektur der Beinachsen, sind für das Gehen Bewegungen in oberem und unterem Sprunggelenk (OSG, USG) wesentlich. Die funktionellen Bewegungen des OSG und USG werden von v. Lanz et al. sowie Schünke et al. ausführlich erklärt.

Im oberen Sprunggelenk liegt die Trochlea tali im Sinne eines Scharniergelenks zwischen der Malleolengabel. Die Bewegungsachse des OSG verläuft transversal durch die Malleoli und bildet mit dem Tibiaschaft einen Winkel von 82° in der Frontalebene (Schünke, Voll & Wesker, 2004). Alle Muskeln deren Sehnen hinter der OSG-Achse verlaufen oder ansetzen plantarflektieren den Fuß, entsprechend dorsalextendieren Muskeln den Fuß, deren Sehnen vor der OSG-Achse verlaufen oder ansetzen (V. Lanz, Wachsmuth & Lang, 1972) (vgl. Abbildung 1 und Tabelle 1).

Das untere Sprunggelenk wird vom Talus, Kalkaneus und Os naviculare gebildet und wird vom Lig. talocalcaneum interosseum entlang des Sulcus tali in eine vordere und hinter Kammer geteilt. Dabei entstehen die Teilgelenke Art. subtalaris hinten und Art. talocalcaneonavicularis vorne. Die Achse des USG verläuft schräg von außen nach innen entlang des Collum tali (30° in der Horizontalebene) und von unten nach oben (20° in der Sagittalebene) (Schünke et al., 2004). Alle Muskeln deren Sehnen lateral der USG-Achsen verlaufen oder ansetzen pronieren den Fuß und alle Muskeln deren Sehnen medial der Achse verlaufen oder ansetzen supinieren den Fuß. Eine Zwischenstellung nimmt dabei der M. tibialis anterior ein, der entsprechend seinem Sehnenverlauf eine sehr geringe bis keine Wirkung auf das USG hat (V. Lanz et al., 1972) (vgl. Abbildung 1 und Tabelle 1).

Die mögliche Arbeitsleistung der einzelnen Muskeln ist abhängig vom Hebel zu den Gelenkachsen, entsprechend dem Sehnenverlauf und der Kraft, entsprechend der Muskelmasse. Die einzelnen Arbeitsleistungen der Muskeln wurden von v. Lanz und Wachsmuth ermittelt (vgl. Abbildung 1). Dabei fällt ein vierfaches Übergewicht der Plantarflexoren im Vergleich zu den Dorsalextensoren auf. Die Arbeitsleistungen von Supinatoren und Pronatoren ist nahezu ausgeglichen (v. Lanz et al., 1972).

Abbildung 1 zeigt die Funktion der Unterschenkelmuskulatur im OSG und USG, die Zahlen geben die mögliche Arbeitsleistung der einzelnen Muskeln in Meterkilogramm [mkg] an. Von Lanz und Wachsmuth beschreiben die Funktion und Leistung eines Muskels an Hand von Muskelmasse und Hebelabstand zur Achse. Je größer der Hebelabstand und je größer die Muskelmasse, desto größer die Kraft. Deutlich wird dieser Sachverhalt am Beispiel des M. tibialis anterior als stärkster Dorsalextensor im OSG, aufgrund seines großen Hebels zur OSG Achse. Als stärkster Antagonist dient der M. trizeps surae als Plantarflexor im OSG und gleichzeitig starker Supinator im USG, aufgrund seines großen Hebels zu beiden Gelenkachsen und seiner großen Muskelmasse (v. Lanz et al., 1972)

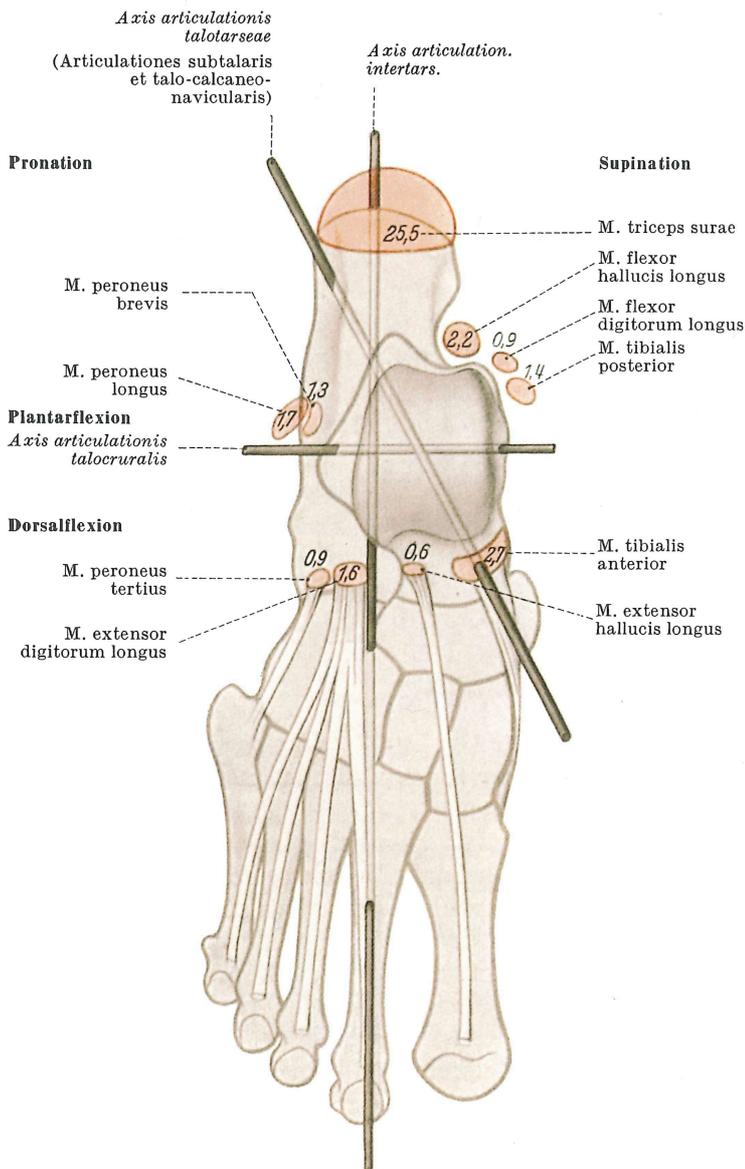


Tabelle 1: Funktion der Unterschenkelmuskulatur im OSG & USG

<u>OSG</u> Dorsalextensor / Plantarflexor	M. tibialis anterior M. ext. hallucis longus M. ext. digitorum longus M. ext. digiti minimi	M. triceps surae M. tibialis posterior M. flex. hallucis longus M. flex. digitorum longus Mm. peronei
<u>USG</u> Supinator / Pronator	M. triceps surae M. tibialis posterior M. flex. hallucis longus M. flex. digitorum longus	M. ext. hallucis longus M. ext. digitorum longus M. ext. digiti minimi Mm. peronei

1.3 Das Krankheitsbild des idiopathischen Klumpfußes



Abbildung 2 zeigt einen idiopathischen Klumpfuß eines 6 Monate alten Säuglings.

Der idiopathische Klumpfuß (siehe Abbildung 2) ist eine angeborene Fehlförm des Fußes, die sich mit zunehmendem Schweregrad nicht mehr passiv ausgleichen lässt. Dabei weist der Klumpfuß folgende Komponenten auf: Spitzfuß (lat. equinus), Sichelfuß (lat. adductus), Hohlfuß (lat. cavus), O-Stellung des Rückfußes (lat. varus), Inversion des Rückfußes und eine Supinationsstellung des Vorfußes. Man spricht auch von einem Pes equino-varus adductus et supinatus oder Pes talipes equinovarus. Dabei kommt es zu einer für den Klumpfuß typische mediale und dorsale Hautfalte (Exner et al., 2005). Liegt eine ausgeprägte Excavatuskomponente vor, so zeigt sich diese auch in einer Verkürzung des Fußes. Typisch für den Klumpfuß ist die Klumpfußwade, aufgrund einer schwächtigen Muskulatur am Unterschenkel und Atrophie des M. triceps surae. Der Bauch des M. gastrocnemius ist nach proximal verschoben. Die Atrophie der Wadenmuskulatur ist meist proportional zum Schweregrad des Klumpfußes und bleibt lebenslang bestehen (Feldbrin, Gilai, Ezra, Khermosh, Kramer & Wientroub, 1995; Grill, 1996). Es ist wichtig den Klumpfuß von einer Klumpfußhaltung zu differenzieren. Dabei handelt es sich um eine vollständig redressierbare Fehlstellung des Fußes, ohne die oben genannte Faltenbildung (Burgkart, Lampe, Gerdsmeyer & Gradinger, 2003).

1.3.1 Epidemiologie

Der idiopathische Klumpfuß weist eine Prävalenz von 1-2 auf 1000 Geburten in Nordamerika und Europa auf, während in chinesischen Gebieten Prävalenzen von 0,39 auf 1000 und in Polynesien von 6,8 auf 1000 Geburten gefunden werden.

Das Verhältnis von Jungen zu Mädchen beträgt 3:1 (Weimann-Stahlschmidt et al., 2010). Wynne-Davies beobachtete eine familiäre Häufung des Klumpfußes und postulierte ein erhöhtes Risiko, mit steigender Anzahl von Klumpfüßen in der eigenen Familie (Wynne-Davies, 1964). Lochmiller konnte bei 25% der untersuchten Patienten eine pos. Familienanamnese erheben. Ebenso zeigte sich auch ein erhöhtes Risiko bei Zwillingen für einen kongenitalen Klumpfuß (Lochmiller, Johnston, Scott, Risman & Hecht, 1998).

1.3.2 Ätiologie

Die genauen Ursachen des idiopathischen Klumpfußes sind unbekannt. Autoren vieler Studien sprechen von einer multifaktoriell bedingten Fehlbildung. Weimann-Stahlschmidt et al. und Honein et al. zählen exogene und endogene Faktoren auf. Zu den exogenen Faktoren zählen Umweltfaktoren, wie Ernährung, Viren und Temperatur. Auch Rauchen während der Schwangerschaft oder ein Oligohydramnion (verringertes Fruchtwasser) oder Amniozentese (Fruchtwasseruntersuchung) gelten als exogene Faktoren. Als endogene Faktoren werden genetische Ursachen, Veränderungen des Kollagens und der Gefäßversorgung, knöcherne Deformitäten des Talus, neurogene Imbalance und ein akzessorischer M. soleus genannt (Honein, Paulozzi & Moore, 2000; Weimann-Stahlschmidt et al., 2010). Ferner wurden biochemisch und histologisch veränderte Strukturen der Sehnen und Bänder beim Klumpfuß gefunden, die als Kofaktoren zur Entstehung eines Klumpfußes diskutiert werden (Fukuhara, Schollmeier & Uhthoff, 1994; Wess, 2009). Andere Studien sehen darin Hinweise auf neurogene Ursachen des kongenitalen Klumpfuß (Feldbrin et al., 1995; Handelsman & Badalamente, 1981; Isaacs, Handelsman, Badenhorst & Pickering, 1977).

Im Gegensatz dazu konnten Herceg et al. sowie Khan et al. oder Pierre et al., die ebenfalls Muskeln elektrophysiologisch, histologisch und biochemisch untersuchten, Veränderungen von Muskelgewebe und Bandstrukturen nicht nachweisen (Bill & Versfeld, 1982; Herceg, Weiner, Agamanolis & Hawk, 2006; Khan, Ryan, Gruber, Haralabatos & Badalamente, 2001).

1.3.3 Anatomie des Klumpfußes

1818 beschrieb Scarpa die pathologische Anatomie des idiopathischen Klumpfußes als primäre knöchernen Fehlbildungen des Talus und sekundäre Fehlentwicklung der anderen Tarsalknochen. Es folgten andere grundlegende Studien, die auf makro- und mikroskopischen Untersuchungen basieren (Carroll, 2012). Ippolito und Ponseti haben 1980 die Klumpfüße sehr eingehend untersucht und sahen die primäre Ursache der Deformität in einer Fibrose der Weichteile, die eine Fehlentwicklung des Fußskeletts sowie eine Muskeldysbalance zur Folge hat (Ippolito et al., 1980). Windisch et al. kam 2007 zu ähnlichen Ergebnissen. Es konnte gezeigt werden, dass am medialen Fußrand die Sehnen und die Bänder fibrosiert und verkürzt sind, während am lateralen Fußrand diese Strukturen überdehnt und verlängert sind. Es kommt zu einer Änderung der Zugrichtung des M. tibialis anterior und des M. tibialis posterior sowie der langen Zehenmuskeln. Aufgrund dieser Muskeldysbalance kommt es zu einer Verstärkung der Supinations- und Adduktusstellung (Windisch, Anderhuber, Haldi-Brandle & Exner, 2007a).

Als Folge resultieren Veränderungen der Knochen und der Gelenkstellungen (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4). Maßgeblich betroffen sind die tarsalen Knochen, insbesondere der Talus ist wie folgt verändert:

- Der Talushals-Trochlea-Winkel ist mit 37° bis 41° vergrößert (Norm: 27° - 33°).
- Der Corpus–Collum–Winkel kann auf bis zu 100° reduziert sein (Norm: 150° - 160°).
- Der Talushals ist verkürzt, und die Abweichung bezüglich des Körpers liegt zwischen 28° und 43° (Norm: 22° - 24°), der Taluskopf weist mit seiner Gelenkfläche nach medioplantar und das posteriore Talusplateau ist anterolateral abgeflacht.
- Die kalkaneare Gelenkfläche ist triangulär und transversal flach und zeigt nicht die typische Sattelform.
- Im Talonavikulargelenk ist der Talus nach medial in Richtung Innenknöchel subluxiert.

- Im Talokalkaneargelenk ist der Kalkaneus ebenfalls nach medial plantar in Relation zum Talus rotiert. Es kommt zum Fersenhochstand

(Westhoff et al., 2008; Windisch et al., 2007a; Windisch, Anderhuber, Haldi-Brandle & Exner, 2007b).

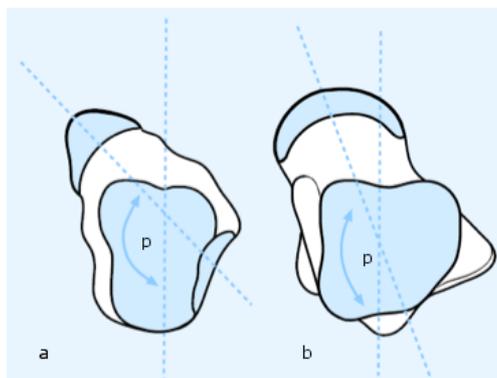


Abbildung 3 zeigt die kraniale Aufsicht des rechten Talus. Beim Klumpfuß (a) ist der Talus im Vergleich zum Normalen (b) verkleinert. Der Talushals ist verkürzt und nach medial plantar geneigt. Der Korpus-Kollum-Winkel p kann bis auf 100° reduziert sein (modifiziert nach Krauspe, Westhoff & Wild, 2006).

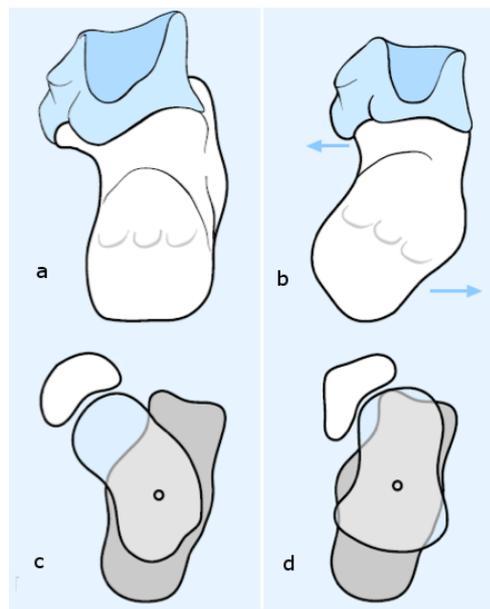


Abbildung 4 zeigt die dorsale (a,b) und die kraniale Ansicht eines rechten Talus und Calcaneus (c,d). Im Vergleich zur Norm (a,c) rotiert der Kalkaneus beim Klumpfuß (b,d) in Relation zum Talus nach medioplantar. Dabei kommt es zum Fersenhochstand. Die Achsen von Talus und Kalkaneus erscheinen schließlich parallel. Das Os naviculare disloziert nach medioplantar (modifiziert nach Krauspe et al., 2006).

Die Fehlstellung im Talokalkaneargelenk lässt sich radiologisch in 2 Ebenen entsprechend der Einstellung nach Simons darstellen. Dabei werden Aufnahmen in maximal möglicher Korrekturstellung des Klumpfußes aufgenommen (Simons, 1978).

Nach Imhäuser werden die Achsenprojektionen von Sprung- und Fersenbein im Röntgenbild aufgetragen und der talokalkaneare Winkel bestimmt, um so die Fehlstellung zu quantifizieren. Beim Klumpfuß ist aufgrund der Supination der talokalkaneare Winkel kleiner 30° . In der seitlichen Projektion von Talus und Kalkaneus kommt es aufgrund der Spitzfußstellung zu einer parallelen Darstellung der Achsen (Imhäuser, 1977) (vgl. Abbildung 5).

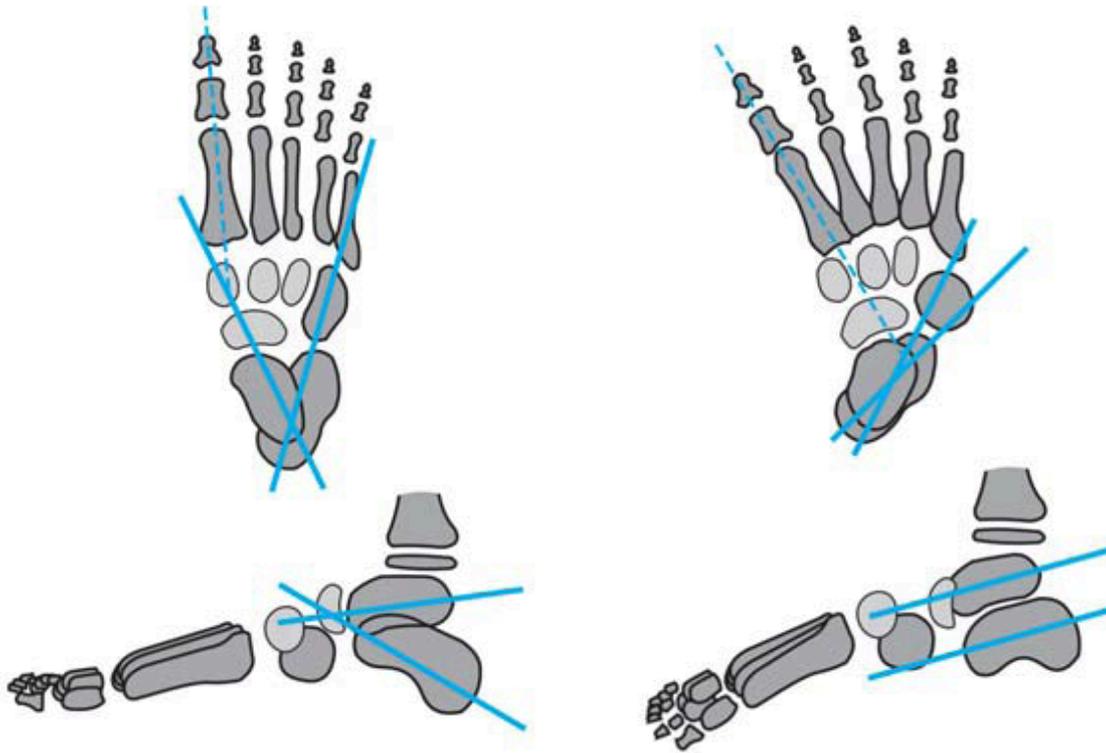


Abbildung 5 zeigt den Talokalkaneare Winkel, links entsprechend der Norm mit einem Winkel zwischen 30° – 50° und rechts beim Klumpfuß einen Winkel $< 30^{\circ}$ (Hefti & Brunner, 2006).

Sehr plastisch wird die Klumpfußstellung in Analogie zum Hüftgelenk als ein Kugelgelenk beschrieben. Dabei gilt der Talus als „Hüftkopf“ und der Kalkaneus, das Naviculare und das Pfannenband als „acetabulum pedis“. Beim Klumpfuß ist dieses Acetabulum nach medial und plantar disloziert“ (Epeldegui & Delgado, 1995a, 1995b; Imhoff & Zollinger-Kies, 2004).

1.3.4 Klassifikation nach Diméglio

Zur Beurteilung und Einteilung des Klumpfußes existieren eine Fülle von Verfahren und Klassifikationen, wie beispielsweise von Laaveg und Ponseti, McKay, Magnone, Ghanem, Sering, Pirani oder Diméglio. Munshi zeigte eine gute Korrelation zwischen den ersten 6 genannten Klassifikationen zueinander, wies aber darauf hin, dass die Einteilung in Schweregrade wenig übereinstimmte. Munschi mahnt zurecht die vielen verschiedenen Einteilungen an, die es erschweren die verschiedenen Therapiekonzepte miteinander zu vergleichen (Munshi, Varghese & Joseph, 2006).

In der vorliegenden Studie wurden die Patienten nach Diméglio klassifiziert, weil diese Einteilung mit wenig Aufwand und ohne Nebenwirkungen für den Patienten verbunden ist. Der Arzt kann schnell und einfach die klinischen Aspekte eines Klumpfußes standardisiert dokumentieren. Nach Diméglio wird der Klumpfuß in die 4 Schweregrade, soft-soft, soft-stiff, stiff-soft, stiff-stiff eingeteilt. Dabei werden 20 Punkte auf einzelne Funktionseinschränkungen und die Morphologie des Klumpfußes verteilt (siehe Tabelle 2). Bei der Untersuchung des Fußes in seiner Funktion (Abbildung 6) wird die Beweglichkeit im oberen und unteren Sprunggelenk sowie die Morphologie des Vorfußes und Rückfußes erfasst. Zu diesem Zweck werden die Bewegungsumfänge zwischen -20° und $+90^{\circ}$ gemessen und bis zu 4 Punkte bei voller Beweglichkeit vergeben. Bei einer Einschränkung des Bewegungsumfanges von 0° - 90° werden 3 Punkte, bei 20° - 90° werden 2 Punkte und bei 45° bis 90° wird 1 Punkt erreicht. Entsprechend der Morphologie des Fußes kommt für folgende Aspekte jeweils ein weiterer Punkt hinzu, wenn z.B. eine ausgeprägte Hohlfußkomponente vorliegt, eine ausgeprägte Muskelatrophie oder mediale und dorsale Furche bestehen (Dimeglio, Bensahel, Souchet, Mazeau & Bonnet, 1995).

Wirth et al. geben die Häufigkeit der vorkommenden Schweregrade mit 20% für Grad I, 33% für Grad II, 35% für Grad III und 12% für Grad IV an (Wirth & Mutschler, 2009).

Tabelle 2: Klassifikation des idiopathischen Klumpfußes nach Diméglio

soft	Grad I	1 – 5	Punkte
soft-stiff	Grad II	6 – 10	Punkte
stiff-soft	Grad III	11 – 15	Punkte
stiff-stiff	Grad IV	16 – 20	Punkte

Entsprechend der Funktionseinschränkungen und der Morphologie des Fußes werden insgesamt 20 Punkte vergeben und der Klumpfuß in 4 Schweregrade eingeteilt (Dimeglio et al., 1995)

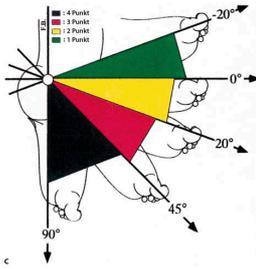
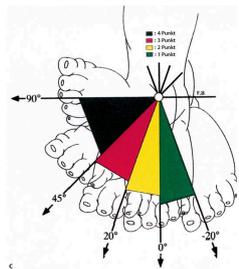
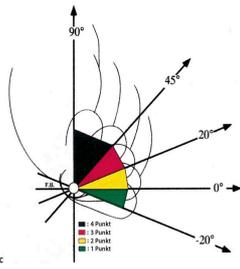
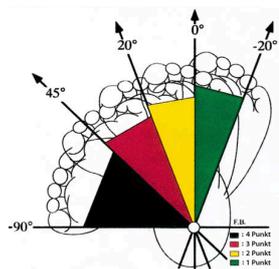
<p>Dorsalexension (20°) & Plantarflexion (90°) im OSG</p> 	<p>Pronation (20°) & Supination (90°) im USG</p> 
<p>Rückfußvalgus (20°) & Rückfußvarus (90°)</p> 	<p>Vorfuß normal (20°) & Vorfußadduktus (90°)</p> 
<p>Ausgeprägte Muskelatrophie, starker Cavus, dorsale und mediale Furche → je 1 Punkt extra</p>	

Abbildung 6 zeigt Untersuchung des Fußes in seiner Funktion und Morphologie nach Diméglio. Es werden die Bewegungsumfänge des Fußes im oberen und unteren Sprunggelenk untersucht und zwischen -20° und +90° eingeteilt. Bei vollem Bewegungsumfang werden 4 Punkte vergeben, bei einem Bewegungsumfang zwischen 0°-90° werden 3P, zwischen 20°und -90° werden 2P und zwischen 45°und 90° wird 1P vergeben. 1 extra Punkt kommt bei auffälliger Morphologie des Fußes hinzu (modifiziert nach Dimeglio et al., 1995).

1.3.5 Therapie des idiopathischen Klumpfußes

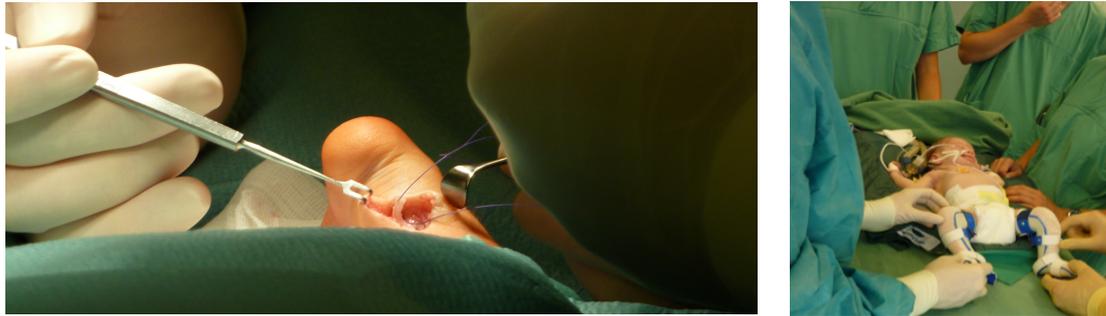


Abbildung 7 zeigt die operative Achillotenotomie bei Klumpfuß eines 6 Monate alten Säuglings (links) mit postoperativer Anlage von Oberschenkelschienen (rechts).

In der Literatur der letzten Jahre werden Übersichtsarbeiten zu den vielfältigen konservativen und operativen Therapieoptionen zusammengestellt (vergleiche dazu beispielsweise Arbeiten von (Bensahel, Kuo & Lehmann, 2009; Hamel, 2005; Lichtinger, 2012; Waschak, Radler & Grill, 2009; Weimann-Stahlschmidt et al., 2010; Westhoff et al., 2008).

Die Behandlung des idiopathischen Klumpfußes beginnt in den ersten Tagen nach der Geburt durch manuelle Redression und Gipsversorgung, dabei wird die Fehlstellung schrittweise korrigiert. Die manuelle Redression kann auf 2 unterschiedliche Weisen durchgeführt werden. Nach Kite und Imhäuser erfolgt die Reposition des Vorfußes und Rückfußes durch Gegendruck am Kalkaneokuboidgelenk, während nach Ponseti der Gegendruck am Taluskopf ausgeübt wird. Die Spitzfußstellung wird zuletzt ausgeglichen. Anschließend wird die jeweilige redressierte Fußstellung im Gips retiniert. Zu Beginn erfolgt ein Gipswechsel alle 3 Tage, dann wöchentlich und später alle 2 Wochen.

Nach 6 Wochen erfolgt eine Evaluierung des Behandlungserfolges. Bei gutem Ergebnis in der Stellung und in der Funktion des Fußes wird die konservative Behandlung mit erneuten Gipsanlagen, Beinschienen, Krankengymnastik und Schuheinlagen fortgeführt. Im Falle persistierender Fehlstellungen erfolgt eine operative Korrektur. Die Operation reicht von einfacher Achillessehnenverlängerung, über Kapselspaltung des oberen und unteren Sprunggelenks bis hin zum kompletten subtalaren Release und Versetzung und Verlängerungen einzelner Muskelsehnen. Klumpfüße im Schweregrad III oder IV nach Diméglio benötigen in der Regel eine operative Korrektur der Fußstellung. Bei Klumpfüßen I° und II°

nach Diméglio werden in der Regel durch eine konservative Therapien sehr gute Ergebnisse erzielt (Wirth et al., 2009).

Eine weitere Behandlung stellt die französische Methode dar, die ohne Gipsredressionen mit Hilfe einer CPM-(Continous-Passive-Motion)-Schiene den Klumpfuß maschinell für 14-18 Stunden täglich bewegt. Das frühfunktionale Behandlungskonzept wird um manuelle Manipulation und Bandagentherapie ergänzt. Nach 3 Monaten ist die Behandlung beendet, es erfolgt eine Reevaluierung des Therapiererfolges hinsichtlich einer möglicherweise notwendigen Operation (Charles, Canavese & Dimeglio, 2006).

Die operative Therapie unterlag in den letzten Jahrzehnten einem stetigen Wandel. Bis in die 1980er-Jahre bestand die operative Behandlung des idiopathischen Klumpfußes in Deutschland in einem begrenzten dorsalen Release nach der Methode von Imhäuser. In den Folgejahren propagierten in Deutschland insbesondere Krauspe und Parsch das peritalare Release mit dem sog. Cincinnati-Zugang nach der Methode von McKay und Simons. Seit den letzten 10 Jahren tritt die konservative Gipsredression der Methode nach Ponseti mit anschließender minimalinvasiver Achillotomie, immer mehr in den Vordergrund. Die unterschiedlichen Behandlungskonzepte werden kontrovers diskutiert. Die Entwicklung zeigt, dass aufwendige und invasive Methoden von minimalinvasiven Verfahren abgelöst werden. Welches Therapieverfahren letztlich angewendet wird, ist von dem Schweregrad der Fußdeformität und der verbleibenden Restdeformität abhängig (Carroll, 2012; Hamel, 2005).

In der vorliegenden Studie waren die Operation nach McKay und Simons mit Cincinnati-Zugang und die Operation nach Imhäuser die vorrangige Behandlungsmethode. Die Behandlung nach Ponseti erfolgte nur bei einem der nachuntersuchten Kinder, das in Folge eines Klumpfußrezidivs eine korrigierende Operation mit peritalarer Arthrolyse und Cincinnati-Zugang benötigte.

1.3.5.1 Die Operation nach Imhäuser

Die Operation nach Imhäuser erfolgt vorzugsweise im Alter von 4 Monaten. Bis zum Zeitpunkt der Operation werden manuelle Redressionen und Gipsbehandlungen angewendet. Der Operationszugang wird von dorsal gewählt, die Schnittführung ist vertikal. Im Sinne eines dorsalen Release werden die Kapsel des oberen

und unteren Sprunggelenks dorsal gespalten, um eine residuale Fehlstellung im talokalkanearen Gelenk zu korrigieren. Durch den Calcaneus wird ein Kirschnerdraht gelegt und dieser in das sog. Schede-Fersenzuginstrument eingespannt, um eine Rechtwinkelstellung des Fußes zu erreichen und die Ferse in Position zu halten. Zur Korrektur des Spitzfußes wird die Achillessehne Z-förmig verlängert. Weitere korrigierende Operationen, beispielsweise Tibialis-anterior-Transfer werden zweizeitig bis zum 3. Lebensjahr angegangen (Imhäuser, 1984).

1.3.5.2 Die Operation nach McKay und Simons und Cincinnati-Zugang

Die Operation erfolgt im Alter von 6-8 Monaten. Eine manuelle Redression sowie Gipsbehandlung geht ebenfalls der Operation vorweg. Der Hautschnitt erfolgt hufeisenförmig vom Großzehengelenk über die Achillessehne bis zum lateralen Malleolus. Entsprechend einem peritalaren Release werden obere und untere Gelenkkapsel medial und lateral eröffnet. Der weitere Fortgang erfolgt nach patientenspezifischen Vorgehen, ein Zweiteingriff soll somit vermieden werden. Insbesondere die fehlerhafte Rotation zwischen Kalkaneus und Talus wird beseitigt und das talonavikulare sowie das kalkaneokuboidale Gelenk werden reponiert. Oftmals werden die Fußwurzelknochen mit Kirschnerdrähten fixiert. Des Weiteren können Muskelansätze versetzt und Sehnen verlängert werden. Zur Korrektur des Spitzfußes wird die Achillessehne ebenfalls Z-förmig verlängert (Krauspe & Parsch, 1995).

Die einzelnen Operationsverfahren unterscheiden sich in der Wahl des Operationszugangs und im Ausmaß und der Größe des Operationsgebietes. Das postoperative Behandlungsschema ist in beiden Operationsverfahren sehr ähnlich. Der postoperative Oberschenkelgips wird jeweils für 6 Wochen getragen. Die Kirschnerdrähte werden nach 4 Wochen entfernt. Anschließend muss eine Kopenhagener Nachtlagerungsschiene für mindestens ein Jahr getragen werden. Des Weiteren sind physiotherapeutische Anwendungen, Schuheinlagen und regelmäßige medizinische Verlaufskontrollen notwendig (Imhäuser, 1984; Krauspe et al., 1995).

1.3.5.3 Gipsredression nach Ponseti

Die Behandlungsmethode nach Ponseti besteht in der ersten Phase aus manueller Redression und seriellen Oberschenkelgipsen, die die einzelnen Teilfehlstellungen des Klumpfußes in Etappen korrigieren.

Zunächst wird die Cavusstellung im Vorfuß ausgeglichen. Hierfür wird der Vorfuß betont supiniert und so das Navikulare und Kuboid in eine Linie zum Talus und Kalkaneus gebracht. Erst im zweiten Schritt wendet man sich der subtalaren Dero-rotation zu, wobei der Gegenhalt lateral am Talus, im Kopf-Halsübergang entscheidend ist. In einem Behandlungszeitraum von 8-10 Wochen wird der supinierte Fuß in eine Abduktion von etwa 75 Grad, gemessen gegen die Kniegelenks-Bewegungsachse überführt. Zuletzt wird der Spitzfuß mit langsamer Dorsalextension ausgeglichen. Bei 85% der Fälle verbleibt eine Spitzfußstellung, die eine perkutane Achillotenotomie notwendig macht.

In der 2. Phase wird eine sog. Denis-Brown-Schiene angepasst, die die Füße in 75° Außenrotation fixiert. Getragen wird diese Schiene für 24 Stunden am Tag, in den ersten 6 Monate. Anschließend für mindestens weitere 5 Jahre nur noch nachts. Die zeitgleiche manuelle Therapie durch medizinisches Personal und den Eltern ist für den Behandlungserfolg entscheidend (Ponseti & Campos, 2009).

1.3.6 Klumpfußrezidive, Unter- und Überkorrektur

Im Allgemeinen lassen sich gute bis sehr gute Ergebnisse in der Behandlung des idiopathischen Klumpfußes erzielen. Dennoch kommt es zu Komplikationen oder Persistenz von einzelnen Fehlstellungen oder zum Klumpfußrezidiv. Bei der Behandlung nach Ponseti kommt es durch Incompliance der Eltern zu Unterkorrekturen des Klumpfußes, beispielsweise zu einer residualen Spitzfußstellung. Nicht korrekt angewandte Redressionsmanöver bergen die Gefahr eines iatrogenen „Tintenlöscher-Fußes“. Bei operativen Therapieansätzen treten vermehrt Überkorrekturen auf, es kommt beispielsweise zum Knick-Senkfuß. Als postoperatives Trauma werden Talusnekrosen beobachtet, mit konsekutiven „Flat-Top Talus“. In manchen Fällen zeigt sich das Bild eines sog. „rebellischen Klumpfußes“. Dieser neigt trotz Therapie und Operation zu erneuten Rezidiven. Eine genaue Ursache dieser therapieresistenter Klumpfüße ist nicht bekannt (Lichtinger, 2012).

Die therapeutischen Möglichkeiten eines Klumpfußrezidivs oder einer Restdeformität beinhalten anfangs konservative Maßnahmen, wie erneute Redressionsgipse, Orthesen und Physiotherapie. Je nach Ausmaß und Therapieresistenz werden erneute operative Maßnahmen empfohlen. Dazu zählen Muskelansatztransfer, peritalare Arthrolyse, Korrekturosteotomien von Os cuboideum, Os cuneiforme mediale, Os calcaneus. Bei schweren Formen ist ein Fixateur externe, die sog. Ilisarov-Methode indiziert (Lichtinger, 2012; Westhoff et al., 2008).

2 Material und Methodik

Für die vorliegende Arbeit wurden 12 Kinder mit operierten idiopathischen Klumpfüßen regelmäßig über viele Jahre pedobarographisch nachuntersucht und mit einem gesunden Kontrollkollektiv verglichen. Bei 4 Kindern war es aufgrund des langen Beobachtungszeitraums von mindestens 7,0 und maximal 9,8 Jahren möglich, einen intraindividuellen Langzeitverlauf zu dokumentieren. Diese 4 Patienten waren nicht gesondert ausgesucht. Zum weiteren Informationsgewinn wurden bei 10 der Patienten ein MRT der Unterschenkel angefertigt, anhand derer die Volumina der einzelnen Muskeln am Unterschenkel bestimmt wurden. Die Muskelvolumina ermöglichten es, in Verbindung mit den biomechanischen Messdaten der Pedobarographie, pathophysiologische und funktionelle Zusammenhänge des Klumpfußes zu untersuchen. Als Kontrolle dienten die Füße von 2 gesunden Kindern und die gesunden Gegenseiten von 4 Patienten mit unilateralen Klumpfüßen.

2.1 Patientenkollektiv

In die Studie eingeschlossen wurden insgesamt 12 Kinder bzw. Jugendliche, 9 Jungen, 3 Mädchen, mit insgesamt 19 Klumpfüßen, davon 7 beidseitige, 3 linke und 2 rechte Klumpfüße. Alle Kinder dieser Studie wurden operiert, 11 davon in der kinderorthopädischen Abteilung des Klinikums Rechts der Isar bzw. in dem ihr angegliederten Kinderkrankenhaus München Schwabing. Je nach Operationsverfahren erfolgte die Operation im Alter von 3 Monaten bei der Operation nach Imhäuser, bzw. 6 Monate bei der Operation nach McKay und Simons Cincinnati. Insgesamt wurden 7 Kinder nach Imhäuser operiert und 4 Kinder nach Cincinnati. Eines der Kinder wurde wegen eines Rezidivs nach bereits erfolgter Behandlung nach Ponseti in London erstmals in der Kinderorthopädischen Abteilung vorstellig und wegen eines Rezidivs erneut im Alter von 2 Jahren nach der Methode von McKay und Simons mit Cincinnati-Zugang korrigierend operiert. Der jüngste Patient war bei Studienbeginn 2,5 Jahre alt, der Älteste bei Studienbeginn 16 Jahre alt. Im weiteren Verlauf wurden insgesamt 115 Messreihen von 12 Patienten (19 Klumpfüße) im Alter zwischen 2,5 Jahren und 21,5 Jahren erhoben (vgl. Tabelle 3).

In der klinischen Untersuchung zeigten die Patienten keine weiteren Fehlbildungen oder andere Erkrankungen, alle Patienten waren schmerzfrei gehfähig. Eine

postpartale Dokumentation der Evaluierung der Klumpfüße war nicht vorgenommen worden. In der postoperativen Einteilung nach Diméglio zeigten sich 13 leichtgradige Klumpfüße und 7 mittelgradige Klumpfüße (vgl. Tabelle 4). Im Follow-Up kam es nur bei einem Kind zu einer Verschlechterung, von einem moderaten zu einem schweren Klumpfuß. Alle anderen Kinder zeigten keine Veränderungen im Score nach Diméglio (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 3: Patientenkollektiv

Patient	Alter in Jahren	Anzahl der Messungen	Zeitraum in Jahren
P01 Klumpfuß bds.	2 - 12	14	9,8
P02 Klumpfuß bds.	6 - 15	8	9,1
P03 Klumpfuß li.	3 - 10	4	6,3
P04 Klumpfuß li.	14 - 21	5	7,0
P05 Klumpfuß bds.	3 - 12	11	7,9
P06 Klumpfuß bds.	6 - 11	2	4,5
P07 Klumpfuß bds.	3 - 9	7	6,1
P08 Klumpfuß bds.	8 - 11	3	3,4
P09 Klumpfuß re.	6 - 11	4	4,7
P10 Klumpfuß bds.	8 - 11	4	3,2
P11 Klumpfuß re.	7 - 9	3	1,4
P12 Klumpfuß re.	4 - 6	4	1,9

n=12, davon m=9. und w=3, Untersuchungsintervall: max=9,3 Jahre, min=1,9 Jahre

Tabelle 4: Klassifikation nach Diméglio zum Zeitpunkt der 1. Messung

		OSG	USG	Varus	Adduktus	Extra	Summe	Diméglio
P01	re	2	2	1	1	0	6	mittel
	li	2	1	1	1	0	5	mittel
P02	re	1	2	1	1	1	6	mittel
	li	1	2	1	1	1	6	mittel
P03	re	nicht operiert						
	li	1	1	1	1	0	4	leicht
P04	re	nicht operiert						
	li	1	1	1	1	0	4	leicht
P05	re	2	1	1	1	0	5	mittel
	li	2	1	1	1	0	5	mittel
P06	re	1	1	1	1	0	4	leicht
	li	1	1	1	1	0	4	leicht
P07	re	1	1	1	1	0	4	leicht
	li	1	1	1	1	0	4	leicht
P08	re	1	1	1	1	0	4	leicht
	li	1	1	1	1	0	4	leicht
P09	re	2	2	3	1	1	9	mittel
	li	nicht operiert						
P10	re	1	1	1	1	0	4	leicht
	li	1	1	1	1	0	4	leicht
P11	re	1	1	1	1	0	4	leicht
	li	nicht operiert						
P12	re	nicht operiert						
	li	1	1	1	1	0	4	leicht

Zum Zeitpunkt der ersten Messung wurde die Beweglichkeit im OSG und USG beurteilt sowie Vorfußadduktus und Rückfußvarus. Ein Sonderpunkt wurde jeweils für eine ausgeprägte Muskelatrophie, einen ausgeprägten Hohlfuß, eine dorsale oder eine mediale Furche vergeben.

Diméglioscore: Leicht (I°): 1-5 P, moderat (II°): 6-10 P, schwer (III°): 11–15 P, sehr schwer (IV°): 16-20 P

Tabelle 5: Follow-Up des Diméglio-Scores

Alter [Jahre]	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
P01 re	II	II	II	II		II	II	II	II	II									
li	II	II	II	II		II	II	II	II	II									
P02 re				II		II	II	II	II	II	II		II						
li				II		II	II	II	II	II	II		II						
P03 re	nicht operiert																		
li	I					I	I	I											
P04 re	nicht operiert																		
li												I	I	I			I		I
P05 re	II		II		II	II	II	II	II	II									
li	II		II		II	II	II	II	II	II			II						
P06 re				I					I										
li				I					I										
P07 re	I	I	I		I	I	I	I											
li	I	I	I		I	I	I	I											
P08 re						I	I		I										
li						I	I		I										
P09 re				II	II		III		III										
li	nicht operiert																		
P10 re						I	I	I	I										
li						I	I	I	I										
P11 re					I	I	I												
li	nicht operiert																		
P12 re	nicht operiert																		
li		I	I	I															

Bei 11 von 12 Patienten (17 Klumpfüße) kam es zu keiner Veränderung der Gradeinteilung nach Diméglio, bei einer Patientin (2 Klumpfüße) verschlechterte sich der Klumpfuß von Grad II auf Grad III nach Diméglio.

2.2 Kontrollkollektiv

Für die Auswertung wurde ein Kontrollkollektiv aus 38 Kindern im Alter von 3 bis 15 Jahren pedobarographisch untersucht. Abbildung 6 gibt die Altersverteilung des Kontrollkollektivs wieder. Des Weiteren wurden von 2 Kindern ein MRT Bild der Unterschenkel erstellt und daraus die Muskelvolumina am Unterschenkel bestimmt. Die gesunden Kinder waren Geschwister der zu untersuchenden Patienten oder kamen aus dem Bekanntenkreis.

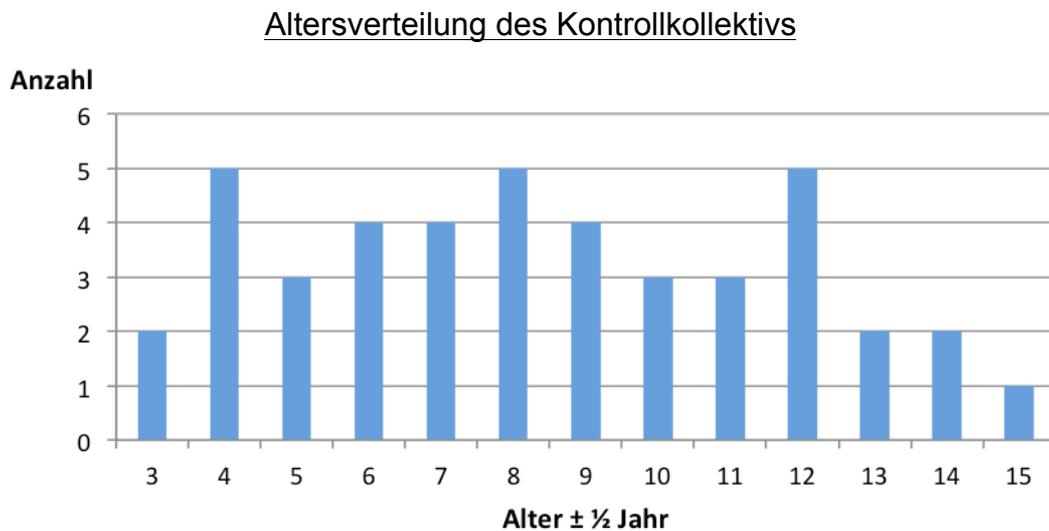


Abbildung 6 zeigt die Altersverteilung des Kontrollkollektivs, es wurden 38 Kinder im Alter zwischen 3 und 15 Jahren pedobarographisch untersucht.

2.3 Messtechnik

In der vorliegenden Studie wurden die Kinder mit pedobarographischen Messungen im Ganglabor des Klinikums rechts der Isar München regelmäßig nachuntersucht und einmalig MRT-Bilder der Unterschenkel angefertigt.

2.3.1 Pedobarographie im Ganglabor

Die Pedobarographie ist eine nicht invasive, einfach und schnell durchführbare Messmethodik. Sie ist objektiv und unabhängig vom untersuchenden Arzt. Die Pedobarographie stellt die Messergebnisse in Form von Druckverteilungsbildern sehr anschaulich und auch für den Laien intuitiv nachvollziehbar dar.

Bei der Durchführung der plantaren Druckmessung wurde das emed-m Messsystem von Novel verwendet. Es ist eine Druckmessplatte, die beim Auftreten mit speziellen Sensoren die Drücke registriert und in digitalisierter Form an einen angeschlossenen PC überträgt. Der PC speichert die gemessenen Daten und eine Software stellt die Drücke in Form eines farbkodierten Druckverteilungsbildes dar. Anschließend können die Rohdaten weiterverarbeitet werden. Im Ganglabor des Klinikums rechts der Isar in München ist das Messsystem portabel und kann in kurzer Zeit auf- und abgebaut werden. Die Messplatte ist in einem auslegbaren Laufsteg eingelassen, sodass der Patient barfuß bequem über die Platte laufen kann. Gleichzeitig werden die Beine des Patienten von 2 Videokameras beim Gehen frontal und seitlich gefilmt. Die Filmaufnahmen sind mit der Messplatte synchronisiert, dies ermöglicht dem Arzt eine genaue Beurteilung des dynamischen Vorgangs beim Gehen und der dabei auf den Fuß wirkenden Belastungen.

Die emed-m ist eine Druckmessplatte in der kapazitive Sensoren verbaut sind. Diese bestehen aus einem Elastomer, das sich bei Belastung verformt und die elektrischen Eigenschaften des Sensors verändern (Schaff, Reinisch, Mitternacht & Senner, 1991).

Die Druckmessplatte hat einen Sensorenbereich mit einer Auftrittsfläche von $38 \times 24 \text{ cm}^2$, mit 4 Drucksensoren pro cm^2 und einer Abtastrate von 50 Hz. Es können Drücke in einem Bereich zwischen 10 und 1200 kPa gemessen werden, mit einer Druckauflösung von 10 kPa und einer Genauigkeit von $\pm 5\%$ (Novel GmbH, 2007).

Bei der Durchführung der Messung ist ein individueller Startpunkt im Abstand von 3 Schrittlängen zu der Messplatte festzulegen. Die Patienten gehen in gewohnter Gehgeschwindigkeit barfuß über die Platte, dabei soll immer einer der beiden Füße vollständigen Plattenkontakt haben. Es ist auf ein natürliches Gehen zu achten, zu hohe Geschwindigkeiten oder Springen führen zu falschen Ergebnissen. Es kann helfen, wenn die Patienten sich auf ein Ziel im Raum konzentrieren und nach Möglichkeit die Platte nicht beachten. Die Aufnahmen werden bis zu 10 Mal je Fuß wiederholt, sodass bei der Auswertung der Daten Unregelmäßigkeiten der Einzelschritte beim Gehen durch Mittelung der Ergebnisse einer Messreihe ausgeglichen werden und die Streuung der Werte messbar wird. Grundsätzlich sind pedobarographische Messungen von der Geschwindigkeit abhängig, exakte Vergleiche der Messungen untereinander würden somit nur möglich, wenn alle Kinder mit derselben Geschwindigkeit über die Platte gingen. Jedoch um eine Information über die tatsächliche Belastung des Fußes in seiner Alltagsfunktion zu erhalten, bittet man die Kinder in einer für sie normalen Geschwindigkeit zu gehen. Eine erste Auswertung mit der emed-Software zeigt unmittelbar das aktuelle Pedogramm und vorangegangene Aufnahmen sowie 2 zeitsynchrone Videosequenzen (vgl. Abbildung 7).

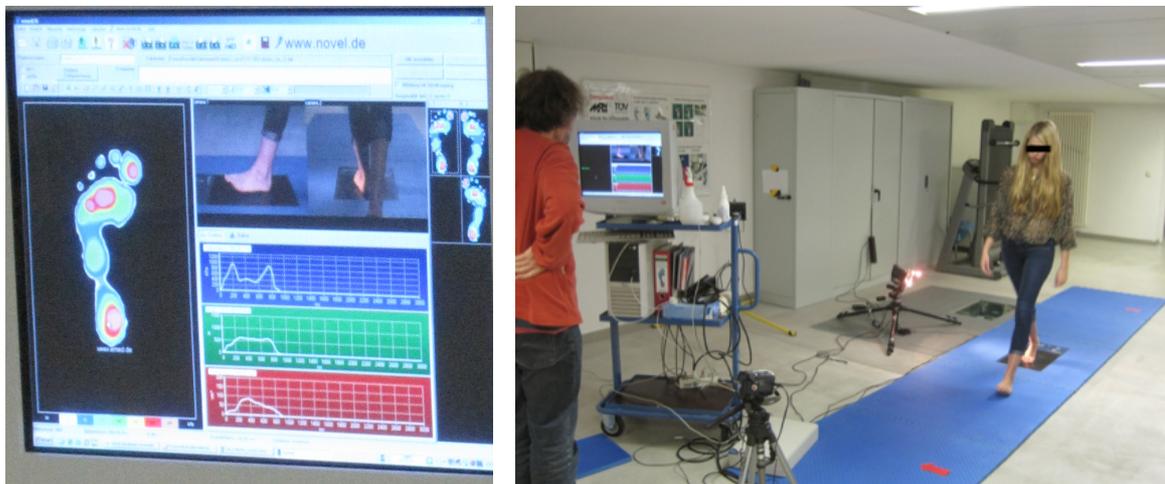


Abbildung 7 zeigt Pedobarographische Messungen im Klinikum rechts der Isar. Links ist die Benutzeroberfläche der Software von Novel zu sehen, die das aktuelle und 3 vorangegangene Pedogramme sowie 2 zeitsynchrone Videossequenzen wiedergibt. Im rechten Bild läuft eine Patientin auf dem Laufsteg über die emed-m Messplatte von Novel. 2 Videokameras zeichnen den rechten Fuß von seitlich und frontal auf.

2.3.1.1 Bilder in Einzelabfolge

Die weitere Verarbeitung am PC erfolgte in dieser Studie wie bei Mitternacht & Lampe 2006 beschrieben. Anhand der pedobarographischen Messdaten werden der zeitliche Verlauf der gesamten Bodenkraft des Fußes und die Kraft auf bestimmte Teilbereiche der Fußsohle bestimmt. Des Weiteren werden entsprechend dem Hebelgesetz äußere Gelenkmomente bestimmt, welchen die sprunggelenkbewegende Muskulatur und knöchernen Strukturen ein gleichgroßes inneres Moment entgegenhalten müssen (Mitternacht & Lampe, 2006).

Beim Gehen wird in der Regel zuerst die Ferse am Boden aufgesetzt, anschließend rollt der Fuß über den Außenrand ab, um sich über den vorderen Fußballen abzustößen. Zu jedem Zeitpunkt registriert die Messplatte den Bodenkontakt und misst die dabei entstehenden Drücke. Dabei werden 50 Druckverteilungsbilder pro Sekunde erstellt und die Drücke farbig kodiert dargestellt. Die Ganglinie wird ebenfalls angegeben, sie entspricht der Bewegung des Schwerpunkts der Druckverteilung im Gangablauf und verläuft entlang des Angriffspunkts des Bodenkraftvektors. Am Schluss einer jeden Messung wird ein Druckmaximalbild erstellt, das sich aus den Maximalwerten aller gemessenen Druckwerte ergibt (vgl. Abb. 8).

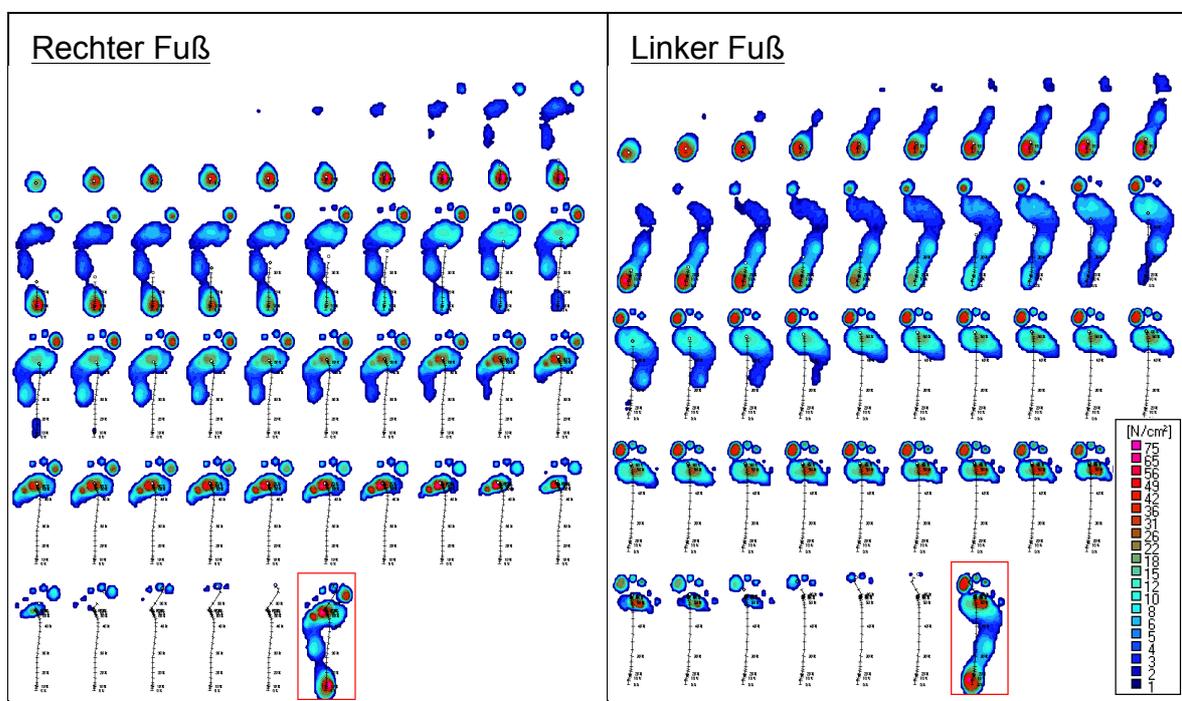


Abbildung 8 zeigt den Abrollvorgang des Fußes in der Pedobarographie. Dargestellt sind die einzelnen Bildaufnahmen eines Pedogramms vom rechten und linken Fuß. Aufgenommen werden 50 Bilder pro Sekunde. Die einzelnen Druckwerte werden von den Sensoren registriert und entsprechend ihres Wertes farbig dargestellt. Die Ganglinie ist die Bahn des Schwerpunktes der Druckverteilung und entspricht dem Angriffspunkt des Bodenkraftvektors. Rot umrahmt ist das Maximaldruckbild, es zeigt die jeweils höchsten Druckwerte, die ein Sensor während eines Schrittzklus registriert.

2.3.1.2 Druckmaximalbild

Das Druckmaximalbild kodiert die aufsummierten Drücke farblich. In Abbildung 9 sind hohe Druckwerte über Ferse, Vorfußballen und Großzehe mit Druckwerten über 50 N/cm^2 und niedrigere Druckwerte von 12 N/cm^2 über dem Mittelfußareal zu erkennen. Die Mittelfußbelastung ist in diesem Beispiel, entsprechend einer bereits ausgebildeten Druckschwiele am Mittelfuß, zu hoch. Die Schwiele ist auch auf der Photographie sowie in der Scanaufnahme zu sehen.

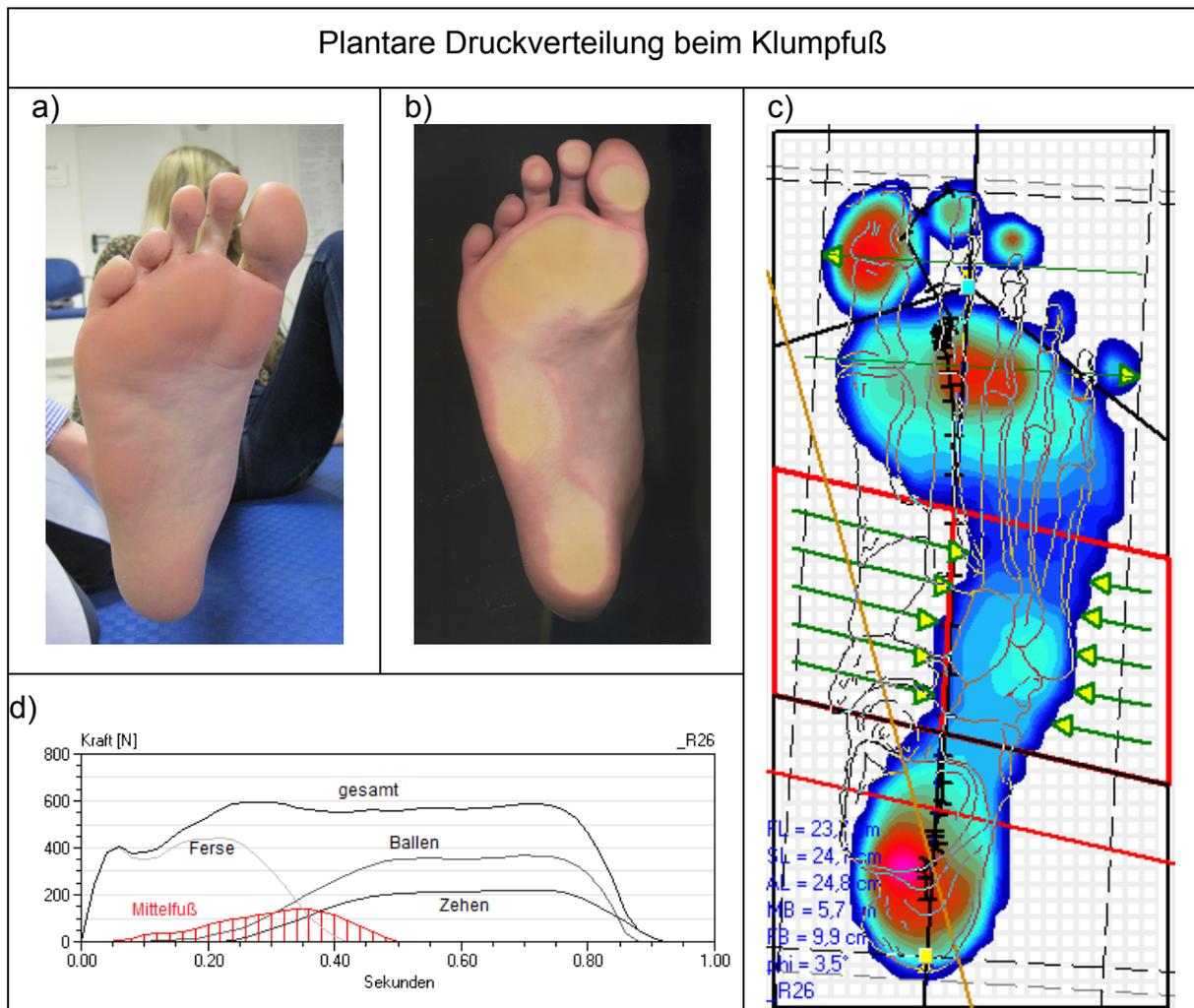


Abbildung 9a) zeigt eine Photographie aus kaudaler Sicht des rechten Fußes, mit leichter Schwiele am Mittelfuß, b) eine entsprechende Scanaufnahme desselben Fußes, mit deutlich vergrößerte Bodenkontaktfläche am Mittelfuß und c) das dazugehörige Druckmaximalbild, aus kranialer Sicht, (= Pedogramm) mit Auswertemaske. d) zeigt die Zeitliche Veränderung der Kraft, die auf den gesamten Fuß, die Ferse, den Mittel- und Vorfuß wirkt. Die Fläche unter den Kurven beschreibt das Kraft-Zeit-Integral und gibt den, auf den Fuß wirkenden, Kraftstoß (= Last) an.

2.3.1.3 Manuelle Anpassung der Auswertemaske

Mit Hilfe der Software wird die Fülle an Rohdaten ausgewertet, die anschließend graphisch und tabellarisch angezeigt werden können. Dazu wird eine virtuelle Auswertemaske erstellt. Sie teilt das Druckmaximalbild eines Pedogramms in 5 Segmente, sog. Areas of Interest (AOI), Ferse, Mittelfuß und Vorfuß sowie mediale und laterale Fußhälfte. Die Maske muss einmal pro Messreihe manuell jeweils an den linken und rechten Fuß angepasst werden. Dabei wird die Maske an der Fußgröße und Fußlängsachse ausgerichtet. Ein eingeblendetes Fußskelett hilft, die genaue Größe und Position der Maske zu bestimmen. Es ist hilfreich, sich an markanten Fußknochen entsprechenden Druckstellen im Pedogramm, wie Ferse, Ballen und Großzehe zu orientieren. Die Längsachse der Maske wird durch das Fersenzentrum und das Metatarsaleköpfchen II gelegt. Anschließend kann auf jedes weitere Pedogramm der Messreihe eine Kopie geladen werden (Abbildung 9c).

2.3.1.4 Berechnung der einzelnen Messgrößen

Die Messplatte misst die Druckverteilung an der Fußsohle im Verlauf des Bodenkontakts. Daraus können dann folgende Gang- und Kraftparameter abgeleitet werden: Kontaktfläche und Kontaktzeit, Kraft, Kraftstoß und Drehmomente im oberen und unteren Sprunggelenks sowie die Drehmomentstöße.

Integriert man die Druckwerte [N/cm^2] über die Fläche erhält man die auf den Fuß wirkende Kraft [N]. Abbildung 9 d stellt den Kurvenverlauf der gemessenen Kräfte dar. Angezeigt werden können die Kräfte über den gesamten Fuß sowie die Kraftanteile über Ferse, Mittelfuß und Vorfuß. Die erstellten Kurven zeigen zu jedem Zeitpunkt die am Fuß wirkende Kraft. Der Kurvenverlauf der Gesamtkraft beschreibt 2 Maxima, zu Beginn das Aufsetzen der Ferse und am Schluss das Abstoßen des Fußballens, dazwischen durchläuft die Kurve ein Minimum.

Integriert man anschließend die Kraft über die Zeit, erhält man den Kraftstoß [Ns] auf eine bestimmte Fläche wirkt. In der vorliegenden Arbeit werden die Kraftstöße von Rück-, Mittel-, und Vorfuß relativ zum Gesamtkraftstoß in Prozent angegeben. Zum besseren Verständnis ist ein Kraftstoß als Last zu verstehen und es wird im Folgenden von Lastanteilen [%] an der Gesamtlast des Fußes die Rede sein.

Die Bestimmung der Drehmomente ist in Abbildung 10 dargestellt und leitet sich aus dem Hebelgesetz ab, $\text{Drehmoment} = \text{Kraft} \times \text{Hebel}$. Die Kraft setzt im Schwerpunkt der Druckverteilung an, der Hebel ist der Abstand vom Kraftangriffspunkt jeweils senkrecht zu einer der Gelenkachsen. Während des Abrollvorgangs verändern sich die Hebel entsprechend der Wanderung des Druckschwerpunktes entlang der Ganglinie. Zu Beginn werden gering negative Werte gemessen, da der Fuß beim Auftreten auf den Boden in leichte Dorsalextension gebracht wird und deshalb nur an der Ferse Bodenkontakt besteht und der Kraftangriffspunkt deshalb hinter der Sprunggelenkachse liegt. Anschließend werden, bei Plantarflektion des Fußes positive Werte gemessen. Mit dem Abrollen des Fußes wandert der Druckschwerpunkt nach vorne, die Drehmomente steigen an und erreichen schließlich mit dem Abstoßen des Fußballens ein Drehmomentmaximum.

Entsprechend dem Kräftegleichgewicht wird dem äußeren Drehmoment ein inneres Drehmoment entgegengehalten. Das innere Drehmoment wird entweder muskulär oder vom Gelenkapparat selbst, durch knöcherne Strukturen oder Bänder erzeugt. Integriert man die Drehmomente über die Zeit erhält man einen Drehmomentstoß [Nms], in Analogie zum Kraftstoß [Ns].

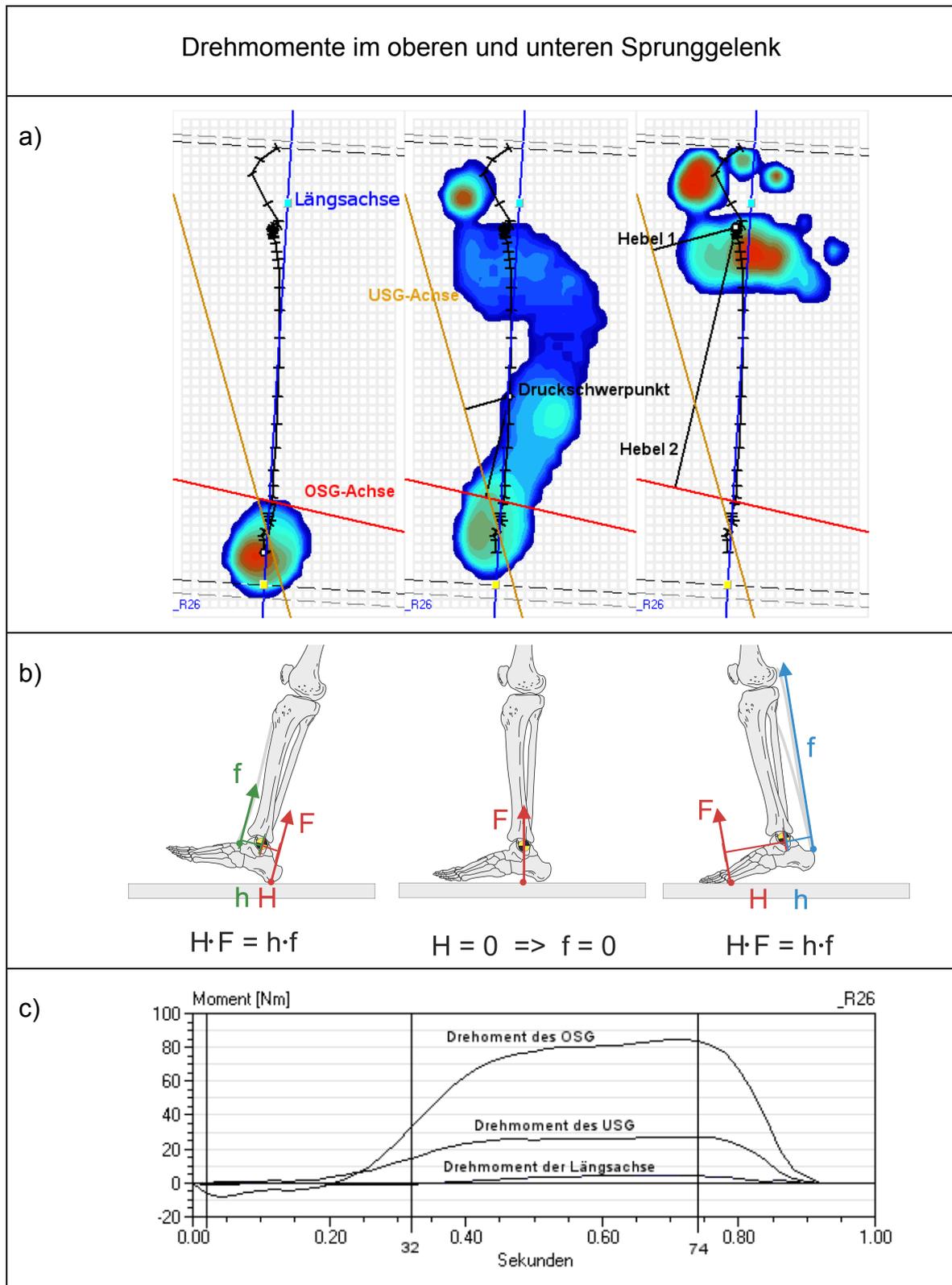


Abbildung 10 zeigt die Drehmomentberechnung im oberen und unteren Sprunggelenk. In a) sind Pedogramme nach 2, 32 und 74 Sekunden des Abrollvorgangs dargestellt. Eingetragen sind die Gelenkachsen und der entsprechende Hebel durch den Druckschwerpunkt. b) erklärt das Hebelgesetz, $M = F \times H$. Entsprechend der Physiologie der Bewegung müssen entstehende äußere Drehmomente immer durch ein muskulär oder knöchern erzeugtes inneres Drehmoment im Gelenk ausgeglichen werden. c) stellt die Kurvenverläufe der gemessenen Drehmomente im oberen und unteren Sprunggelenk sowie entlang der Längsachse dar.

2.3.1.5 Messparameter und Interpretation beim Klumpfuß

Bei der Auswertung der Messergebnisse wurden in der vorliegenden Studie die Messparameter der Pedobarographie so gewählt, dass die komplexe Klumpfußfehlstellung möglichst genau in der plantaren Druckverteilung abgebildet wird.

Die Belastung der lateralen Fußhälfte charakterisiert die Supinationsstellung und den Rückfußvarus des Klumpfußes.

3 weitere AOIs wurden nach anatomischen Aspekten gewählt: Ferse, Mittel- und Vorfuß, inklusive Zehen. Sie ermöglichen es das Abrollverhalten des Fußes abzubilden. Es wurden die Lastanteile dieser Areale und die Bodenkontaktdauer der Ferse bestimmt. Dies ermöglicht eine Zuordnung einer Spitzfußkomponente mit vermehrter Vorfußbelastung sowie verminderter und verkürzter Fersenbelastung.

Die Drehmomente im OSG geben ebenfalls Aufschluss über eine mögliche Spitzfußstellung. Beim Spitzfuß zeigt der Kurvenverlauf der gemessenen Drehmomente bereits zu Beginn positive Werte, da es zu keiner initialen Dorsalextension des Fußes kommt. Im weiteren Kurvenverlauf kommt es rascher zu einem Plateau mit geringeren Drehmomentmaxima, als beim gesunden Fuß.

Die Drehmomentstöße lassen Rückschlüsse auf die Rigidität der Gelenke zu. Beim Klumpfuß werden erhöhte Drehmomentstöße als Ausdruck besonderer Rigidität im oberen und unteren Sprunggelenk gemessen.

Die Ganglinie zeigt den Verlauf des Druckschwerpunktes einer Messung an und ist bei einem Klumpfuß als Ausdruck der Supination nach lateral verlagert.

2.3.1.6 Messparameter und Interpretation beim gesunden Fuß

Beim gesunden Fuß zeigt der Kurvenverlauf der Gesamtkraft 2 Maxima. 1. beim Aufsetzen der Ferse und 2. beim Abstoßen des Vorfußes, dazwischen wird ein Druckminimum gemessen. Die Ferse hat physiologischer Weise Bodenkontakt bis zur 1. Hälfte des Abrollvorgangs.

Die Drehmomente im oberen Sprunggelenk weisen zu Beginn, wenn der Fuß in Dorsalextension auf den Boden aufgesetzt wird, geringe negative Momente auf. Die absoluten Werte sind gering, da es nicht viel Kraft benötigt den Fuß ohne Widerstand in Dorsalextension zu bringen. Im weiteren Abrollen wird der Fuß plantarflektiert, die Drehmomentkurve steigt mit zunehmender Muskelaktivität steil

an, bis schließlich beim Abstoßen des Fußes ein hohes Maximum des Drehmoments gemessen wird und dieses größer ist als beispielsweise bei einem Klumpfuß oder Spitzfuß (vgl. Abbildung 11).

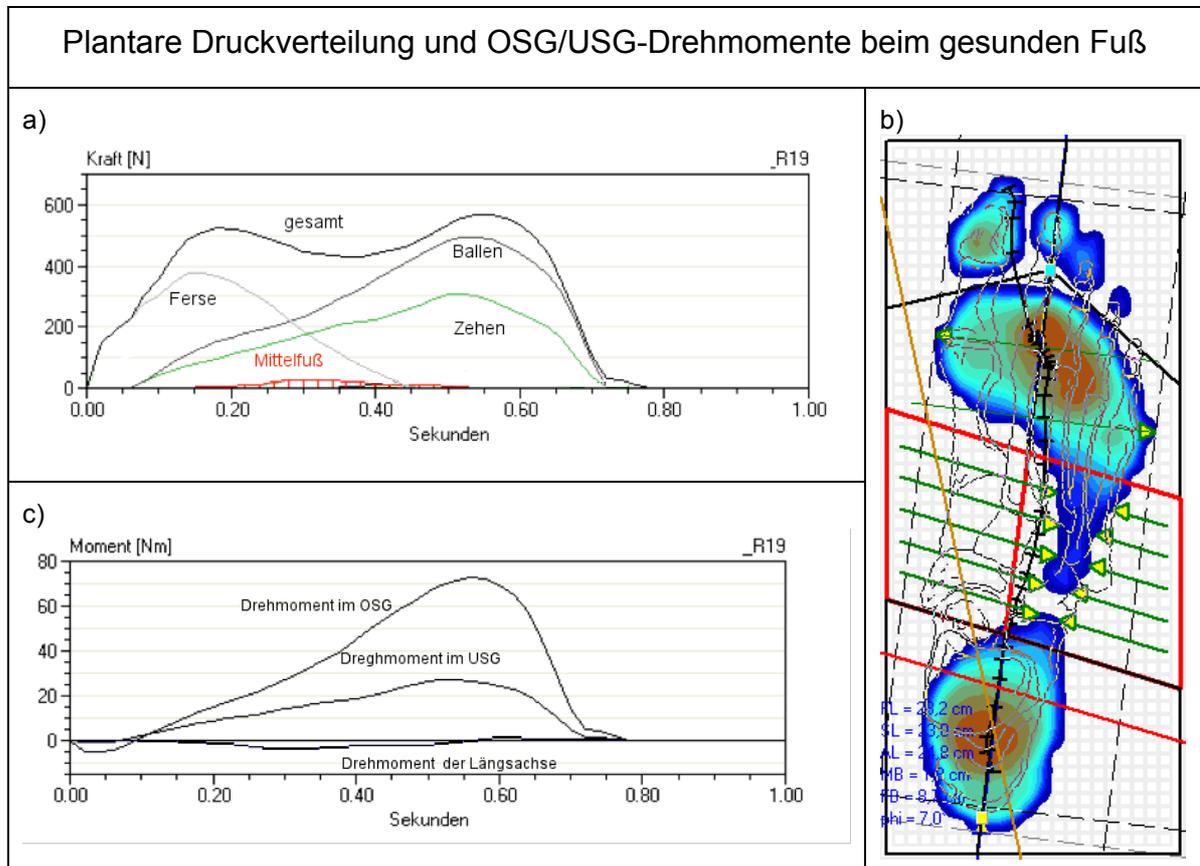


Abbildung 11a) zeigt die Messkurven der einzelnen Kräfte, die auf den gesamten Fuß, die Ferse, den Mittel- und Vorfuß über die Zeit des Abrollens wirken. Die Fläche unter den Kurven beschreibt ein Kraft-Zeit-Integral und gibt den auf den Fuß wirkenden Kraftstoß (= Last) an. b) gibt das entsprechende Druckmaximalbild (= Pedogramm) mit Auswertemaske des rechten Fußes an. c) stellt den Kurvenverlauf von Drehmomenten im oberen und unteren Sprunggelenk sowie entlang der Fußlängsachse dar.

2.3.2 MRT-Untersuchungen bei Patienten mit Klumpfuß und gesunden Probanden

Zur genaueren Untersuchung der Pathologie des Klumpfußes, insbesondere der Klumpfußwade, wurden bei 10 der Kinder mit Klumpfuß (6 beidseitige und 4 unilaterale Klumpfüße) MRT-Bilder des Unterschenkels angefertigt. Das Durchschnittsalter betrug zum Zeitpunkt der Messung 11 Jahre. Für einen möglichen Vergleich wurden bei 2 gesunden Kindern (9 und 14 Jahre) MRT-Scans angefertigt. Zusammen mit der gesunden Gegenseite der Kinder mit unilateralen Klumpfüßen konnten 8 gesunde Füße als Kontrollkollektiv zusammengefasst werden.

Anhand der MRT Bilder wurden die Volumina der Muskeln am Unterschenkel sowie die Länge der Achillessehne bestimmt. Es erfolgte ein interindividueller Vergleich zwischen krank und gesund sowie ein intraindividueller Vergleich zwischen Klumpfuß und gesunder Gegenseite bei Patienten mit unilateralem Klumpfuß. Um Einblicke in die funktionale Pathologie des Klumpfußes zu erhalten, wurden die Ergebnisse der Muskelvolumenmessung mit den Ergebnissen der Pedobarographie in Zusammenhang gebracht.

Die Untersuchung mit einem Magnetresonanztomographen (MRT) wurde als bildgebendes Verfahren ausgewählt, da es keine Nebenwirkung für den Patienten aufweist. Es sind weder schädigende Strahlungen vorhanden, noch sind invasive Maßnahmen, wie Blutabnahmen, Kontrastmittelapplikationen oder Medikamente für die Untersuchung erforderlich. Die Bildgebung ermöglicht eine gute Unterscheidung der unterschiedlichen Gewebe am Bein. Durch das Schichtaufnahmeverfahren wird es möglich, den gesamten Unterschenkel in 3 Dimensionen zu rekonstruieren.

2.3.2.1 Bildaufnahmen im MRT

Die MRT-Untersuchungen erfolgten bei den Patienten in Rücklage, die Beine wurden mit einem Kissen stabilisiert, um störende Bewegungen auf ein Minimum zu reduzieren. Die Aufnahmen erfolgten von kurz oberhalb des Knies bis zum distalen Zehenende. Allen Kindern war es möglich, für die Zeit der Untersuchung, von ca. 10 Minuten regungslos auf der Liege des Tomographen liegenzubleiben.

Die Messungen wurden mit einem B. V.-Tomographen der Firma Philips Medical Systems Nederland durchgeführt. Für eine optimale Weichteilkontrastierung wurde

eine T1-Gewichtung gewählt, um Knochen-, Fett- und Muskelgewebe kontrastreich darzustellen. Bei einem Scan wurden Bilder mit einer Schichtdicke von 0,3 mm und einem Bilderabstand von 4,4 mm sowie einer Auflösung von 0,83 mm x 0,83 mm Bildpunktgröße aufgenommen. Die Bildgröße entspricht 512 x 512 Pixel mit 256 Graustufen. Abgespeichert werden die Bilder in einem in der Medizin standardisierten DICOM-Format (Digital Imaging and Communication in Medicine). Dieses Format wird auch für Ultraschall-, CT- und Röntgenbilder verwendet.

2.3.2.2 *Muskelsegmentierung und Volumenbestimmung*

Die Muskelsegmentierung und Volumenbestimmung erfolgte mit einer speziell programmierten Software am PC. Die Benutzeroberfläche ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Software ermöglicht es in den einzelnen Schnittbildern die Querschnittflächen der Muskeln zu berechnen und anschließend die Volumina der Muskeln zu bestimmen. Dabei wird die Summe aller Schnittbilder minus 1 mit dem Bilderabstand (4,4 mm) multipliziert. Die Erkennung der unterschiedlichen Gewebe und der einzelnen Muskeln konnte nicht automatisiert werden. Es war erforderlich, mit Splines die einzelnen Muskeln manuell zu kennzeichnen. Die Splines definieren mit 12 Punkten die Querschnittsfläche eines Muskels. Dazu wurden die Punkte manuell um einen Muskelquerschnitt positioniert. Die Splines wurden auf diese Weise um jeden Muskel in jedem 2. Schnittbild angepasst. Die nicht erfassten Schnitte wurden durch Interpolation der darüber und darunter liegenden Schnitte ermittelt. Es ist möglich den Spline aus dem vorangegangenen Bild erneut zu laden und an den zu betrachtenden Muskel anzupassen.

Die genaue Anpassung der Splines gestaltete sich mitunter schwierig. Besonders bei kleinen Muskeln war es nicht möglich, die einzelnen Muskeln exakt zu differenzieren. Aus diesem Grund mussten der M. extensor digitorum longus und der M. extensor hallucis longus sowie der M. peroneus longus und der M. peroneus brevis jeweils zusammen gefasst werden.

Die Volumina von M. soleus, M. gastrocnemius, M. tibialis posterior, M. flexor digitorum longus, M. flexor hallucis longus, M. tibialis anterior und M. popliteus konnten einzeln bestimmt werden. Der M. plantaris longus wurde aufgrund seines besonders kleinen Volumens nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 13).

Die Achillessehne wurde in ihrer Länge vom Übergang des Muskels in Sehne bis zum Ansatzpunkt am Calcaneus bestimmt.

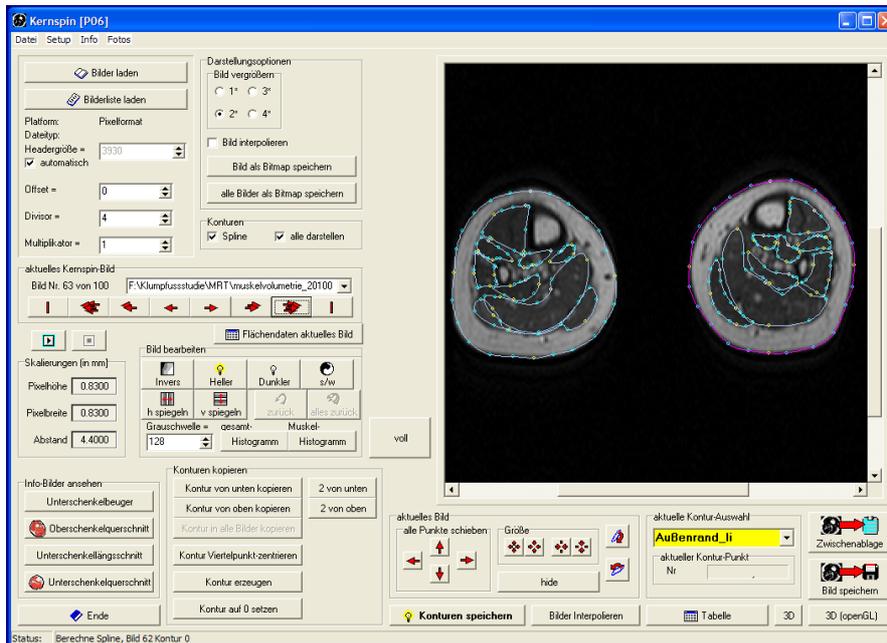


Abbildung 12 zeigt die Benutzeroberfläche der Software zur Bestimmung der Muskelvolumina. Die Splines sind auf den MRT-Schnittbildern bereits abgebildet, ihre Form und Größe werden durch 24 Punkte definiert. Diese lassen sich manuell positionieren, um den Splines genau an den Muskel anzupassen.

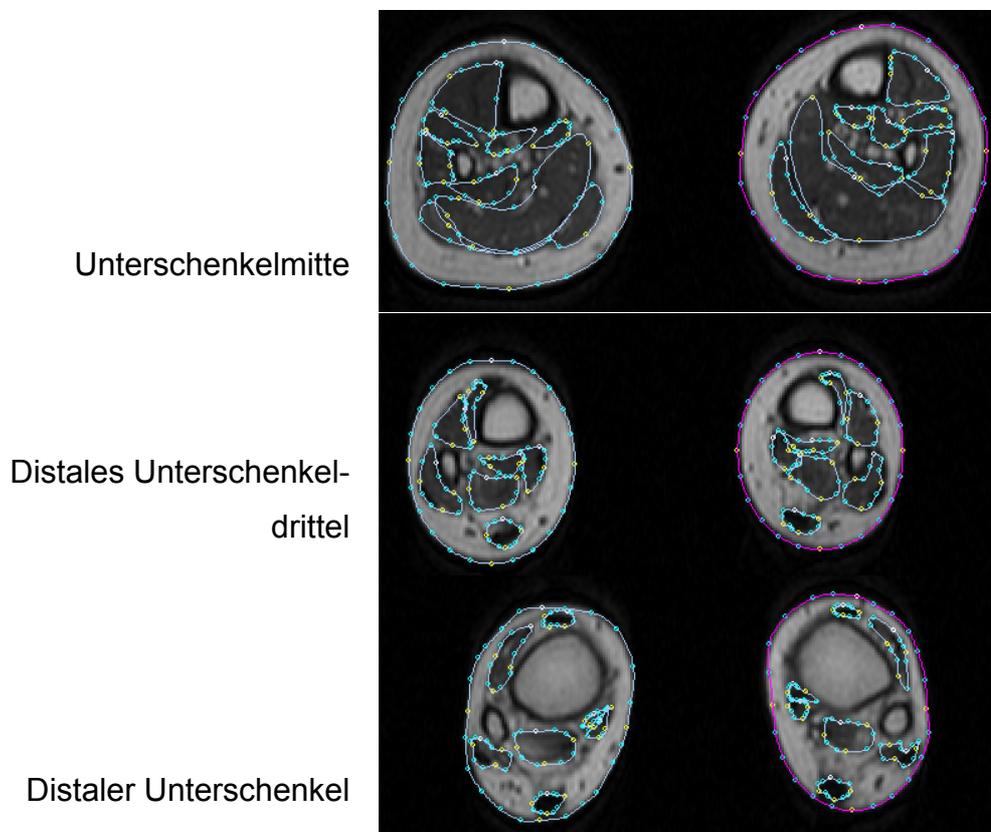


Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Muskelsegmentierung in MRT-Querschnitten eines Unterschenkels.

2.4 Statistik

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte in der vorliegenden Arbeit deskriptiv anhand von Korrelationen verschiedener Parameter. Es wurden Trends in der Belastung des Fußes während des Wachstums aufgezeigt und individuelle Trends von Patienten mit Klumpfüßen mit einem Kontrollkollektiv verglichen. Des Weiteren erfolgte intraindividuelle Vergleich zwischen Klumpfuß und gesunder Gegenseite bei Patienten mit unilateralen Klumpfüßen.

Für das gesunde Kontrollkollektiv wurden Mittelwerte und Standardabweichung der Parameter für alle Altersgruppen im Abstand von einem Jahr (Altersbereich von 3 bis 15 Jahren) bestimmt. Eine Normalverteilung der Messparameter wurde angenommen. Ein Referenzbereich wurde im Abstand von ± 2 Standardabweichungen zum mittleren Trend gewählt. Die Kurven des mittleren Trends und des Referenzbereichs wurden logarithmisch glättend interpoliert. Damit liegen 95,6% aller Messwerte des Kontrollkollektives innerhalb des Referenzbereichs, 4,4% gesunden Füße würden fälschlicherweise als abweichend bezüglich des jeweiligen Parameters interpretiert.

Aufgrund der komplexen Korrelationsstruktur und Abhängigkeiten der Parameter untereinander wurden keine gruppenvergleichenden statistischen Tests durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf der altersabhängigen Veränderung der plantaren Druckverteilung während des Wachstums von Kindern. Eine Gruppierung wäre deshalb bestenfalls über 2 oder 3 Jahre zulässig und für statistische Gruppenvergleiche wären deshalb unrealistisch viele Probanden erforderlich.

Die statistische Auswertung und Darstellung der Daten erfolgte mit Microsoft Excel und wurde mit dem Institut für Medizinische Statistik und Epidemiologie der TU-München (IMSE) abgestimmt.

3 Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit konnten charakteristische Veränderungen der plantaren Druckverteilung für den Klumpfuß im Vergleich zu einer Kontrollgruppe gezeigt werden. Es erfolgte eine Einteilung der operierten Klumpfüße nach ihrer aktuell individuell dominierenden Teilkomponente des Klumpfußes. Eine Besonderheit stellt der erfasste Langzeitverlauf in der Pedobarographie von 4 Kindern mit Klumpfüßen über einen Zeitraum von bis zu 9,8 Jahren dar. Um die funktionale Pathologie des Klumpfußes zu beschreiben, wurden Muskelvolumina am Unterschenkel und die Achillessehnenlänge im MRT bestimmt und mit Ergebnissen der plantarer Druckverteilung sowie Veränderungen der Kraftentwicklung im oberen und unteren Sprunggelenk korreliert.

3.1 Altersabhängige Veränderungen des Kontrollkollektivs in der Pedobarographie

Mit der Pedobarographie lässt sich das differenzierte Abrollen sowie das Fehlbelasten des Fußes sehr genau darstellen. Um Abweichungen zur Norm erkennen und auch Fehlstellungen charakterisieren, systematisieren und quantifizieren zu können, ist es wichtig das Verhalten von gesunden Füßen in der Pedobarographie zu studieren.

In der Analyse einer physiologischen plantaren Druckverteilung fällt eine typische Lastverteilung an der Fußsohle auf. Als Last wird im Folgenden immer das Integral der Bodenkraft in einem Fußareal über den gesamten Abrollvorgang verstanden. Beim Auftreten und Erstkontakt mit der Ferse entsteht zuerst ein hoher Druck am Kalkaneus. Beim anschließenden Abrollen über den lateralen Fußrand verteilt sich der Druck auf die Ferse und den Mittelfuß. Schließlich verlagert sich das Gewicht auf den Vorfuß und beim Abstoßen vom Boden entsteht ein Druckmaximum am medialen Fußballen und der Großzehe. Die sich während des Abrollens darstellende Ganglinie ist moderat nach lateral gekrümmt.

Im Kinder- und Jugendalter erfährt der Fuß während des Wachstums eine dynamische Entwicklung in der Fußbelastung und es können altersabhängige Änderungen der plantaren Druckverteilung gezeigt werden.

Der kindliche Fuß eines 3-Jährigen zeigt einen altersentsprechenden Plattfuß, der durch ein persistierendes Fettpolster hervorgerufen wird. Mit zunehmender Entwicklung wird eine physiologische Längs- und Querwölbung der Fußstruktur sichtbar und der Fuß richtet sich auf. Die Mittelfußlast verringert sich entsprechend, umgekehrt steigt die Belastung am Vorfuß entsprechend an. Die Fersenbelastung hingegen bleibt konstant in der Tendenz diskret fallend. zeigt exemplarische Pedogramme des Kontrollkollektivs im Alter zwischen 3 und 15 Jahren.

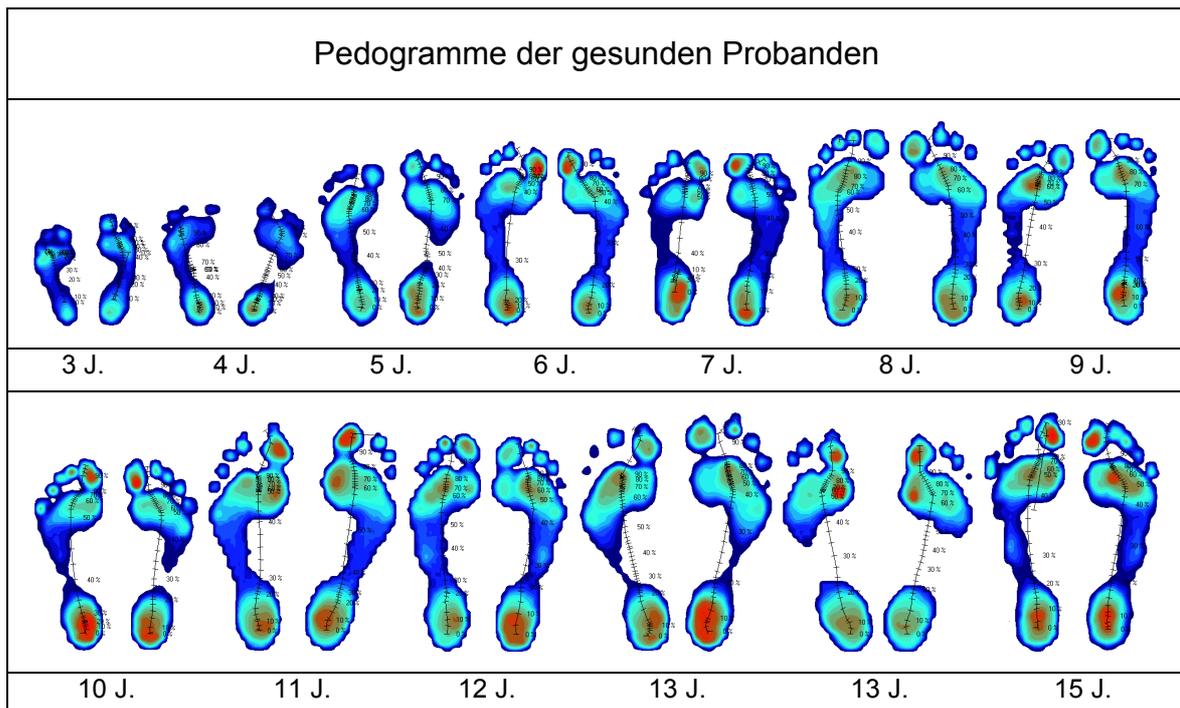


Abbildung 14 stellt exemplarische Pedogramme des Kontrollkollektivs im Alter zwischen 3 und 15 Jahren dar.

Die Beschreibung der Entwicklung der plantaren Druckverteilung von 38 gesunden Kindern wird in Abbildung 15 anhand von Lastanteilen der einzelnen Teilareale der Fußsohle und der Bodenkontaktzeit der Ferse vorgenommen. Dabei werden Durchschnittswerte ermittelt und entsprechende Trendlinien sowie Referenzbereiche im Abstand der zweifachen Standardabweichung oberhalb und unterhalb zum Mittelwert graphisch dargestellt.

Der Fersenlastanteil fällt im Trend nur leicht von 32% im Alter von 3 Jahren auf ein Niveau von 28% im Alter von 15 Jahre. Die Mittelfußbelastung reduziert sich in gleichem Zeitraum von anfangs 9% auf ein Minimum von 3%, während die Belastung am Vorfuß von 59% auf 70% ansteigt. Der Lastanteil der lateralen Fußhälfte fällt von 56% auf 52% ab. Die Bodenkontaktzeit der Ferse beträgt mit 3 Jahren

57% der Gesamtbodenkontaktzeit des Fußes, mit 15 Jahren beträgt sie 46%. Bei kleinen Kindern lassen sich große Unterschiede in der Belastung des Fußes feststellen, die Messergebnisse streuen sehr breit um den Mittelwert. Ursachen hierfür können einerseits die unterschiedliche Motivation und Mitarbeit der Kinder sein oder andererseits könnte es Folge einer unterschiedlichen zeitlichen Entwicklung der anatomischen Strukturen sowie des lokomotorischen Systems sein. Mit dem Älterwerden entwickeln die Kinder ein immer stabileres und koordinierteres Gangbild. Die Streuung reduziert sich und die individuellen plantaren Druckverteilungen gleichen sich an. Dieser Trend geht nahtlos über in die typische Druckverteilung von Erwachsenen.

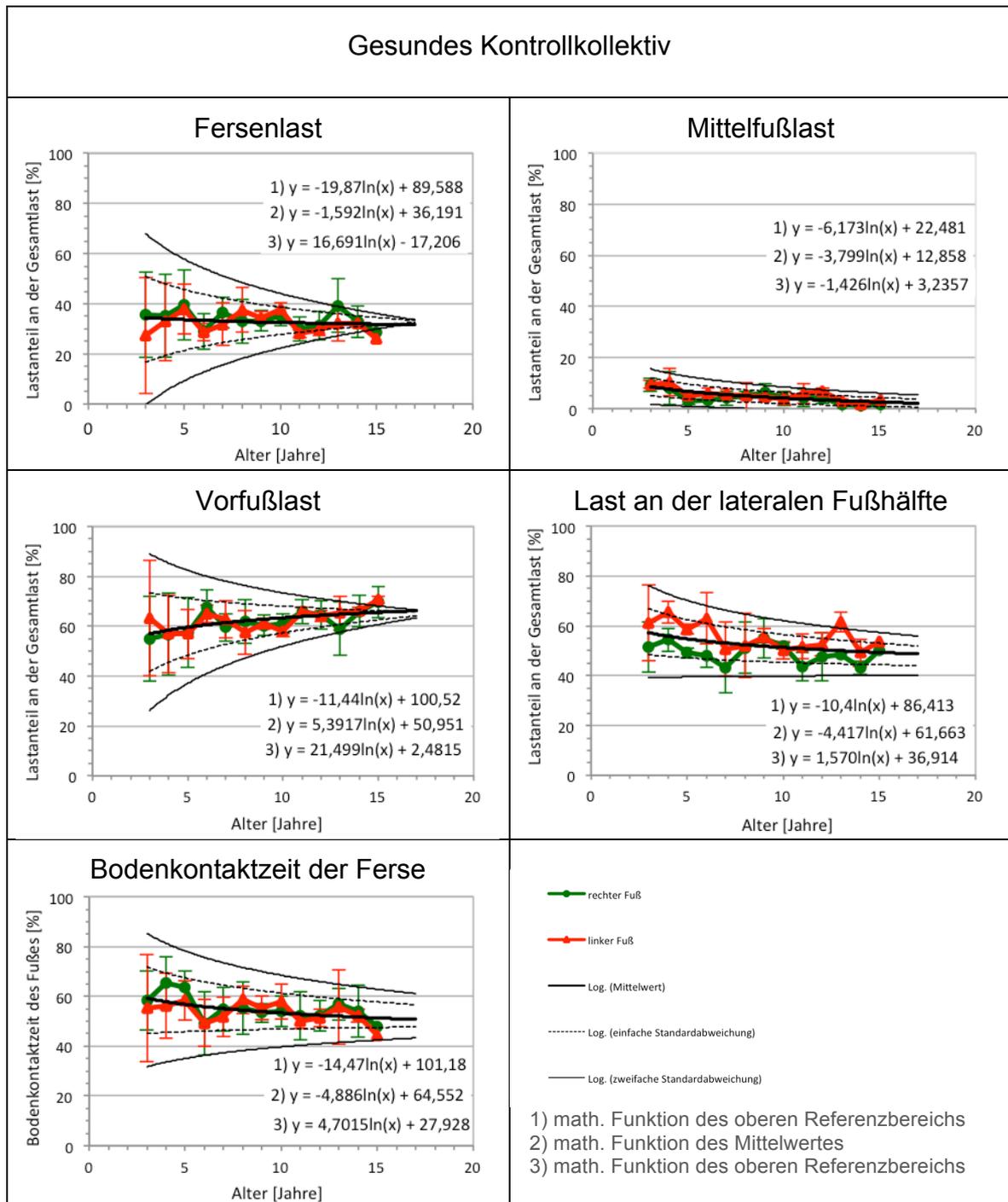


Abbildung 15 zeigt die Entwicklung der plantaren Druckverteilung anhand des Kontrollkollektivs mit 38 Kindern. Die einzelnen Diagramme stellen einzelne Teilareale der Fußsohle, Ferse, Mittelfuß, Vorfuß, laterale Fußhälfte sowie die Bodenkontaktzeit der Ferse dar. Die in den einzelnen Teilbereichen gemessenen Werte sind über die Anzahl der untersuchten Kinder gleichen Alters gemittelt. Der linke Fuß ist rot und der rechte grün aufgetragen. Die mittlere schwarze Linie gibt den Trend der Durchschnittswerte von rechtem und linkem Fuß an. Die gestrichelten Kurven zeigen den Trend der dazugehörigen einfachen Standardabweichungen und die durchgezogenen Kurven zeigen den Trend der zweifachen Standardabweichung oberhalb und unterhalb der Mittelwerte. Sie markieren einen Referenzbereich in dem 95,6% der Füße des Kontrollkollektivs erfasst sind. Die Grenzwerte können für ein beliebiges Alter, bis einschließlich 15 Jahre, mit Hilfe der angegebenen mathematischen Funktionen berechnet werden.

3.2 Typische Lastverteilung der operierten Klumpfüße in der Pedobarographie

In der vorliegenden Studie konnten typische plantare Druckverteilungsmuster des Klumpfußes in der Pedobarographie herausgearbeitet werden. Im Allgemeinen ist die Bodenkontaktzeit der Ferse verkürzt und es wird vermehrt über den lateralen Fußrand abgerollt. Die Ganglinie hat sich im Gegensatz zum Gesunden deutlich nach lateral verlagert, dabei entstehen erhöhte Lastenanteile über dem lateralen Fußrand. Bei den Klumpfüßen der untersuchten Patienten konnten im Einzelnen maximale Lastanteile über dem Mittelfuß von bis zu 45% gemessen werden.

Abbildung 16 zeigt exemplarische Pedogramme der 12 untersuchten Kinder mit Klumpfüßen zum Zeitpunkt der letzten Messung. In der überwiegenden Zahl der Pedogramme ist eine Verbreiterung des Mittelfußareals beim Klumpfuß zu erkennen, beispielsweise zeigen die Pedogramme 8, 17 und 20 einen deutlichen Abdruck des Os cuboideum mit Druckwerten bis zu 31 N/cm^2 am lateralen Fußrand. Eine besonders hohe Belastung der lateralen Fußhälfte zeigt sich zudem in einer stark nach lateral gekrümmter Ganglinie, die zu hohen Druckwerten, bis zu 65 N/cm^2 am lateralen Fußballen führt. Pedogramme 16, 21 und 22 verdeutlichen dies. Im Pedogramm 22 beginnt die Ganglinie am lateralen Fußballen und führt in Richtung Rückfuß. Dieser Patient setzte den Fuß zu Beginn mit dem Fußballen am Boden auf und erst anschließend kam es zu einem sehr kurzen Bodenkontakt der Ferse. Dieser Patient weist ein Gangmuster im Sinne eines Spitzfußes auf. Ähnlich kurze Bodenkontaktzeiten der Ferse sind in den Pedogrammen 8, 10, 13, 14, 17, 19, und 20 zu sehen, mit dem Unterschied eines regelrechten Erstkontaktes mit der Ferse am Boden. Die Ferse wird aber deutlich zu kurz und vermindert belastet (5 N/cm^2). In der Folge kommt es zu einer Mehrbelastung am Vorfuß über Metatarsaleköpfchen 2 und 3 (56 N/cm^2). Eine Adduktusfehlstellung des Vorfußes lässt sich im Pedogramm an der nach medial reichenden Großzehen erkennen. Dies bildet sich in den Pedogrammen 3, 4, 19 und 20 ab. Ein bestehender Rückfußvarus ließe sich an einem nach lateral gerichteten Belastungsareal der Ferse erkennen, dies ist bei keinem der untersuchten Patienten der Fall. Neben den Teildeformitäten Equino-varus-adductus et supinatus zeigen die Pedogramme 15, 16, 21 und 22 eine Fehlbelastung am Vorfuß im Sinne eines Spreizfußes. Die Metatarsaleköpfchen 2 bis 5 werden mit Druckwerten bis 56 N/cm^2 vermehrt belastet.

In den Pedogrammen 3 und 4 fällt ein Knick-Senkfuß auf. Das Belastungsareal der Ferse ist nach medial verlagert und der Mittelfuß hat vermehrt Bodenkontakt, die Ganglinie ist nach medial gekrümmt. Bei 6 und 11 ist ein Knickfuß zu sehen, ohne ausgeprägte Senkung im Mittelfuß. Die Ferse und der Vorfuß werden medial belastet.

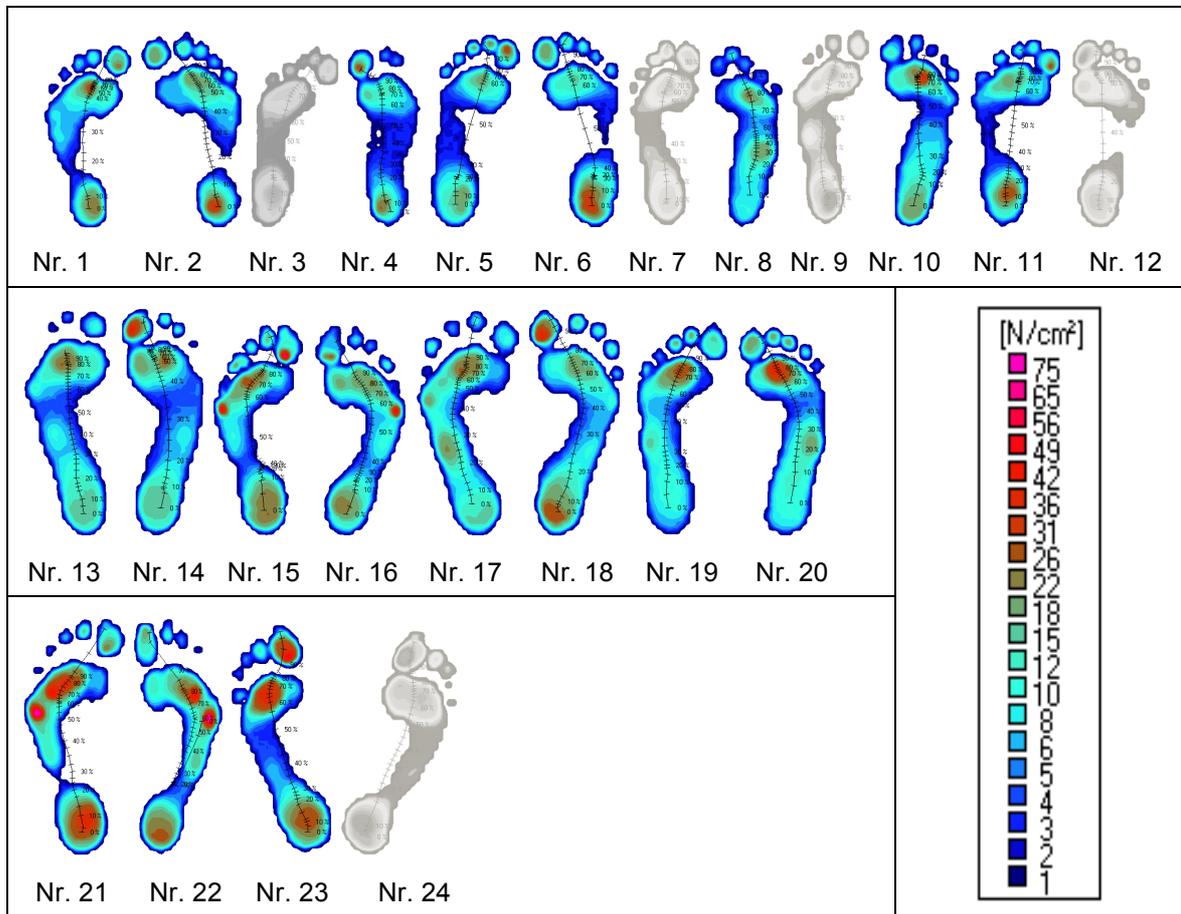


Abbildung 16 zeigt die Pedogramme der 12 Patienten mit insgesamt 19 operierten Klumpfüßen (farbig) und 5 nicht operierten Füßen (grau).

3.3 Charakterisierung der Klumpfüße mittels Pedobarographie im Vergleich zum Kontrollkollektiv

Im Folgenden werden die 19 operierten Klumpfüße an Hand ihrer individuell dominierenden Fehlstellung charakterisiert, dazu wurden die Unterschiede zum Kontrollkollektiv in der plantaren Druckverteilung quantitativ erfasst und graphisch dargestellt.

Die Unterscheidung der einzelnen Fehlstellungen erfolgte mit Hilfe einer standardisierten Auswertung der plantaren Druckverteilung an Hand von einzelnen Teilbereichen der Fußsohle (Ferse, Mittelfuß, Vorfuß, laterale Fußhälfte) und der Bodenkontaktzeit der Ferse. Der Vergleich zum Kontrollkollektiv wird durch einen Referenzbereich im Abstand von 2 Standardabweichungen zum Mittelwert ermöglicht. Die Messergebnisse der Klumpfüße wurden in Abbildung 17 in Relation zum Referenzbereich aufgetragen. Im Ergebnis zeigten 5 der 19 operierten Klumpfüße ein physiologisches Druckverteilungsmuster. Des Weiteren fielen 2 Spitzfüße, 3 Senkfüße sowie 9 Residualklumpfüße auf. Von den gesunden Füßen der Gegenseite bei unilateralen Klumpfüßen zeigten sich 4 physiologische Pedogramme und 1 altersentsprechender Senkfuß (vgl. Abbildung 17).

Die einzelnen dominierenden Fehlstellungen werden im Zusammenspiel der einzelnen Abweichungen zur Norm wie folgt abgeleitet (vgl. Tabelle 6):

Eine *Spitzfußfehlstellung* führt in der Pedobarographie zu einem erhöhten Lastanteil des Vorfußes und einer kürzeren Bodenkontaktdauer der Ferse. 2 Spitzfüße sind in hellgrün farbig hervorgehoben, sie liegen unterhalb des Referenzbereiches der Bodenkontaktzeit (Abbildung 17e), gleichzeitig fällt eine reduzierte Fersenlast um mehr als 2 Standardabweichungen (Abbildung 17a) sowie eine relativ hohe Vorfußlast (Abbildung 17c) auf. Ein verminderter Fersenlastanteil ist ebenfalls bei 5 Residualklumpfüßen als Zeichen der Spitzfußkomponente des Klumpfußes vorhanden.

Bei einem *Senkfuß* reduziert sich die Längswölbung des Fußes und es kommt im Pedogramm zu einer vermehrten Belastung des Mittelfußes (Abbildung 17b). Die Supinationsstellung ist nicht sonderlich ausgeprägt, es kommt entsprechend nicht zu einer Mehrbelastung der lateralen Fußhälfte (Abbildung 17d). Die übrigen Teilsegmente entsprechen der Norm. Dies ist bei 4 Füßen (dunkelgrün) der Fall.

Ein *Residualklumpfuß* zeichnet sich im Pedogramm durch einen erhöhten Lastanteil der gesamten lateralen Fußhälfte aus, die durch eine vermehrte Supinationsstellung und einen Rückfußvarus bedingt ist. In Abbildung 17d liegen 9 Residualklumpfüße (rot) außerhalb des Referenzbereichs der Lastanteile der lateralen Fußhälfte. Diese laterale Fehlbelastung ist ein Alleinstellungsmerkmal für den Residualklumpfuß. Der Mittelfußlastanteil ist ebenfalls, wie beispielsweise beim Senkfuß, pathologisch erhöht (Abbildung 17b). Zudem verbleibt die Tendenz zum Spitzfuß.

Tabelle 6: Einzelcharakteristika des idiopathische Klumpfußes im Pedogramm

Dominierende Fehlstellung eines Klumpfußes nach Operation	Lastverteilung im Pedogramm
Spitzfuß	Erhöhter Vorfußlastanteil Verkürzte Bodenkontaktzeit der Ferse
Senkfuß	Erhöhter Mittelfußlastanteil
Residualklumpfuß	Erhöhter Mittelfußlastanteil Erhöhter Lastanteil der lateralen Fußhälfte

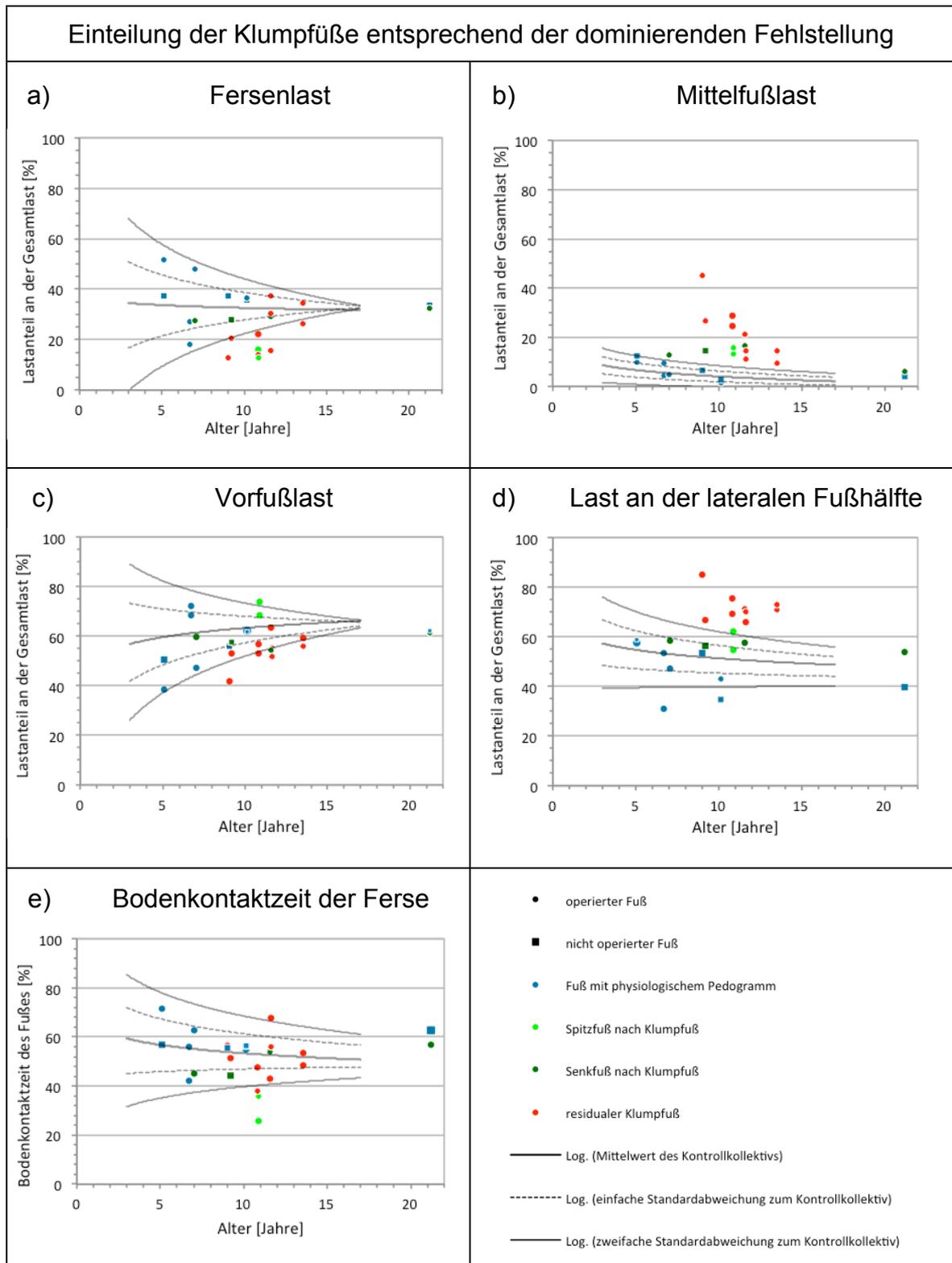


Abbildung 17 zeigt die 19 untersuchten Klumpfüße und 5 nicht operierte Füße der 12 Patienten in Bezug zum Referenzbereichs (= \pm zweifache Standardabweichung zum Mittelwert des Kontrollkollektivs). Dargestellt werden die einzelnen Teilbereiche, Fußsohle, Ferse, Mittelfuß, Vorfuß und laterale Fußhälfte sowie die Bodenkontaktzeit der Ferse. Die Klumpfüße werden entsprechend ihrer dominierenden Fehlstellung eingeteilt und farbig kodiert.

3.4 Langzeitverläufe im Pedogramm

Die individuellen Langzeitverläufe und die Entwicklung des Klumpfußes im Pedogramm werden im Folgenden an 4 Kindern dargestellt. Diese wurden ausgewählt, da hier die längsten Verläufe vorliegen und somit Trends der Fußentwicklung über einen langen Wachstumszeitraum abgebildet werden konnten. 2 der Kinder stellten sich in regelmäßigen Abständen, über einen Zeitraum von 9 Jahren und 2 Kinder über 7 Jahren vor. Bei den restlichen 8 Patienten waren die Verläufe kürzer (siehe Tabelle 3).

3.4.1 Patient 01

Patient 1 (m) wurde im Alter von 9 Monaten der Klumpfuß beidseits nach der Methode nach McKay und Simons und Cincinnati-Zugang operiert. Es erfolgten im Alter von 2 bis 12 Jahren regelmäßig halbjährliche bis jährliche pedobarographische Kontrollen an insgesamt 12 Untersuchungstagen. Der Adduktus und der Rückfußvarus wurden zusätzlich fotografisch dokumentiert. In ist eine Adduktusfehlstellung im Vorfuß zu erkennen, die sich im Verlauf den Fotos nach zu urteilen zu verbessern scheint. In den Pedogrammen zeigt sich jedoch eine Zunahme der medialen Abweichung der Großzehe mit moderat nach lateral gekrümmter Ganglinie im Sinne eines persistierenden Adduktus. Die Stellung des Rückfußes ist nach klinischen Kriterien regelrecht, ohne Varusstellung. Dies wird im Pedogramm durch eine zentrale und symmetrische Belastung der Ferse bestätigt (vgl. Abbildung 18).

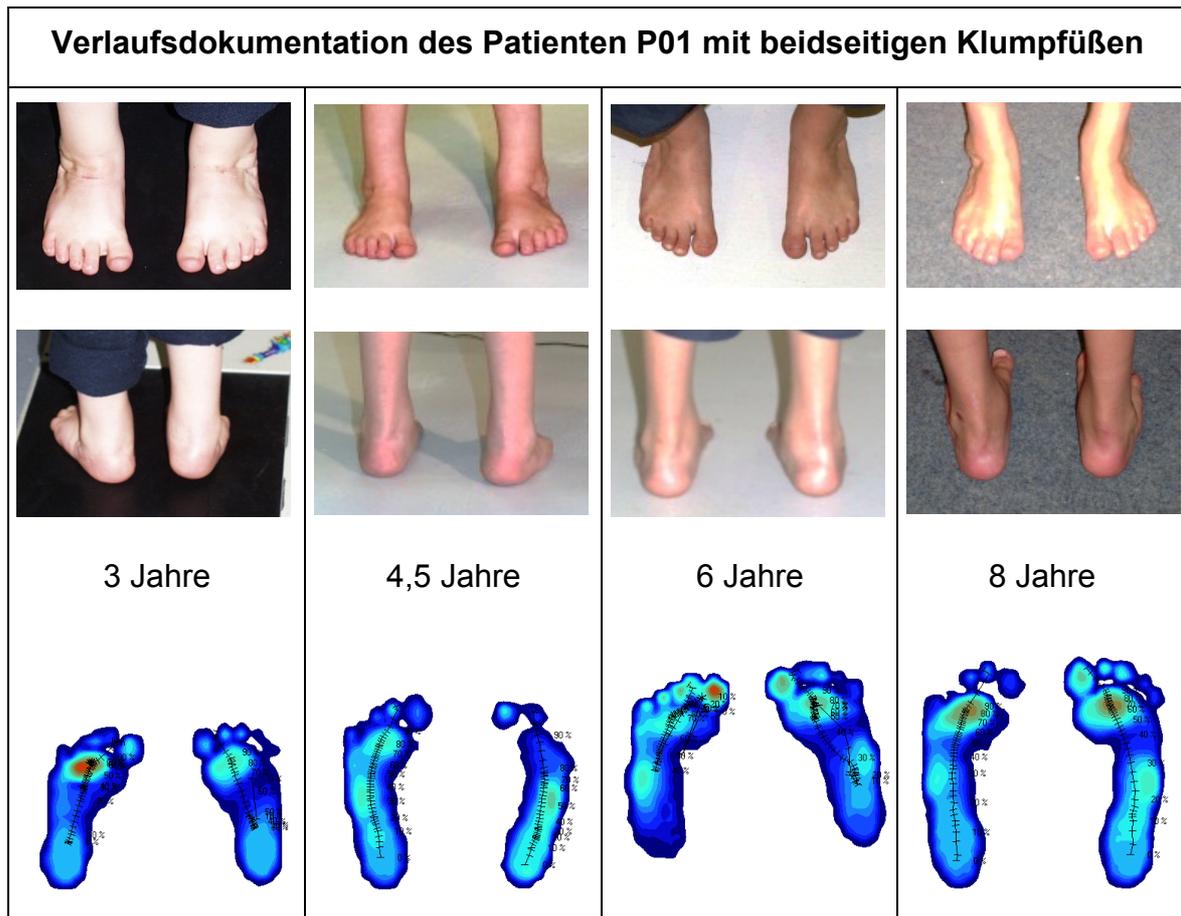


Abbildung 18 zeigt Fotos und Pedogramme des Patienten 01 mit Klumpfuß beidseits, im Alter von 3 J., 4½ J., 6 Jahren und 8 Jahren.

Der Verlauf in der Pedobarographie wird in Abbildung 19 dargestellt. Im Kleinkindalter sind die Kurvenverläufe in allen Diagrammen unregelmäßig, die einzelnen Messwerte streuen um den Mittelwert. Gründe hierfür sind das junge Alter des Patienten sowie die tagesformabhängige Mitarbeit. Ein besseres Mitwirken und koordinierteres Gehen ist mit dem Schulalter zu erwarten. Davor werden die Messungen gestört von zu schnellem Gehen, Hüpfen oder sonstigen Experimentierversuchen im Bewegungsablauf. Dies lässt sich auch in den Kurvenverläufen erkennen, die mit dem 8. Lebensjahr eine regelmäßigere Form annehmen.

Im zeitlichen Verlauf zeigen die Messkurven in Abbildung 19, dass beide Residualklumpfüße des Patienten über die Zeit weitgehend unverändert bleiben. Im Alter zwischen 2 und 12 Jahren sind die Lastanteile der lateralen Fußhälfte und des Mittelfußes konstant außerhalb des Referenzbereichs erhöht. Im Alter von 8 Jahren beginnt eine diskrete Tendenz zum Spitzfuß beidseits. Die Lastanteile am Vor-

fuß steigen an und die Bodenkontaktzeiten der linken und rechten Ferse verkürzen sich.

Die Fersenbelastung in Abbildung 19a bleibt bis zum Alter von 8 Jahren innerhalb des Referenzbereichs. Danach verjüngt sich der Referenzbereich und die Kurven kommen außerhalb davon zu liegen.

Abbildung 19b zeigt eine erhöhte Mittelfußlast am linken und rechten Fuß. Die Messkurven verlaufen mit gering fallender Tendenz entsprechend dem Referenzbereich, verbleiben jedoch stets darüber.

Der Verlauf der Vorfußlast (Abbildung 19c) orientiert sich am Verlauf der Kurve der unteren einfachen Standardabweichung des Kontrollkollektivs. In der Tendenz wird ein steigender Verlauf beobachtet.

Einen ähnlichen Verlauf wie der der Mittelfußlast beschreiben die Kurven der Lastanteile der lateralen Fußhälfte (Abbildung 19d). Die Kurven verlaufen zu Beginn innerhalb des Referenzbereichs. Während der Referenzbereich einen fallenden Verlauf zeigt, bleiben die Messkurven des Patienten gleichbleibend hoch und kommen mit dem 7. Lebensjahr außerhalb oberhalb des Referenzbereichs zu liegen.

Die Bodenkontaktzeit der Ferse (Abbildung 19e) zeigt bis zum 8. Lebensjahr einen konstanten Verlauf, der sich an den Mittelwerten des Kontrollkollektivs orientiert. Anschließend fallen die Kurven darunter, verbleiben jedoch innerhalb des Referenzbereichs.

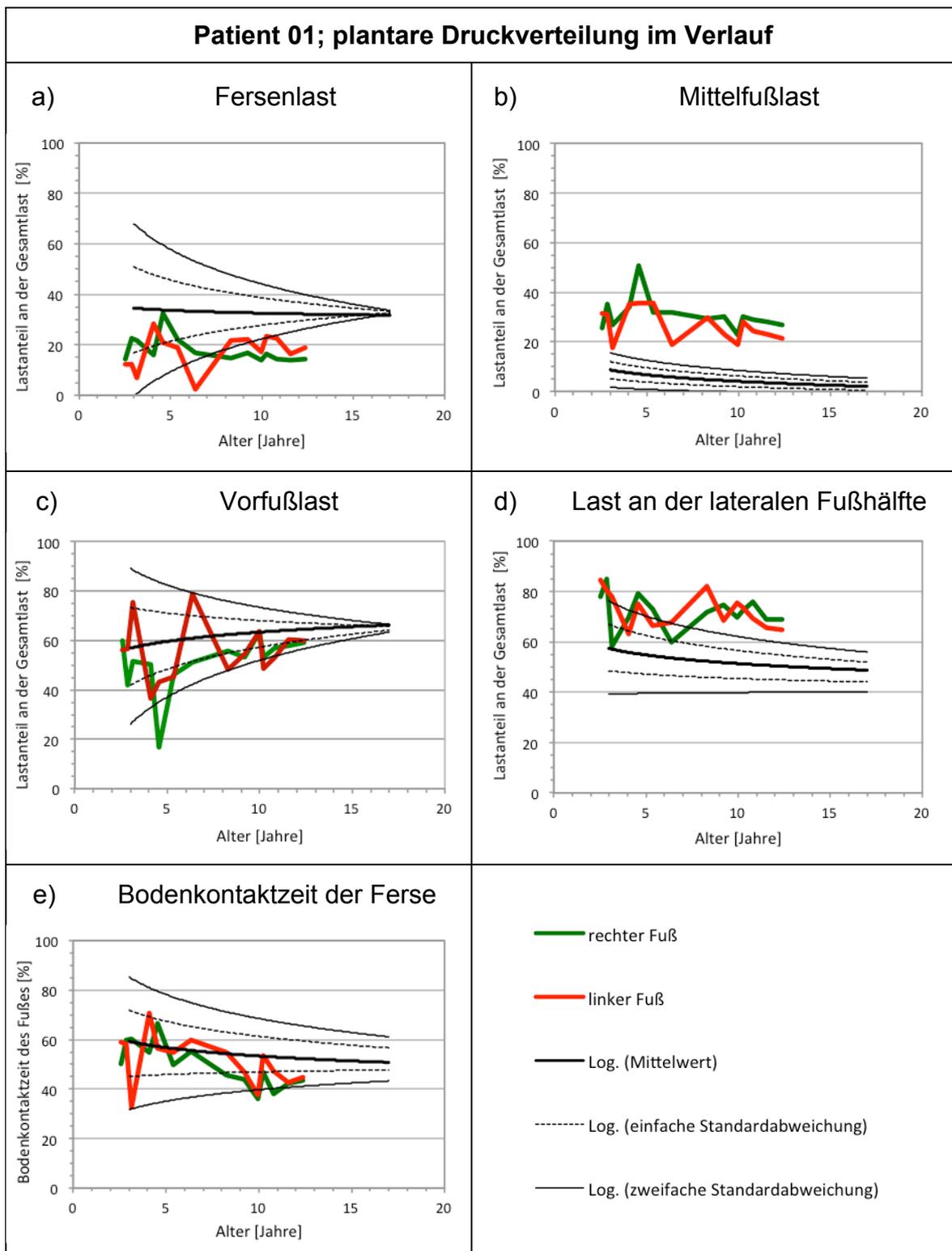


Abbildung 19 zeigt die Entwicklung der plantaren Druckverteilung von Patienten 01 mit beidseitigen Klumpfüßen im Alter von 2 bis 12 Jahren. In den Diagrammen sind die in den Teilbereichen gemessenen Lastanteile an der Fußsohle sowie die Bodenkontaktzeit der Ferse aufgetragen. Der linke Fuß ist rot und der rechte Fuß grün markiert. Die schwarzen Trendlinien stellen die Mittelwerte und den Referenzbereich des Kontrollkollektivs dar.

3.4.2 Patient 02

Patient 02 (m) wurde im Alter von 5 Monaten mit einer dorsalen Kapsulotomie und Achillessehnenverlängerung nach Imhäuser an beiden Füßen operiert. Im Alter von 6 bis 15 Jahren wurden bei dem Patienten 8 pedobarographische Messungen im Verlauf durchgeführt. In ist photographisch ein moderater Adduktus zu erkennen. Die Pedogramme zeigen eine leichte nach medial verlagerte Ganglinie im Vorfuß beidseits. Der Rückfuß befindet sich links in Valgusstellung, rechts in einer physiologischen Position. Im Pedogramm des linken Fußes ist die Fersenbelastung durch den Rückfußvalgus nach medial verlagert (vgl. Abbildung 20).

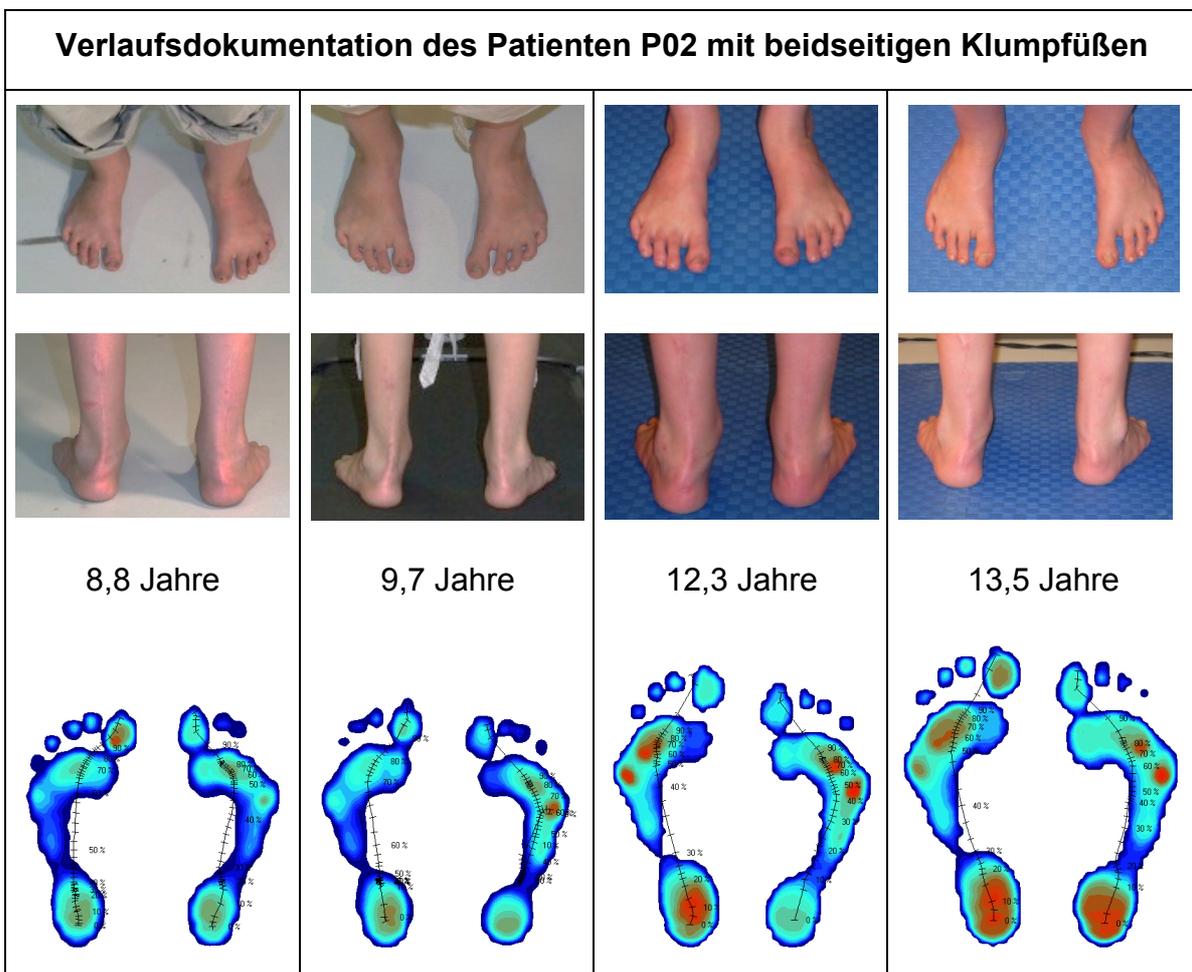


Abbildung 20 zeigt Fotos und Pedogramme des Patienten 02 mit beidseitigen Klumpfüßen, im Alter von 8J., 9J. 12J. und 13 Jahren.

Im Langzeitverlauf zeigen die Messkurven in Abbildung 21 die pedobarographischen Charakteristika eines Residualklumpfußes beidseits, rechts mehr als links. Der rechte Fuß zeigt im Verlauf keine Veränderung seiner Fehlbelastung, eine leichte Spitzfußkomponente bleibt bestehen. Der linke Fuß weist zunächst eine nahezu normale plantare Druckverteilung auf. Im Alter von 11 Jahren verstärkt sich erneut die Residualklumpfußstellung mit erhöhten Lastanteilen außerhalb des Referenzbereichs des Mittelfußes und der lateralen Fußhälfte. Eine Spitzfußstellung links zeigt sich hingegen nicht.

Im Diagramm von Abbildung 21a verlaufen die Messkurven mit Ausnahme der letzten Messung innerhalb des Referenzbereichs. Im Vergleich zwischen linkem und rechtem Fuß zeigt sich rechts insgesamt weniger Fersenbelastung.

In Abbildung 21b sind die Messkurven der Mittelfußlast beider Füße zu Beginn außerhalb des Referenzbereichs und die Lastanteile am rechten Fuß bleiben im Verlauf konstant erhöht. Die Messkurve des linken Fußes weist einen Abwärtstrend auf und kommt im Alter zwischen 7 und 11 Jahren innerhalb des Referenzbereichs zu liegen. Anschließend steigt der Kurvenverlauf an und verlässt den Referenzbereich erneut.

In Abbildung 21c steigen die Kurvenverläufe der Vorfußdruckbelastung zwar an, bleiben jedoch im Referenzbereich. Die Vorfußlast ist am rechten Fuß höher als am linken.

Abbildung 21d zeigt am rechten Fuß eine konstant erhöhte Druckbelastung der lateralen Fußhälfte, die Messkurven liegen außerhalb des Referenzbereichs. Die Messkurve des linken Fußes verläuft ähnlich dem Verlauf der Mittelfußlastanteile. Zu Beginn fällt die Kurve und verbleibt bis zum 11. Lebensjahr innerhalb des Referenzbereichs, um danach deutlich anzusteigen. Es werden gleiche Lastanteile wie am rechten Fuß gemessen.

In Abbildung 21e liegen die Messkurven der Bodenkontaktzeit der Ferse beider Füße innerhalb des Referenzbereichs. Im Vergleich zur rechten Ferse ist die Bodenkontaktzeit links kürzer. Zu Beginn fallen beide Kurven ab und steigen im Alter von 11 Jahren erneut leicht an.

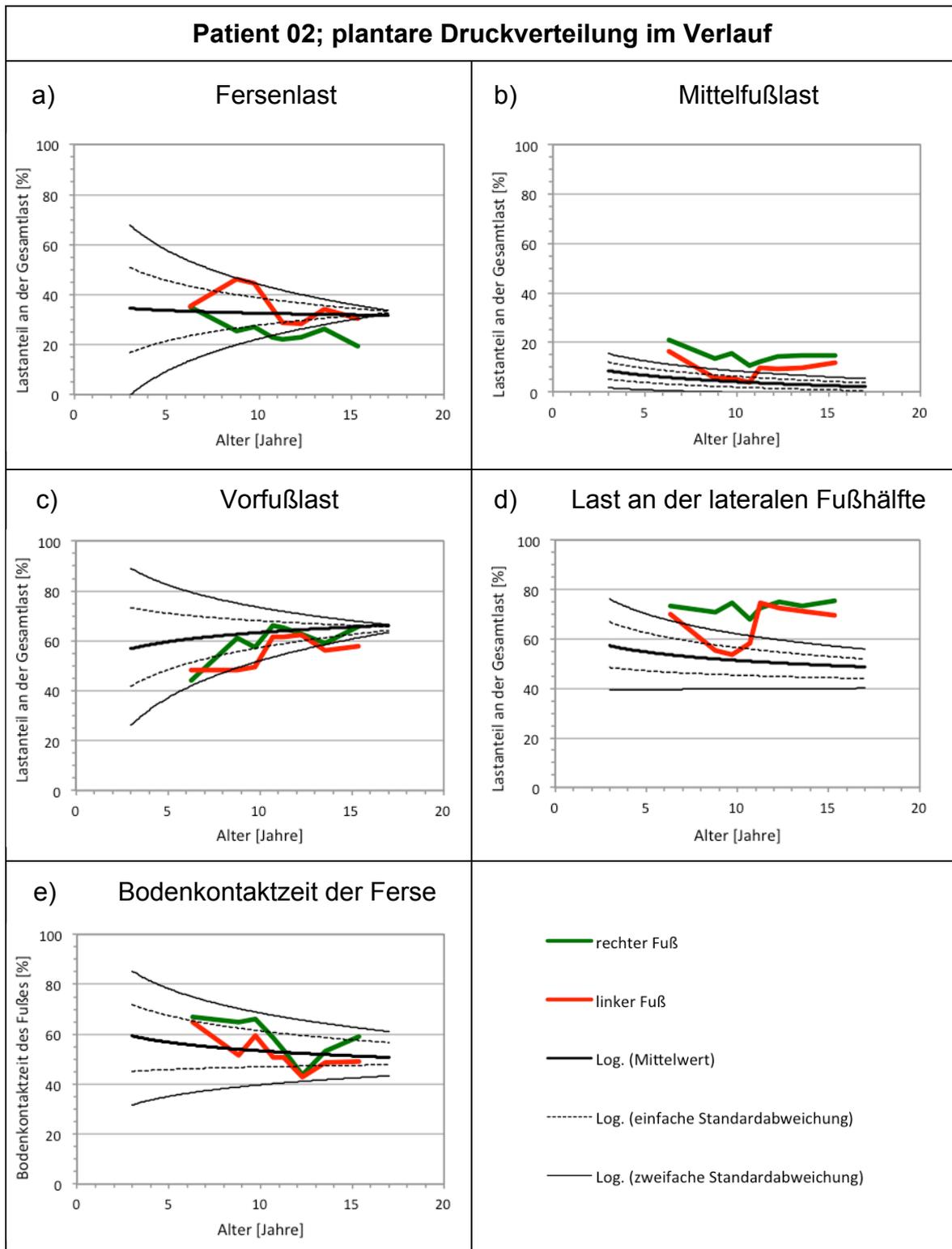


Abbildung 21 zeigt die Entwicklung der plantaren Druckverteilung von Patienten 02, mit beidseitigen Klumpfüßen im Alter von 6 bis 15 Jahren. In den Diagrammen sind die in den Teilbereichen gemessenen Lastanteile an der Fußsohle sowie die Bodenkontaktzeit der Ferse aufgetragen. Der linke Fuß ist rot und der rechte Fuß grün markiert. Die schwarzen Trendlinien stellen die Mittelwerte und den Referenzbereich des Kontrollkollektivs dar.

3.4.3 Patient 04

Patient 04 (m) wurde wegen eines einseitigen Klumpfußes links, im Alter von 9 Monaten nach Mc Kay und Simons mit Cincinnati-Zugang operiert. Die pedobarographischen Nachuntersuchungen des Patienten erfolgten im Alter von 14 bis 21 Jahren an 5 Untersuchungstagen. Am linken Fuß erkennt man einen Rückfußvalgus im Sinne eines Knicksenkfußes. Im Pedogramm hingegen kommt es nicht zu einer Medialisierung der Fersenbelastung. Eine Adduktuskomponente des Vorfußes ist nicht zu erkennen. Die Ganglinie verläuft regelrecht (vgl. Abbildung 22).

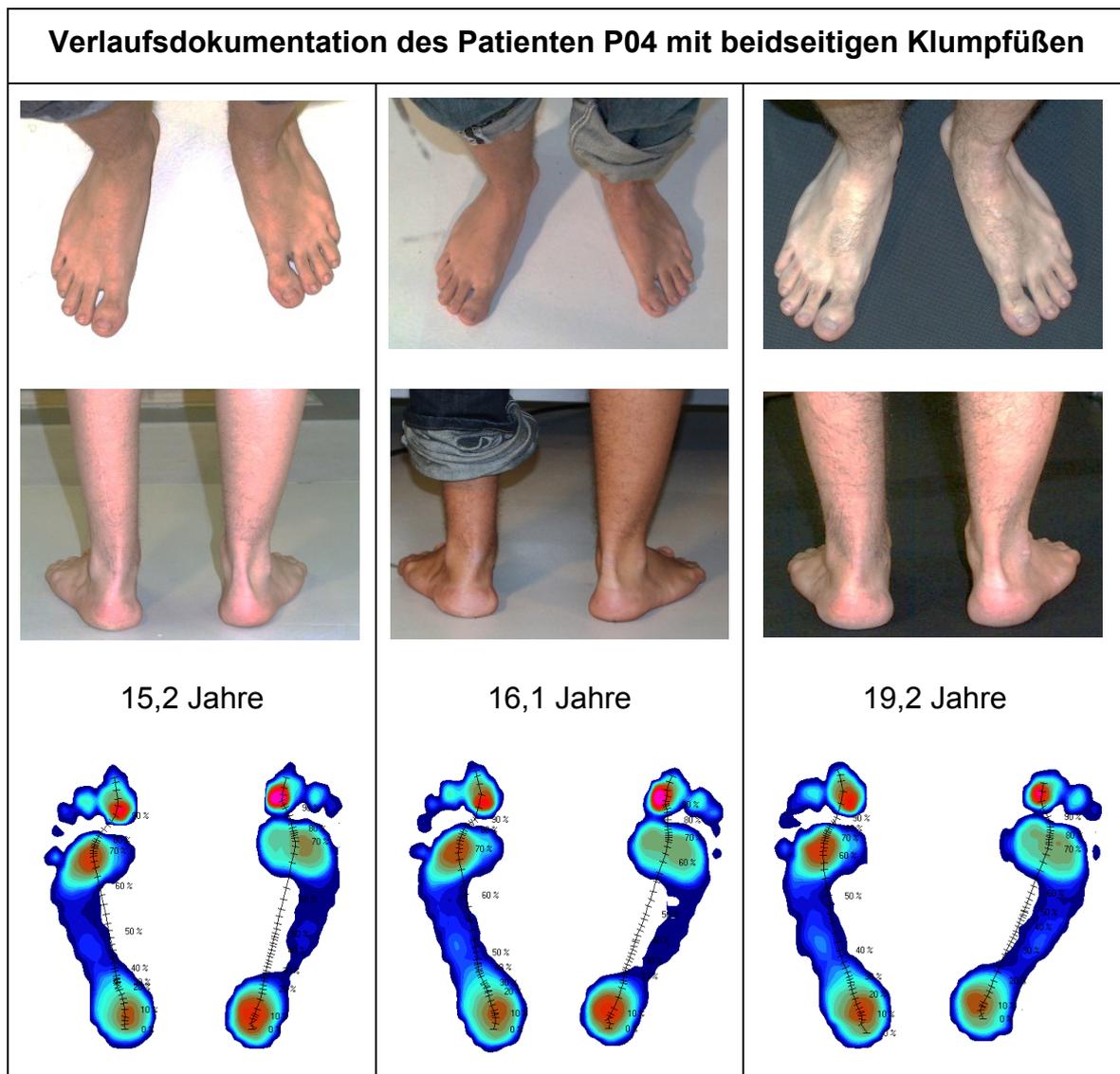


Abbildung 22 zeigt Fotos und Pedogramme des Patienten 04 mit einseitigem Klumpfuß links, im Alter von 15J., 16J. und 19 Jahren.

Im Langzeitverlauf zeigt sich in der Abbildung 23 ein Residualklumpfuß links mit gering erhöhten Lastanteilen des Mittelfußes sowie der lateralen Fußhälfte, der im Verlauf unverändert bleibt. Eine Spitzfußkomponente zeigt sich nicht. Der gesunde rechte Fuß zeigt im Verlauf eine unauffällige plantare Druckverteilung.

Die Messkurven der linken und rechten Fersenbelastung zeigen einen gleichförmigen Trend. Beide zeigen insgesamt etwas zu hohe Lastanteile und sind im Trend fallend, sie nähern sich den Mittelwerten des Kontrollkollektivs an (vgl. Abbildung 23a).

Gleichzeitig weisen die Fersen beidseits eine verlängerte Bodenkontaktzeit auf. Die Messkurven sind ebenfalls im Trend fallend und nähern sich dem Referenzbereich an (vgl. Abbildung 23c).

Gegenläufig zur Ferse verhalten sich die Kurvenverläufe der Vorfußbelastung beidseits, mit anfänglich geringeren Lastanteilen, mit steigendem Trend und im Alter von 21 Jahren mit der Norm entsprechenden Werten. Im Unterschied zwischen links (Klumpfuß) und rechts (gesund) wird der linke Vorfuß geringer belastet (vgl. Abbildung 23c).

Die Messkurven der Lastanteile des Mittelfußes und der lateralen Fußhälfte linksseitig verlaufen entlang der oberen zweifachen Standardabweichung und folgen dem fallenden Trend. Der gesunde rechte Fuß weist keine erhöhten Lastanteile am Mittelfuß oder der lateralen Fußhälfte auf (vgl. Abbildung 23 b & d).

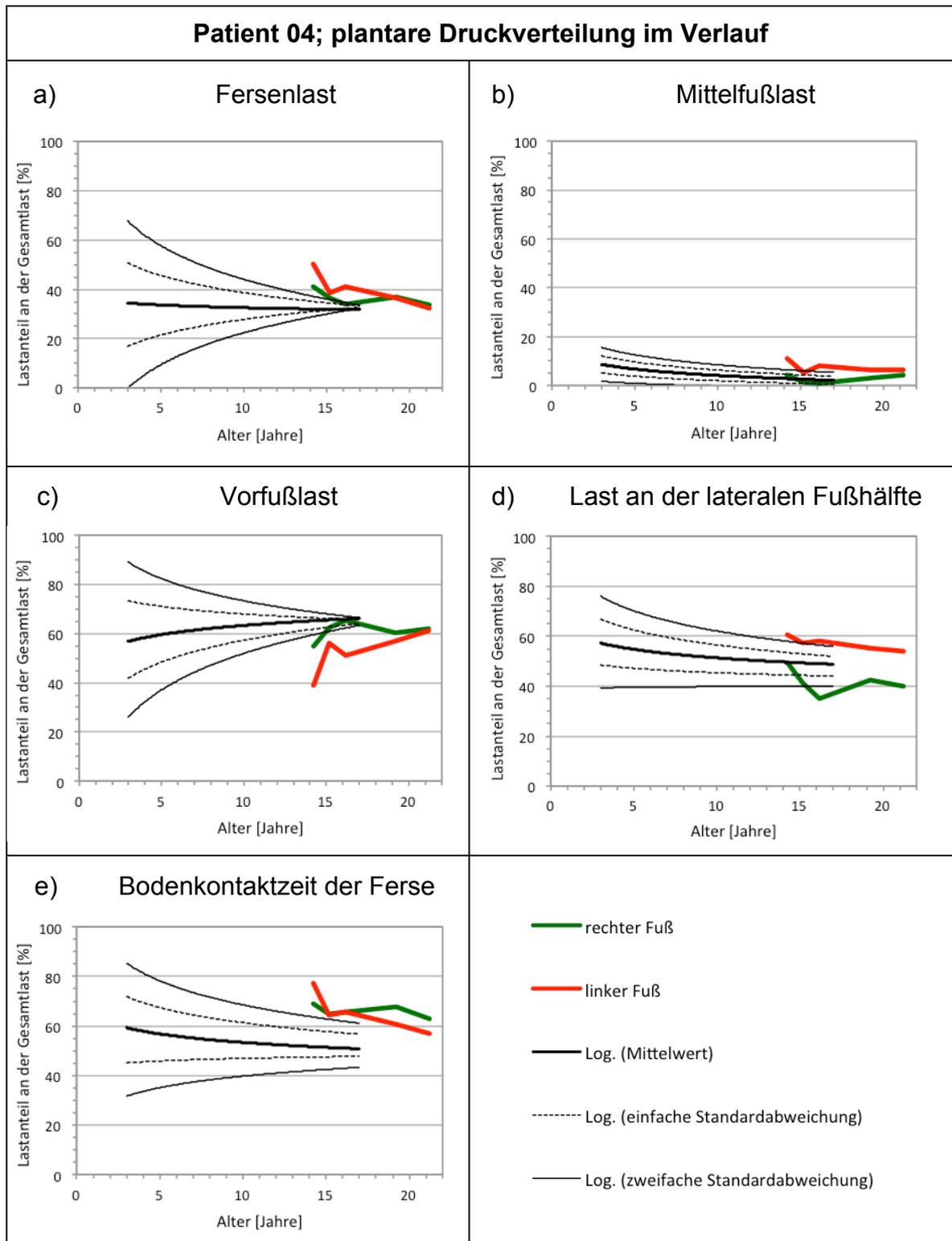


Abbildung 23 zeigt die Entwicklung der plantaren Druckverteilung von Patienten 04, mit einseitigem Klumpfuß links im Alter von 14 bis 21 Jahren. In den Diagrammen sind die in den Teilbereichen gemessenen Lastanteile an der Fußsohle sowie die Bodenkontaktzeit der Ferse aufgetragen. Der linke Fuß ist rot und der rechte Fuß grün markiert. Die schwarzen Trendlinien stellen die Mittelwerte und den Referenzbereich des Kontrollkollektivs dar.

3.4.4 Patient 05

Der Patient P05 (m) wurde im Alter von 4 Monaten beidseits mit einem dorsalen Release nach Imhäuser operiert. Pedobarographische Nachuntersuchungen erfolgten im Alter von 3 bis 11 Jahren an insgesamt 10 Untersuchungstagen. Klinisch fiel eine leichte Adduktusfehlstellung beidseits auf, die sich auch in den Pedogrammen dezent abbildet. In der Betrachtung des Rückfußes zeigt sich eine Valgusstellung der Ferse beidseits, die im Verlauf rechts zunimmt. Pedobarographisch zeigt sich anfangs eine symmetrische Belastung des Fersenareals. Mit 11 Jahren kommt es zu einer nach medial verlagerten Fersenbelastung rechts (vgl. Abbildung 24).

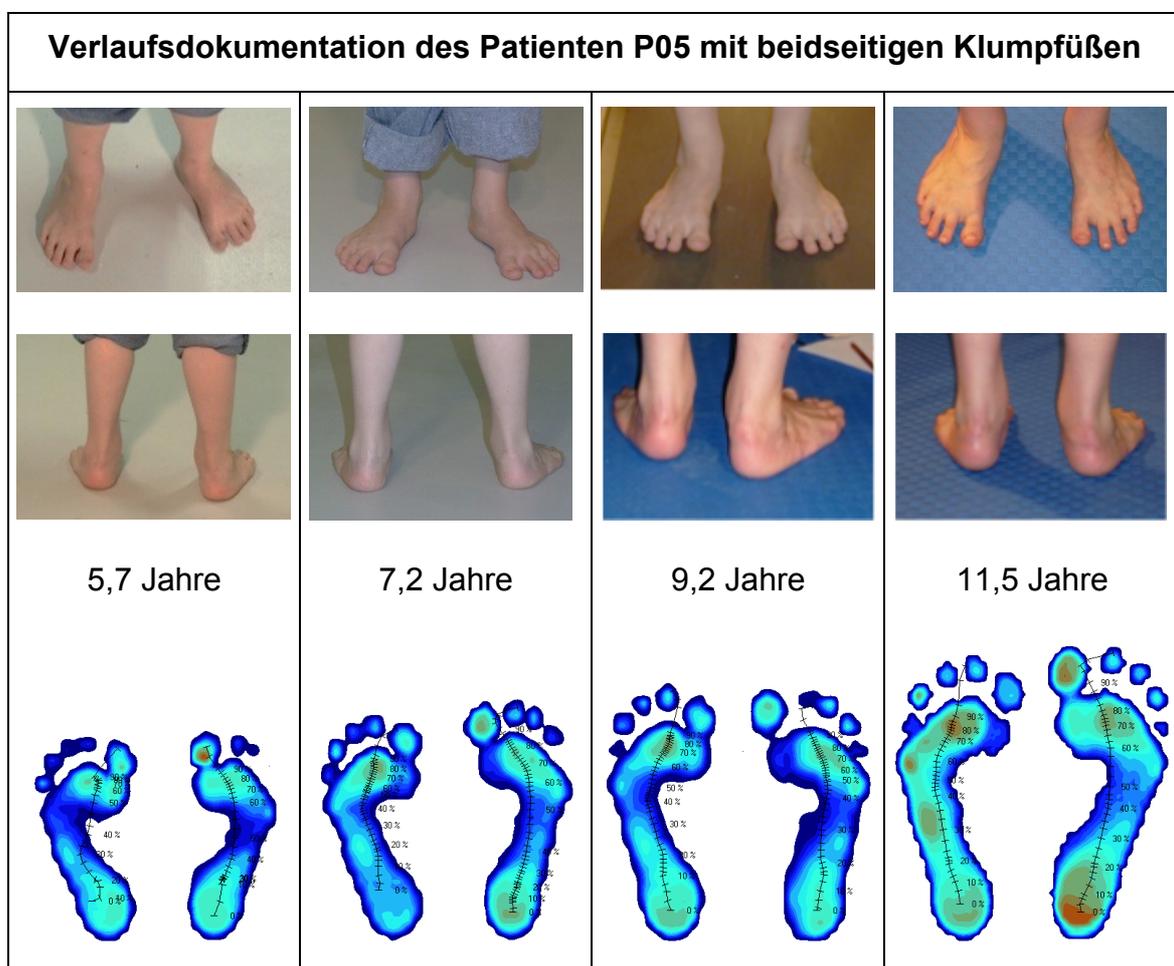


Abbildung 24 zeigt Fotos und Pedogramme des Patienten 05 mit beidseitigen Klumpfüßen, im Alter von 5J., 7J. 9J. und 11 Jahren.

Beide Füße weisen im Alter von 3 Jahren eine sehr ähnliche plantare Druckverteilung auf, jedoch mit unterschiedlicher Entwicklung im weiteren Verlauf. Der rechte Fuß zeigt das Bild eines Senkfußes nach Klumpfuß, ohne zusätzliche Spitzfußstellung, während links, insbesondere ab dem 9. Lebensjahr, die Residualklumpfußstellung mit Spitzfußkomponente zunimmt.

Im Langzeitverlauf zeigen die Messkurven der Mittelfußlast beidseits erhöhte Ausgangswerte, mit einem abfallenden Trend, entsprechend dem Verlauf des Referenzbereichs. Im Alter von 9 Jahren kommt es zu einem sprunghaften Anstieg der Belastung, links mehr als rechts und anschließend gleichbleibend hoher Belastung des Mittelfußes beidseits (vgl. Abbildung 25b).

Die Kurvenverläufe der Belastung der lateralen Fußhälfte von linkem und rechtem Fuß unterscheiden sich deutlich voneinander. Beide Füße weisen zu Beginn eine deutlich erhöhte Belastung auf. Während der rechte Fuß sich dem Mittelwert der Norm annähert steigt die Belastung linksseitig auf Werte oberhalb der zweifachen Standardabweichung an. Am rechten Fuß kommt es schließlich mit 10 Jahren ebenfalls zu einem Anstieg der lateralen Belastung (vgl. Abbildung 25d).

Die Fersenbelastung ist links verringert und beschreibt im Kurvenverlauf eine fallende Tendenz bis unterhalb der zweifachen Standardabweichung zur Norm. Am rechten Fuß beschreibt der Kurvenverlauf einen sehr unregelmäßigen Verlauf, der sich jedoch im Trend innerhalb des Referenzbereiches bewegt (vgl. Abbildung 25a).

Die Bodenkontaktzeit der Ferse liegt im Alter von 3 Jahren im hohen Normbereich und verkürzt sich im Trend zunehmend. Rechtsseitig nähert sich der Kurvenverlauf den Mittelwerten der Norm an und linksseitig verläuft die Messkurve im unteren Teil des Referenzbereiches (vgl. Abbildung 25e).

Die Messkurven der Vorfußbelastung verlaufen rechts entsprechend dem unteren Referenzbereichs mit steigender Tendenz. Links kommt es zu einem steileren Kurvenverlauf als rechts. Der Kurvenverlauf orientiert sich um die Mittelwerte der Norm (vgl. Abbildung 25c).

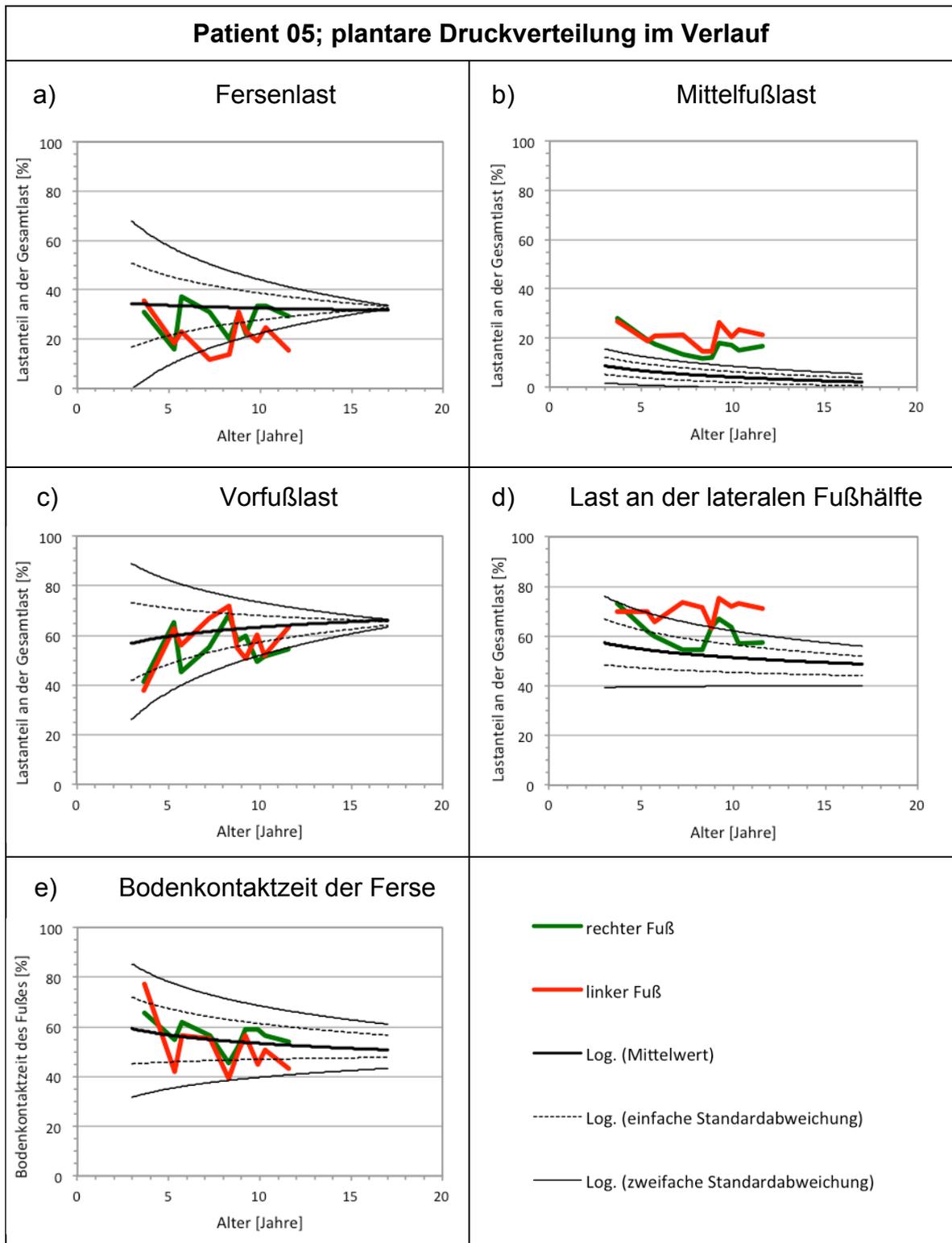


Abbildung 25 zeigt die Entwicklung der plantaren Druckverteilung von Patienten 05, mit beidseitigen Klumpfüßen im Alter von 3 bis 11 Jahren. In den Diagrammen sind die in den Teilbereichen gemessenen Lastanteile an der Fußsohle sowie die Bodenkontaktzeit der Ferse aufgetragen. Der linke Fuß ist rot und der rechte Fuß grün markiert. Die schwarzen Trendlinien stellen die Mittelwerte und den Referenzbereich des Kontrollkollektivs dar.

Zusammenfassend erkennt man in den pedobarographischen Langzeitverläufen der 4 Kinder mit insgesamt 7 operierten Klumpfüßen folgenden Befund:

Die Klumpfüße unterliegen einem ähnlichen Wandel wie gesunde Füße, ausgehend von einem anderen Niveau. Die stets erhöhten Lastanteile am Mittelfuß sowie der lateralen Fußhälfte verringern sich im Verlauf, wenn auch nur wenig. Ebenso nehmen die Fersenlast und Bodenkontaktzeit der Ferse ab, mit gleichzeitigem Anstieg der Vorfußlast. Diese für gesunde Füße physiologische Entwicklung, verstärkt hingegen beim idiopathischen Klumpfuß die Spitzfußstellung.

In der individuellen Entwicklung der 7 operierten Klumpfüße zeigten sich bei 4 Füßen im Verlauf nur mäßige Veränderungen in der Pedobarographie. Bei weiteren 2 Füßen kam es zu einer Zunahme der Klumpfußstellung im Alter von 9 und 11 Jahren. Bei einem Fuß zeigte sich die Zunahme einer Senkfußstellung nach Klumpfuß. Die Spitzfußkomponente des Klumpfußes war bei 4 der 7 operierten Klumpfüße nachweisbar. Bei 3 davon nahm die Spitzfußstellung im Verlauf zu und bei einem verblieb sie unverändert.

Gravierende Veränderungen oder funktionelle Einschränkungen des Fußes, die zu einem Wechsel der Therapiestrategie oder einer erneuten Operation führten wurden nicht beobachtet.

3.5 Muskelvolumen-Messung

Der Klumpfuß weist oft eine typische Klumpfußwade auf; sie ist schwächig und entsprechend im Umfang reduziert. Zur genaueren Untersuchung wurden bei 10 der Patienten mit Klumpfuß ein MRT der Unterschenkel angefertigt. Bei 2 der Kinder mit Klumpfuß war es aus terminlichen Gründen der Patienten nicht möglich, eine MRT-Untersuchung vorzunehmen. Anhand der MRT-Bilder wurden die Volumina der einzelnen Muskeln ausgemessen. Die erlangten Daten tragen in Kombination mit den Ergebnissen aus der Pedobarographie zum besseren Verständnis der Pathologie und Ursache des Klumpfußes bei. Dazu wurde die Unterschenkelmuskulatur bei Klumpfüßen mit der Unterschenkelmuskulatur von Gesunden verglichen. Zur Gruppe der Gesunden zählten 2 gesunde Probanden und 4 Patienten mit einseitigem Klumpfuß. Insgesamt wurden 8 Unterschenkel als gesundes Kontrollkollektiv definiert. Des Weiteren wurde bei Patienten mit unilateralen Klumpfüßen, ein intraindividuelle Vergleich zwischen Klumpfußseite und der gesunden Gegenseite vorgenommen.

3.5.1 Unterschenkelmuskulatur beim Klumpfuß und beim gesunden Fuß

Vergleicht man das Gesamtmuskelvolumen des Unterschenkels von 10 Kindern mit 16 Klumpfüßen mit dem Kontrollkollektiv, 6 Kinder 8 gesunde Füße, zeigt sich in der Analyse der MRT-Bilder ein Defizit des Gesamtvolumens der Unterschenkelmuskulatur pro Körpergewicht (KG) beim Klumpfuß von 23%. Das Gesamtvolumen der untersuchten Klumpfüße beträgt im Mittel $10,9 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$ (Min. = $6,9 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$, Max. = $13,3 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$).

Im Vergleich dazu zeigen die untersuchten gesunden Füße ein größeres Gesamtvolumen der Unterschenkelmuskulatur im Mittel von $14,2 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$ (Min. = $11,8 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$, Max. = $17,0 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$) (vgl. Abbildung 26).

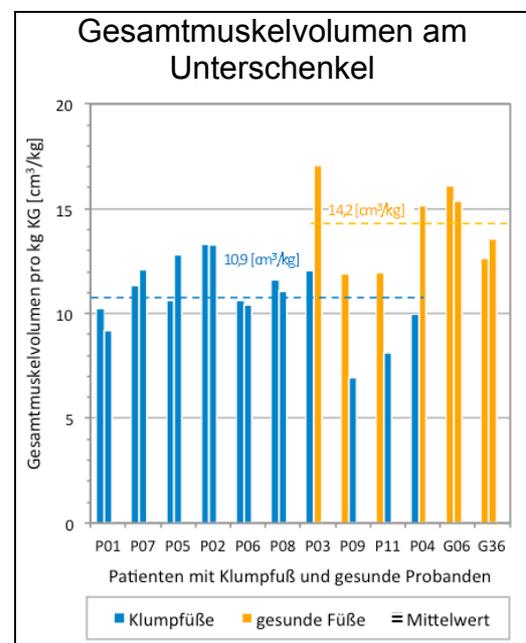


Abbildung 26 zeigt die Muskelvolumina am Unterschenkel bei 6 Kindern mit beidseitigen Klumpfüßen, 4 Kindern mit einseitigem Klumpfuß und 2 Kindern ohne Klumpfuß. Die Volumina werden auf das Körpergewicht normiert. Die gestrichelte Linien markieren die durchschnittlichen Muskelvolumina.

Aufgrund der individuell verschieden ausgeprägten Muskelvolumina, abhängig von der körperlichen Aktivität sowie Veranlagung, wurden die einzelnen Muskelmasse anteilig am Gesamtmuskelvolumen des Unterschenkels bestimmt. Das Kontrollkollektiv weist folgende Mittelwerte für die Muskelvolumenanteile am Gesamtmuskelvolumen des Unterschenkels auf (vgl. Abbildung 27):

M. flexor digitorum longus 3.3%, M. Flexor hallucis longus 5,4%, M. extensor digitorum longus zusammen mit M. extensor hallucis longus 6,8%, die Mm. peronei zusammen 8,8%, M. tibialis anterior 10,3%, M. tibialis posterior 6,4%, M. soleus 29,0%, M gastrocnemius medialis und lateralis 28,3% und M. popliteus 1,5%.

Bei Patienten mit Klumpfuß verteilen sich die Muskelvolumenanteile des Unterschenkels wie folgt:

M. Flexor digitorum longus 3.1%, M. Flexor hallucis longus 5,6%, M. extensor digitorum longus und M. extensor hallucis longus zusammen 5,9%, die Mm. peronei zusammen 10,3%, M. tibialis anterior 9,7%, M. tibialis posterior 5,2%, M. soleus 24,7,0%, M gastrocnemius 33,1% und M. popliteus 2,0%.

Im Vergleich zwischen gesundem Fuß und operiertem idiopathischen Klumpfuß fallen bei Klumpfüßen höhere relative Volumenanteile der Mm. peronei und des M. gastrocnemius sowie verminderte Volumenanteile des M. soleus und M. tibialis posterior auf. Die sonstigen Muskelvolumenanteile unterscheiden sich nur gering.

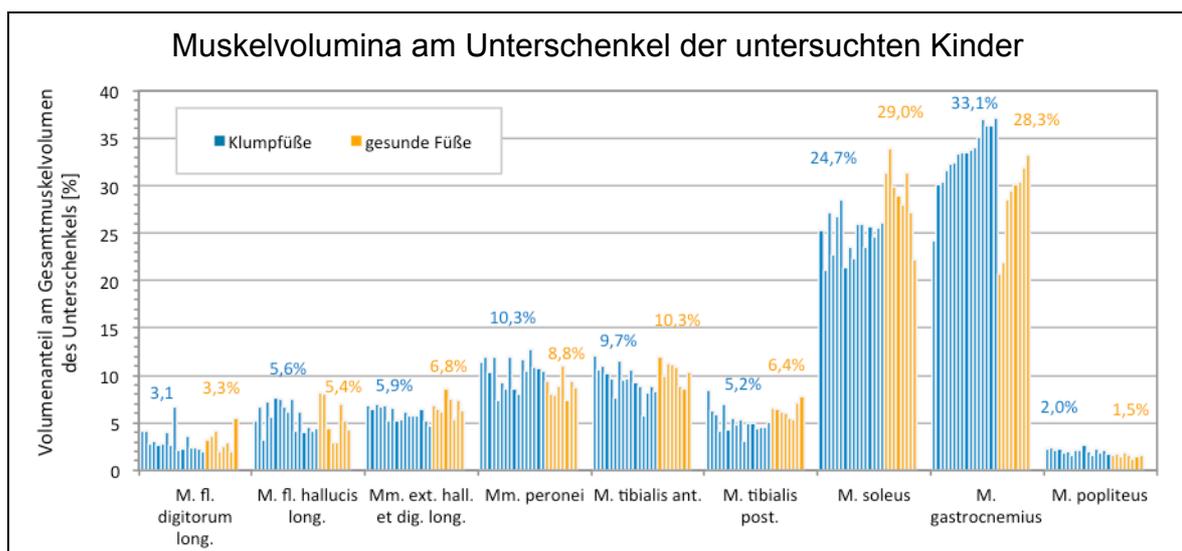


Abbildung 27 zeigt die Volumenanteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtmuskelmasse des Unterschenkels. Es werden 16 Klumpfüße mit 8 gesunde Füßen verglichen. Die einzelnen Mittelwerte der gemessenen Volumenteile sind im Diagramm zusätzlich eingetragen. Auffällig ist ein relatives Übergewicht des M. gastrocnemius und der Mm. peronei sowie ein besonders starkes Defizit des M. soleus und des M. tibialis posterior.

Auffällig dabei ist das Verhältnis zwischen M. soleus und M. gastrocnemius. Bei Klumpfüßen weist der M. gastrocnemius stets den größeren Anteil am Gesamtmuskelvolumen auf. Im Kontrollkollektiv dagegen sind die Volumenanteile im Mittel gleich groß. Bildet man einen Quotienten zwischen den Volumenanteilen von M. soleus und M. gastrocnemius wird dieser Unterschied in der graphischen Darstellung von Abbildung 28 sichtbar. Entlang der Winkelhalbierenden sind die Volumenteile beider Muskeln gleich, oberhalb davon überwiegt der M. gastrocnemius und unterhalb davon überwiegt der M. soleus. Bei 15 der 16 Klumpfüße ist der Volumenanteil des M. gastrocnemius größer. Bei einem sind beide Anteile gleich. Im Kontrollkollektiv gruppieren sich 4 Füße ebenfalls entlang der Winkelhalbierenden mit gleichem Verhältnis zwischen M. soleus und M. gastrocnemius. Bei 2 Füßen des Kontrollkollektivs ist der M. soleus größer als der M. gastrocnemius (unterhalb der Winkelhalbierenden) und bei 2 weiteren ist es umgekehrt (oberhalb der Winkelhalbierenden).

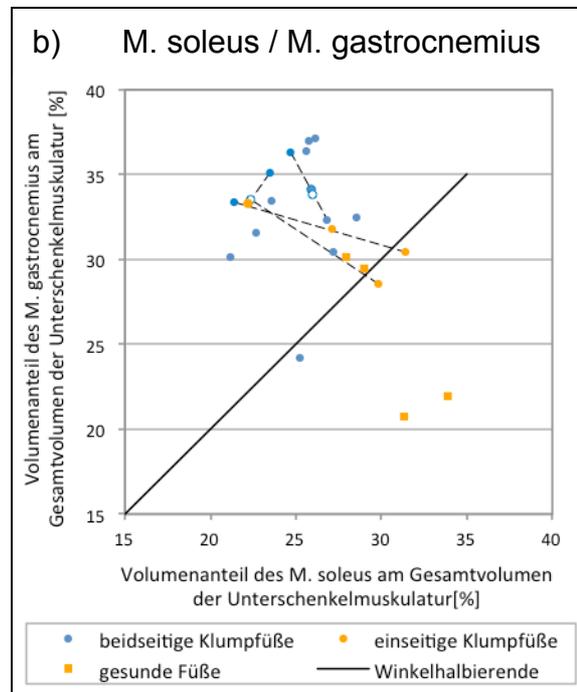


Abbildung 28 setzt M. gastrocnemius und M. soleus ins Verhältnis zueinander. Entlang der Winkelhalbierenden ist das Verhältnis der untersuchten Muskeln gleich, oberhalb davon überwiegt der M. gastrocnemius und unterhalb davon überwiegt der M. soleus. Die einseitigen Klumpfüße sind mit ihrer gesunden Gegenseite verbunden. Auffällig ist ein Übergewicht des M. gastrocnemius bei den Klumpfüßen.

3.5.2 Intraindividuelle Vergleich bei Kindern mit einseitigem Klumpfuß

Bei 4 Patienten mit einseitigem Klumpfuß ist es möglich, die Muskelvolumina am Unterschenkel auf der Klumpfußseite mit den Muskelvolumina der gesunden Gegenseite zu vergleichen. Bei allen 4 Patienten fällt auf der Seite des Klumpfußes ein deutlich reduziertes Volumen jedes einzelnen Muskels auf. Besonders betroffen sind der M. tibialis posterior und der M. soleus. Ihr Volumendefizit beträgt bei 3 von 4 Kindern 48% oder mehr. Weniger stark betroffen sind die Mm. peronei, der M. gastrocnemius, der M. tibialis anterior sowie die Zehenmuskulatur, das Volumendefizit beträgt bei 3 von 4 Kindern 40% oder weniger (vgl. Abbildung 29).

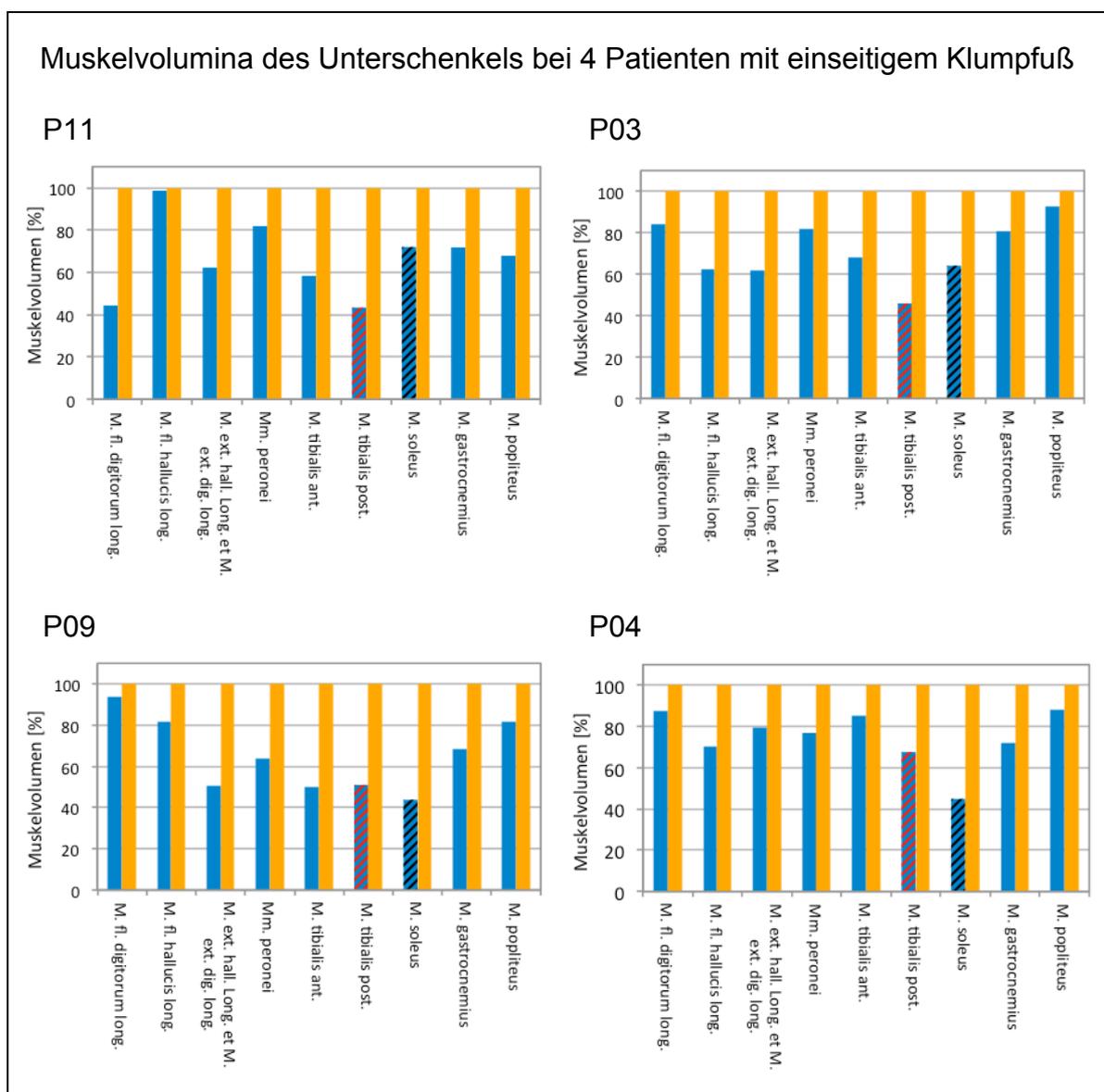
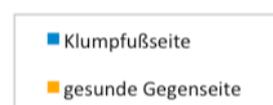


Abbildung 29: Intraindividuelle Vergleich bei 4 Patienten mit unilateralem Klumpfuß. Die untersuchten Klumpfüße weisen alle ein Muskeldefizit der betroffenen Seite auf. Besonders betroffen sind der M. tibialis posterior und M. soleus. Weniger stark betroffen sind die Mm. peronei, der M. gastrocnemius, der M. tibialis anterior sowie die Zehenmuskulatur.



3.6 Zusammenhang von Muskelvolumen und Pedobarographie

In den Unterschenkel-MRT-Bildern der Klumpfüße fiel insgesamt ein vermindertes Volumen der einzelnen Muskeln am Unterschenkel auf. In der Analyse der plantaren Druckverteilung bei Klumpfüßen zeigten sich erhöhte Lastanteile des Mittelfußes, der lateralen Fußhälfte sowie erhöhte Drehmomente im oberen und unteren Sprunggelenk. Im Folgenden werden die Ergebnisse der biomechanischen Messungen und anatomischen Daten miteinander verglichen und in Korrelation gebracht.

3.6.1 Korrelation zwischen plantarer Druckverteilung & Muskelvolumina

In der vorliegenden Studie korrelieren erhöhte Lastanteile des Mittelfußes und der lateralen Fußhälfte mit verminderten Volumina des M. tibialis posterior und des M. tibialis anterior. Eine vergleichbare Korrelation zu anderen Muskeln konnte nicht gezeigt werden.

Die untersuchten Klumpfüße weisen einen deutlich erhöhten Lastanteil des Mittelfußes bis zu 60% der Gesamtlast auf, im Mittel liegt der Mittelfußlastanteil bei 15,8% (Standardabweichung 11,2%). Im Vergleich dazu weisen die 8 Kontrollfüße einen Mittelfußlastanteil im Mittel von 5,0% (Standardabweichung 4,6%) auf.

Der Lastanteil der lateralen Fußhälfte ist bei den untersuchten Klumpfüßen im Mittel mit 61,6% erhöht (Standardabweichung 7,4%), versus 48,9% (Standardabweichung 14,7%) der Kontrollfüße.

Das Volumen des M. tibialis posterior der untersuchten Klumpfüße beträgt im Mittel $0,6 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$ (Standardabweichung $0,2 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$), versus $0,9 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$ (Standardabweichung $0,2 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$) der Kontrollfüße.

Das Volumen des M. tibialis anterior der untersuchten Klumpfüße beträgt im Mittel $1,0 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$ (Standardabweichung $0,3 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$), versus $1,5 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$ (Standardabweichung $0,2 \text{ cm}^3/\text{kgKG}$) der Kontrollfüße.

Beschreibend zeigt sich in allen Graphen von Abbildung 30 die blaue Punktwolke (Klumpfüße), links oberhalb von der orangefarbenen Punktwolke (Kontrollkollektiv). Das Zentrum bildet jeweils der Mittelwert von Muskelvolumen und Lastanteil der AOI der Fußsohle. Es zeigt sich beim Klumpfuß ein deutlich erhöhter Lastan-

teil des Mittelfußes und der lateralen Fußhälfte und deutlich verringertem Muskelvolumen des M. tibialis posterior und des M. tibialis anterior im Vergleich zum Kontrollkollektiv.

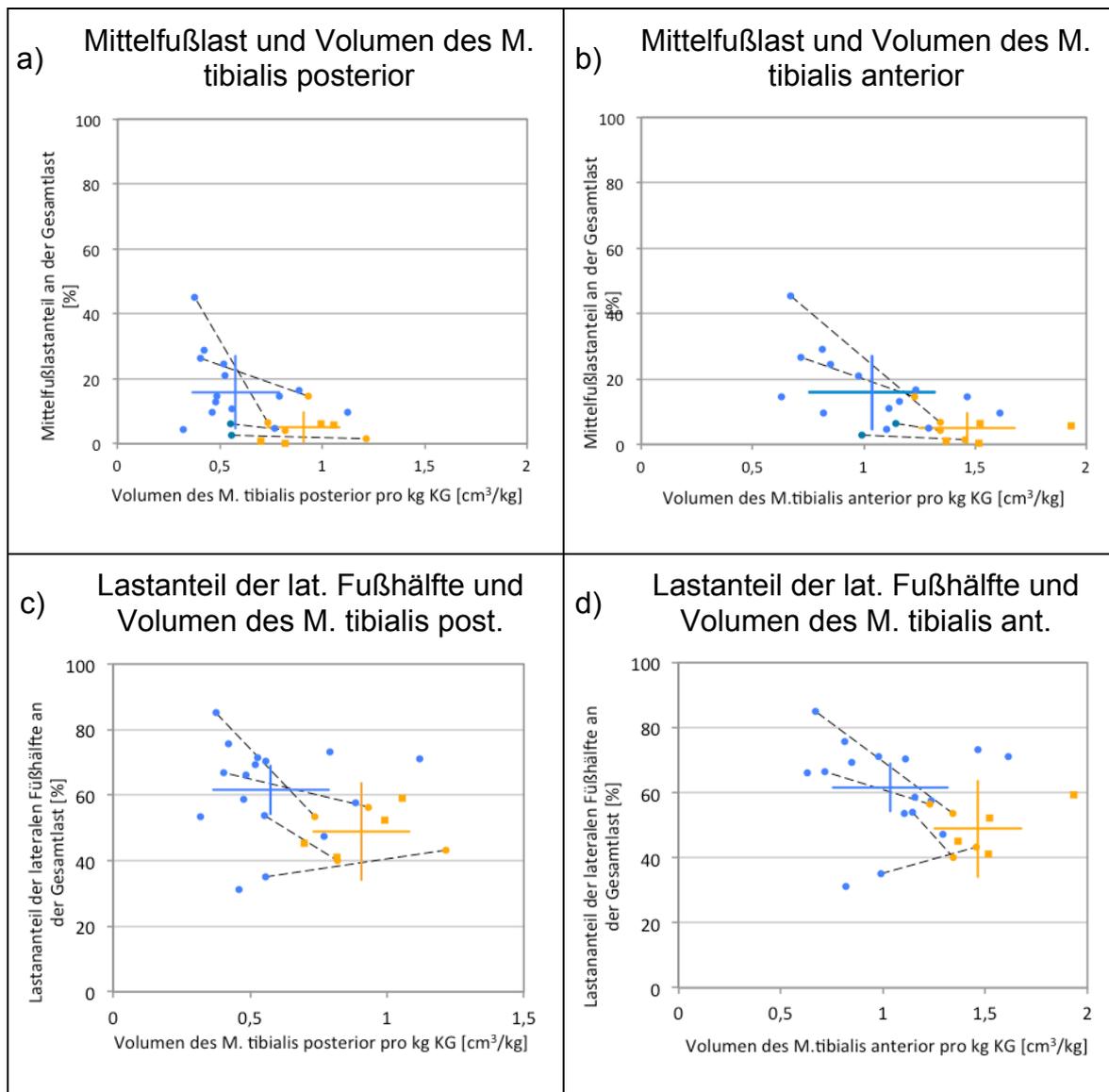


Abbildung 30: Die untersuchten Klumpfüße (16 Füße) weisen geringere Muskelvolumina und erhöhte Lastanteile der einzelnen Teilareale der Fußsohle auf als das Kontrollkollektiv (8 Füße). Das Kreuz markiert die jeweiligen Mittelwerte und der Abstand der Balken zum Zentrum gibt die dazugehörigen Standardabweichung an. Die einseitigen Klumpfüße sind gestrichelt mit der gesunden Gegenseite verbunden.

- Klumpfüße
- einseitig gesunde Füße
- beidseitige gesunde Füße
- + Mittelwert und Standardabweichung

3.6.2 Korrelation zwischen Drehmomenten des oberen und unteren Sprunggelenkes und Muskelvolumina am Unterschenkel

Mit den in der Pedobarographie gewonnenen Daten wurden Drehmomente im oberen und unteren Sprunggelenk bestimmt und anschließend mit den Volumina der Unterschenkelmuskeln korreliert. Hierbei korrelieren im Normalfall hohe Drehmomente im Gelenk mit hohen Volumina der die Gelenke bewegenden Muskeln. Größere Drehmomente in den Gelenken setzen größere Muskelvolumina voraus, um gut bewegliche Gelenke gegen das äußere Drehmoment zu halten. Für die folgenden Betrachtungen wurden die gemessenen Drehmomente über die Zeit integriert, daraus ergibt sich ein Drehmomentstoß. Auf diese Weise ist es möglich die Bewegungskräfte untereinander zu vergleichen. Im Vergleich zum Kontrollkollektiv weisen die untersuchten Klumpfüße geringere Volumen des M. surae auf, bei gleichzeitig erhöhten Drehmomentstößen im OSG sowie analog dazu geringere Volumina der Invertoren mit erhöhten Drehmomentstößen im USG.

Dies lässt sich graphisch anhand von Trendlinien in Abbildung 31 für das obere und untere Sprunggelenk darstellen. Im Trend liegen die blauen Punkte (Klumpfüße) deutlich oberhalb der orangefarbenen Punkte (Kontrollkollektiv). Die Trendlinien haben den Ursprung im Nullpunkt gemeinsam, sie unterscheiden sich in der Steigung. Diese wird bei den Klumpfüßen mit einem Faktor 2,8 für das OSG und mit 1,1 für das USG angegeben. Im Vergleich dazu weist das Kontrollkollektiv eine Steigung der Trendlinien mit einem Faktor von 1,8 für das OSG und 0,5 für das USG auf.

Besonders eindrücklich lässt sich dieser Sachverhalt bei 4 Patienten mit einseitigem Klumpfuß beobachten. Einseitige Klumpfüße sind mit ihrer gesunden Gegenseite verbunden dargestellt. Die Verbindungslinien verlaufen tendenziell waagrecht und bringen so ein deutliches Volumendefizit der Muskeln zum Ausdruck. Das Volumen des M. surae und der Supinatoren der betroffenen Seite ist im Mittel um 36% reduziert (vgl. Abbildung 31).

Es werden nur die Supinatoren betrachtet, die unmittelbar auf die Gelenkachse des USG wirken. Diese sind M. surae, M. tibialis posterior, Flexor digitorum longus und M. hallucis longus. Der M. tibialis anterior nimmt eine Zwischenstellung zwischen Pronator und Supinator ein, entsprechend seines Sehnenverlaufs entlang

der Bewegungsachse des USG (vgl. Abbildung 1, S. 10). Er wird deshalb bei den Betrachtungen ausgeschlossen (v. Lanz et al., 1972).

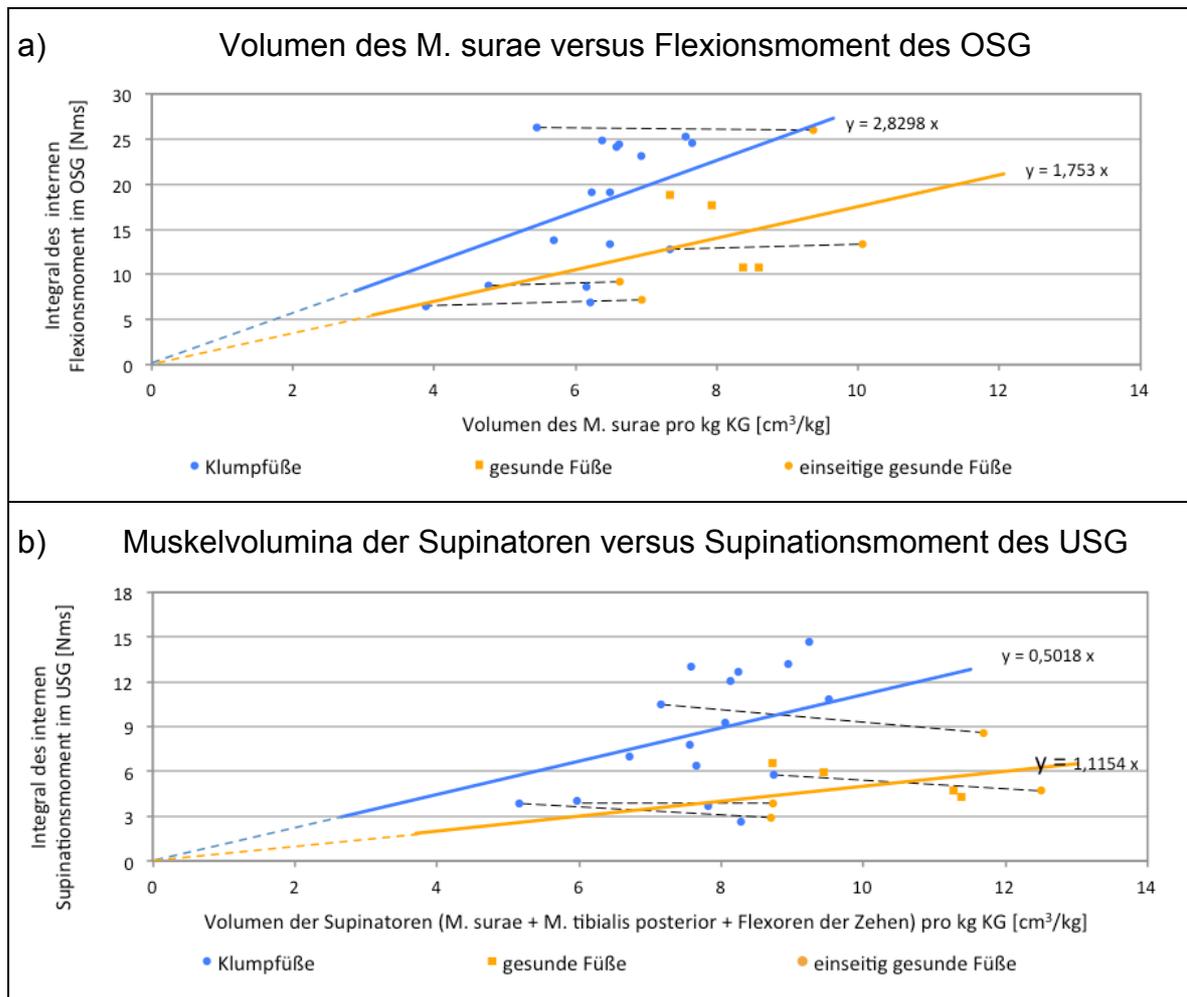


Abbildung 31: Die Diagramme zeigen die Volumina von Muskeln und die von ihnen im OSG (a) und USG (b) erzeugten Drehmomente. Klumpfüße (16 Füße) weisen niedrigere Muskelvolumina auf, mit gleichzeitig erhöhten Drehmomenten in den Gelenken, verglichen mit dem Kontrollkollektiv (8 Füße). Die Trendlinien der beiden Kollektive unterscheiden sich in ihrer Steigung, die mathematische Funktionen sind im Diagramm mit angegeben. Die einseitigen Klumpfüße sind gestrichelt mit der gesunden Gegenseite verbunden.

3.6.3 Korrelation zwischen Achillessehnenlänge und M. surae

Die Achillessehnenlänge wurde in den angefertigten MRT-Bildern ausgemessen. Alle Patienten weisen eine relativ lange Achillessehnenlänge auf. Dies ist auf die im Säuglingsalter durchgeführte Achillessehnenverlängerung zurückzuführen. Es besteht eine Korrelation zwischen langer Achillessehne und vermindertem Volumen des M. surae. In Abbildung 32 stellt sich eine blaue Punktwolke (Klumpfüße) oberhalb der orangenen Punkte (gesunde Füße) dar. Bei operierten Klumpfüßen ist die Achillessehne länger und gleichzeitig das Volumen des M. surae vermindert. Bei 4 Kindern mit einseitigem Klumpfuß wird dieser Zusammenhang durch eine Verbindungslinie zwischen gesunder und betroffener Seite besonders illustriert.

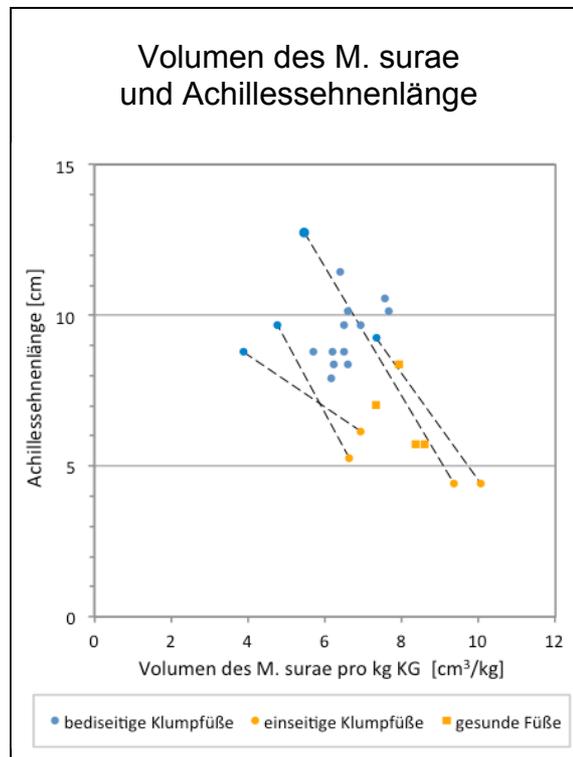


Abbildung 32 zeigt das Volumen des M. surae in Abhängigkeit von der Achillessehnenlänge von den 16 untersuchten Klumpfüßen und 8 Kontrollfüßen. Die einseitigen Klumpfüße sind mit der gesunden Gegenseite gestrichelt verbunden.

3.7 Vergleich zwischen den angewandten Operationsverfahren, anhand von typischen Parametern in der Pedobarographie und Muskelvolumina am Unterschenkel

11 der Patienten wurden im Säuglingsalter operiert und eine Patientin im Alter von 2 Jahren, 7 entsprechend dem Operationsverfahren nach McKay und Simons mit Cincinnati Zugang und 5 entsprechend dem Operationsverfahren nach Imhäuser. Es sollen die charakteristischen Parameter in der Pedobarographie und die Veränderungen der einzelnen Muskelvolumina des Unterschenkels dem jeweiligen Operationsverfahren zugeordnet werden. Dazu wurden die Kinder pedobarographisch nachuntersucht und bei 10 der 12 Kinder wurde ein MRT der Unterschenkel angefertigt. Bei 2 Kindern mit Operation nach McKay und Simons war es aus terminlichen Gründen nicht möglich eine MRT-Untersuchung vorzunehmen.

Im Gruppenvergleich zwischen den Patienten, die nach der Methode von McKay und Simons mit Cincinnati-Zugang und den Patienten die nach Imhäuser operiert wurden, konnten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den angewandten Operationsverfahren festgestellt werden. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messungengenauigkeit und unterscheiden sich nur in wenigen Prozenten (vgl. Abbildung 33).

Patienten, die nach der Methode von Imhäuser operiert wurden zeigten durchschnittlich eine etwas größere Gesamtmuskelmasse (Differenz 1%) sowie einen größeren Volumenanteil des M. tibialis posterior an der Gesamtmuskelmasse (Differenz 1%). In der Pedobarographie waren im Durchschnitt die Belastung der lateralen Fußhälfte erhöht (Differenz 2%), die Bodenkontaktzeit verlängert (Differenz 5%) und die Drehmomentstöße im OSG erhöht (Differenz 3%).

Patienten die nach der Methode von McKay und Simons operiert wurden wiesen hingegen durchschnittlich eine Mehrbelastung des Mittelfußes (Differenz 3%) und im Durchschnitt einen größeren Volumenanteil am Gesamtmuskelvolumen des M. soleus und M. gastrocnemius auf (Differenz jeweils 2%).

Die Achillessehnenlänge war bei beiden Kollektiven im Durchschnitt gleich lang.

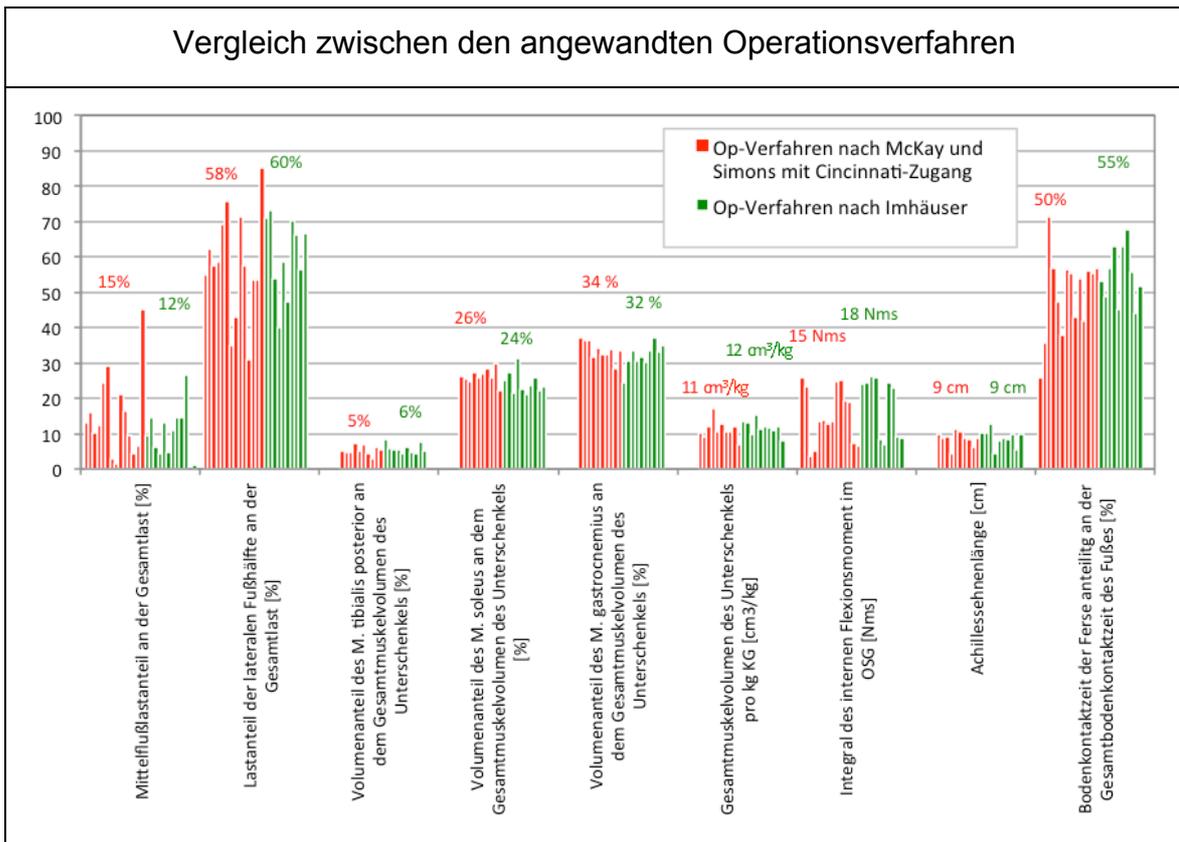


Abbildung 33 zeigt das Patientenkollektiv (12 Kinder) sortiert nach dem jeweils angewendeten Operationsverfahren. Es wurden 7 Kinder nach McKay und Simons mit Cincinnati-Zugang (rot) und 5 Kinder nach Imhäuser (grün) operiert. Alle Kinder wurden pedobarographisch nachuntersucht und bei 10 der 12 Kinder erfolgten MRT-Aufnahmen der Unterschenkel. Die entsprechenden Mittelwerte der untersuchten Parameter sind oberhalb der Balken angegeben. Gravierende Unterschiede im Vergleich der Operationsverfahren können nicht gefunden werden. Die größte Differenz ergibt sich für die Bodenkontaktzeit; sie ist bei der Operation nach Imhäuser um 5% kürzer.

4 Diskussion

Der idiopathische Klumpfuß ist eine angeborene Fehlstellung des Fußes. Es ist ein Krankheitsbild das in der Kinderorthopädie große Bedeutung hat.

Der Fuß durchläuft beim Heranwachsen des Kleinkindes bis zum Erwachsenen typische Veränderungen in seiner Morphologie und in seiner Funktion im Gangablauf. In der vorliegenden Studie wurde untersucht, ob der im Säuglingsalter operierte idiopathische Klumpfuß physiologische Entwicklungsmöglichkeiten besitzt und dementsprechend seine Fehlstellung während des Wachstums korrigiert, oder ob residuale Fehlstellungen persistieren oder zunehmen.

12 Kinder mit 19 Klumpfüßen wurden über Jahre hinweg wiederholt klinisch und pedobarographisch nachuntersucht. Bei 4 dieser Kinder war es möglich einen Langzeitverlauf von 7,0 bis 9,8 Jahre pedobarographisch zu dokumentieren. Die anderen 8 Patienten kamen im Durchschnitt über einen Zeitraum von 3,9 Jahren zur Verlaufskontrolle. An einer Kontrollgruppe mit 38 gesunden Kindern im Alter zwischen 3 bis 15 Jahren wurde die physiologische Veränderung verschiedener pedobarographischer Parameter mit dem Alter ermittelt, insbesondere von Parametern, die auch für die Beschreibung des Klumpfußes charakterisierend sind. Für jeden Altersjahrgang wurden Mittelwerte und Standardabweichungen der Parameter ermittelt. Mit dem Kontrollkollektiv wurden schließlich die einzelnen Klumpfüße verglichen sowie die individuelle Entwicklung von 4 Kindern mit Klumpfüßen, im zeitlichen Verlauf aufgezeigt.

Zu dieser Zeit wurden bei 6 Kindern mit beidseitigen und 4 Kindern mit einseitigem Klumpfuß sowie bei 2 gesunden Kindern jeweils eine MRT-Untersuchung der Füße und Unterschenkel angefertigt. Damit sollten Volumendefiziten der Muskulatur bestimmt werden und den Fußfehlstellungen zugeordnet werden.

Zur Untersuchung der strukturellen und funktionellen Eigenschaften des Klumpfußes hat sich die dynamische Pedobarographie als geeignetes Messverfahren etabliert.

Razeghi et al. unterstreichen in einer Übersichtsarbeit zu Klassifikationsmethoden des Fußes, insbesondere die Bewegung des Fuß zu untersuchen, da die Messergebnisse der statisch ermittelten Fußstruktur weniger aussagekräftig seien (Razeghi & Batt, 2002). In der Pedobarographie ist die dynamische Abrollbewe-

gung des Fußes differenziert darstellbar. Ihren Ursprung hat sie in der Erforschung des Diabetes. Sie wurde in den 80iger Jahren von Dr. Kirsch und Seitz (Novel GmbH) in der medizinischen Forschung etabliert (Frey, 1987). Seitdem hat sich das Anwendungsverfahren der Pedobarographie stets erweitert und ist aus einem orthopädischen oder sportmedizinischen Ganglabor nicht mehr wegzudenken.

Um Langzeitverläufe während und nach der Behandlung des Klumpfußes differenziert und objektiv zu beurteilen, bietet die Messmethodik der Pedobarographie eine optimale Ergänzung zur klinischen Untersuchung. Mit der Pedobarographie können die funktionellen Parameter beim Abrollen des Fußes sowie statische und dynamische Fehlbelastungen über Druckmessbilder sehr genau erfasst werden. Auch dem Patienten und seinen Eltern können die farblich dargestellten Pedogramme anschaulich erklärt werden. Rosenbaum beschreibt die Einsatzmöglichkeiten der Pedobarographie und geht dabei insbesondere auf die postoperative Erfolgskontrolle und die Langzeitevaluierung von Patienten mit Fußdeformitäten ein (Rosenbaum & Becker, 1997).

Die plantare Druckverteilung wurde in der vorliegenden Studie, wie bei Mitternacht und Lampe beschrieben, ausgewertet. Ihren Ergebnissen nach bieten die elektronischen Messsysteme und die digital hinterlegten Rohdaten noch viel mehr Möglichkeiten, um Fragestellungen zur Funktion von Fuß und Sprunggelenk nachzugehen, dabei lassen sich neben der Bestimmung von Lastanteilen einzelner Areale der Fußsohle auch die Drehmomente des OSG und USG ableiten (Mitternacht et al., 2006). In dieser Studie wurden die Parameter der Pedobarographie ausgewählt, die die Morphologie und die Funktionseinschränkung eines Klumpfußes am besten beschreiben. Zum einen wurden die Pedogramme entlang der Längsachse in die mediale und laterale Fußhälfte geteilt, um die Supinationskomponente und den Rückfußvarus eines idiopathischen Klumpfußes zu erfassen. Zum anderen wurden die Pedogramme in 3 Areale quer zur Fußachse anatomisch, in Rückfuß, Mittelfuß und Vorfuß (inklusive Zehen) unterteilt. Dies ermöglichte das Abrollverhalten des Fußes zu beschreiben. Insbesondere Bodenkontaktzeit der Ferse und die Vorfußlast sind Parameter, die die Spitzfußkomponente des Klumpfußes beschreiben. Charakteristisch für einen Klumpfuß ist eine deutlich erhöhte Mittelfußlast. Des Weiteren werden Drehmomente im oberen und unteren Sprunggelenk bestimmt, diese ermöglichen Rückschlüsse auf die Rigidität der Gelenke. Andere

Autoren verwenden oft die Standard-10-Areale-Maske von Novel und fassen dann einzelne Areale je nach Fragestellung wieder zusammen, sodass letztlich praktisch dieselben Fußareale wie in der vorliegenden Studie betrachtet werden. (Sinclair et al., 2009). Die Drehmomente bezüglich der Gelenkachse werden von der novel-Software nicht standardisiert abgeleitet.

Van der Leeden empfiehlt den Messvorgang mindestens dreimal zu wiederholen, um die Verlässlichkeit der Daten zu erhöhen (Van Der Leeden, Dekker, Siemonsma, Lek-Westerhof & Steultjens, 2004). In der vorliegenden Studie wurde ebenfalls eine Mindestzahl von 3 gültigen Messungen je Fuß vorausgesetzt. Bei älteren Kindern bei einer besseren Mitarbeit wurden bis zu 10 Messungen je Fuß abgeleitet.

Bei Erwachsenen ergaben pedobarographische Messungen von 111 gesunden Probanden eine plantare Druckverteilung mit einem Lastanteil von 2% am Mittelfuß, 24% an der Ferse und 74% am Vorfuß (Hennig & Milani, 1993). Vergleichbare, im Mittelfuß aber höhere Werte, geben Putti et al. für 53 gesunde Erwachsene mit einem Lastanteil von 7% am Mittelfuß, 28% an der Ferse und 65% am Vorfuß an (Putti, Arnold, Cochrane & Abboud, 2008).

Der Kinderfuß zeigt im Vergleich zum erwachsenen Fuß sehr viel geringere Maximaldruckwerte unter der Fußsohle. Der Grund hierfür ist der relativ große Fuß im Verhältnis zum geringen Körpergewicht. Die Belastung des Mittelfußes ist dreimal höher als beim Erwachsenen. Dies lässt sich durch eine noch nicht voll ausgereifte Längswölbung im Fuß mit einem kindlichen plantaren Fettpolster erklären (Hennig & Rosenbaum, 1991). Eine ausgereifte Längswölbung entwickelt sich normalerweise bis zum 6. Lebensjahr (Hennig, Staats & Rosenbaum, 1994). Lampe et al. untersuchten die Entwicklung des Kinderfußes in der Pedobarographie. Es zeigte sich, dass beim Abrollvorgang des kleinkindlichen Fußes eine weniger differenzierte Dynamik zu beobachten ist. Auch die Gesamtlast verteilt sich gleichmäßiger auf die Areale des Fußes. Mit zunehmender Entwicklung hebt sich der Mittelfuß an und Rückfuß sowie Vorfuß werden vermehrt belastet. Der jugendliche Fuß weist schließlich eine ähnliche Druckverteilung wie die eines Erwachsenen auf (Lampe, Mitternacht, Schrodli, Gerdesmeyer, Nathrath & Gradinger, 2004).

In der vorliegenden Arbeit verringert sich in der Pedobarographie von 38 gesunden Kindern, der Lastanteil des Mittelfußes von 9,2% (Ferse 32,8%, Vorfuß 58,0%) bei den 3 und 4 Jährigen, auf 4,9% (Ferse 35,2%, Vorfuß 59,9%) bei den 8 bis 10 Jährigen und auf 2,4% (Ferse 27,5%, Vorfuß 70,1%) bei den 15 Jährigen. Hennig et al. geben in einer Studie mit 125 Kindern im Alter zwischen 6 und 10 Jahren vergleichbare Lastanteile für den Mittelfuß von 3% (Ferse 33,5%, Vorfuß 63,5%) an (Hennig et al., 1994).

In der Auswertung der plantaren Druckverteilung der 38 gesunden Kinder wiesen die Ergebnisse eine erhebliche Streuung im Kleinkindalter auf die sich mit dem Älterwerden verringerte. Die älteren Kinder zeigten ein koordinierteres Gehen als jüngere Kinder. Eine große interindividuelle Variation in der Entwicklung des kindlichen Fußes stellten ebenfalls Bertsch et al. in der Pedobarographie fest. Manche Kinder zeigten nach ihren Angaben bereits mit 1 Jahr eine ausgereifte plantare Druckverteilung während andere diesen Alters eine noch sehr unausgereifte plantare Druckverteilung aufwiesen (Bertsch, Unger, Winkelmann & Rosenbaum, 2004).

In der Pedobarographie sind Untersuchungen des Klumpfußes ein Themenschwerpunkt. Die vorliegende Studie zeichnet sich dadurch aus, dass bei einem Teil der Probanden eine individuelle Entwicklung des postoperativen Klumpfußes über viele Jahre mit jährlich wiederholten Pedobarographischen Messungen beobachtet und dokumentiert wurde.

Insgesamt unterschieden sich die untersuchten Klumpfüße deutlich durch typische Veränderungen in der Pedobarographie vom gesunden Fuß. Beispiele sind eine Mehrbelastung des Fußaußenrandes, besonders des lateralen Mittelfußes und Fußballens, mit einer nach lateral verlagerten Ganglinie und insgesamt vergrößerten Auflagefläche und verlängerten Bodenkontaktzeit des Mittelfußes. Typisch ist auch eine kurze und verringerte Fersenbelastung. Der Klumpfuß ist rigide in seinen Sprunggelenken und tendenziell in einer Spitzfußstellung, eine Dorsalextension ist nur vermindert möglich. Diese Eigenschaften zeigen sich während des Abrollvorgangs des Fußes, in einem schnelleren Anstieg der Drehmomente auf ein Maximum mit geringeren Spitzenwerten als beim gesunden Fuß. Im Kurvenverlauf der Drehmomente wird ein Plateau beschrieben und über die Zeit integriert resultieren daraus erhöhte Drehmomentstöße.

Signifikant verminderte Plantarflexionsmomente des OSG bei Patienten mit unilateralen Klumpfüßen konnte ebenfalls Davies et al. in der Ganganalyse nachweisen (Davies, Kiefer & Zernicke, 2001).

Bei 9 von 19 nachuntersuchten Klumpfüßen konnte in der Pedobarographie eine ausgeprägte Supinatusstellung des Fußes durch eine besonders hohe Belastung (mehr als 2 Standardabweichung zum Mittelwert des Kontrollkollektivs) des Mittelfußes und der lateralen Fußhälfte nachgewiesen werden. Es wurden am Mittelfuß Lastanteilen zwischen 10% und 45% der Gesamtlast und am Fußaußenrand Lastanteilen zwischen 62% und 85% gemessen.

Bei 2 der 19 Klumpfüße war eine Spitzfußkomponente in einer besonders verkürzten Bodenkontaktzeit der Ferse (26%, 38% des Abrollvorgangs) und gleichzeitig besonders verminderten Lastanteilen der Ferse (13%, 16% der Gesamtlast) erkennbar. Die Kinder wechselten auffällig schnell von Rückfuß auf Vorfuß oder setzten gleich mit dem Vorfuß auf den Boden auf, ohne einen initialen Fersenbodenkontakt.

Bei 3 weiteren Kindern konnte ein Senkfuß nach Klumpfuß in der Pedobarographie beobachtet werden. Der Verlust der Längswölbung führt zu einer besonders hohen Belastung des Mittelfußes mit Lastanteilen zwischen 10% und 17%. Eine ausgeprägte Supinationskomponente des idiopathischen Klumpfußes und eine Mehrbelastung der lateralen Fußhälfte bestand dabei nicht.

Die für den operierten idiopathischen Klumpfuß typische Druckverteilung gibt Malliwitz in einer Studie mit 42 Patienten (68 Klumpfüße), im Alter zwischen 24 und 32 Jahren mit folgenden Lastanteilen an: Ferse 31%; Mittelfuß 10% und Vorfuß 59% (Malliwitz, 2000). Eine vermehrte Belastung der lateralen Fußhälfte gibt Schinkhof für 42 Patienten mit einseitigen Klumpfüßen mit 56% der Gesamtlast an (Schinkhof, 2003). Auch Jacks et al. konnten signifikante Unterschiede zum Gesunden in einer vermehrten und längeren Belastung des lateralen Mittelfußes, und gleichzeitiger verminderten Belastung von Ferse und medialen Vorfuß feststellen (Jacks, Alvarez, A. & Devera, 2009). Trobisch et al. kamen zu ähnlichen Ergebnissen (Trobisch & Neidel, 2009). Diese Ergebnisse entsprechen denen der vorliegenden Studie.

Die in der orthopädischen ambulanten Praxis häufig geäußerte Annahme eines erhöhten Rezidivrisikos des operierten idiopathischen Klumpfußes beim Kind und insbesondere während bestimmter Wachstumsperioden, gab Anlass pedobarographische Langzeituntersuchungen vorzunehmen und individuelle Langzeitverläufe von Patienten mit Klumpfuß aufzuzeichnen.

In der Literatur gibt es wenige Angaben zu konkreten Altersklassen die für ein Klumpfußrezidiv prädisponieren. Eberhardt et al. geben ein erhöhtes Risiko im Alter zwischen 5 und 6 Jahre an, für Patienten die nach der Methode von Ponseti behandelt wurden (Eberhardt, Peterlein, Fernandez & Wirth, 2012). Studien die individuelle Entwicklungen des idiopathischen Klumpfußes und Langzeitverläufe anhand von regelmäßig durchgeführten pedobarographischen Messungen untersuchen und dokumentieren liegen nicht vor.

In der vorliegenden Studie konnte bei 4 Kindern (7 Klumpfüße) der 12 in die Studie eingeschlossenen Kinder ein individueller Langzeitverlauf von mindestens 7,0 Jahren bis maximal 9,8 Jahren aufgezeichnet und analysiert werden.

Die untersuchten Klumpfüße zeigten alle eine dem Klumpfuß typische plantare Druckverteilung mit unterschiedlichen Ausprägungen. Die gegenüber dem gesunden Fuß um ein mehrfaches erhöhte Mittelfußlast verringerte sich bei den untersuchten Patienten im Verlauf des Wachstums nur um wenige Prozent. Die Vorfußlast nahm im Lauf der Jahre zu und die Fersenbelastung nahm ab und verkürzte sich. Diese beim gesunden Fuß physiologische Entwicklung verstärkt beim Klumpfuß die Tendenz zum Spitzfuß. Im untersuchten Zeitintervall des Langzeit-Follow-Up wurden keine größeren funktionellen oder morphologischen Veränderungen des Klumpfußes beobachtet, die mit Schmerzen oder Behinderung im Alltag verbunden waren. Die Ausgangssituation zu Beginn der Messreihe blieb im Wesentlichen erhalten. Änderungen entwickelten sich nur langsam mit ähnlicher Rate wie im gesunden Kontrollkollektiv, dabei wurden keine ausgeprägten Pathologien in besonderen Wachstumsphasen beobachtet. Dennoch wurden auf Grund einer sehr hohen Sensitivität der Pedobarographie Veränderungen in der plantaren Druckverteilung registriert. Bei 2 Füßen kam es im Alter von 9 und 11 Jahren zu einer Zunahme der Belastung des Mittelfußlast und der lateralen Fußhälfte. Bei einem der 7 Klumpfüße kam es ab dem 9. Lebensjahr zu einer zunehmenden Senkfußstellung. Eine Spitzfußstellung wiesen 4 der 7 Füße auf und bei 3 davon

kam es zu einer Zunahme der Spitzfußstellung. 4 der 7 operierten idiopathischen Klumpfüße zeigten wenig bis keine Änderung ihrer Residualklumpfußstellung.

Gezeigt werden konnte, dass die untersuchten Klumpfüße ihre Entwicklungsfähigkeit behalten, ähnlich wie der gesunde Fuß, allerdings auf anderer Ausgangsbasis. Die Fallzahl in der vorliegenden Studie lässt jedoch Abweichungen von der gezeigten Entwicklung nicht ausschließen.

Die Klumpfußwade ist ein typisches Charakteristikum des Klumpfußes und fällt bereits in der klinischen Untersuchung durch ihren verminderten Wadenumfang auf. Aronson et al. geben eine Seitendifferenz bei eiseitigen Klumpfüßen von durchschnittlich 10% an und heben hervor, dass eine Gipsbehandlung keinen Effekt auf das Muskeldefizit hat (Aronson & Puskarich, 1990). Sonographisch konnte durch Niki et al. postoperativ ebenfalls ein signifikanter Unterschied der betroffenen Seite nachgewiesen werden. In Nachuntersuchungen bis zu 34 Monaten kam es zu keinen wesentlichen Veränderungen (Niki, Nakajima, Hirano, Okada & Beppu, 2013).

Zur Erforschung inwieweit Muskeldysbalancen und Volumendifferenzen zur Pathologie und Pathogenese des Klumpfußes beitragen, wurden in der vorliegenden Studie Muskelvolumina anhand von MRT-Bildern der Unterschenkel ausgemessen und analysiert. Die Ergebnisse wurden anschließend mit den Erkenntnissen aus der Pedobarographie hinsichtlich der veränderten Dynamik der Gelenke und der anatomischen Pathologie des Klumpfußes in Zusammenhang gebracht. Auch die Frage, ob die Biomechanik Grundlage für die Entstehung eines Klumpfußes bietet, kann anhand der Daten diskutiert werden.

Im Vergleich zu 8 gesunden Füßen zeigte sich bei 16 der untersuchten Klumpfüße von 10 Kindern im Alter von 7 bis 21 Jahren (Durchschnittsalter 11 J.) ein mittleres Defizit des Gesamtvolumens der Unterschenkelmuskulatur von 23%.

Besonders interessant ist der Vergleich der Muskelvolumina bei 4 Patienten mit unilateralem Klumpfuß, zwischen Klumpfuß und gesunder Gegenseite. Das Gesamtmuskelvolumen zeigte sich auf der Klumpfußseite um 34% verringert. Die Gesamtvolumendifferenz ist im Vergleich mit den 8 gesunden Füßen (23%) größer. Es kann angenommen werden, dass die gesunde Gegenseite eines unilaterala-

len Klumpfußes möglicherweise die fehlende Funktion des Klumpfußes kompensiert und somit an Volumen zunimmt.

Besonders betroffen waren der M. tibialis posterior und der M. soleus, mit einem Volumendefizit zur gesunden Gegenseite im Mittel von 48% und 44%. Geringer fiel die Volumendefizite für den M. gastrocnemius (27%), den M. tibialis anterior (35%), die Mm. peronei (24%) und die Zehenmuskulatur (27%) aus. Das posteriore Kompartiment war um 32% reduziert.

Ippolito fand 2009 und erneut 2012 ebenfalls anhand von MRT-Untersuchungen an Kindern mit einseitigen Klumpfüßen, im Alter zwischen 2 und 6 Jahren ein Volumendefizit von 44% bzw. 35% auf der Klumpfußseite. Die Muskeln des posterioren Kompartiments wiesen ein Volumendefizit von 46% auf (Ippolito, De Maio, Mancini, Bellini & Orefice, 2009; Ippolito, Dragoni, Antonicoli, Farsetti, Simonetti & Masala, 2012). Eine Differenzierung der Kompartimente in die einzelnen Muskeln wurde nicht vorgenommen.

Anhand der gemessenen Muskelvolumina und der gemessenen Drehmomentstöße der von den Muskeln bewegten Gelenke (OSG und USG) lassen sich Rückschlüsse auf die Rigidität des operierten Klumpfußes ziehen. Beim gesunden Fuß und bei freier Gelenkbeweglichkeit werden Drehmomente ausschließlich muskulär erzeugt. In der vorliegenden Arbeit waren bei den untersuchten Klumpfüßen die gemessenen Drehmomentstöße höher, trotz niedrigeren Muskelvolumina, als beim gesunden Fuß. Die hohen Drehmomentstöße werden offenbar nicht muskulär, sondern durch Knochen und Bändern des Gelenks bei einer anterioren Gewichtsverlagerung erzeugt. Demnach können beim Klumpfuß die erhöhten Drehmomentstöße als ein Maß für die Rigidität angesehen werden.

Eine verminderte Plantarflexionskraft des Klumpfußes in der Ganganalyse und eine Schwächung des M. trizeps surae, gemessen mit Hilfe eines Dynamometer, stellten ebenfalls Karol et al. fest (Karol, Concha & Johnston, 1997).

In einer Untersuchung von neurogenen spastischen Spitzfüßen wurden in der Pedobarographie ähnlich hohe Drehmomentkurven der Sprunggelenke wie beim idiopathischen Klumpfuß gezeigt. Anders als beim idiopathischen Klumpfuß verursacht in diesem Fall, eine spastische Muskeltonuserhöhung des M. surae die erhöhten Drehmomente im Gelenk (Lampe & Mitternacht, 2011).

Ob die Ursache der Muskelvolumendifferenz in der mechanischen Steifigkeit des Gelenks liegt, oder ob umgekehrt eine neurologisch bedingte Schwäche der Muskeln und ein seltener Gebrauch desselben zur Gelenksteifigkeit führt, kann nicht abschließend geklärt werden.

Die Zusammenführung von MRT- und pedobarographischen Untersuchungen am idiopathischen Klumpfuß ermöglicht eine differenzierte Diskussion über kausale Zusammenhänge und Wechselbeziehungen von Veränderungen der knöchernen Strukturen, der Beweglichkeit in den Gelenken sowie der muskulären Anlagen beim operierten idiopathischen Klumpfuß. Dabei werden im Folgenden Hypothesen formuliert, die als mögliche Kausalitätsketten naheliegen, andere Mechanismen und Ursachen sind jedoch nicht auszuschließen.

Die Rigidität der Gelenke steht in Wechselbeziehung zum Verlust des Muskelvolumens. Auffällig dabei ist, dass zwei- oder mehrgelenkige Muskeln weniger betroffen sind als eingelenkige (oberes und unteres Sprunggelenk als eine Einheit betrachtet). Der Volumenanteil an der Unterschenkelmuskulatur des zweigelenkigen (Sprunggelenk und Knie) M. gastrocnemius ist bei 15 von 16 Klumpfüßen, größer als der des eingelenkigen M. soleus. Im gesunden Kontrollkollektiv ist das Verhältnis von M. gastrocnemius und M. soleus, bei 4 von 8 Füßen ausgeglichen und bei 2 weiteren überwiegt sogar der M. soleus (vgl. Abbildung 28, S.66). Aufgrund seiner Zweigelenkigkeit behält der M. gastrocnemius, im Falle eines rigiden Sprunggelenks beim idiopathischen Klumpfuß, weiterhin seine volle Funktion im Kniegelenk. In der Folge fortbestehender Aktivität ist der Volumenverlust geringer als der des M. soleus. Gleiches gilt für die Zehenmuskulatur, sie wirkt in ihrer Funktion ebenfalls über mehrere Gelenke, sowohl als Extensoren der Zehen als auch als Fußheber am Sprunggelenk. Analog zum M. gastrocnemius behält sie eine vermehrte Aktivität in der Bewegung der Zehen und ist von einem rigiden Sprunggelenk weniger stark betroffen. Auch sie weist ein relativ geringes Muskeldefizit auf.

Auf Grund seiner Eingelenkigkeit ist der M. soleus demnach besonders von einem rigiden Sprunggelenk betroffen. Im Intraindividuellen Seitenvergleich (4 Patienten mit unilateralen Klumpfuß) ergibt sich ein relativ großes Volumendefizit von durchschnittlich 44% auf der Klumpfußseite.

Der M. soleus ist nicht nur bei idiopathischen sondern auch bei neurogenen Klumpfüßen im Zusammenhang mit spastischer Hemiparese vermindert. Lampe et al. beschreiben bei Patienten mit einseitiger Hemiparese ein Volumendefizit der Gesamtmuskelmass des plegischen Beines und heben dabei das hohe Volumendefizit des M. soleus, mit einem Defizit von 25,3% besonders hervor (Lampe et al., 2006).

Das größte Volumendefizit, im Vergleich zwischen Klumpfuß und gesunder Gegenseite (4 Patienten mit unilateralem Klumpfuß) weist der M. tibialis posterior mit 48% auf. Er ist ebenfalls ein eingelenkiger Muskel (OSG und USG als Einheit), ohne Kompensationsmöglichkeiten seiner Inaktivität durch andere Gelenkaktivität. Die knöcherne Supinationsstellung des Klumpfußes verstärkt diesen Umstand noch zusätzlich und lässt eine mögliche Restaktivität kaum noch zu. Mit der Atrophie des M. tibialis posterior geht auch die Unterstützung der Fußwölbung verloren. In der vorliegenden Studie korrelierte eine erhöhte Mittelfußlast mit verringerten Muskelvolumina von M. tibialis posterior und M. tibialis anterior. Letzterer ist ebenfalls an der Bildung der Fußwölbung beteiligt.

Der M. tibialis anterior ist im Vergleich zum M. tibialis posterior (Defizit 48%) weniger vom Volumenverlust betroffen (Defizit 34,6%). Als dominanter Dorsalextensor ist er beim Gehen in der Bewegung im OSG maßgeblich beteiligt, während der M. tibialis posterior seine Hauptfunktion als Supinator im USG erfüllt und ist nur sehr wenig beim Gehen und in der Plantarflexion des OSG beteiligt. In der Folge atrophiert der M. tibialis posterior verstärkt.

In der vorliegenden Studie korreliert eine lange Achillessehne des operierten idiopathischen Klumpfußes mit einem Volumenverlust des M. surae. Es ist vorstellbar, dass neben der Gelenkrigidität auch eine zu lange Muskelsehne aufgrund von Funktionseinschränkungen es zur Atrophie des M. surae kommt.

Die vorangegangenen Kausalitätsketten und Erklärungen legen eine knöcherne Fehlstellung als primäre Ursache des idiopathischen Klumpfußes mit einer sekundären reaktiven Muskelatrophie nahe.

Ebenfalls Hinweise für eine ursächlich knöcherne Genese des Klumpfußes konnten Cahuzac et al. anhand der verminderten Ossifikationszentren des Talus und

des Calcaneus im MRT ableiten. (Cahuzac, Baunin, Luu, Estivalezes, Sales De Gauzy & Hobatho, 1999).

Im Rahmen ihrer embryonalen Forschung an Aborten im 1. Trimester formulierten Sasaki et al. als Erklärungsmodell für die Entstehung eines Klumpfußes einen Entwicklungsstopp während einer physiologischen Klumpfußstellung in der 9. SSW. Einer Auffassung unterbleibt in der Folge die Entwicklung eines physiologischen knöchernen Fußskelett (Kawashima & Uthoff, 1990).

Ippolito analysierte die Volumina der Muskelkompartimente des Unterschenkels an Spontanaborten der 13. Und 19. SSW sowie bei Kindern und Erwachsenen mit unilateralen Klumpfüßen. Bereits während der Schwangerschaft entstehende muskuläre Dysbalancen blieben während des Wachstums bestehen und nahmen sogar zu. Das relative Volumendefizit zur gesunden Gegenseite, des posterioren Kompartiments vergrößerte sich während des Wachstums auf 46%, das anteriore und laterale Kompartiment blieb mit 10% Volumendefizit zur gesunden Gegenseite unverändert. Ippolito hält eine primär neurogenen Ursache des idiopathischen Klumpfußes für wahrscheinlicher als die einer primär knöchernen Ursache (Ippolito et al., 2009; Ippolito et al., 2012).

Ippolito und Ponseti waren bereits 1980 der Auffassung einer Fibrose der Weichteile als primären Ursache des idiopathischen Klumpfußes, die eine Fehlentwicklung des Fußskeletts sowie eine Muskeldysbalance zur Folge hat (Ippolito et al., 1980). Windisch et al. kamen 2007 zu ähnlichen Ergebnissen. Aufgrund von medialeseitig verkürzten Bändern und verändertem Sehnenverlauf des M. tibialis anterior und des M. tibialis posterior würde der Fuß in eine Supinations- und Adduktusstellung gezogen (Windisch et al., 2007a).

In der vorliegenden Arbeit wurden Veränderungen in der Pedobarographie während des Wachstumsalters von Kindern mit Klumpfüßen beobachtet und die anatomischen Verhältnisse insbesondere der Muskelvolumina am Unterschenkel untersucht. Es war nicht primäres Ziel eine Evaluierung verschiedener Operationsverfahren durchzuführen, dennoch wurden die einzelnen Ergebnisse und Erkenntnisse dem angewandten Operationsverfahren zugeordnet und wurde ein Gruppenvergleich vorgenommen. Gruppe 1 bestand aus 5 Patienten mit Operation nach Imhäuser und Gruppe 2 aus 7 Patienten mit Operation nach McKay und Si-

mon mit Cincinnati-Zugang. Es zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede der beiden Operationsmethoden. Die Belastung der lateralen Fußhälfte, die Drehmomente des oberen und unteren Sprunggelenks und die im MRT einzeln differenzierten Muskelvolumina unterschieden sich im Gruppenvergleich lediglich um wenige Prozentpunkte im Bereich der Messungengenauigkeit.

Die klinische Verlaufskontrolle ergab bei 18 von 19 untersuchten Klumpfüßen keine Änderungen in der Klassifikation nach Diméglio. Die Indikation für eine erneute Operation bei Rezidiv ergab sich aus klinischer Sicht nicht. Bei einer Patientin ist eine engmaschige Kontrolle notwendig, aufgrund einer Zunahme des Spitzfußes und Verschlechterung in der Diméglio-Klassifikation von Grad II auf Grad III.

Es gibt viele Studien, die zur Bewertung der unterschiedlichen Behandlungsverfahren das Outcome der Operationen mit Hilfe verschiedener Scores bewerten. Dabei werden klinische und radiologische Aspekte aber auch die subjektive Einschätzung der Lebensqualität der Patienten berücksichtigt. In der vorliegenden Studie wurde der Schwerpunkt auf der biomechanischen Analyse des Klumpfußes gelegt und die Pedobarographie als Grundlage der Datenerhebung gewählt, da diese besonders genau die Dynamik beim Gehen abbildet. Radiologische Untersuchungen wurden aufgrund fehlender dynamischer Aspekte nicht vorgenommen.

Nach Untersuchungen von Hutchins et al. aus dem Jahr 1985 werden mit dem Verfahren des dorsalen Release gute Ergebnisse erzielt (Hutchins, Foster, Paterson & Cole, 1985). Ebenso sprechen sich im Jahre 2003 Ippolito et al. für ein limitiertes dorsales Release aus (Ippolito, Farsetti, Caterini & Tudisco, 2003).

McKay und Simons etablierten in den 1980igern das ausgedehnte peritalare Release mit Cincinnati-Zugang und erzielten in Langzeitstudien gute Ergebnisse (McKay, 1983; Simons, 1985). Dies wurde im Jahr 2005 durch weitere Studien untermauert (Schuh, Goske, Salminen, Zeiler & Schraml, 2005; Singh & Vaishnavi, 2005). Neuer Untersuchungen aus den Jahren 2006 und 2010, widersprechen den vorangegangenen und zeigen weniger gute Ergebnisse für ein ausgedehntes operatives Vorgehen (Dobbs, Nunley & Schoenecker, 2006; Schlegel, U. J., Batal, Pritsch, Sobottke, Roellinghoff, Eysel et al., 2010; Van Gelder, Van Ruiten, Visser & Maathuis, 2010).

Bereits 1995 konnten Cooper und Dietz gute postoperative Ergebnisse mit konservativen Behandlungsschemata und Achillotenotomie bei Persistenz eines Spitzfußes erzielen (Cooper & Dietz, 1995). In den Jahren 2004 und 2006 erschienen eine Reihe an Studien die sich für ein konservatives Prozedere nach der Ponseti-Methode aussprechen (Eberhardt, Schelling, Parsch & Wirth, 2006; Morcuende, Dolan, Dietz & Ponseti, 2004; Ponseti, Zhivkov, Davis, Sinclair, Dobbs & Morcuende, 2006; Radler, Suda, Manner & Grill, 2006).

Es zeigt sich ein Trend in den Therapiekonzepten des Klumpfußes hin zur fußspezifischen Behandlung mit mehr konservativen Behandlungsverfahren und anschließender korrigierender Operationen bei persistierenden Fehlstellungen (Heilig, Matern, Rosenzweig & Bennett, 2003). In den USA konnte ein konstanter Rückgang von angewandten Operationen beim Klumpfuß in den Jahren zwischen 1996 und 2006 registriert werden (Zionts, Zhao, Hitchcock, Maewal & Ebramzadeh, 2010). Die einzelnen Behandlungsmethoden sind jedoch Gegenstand intensiver Diskussionen (Hamel, 2005).

In der Literatur gibt es sehr wenige Studien, die die einzelnen Therapiechemata und Ihre Behandlungserfolge anhand von pedobarographischen oder ganganalytischen Nachuntersuchungen unmittelbar miteinander vergleichen.

Malliwitz konnte für das dorsomediale Release bessere postoperative Ergebnisse in der Pedobarographie, mit einer physiologischeren Belastung des medialen Mittelfußes, zeigen, als für das alleinige dorsale Release (Malliwitz, 2000).

Wrage-Brors folgerte hingegen aus ganganalytischen und klinischen Untersuchungen, dass das dorsale Release (Mini-Cincinnati) zu einer besseren Funktion des Fußes führt, als das ausgedehnte peritalare Release. Insbesondere der Zehenstand und die Push-Off Leistungsfähigkeit im OSG waren verbessert (Wrage-Brors, 2006).

Karol et al. raten zu einem weniger aggressiven Vorgehen in der Behandlung des Klumpfußes. Ihre Untersuchungen zeigten eine bessere Bewegung des Sprunggelenks in der Ganganalyse im Falle einer physiotherapeutischen Behandlung im Vergleich zu einer operativen Behandlung (Karol, O'Brien, Wilson, Johnston & Richards, 2005).

Anhand der erhobenen pedobarographischen Messdaten und der im MRT gemessenen Muskelvolumina am Unterschenkel konnte kein besonderer Unterschied zwischen der Operation nach Imhäuser und der Operation nach McKay und Simon mit Cincinnati-Zugang nachgewiesen werden. In diesem Sinne erscheint ein ausgedehntes Operationsverfahren, entsprechend der Operation nach McKay und Simon mit Cincinnati-Zugang nicht als vorteilhaft.

Die Pedobarographie eignet sich in besonderer Weise als Verlaufskontrolle des postoperativen idiopathischen Klumpfußes vom Kleinkind bis zum Erwachsenen, da sie die dynamischen Prozesse und die Entwicklung der Biomechanik des Gehens beim Heranwachsen einfach und objektiv darstellt und dokumentiert. Die Voraussetzung ist jedoch die Fähigkeit zu laufen und das entsprechende Alter, um die nötige Mitarbeit aufzubringen. Klinische Untersuchungen des Klumpfußes insbesondere postpartal und im Säuglingsalter sind daher unerlässlich für Diagnosestellung und Therapieplanung. Zur besseren Beurteilung des Behandlungserfolges ist eine postpartale Dokumentation des idiopathischen Klumpfußes nach standardisiertem Vorgehen, beispielsweise entsprechend der Klassifikation nach Diméglio sinnvoll. Eine solche präoperative Dokumentation wurde in der vorliegenden Arbeit nicht erhoben und kann als Selbstkritik verstanden werden. Ebenso kritisch ist die geringe Patientenzahl, die dieser Studie zugrunde liegt, anzumerken. Insbesondere die Muskelvolumina am Unterschenkel unterliegen einer sehr hohen individuellen Variation und sind von vielen Kofaktoren, wie Aktivität und individueller Veranlagung abhängig.

In der vorliegenden Studie wurden Kinder mit Klumpfuß pedobarographisch nachuntersucht, die nach dem vor 10 Jahren gültigen Therapiestandard operativ behandelt wurden. Interessant wäre es in diesem Zusammenhang weitere pedobarographische Messungen von Kindern, die nicht operativ behandelt wurden, vorzunehmen und Langzeitverläufe zu dokumentieren und auszuwerten und anschließend mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie zu vergleichen.

Ein entscheidender Aspekt einer optimierten Behandlung des idiopathischen Klumpfußes ist die genaue und konsequente Nachbehandlung sowie Verlaufskontrolle. Angesichts der Fülle und Unterschiedlichkeiten der verschiedenen Bewertungssysteme und Klassifikationen des operierten idiopathischen Klumpfußes scheint ein großes Potential in der Verbesserung der Therapie in einheitlichen und

objektiven Messverfahren zu liegen. Diagnosestellung, Therapie und Behandlungserfolge werden dadurch vergleichbar. Die stete Weiterentwicklung und Verbreitung der Pedobarographie insbesondere in der ambulanten Patientenversorgung kann einen wichtigen Beitrag dazu leisten.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden 12 Kinder mit 19 operierten idiopathischen Klumpfüßen jahrelang beobachtet und in regelmäßigen Abständen klinisch und pedobarographisch nachuntersucht und mit einem Kontrollkollektiv verglichen. Ein Langzeitverlauf zwischen 7,0 und 9,8 Jahren konnte bei 4 Kindern anhand von pedobarographischen Messungen dokumentiert werden. Zudem wurde bei 10 Kindern ein MRT der Unterschenkel erstellt, an derer die Volumina der einzelnen Muskeln ausgemessen wurden. Zum Vergleich dienten die Aufnahmen von 2 gesunden Kindern und die gesunde Gegenseite bei 4 Patienten mit einseitigem Klumpfuß.

In der klinischen Untersuchung und der 4 gradigen Einteilung nach Diméglio zeigten bei 16 der operierten Füße ein sehr gutes bis gutes Ergebnis, ohne bemerkenswerte Veränderungen im Verlauf. Nur bei einem Patienten kam es zu einer Verschlechterung von Grad II auf Grad III.

In der Pedobarographie zeigten sich aufgrund der hohen Sensitivität der Pedobarographie deutliche Veränderungen im Vergleich zu einem Kontrollkollektiv, mit einer deutlich erhöhten Belastung des Mittelfußes sowie der lateralen Fußhälfte. Eine Differenzierung der 19 Klumpfüße und Beschreibung der dominierenden Fehlstellung des Fußes an Hand der plantaren Druckverteilung ergab 5 Füße mit physiologischer Pedogramm, 9 Residualklumpfüße, 2 Spitzfüße und 3 Senkfüße.

Im Langzeitverlauf von 4 Kindern konnten dynamische Veränderungen beobachtet werden, die dem gesunden Kontrollkollektiv im Verlauf ähnelten. Ausgehend von einer dem Klumpfuß typischen Druckverteilung, verringerte sich im Trend die Bodenkontaktzeit der Ferse, die Fersen- und Mittelfußlast während die Vorfußlast zunahm. Diese an sich physiologische Veränderung der plantaren Druckverteilung verstärkt hingegen beim Klumpfuß die bestehende Spitzfußstellung. Die individuellen Charakteristika der Klumpfüße im Pedogramm veränderten sich nur wenig. 2 Klumpfüße verstärkten Ihre Klumpfußstellung im Alter von 9 und 11 Jahren, bei einem weiteren kam es im Alter von 9 Jahren zu einem zunehmenden Senkfuß. Eine Spitzfußkomponente konnte bei 4 der 7 Klumpfüße nachgewiesen werden von denen 3 im Verlauf weiter zunahmen.

Anhand der MRT Bilder konnte ein deutlich reduziertes Gesamtvolumen am Unterschenkel der Klumpfüße im Vergleich zu gesunden Füßen gezeigt werden. Im Zusammenhang mit den Messergebnissen der pedobarographischen Untersuchungen werden Ursachen und Wechselwirkungen zwischen Veränderungen der knöchernen Strukturen, der Gelenke und der muskulären Anlagen beim Klumpfuß diskutiert. Die Muskelvolumendefizite korrelierten mit einer vermehrten Rigidität der Sprunggelenke. Weniger Betroffen waren zwei- und Mehrgelenkige Muskeln, wie der M. gastrocnemius und die Zehenmuskulatur. Das größte Volumendefizit wiesen die eingelenkigen Muskeln, der M. tibialis posterior und der M. soleus auf. Neben der Dynamik der Gelenke wirkt auch die Fußmorphologie auf die Muskelvolumina. Die vermehrte Supinationsstellung und der Verlust der Fußwölbung korrelierte mit einem vermehrten Volumendefizit des M. tibialis posterior und des M. tibialis anterior. Es kann in diesem Zusammenhang eine konsekutive Muskelreduktion aufgrund von primärer knöchern veränderter Gelenkfunktion und Morphologie des Fußes diskutiert werden. Andere Ursachen und Kausalitätsketten sind jedoch möglich.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden Messergebnisse zeigen keinen nennenswerten Unterschied in den angewandten Operationsverfahren, Operation nach Imhäuser und Operation nach McKay und Simon mit Cincinnati-Zugang.

Die Pedobarographie eignet sich als Mittel zur Nachuntersuchung von Klumpfüßen, die aufgrund der objektiven und einfachen Anwendung auch in der ambulanten Versorgung von Patienten angewendet werden kann. Die gemessenen Daten lassen sich schnell und für den Patienten und Laien gut verständlich in Form von farbigen Pedogrammen darstellen. Auf diese Weise kann die Pedobarographie einen wesentlichen Beitrag zur Behandlung des idiopathischen Klumpfußes leisten.

IV. Abkürzungsverzeichnis

AOI	areas of interest
ant.	anterior
cm	Zentimeter
et al.	et alii / et aliae
ext.	extensor
flex.	flexor
hall.	hallucis
IMSE	Institut für Medizinische Statistik und Epidemiologie
J.	Jahre
lat.	lateinisch
li	links
long.	longus
m	männlich / Meter
M.	musculus
Mm.	musculi
max.	Maximum
min.	Minimum
mkg	Meterkilogramm
MRT	Magnetresonanztomographie
N	Newton
n	Anzahl
OSG	oberes Sprunggelenk
post.	posterior
re	rechts
s	Sekunde
SSW	Schwangerschaftswoche
USG	unteres Sprunggelenk
w	weiblich

V. Literaturverzeichnis

- Aronson, J. & Puskarich, C. L. (1990). Deformity and disability from treated clubfoot. *J Pediatr Orthop*, 10(1), 109-119.
- Bensahel, H., Kuo, K. N. & Lehmann, W. (2009). Fifth International Clubfoot Congress IFPOS & ICFSG. *J Child Orthop*, 3, 67-83.
- Bertsch, C., Unger, H., Winkelmann, W. & Rosenbaum, D. (2004). Evaluation of early walking patterns from plantar pressure distribution measurements. First year results of 42 children. *Gait Posture*, 19(3), 235-242.
- Bill, P. L. & Versfeld, G. A. (1982). Congenital clubfoot: an electromyographic study. *J Pediatr Orthop*, 2(2), 139-142.
- Burgkart, R., Lampe, R., Gerdesmeyer, L. & Gradinger, R. (2003). Der kongenitale Klumpfuß. *MMW. Fortschr. Med.*, 145, 14, 33-36.
- Cahuzac, J. P., Baunin, C., Luu, S., Estivalezes, E., Sales de Gauzy, J. & Hobatho, M. C. (1999). Assessment of hindfoot deformity by three-dimensional MRI in infant club foot. *J Bone Joint Surg Br*, 81(1), 97-101.
- Carroll, N. C. (2012). Clubfoot in the twentieth century: where we were and where we may be going in the twenty-first century. *J Pediatr Orthop B*, 21(1), 1-6.
- Charles, Y. P., Canavese, F. & Dimeglio, A. (2006). Frühfunktionelle Behandlung des angeborenen Klumpfußes. *Orthopade*, 35(6), 665-668, 670-663.
- Cooper, D. M. & Dietz, F. R. (1995). Treatment of idiopathic clubfoot. A thirty-year follow-up note. *J Bone Joint Surg Am*, 77(10), 1477-1489.
- Davies, T. C., Kiefer, G. & Zernicke, R. F. (2001). Kinematics and kinetics of the hip, knee, and ankle of children with clubfoot after posteromedial release. *J Pediatr Orthop*, 21(3), 366-371.
- Dimeglio, A., Bensahel, H., Souchet, P., Mazeau, P. & Bonnet, F. (1995). Classification of clubfoot. *J Pediatr Orthop B*, 4(2), 129-136.

- Dobbs, M. B., Nunley, R. & Schoenecker, P. L. (2006). Long-term follow-up of patients with clubfeet treated with extensive soft-tissue release. *J Bone Joint Surg Am*, 88(5), 986-996.
- Duce, S. L., D'Alessandro, M., Du, Y., Jagpal, B., Gilbert, F. J., Crichton, L., Barker, S., Collinson, J. M., Miedzybrodzka, Z. (2013). 3D MRI analysis of the lower legs of treated idiopathic congenital talipes equinovarus (clubfoot). *PLOS One*, 8(1), e54100.
- Eberhardt, O., Peterlein, C. D., Fernandez, F. F. & Wirth, T. (2012). Mittelfristige Ergebnisse der Behandlung des idiopathischen Klumpfußes mit der Ponseti-Methode. *Z Orthop Unfall*, 150(2), 190-197.
- Eberhardt, O., Schelling, K., Parsch, K. & Wirth, T. (2006). Die Behandlung des kongenitalen Klumpfußes mit der Ponseti-Methode. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 144(5), 497-501.
- Epeldegui, T. & Delgado, E. (1995a). Acetabulum pedis. Part I: Talocalcaneonavicular joint socket in normal foot. *J Pediatr Orthop B*, 4(1), 1-10.
- Epeldegui, T. & Delgado, E. (1995b). Acetabulum pedis. Part II: Talocalcaneonavicular joint socket in clubfoot. *J Pediatr Orthop B*, 4(1), 11-16.
- Exner, G.U., Anderhuber, F., Waldi-Brändle, V., Jacob, H. A. C. & Windisch, G. (2005). Klumpfuß: Pathoanatomie, manuell-funktionelle und operative Behandlung. Darmstadt: Steinkopff.
- Feldbrin, Z., Gilai, A. N., Ezra, E., Khermosh, O., Kramer, U. & Wientroub, S. (1995). Muscle imbalance in the aetiology of idiopathic club foot. An electromyographic study. *J Bone Joint Surg Br*, 77(4), 596-601.
- Frey, S. (1987). *Die Pedographie, eine neue Methode zur Früherkennung einer Ulcusgefährdung beim Diabetiker*. (Med. Diss.), Ludwig Maximilian Universität München.

- Fukuhara, K., Schollmeier, G. & Uthoff, H. K. (1994). The pathogenesis of club foot. A histomorphometric and immunohistochemical study of fetuses. *J Bone Joint Surg Br*, 76(3), 450-457.
- Grill, F. (1996). Der Klumpfuß. *Orthopade*, 25(4), 364-378.
- Hamel, J. (2005). Kongressbericht: Klumpfuß-Primärbehandlung, Augsburg 2005. *FussSprungg*, 3, 136-139.
- Handelsman, J. E. & Badalamente, M. A. (1981). Neuromuscular studies in clubfoot. *J Pediatr Orthop*, 1(1), 23-32.
- Hefti, F. & Brunner, R. (1999). Das abgeflachte Fußlängsgewölbe. *Orthopade*, 28(2), 159-172.
- Hefti, F. & Brunner, R. (2006). *Kinderorthopädie in der Praxis* (2., erw. und vollst. überarb. Aufl. ed.). Heidelberg: Springer.
- Heilig, M. R., Matern, R. V., Rosenzweig, S. D. & Bennett, J. T. (2003). Current management of idiopathic clubfoot questionnaire: a multicentric study. *J Pediatr Orthop*, 23(6), 780-787.
- Hennig, E. M. & Milani, T. L. (1993). Die Dreipunktunterstützung des Fußes plantarer Druckmessung. Eine Druckverteilungsanalyse bei statischer und dynamischer Belastung. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 131(3), 279-284.
- Hennig, E. M. & Rosenbaum, D. (1991). Pressure distribution patterns under the feet of children in comparison with adults. *Foot Ankle*, 11(5), 306-311.
- Hennig, E. M., Staats, A. & Rosenbaum, D. (1994). Plantar pressure distribution patterns of young school children in comparison to adults. *Foot Ankle Int*, 15(1), 35-40.
- Herceg, M. B., Weiner, D. S., Agamanolis, D. P. & Hawk, D. (2006). Histologic and histochemical analysis of muscle specimens in idiopathic talipes equinovarus. *J Pediatr Orthop*, 26(1), 91-93.

- Honein, M. A., Paulozzi, L. J. & Moore, C. A. (2000). Family history, maternal smoking, and clubfoot: an indication of a gene-environment interaction. *Am J Epidemiol*, 152(7), 658-665.
- Hutchins, P. M., Foster, B. K., Paterson, D. C. & Cole, E. A. (1985). Long-term results of early surgical release in club feet. *J Bone Joint Surg Br*, 67(5), 791-799.
- Hutchinson, R. J., Betts, R. P., Donnan, L. T. & Saleh, M. (2001). Assessment of Ilizarov correction of club-foot deformity using pedobarography. A preliminary report. *J Bone Joint Surg Br*, 83(7), 1041-1045.
- Imhäuser, G. (1977). Was bedeutet ein verkleinerter Winkel zwischen Talus- und Kalkaneuslängsachse im Röntgenbild des angeborenen Klumpfußes? *Arch Orthop Unfallchir*, 88(2), 163-167.
- Imhäuser, G. (Ed.). (1984). *Die Behandlung des idiopathischen Klumpfußes*. Stuttgart: Enke.
- Imhoff, A. B. & Zollinger-Kies, H. (2004). *Fußchirurgie*. Stuttgart, New York: Thieme.
- Ippolito, E. (1995). Update on pathologic anatomy of clubfoot. *J Pediatr Orthop B*, 4(1), 17-24.
- Ippolito, E., De Maio, F., Mancini, F., Bellini, D. & Orefice, A. (2009). Leg muscle atrophy in idiopathic congenital clubfoot: is it primitive or acquired? *J Child Orthop*, 3(3), 171-178.
- Ippolito, E., Dragoni, M., Antonicoli, M., Farsetti, P., Simonetti, G. & Masala, S. (2012). An MRI volumetric study for leg muscles in congenital clubfoot. *J Child Orthop*, 6, 433-438.
- Ippolito, E., Farsetti, P., Caterini, R. & Tudisco, C. (2003). Long-term comparative results in patients with congenital clubfoot treated with two different protocols. *J Bone Joint Surg Am*, 85-A(7), 1286-1294.

- Ippolito, E. & Ponseti, I. V. (1980). Congenital club foot in the human fetus. A histological study. *J Bone Joint Surg Am*, 62(1), 8-22.
- Irani, R. N. & Sherman, M. S. (1972). The pathological anatomy of idiopathic clubfoot. *Clin Orthop Relat Res*, 84, 14-20.
- Isaacs, H., Handelsman, J. E., Badenhorst, M. & Pickering, A. (1977). The muscles in club foot - a histological histochemical and electron microscopic study. *J Bone Joint Surg Br*, 59-B(4), 465-472.
- Itohara, T., Sugamoto, K., Shimizu, N., Ohno, I., Tanaka, H., Nakajima, Y., Sato, Y., Yoshikawa, H. (2005). Assessment of the three-dimensional relationship of the ossific nuclei and cartilaginous anlagen in congenital clubfoot by 3-D MRI. *J Orthop Res*, 23(5), 1160-1164.
- Jacks, D., Alvarez, C., A., Black & DeVera, M. (2009). Pedobarographic Profiles of Children with Clubfoot. *J Bone Joint Surg Br*, 91-B, 235.
- Jeans, K. A. & Karol, L. A. (2010). Plantar pressures following Ponseti and French physiotherapy methods for clubfoot. *J Pediatr Orthop*, 30(1), 82-89.
- Karol, L. A., Concha, M. C. B. S. & Johnston, C. E. (1997). Gait Analysis and Muscle Strength in Children with surgically Treated Clubfeet. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 17 (6), 790-795.
- Karol, L. A., O'Brien, S. E., Wilson, H., Johnston, C. E. & Richards, B. S. (2005). Gait analysis in children with severe clubfeet: early results of physiotherapy versus surgical release. *J Pediatr Orthop*, 25(2), 236-240.
- Kawashima, T. & Uthoff, H. K. (1990). Development of the foot in prenatal life in relation to idiopathic club foot. *J Pediatr Orthop*, 10(2), 232-237.
- Khan, A. M., Ryan, M. G., Gruber, M. M., Haralabatos, S. P. & Badalamente, M. A. (2001). Connective tissue structures in clubfoot: a morphologic study. *J Pediatr Orthop*, 21(6), 708-712.

- Krauspe, R. & Parsch, K. (1995). Die peritalare Arthrolyse zur Klumpfußkorrektur über den sogenannten Cincinnati-Zugang. *Oper Orthop Traumatol.*, 7(2), 128-140.
- Krauspe, R., Westhoff, B. & Wild, A. (2006). *Der Klumpfuß*. Stuttgart: Thieme.
- Lampe, R., Grassl, S., Mitternacht, J., Gerdesmeyer, L. & Gradinger, R. (2006). MRT-measurements of muscle volumes of the lower extremities of youths with spastic hemiplegia caused by cerebral palsy. *Brain Dev*, 28(8), 500-506.
- Lampe, R. & Mitternacht, J. (2011). Research on the performance of the spastic calf muscle of young adults with cerebral palsy. *J Clin Med Res*, 3(1), 8-16.
- Lampe, R., Mitternacht, J., Schrodli, S., Gerdesmeyer, L., Nathrath, M. & Gradinger, R. (2004). Einsatz des Ganglabors bei klinisch-orthopädischen Fragestellungen in der Kinderorthopädie. *Klin Padiatr*, 216(2), 72-78.
- Lichtinger, T. K., Mladenov, K., v. Schulze Pellengahr, C., v. Engelhardt, L. V., Teske, W. (2012). Der kindliche idiopathische Klumpfuß. *OUP*, 3(1), 115-120.
- Liu, X. C., Thometz, J. G., Tassone, C., Barker, B. & Lyon, R. (2005). Dynamic plantar pressure measurement for the normal subject: Free-mapping model for the analysis of pediatric foot deformities. *J Pediatr Orthop*, 25(1), 103-106.
- Lochmiller, C., Johnston, D., Scott, A., Risman, M. & Hecht, J. T. (1998). Genetic epidemiology study of idiopathic talipes equinovarus. *Am J Med Genet*, 79(2), 90-96.
- Maier, E. & Killmann, M. (2003). *Kinderfuß und Kinderschuh: Entwicklung der kindlichen Beine und Füße und ihre Anforderungen an fußgerechte Schuhe*. München: Verlag Neuer Merkur.

- Malliwitz, J. (2000). *Langzeitergebnisse nach operativer Korrektur einer angeborenen Klumpfußdeformität*. (Med. Diss.), Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.
- McKay, D. W. (1983). New concept of and approach to clubfoot treatment: Section III--evaluation and results. *J Pediatr Orthop*, 3(2), 141-148.
- Mitternacht, J. & Lampe, R. (2006). Ermittlung funktioneller kinetischer Parameter aus der plantaren Druckverteilungsmessung. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 144(4), 410-418.
- Morcuende, J. A., Dolan, L. A., Dietz, F. R. & Ponseti, I. V. (2004). Radical reduction in the rate of extensive corrective surgery for clubfoot using the Ponseti method. *Pediatrics*, 113(2), 376-380.
- Munshi, S., Varghese, R. A. & Joseph, B. (2006). Evaluation of outcome of treatment of congenital clubfoot. *J Pediatr Orthop*, 26(5), 664-672.
- Niethard, F. U. & Carstens, C. (1997). *Kinderorthopädie*. Stuttgart: Thieme.
- Niki, H., Nakajima, H., Hirano, T., Okada, H. & Beppu, M. (2013). Effect of Achilles tenotomy on congenital clubfoot-associated calf-muscle atrophy: an ultrasonographic study. *J Orthop Sci*, 18(4), 552-556.
- Nordin, S., Aidura, M., Razak, S. & Faisham, W. (2002). Controversies in congenital clubfoot : literature review. *Malays J Med Sci*, 9(1), 34-40.
- Novel_GmbH. (2007). emed-at & emed-m Pedographie Systeme. *Flyer zur Produktinformation*.
- Pauk, J., Daunoraviciene, K., Ihnatouski, M., Griskevicius, J. & Raso, J. V. (2010). Analysis of the plantar pressure distribution in children with foot deformities. *Acta Bioeng Biomech*, 12(1), 29-34.
- Ponseti, I. V. & Campos, J. (2009). The classic: observations on pathogenesis and treatment of congenital clubfoot. 1972. *Clin Orthop Relat Res*, 467(5), 1124-1132.

- Ponseti, I. V., Zhivkov, M., Davis, N., Sinclair, M., Dobbs, M. B. & Morcuende, J. A. (2006). Treatment of the complex idiopathic clubfoot. *Clin Orthop Relat Res*, 451, 171-176.
- Putti, A. B., Arnold, G. P., Cochrane, L. A. & Abboud, R. J. (2008). Normal pressure values and repeatability of the Emed ST4 system. *Gait Posture*, 27(3), 501-505.
- Radler, C., Suda, R., Manner, H. M. & Grill, F. (2006). Frühe Ergebnisse der Ponseti-Methode zur Behandlung des idiopathischen Klumpfußes. *Z Orthop Ihre Grenzgeb*, 144(1), 80-86.
- Razeghi, M. & Batt, M. E. (2002). Foot type classification: A critical review of current methods. *Gait Posture*, 15(3), 282-291.
- Rosenbaum, D. & Becker, H. P. (1997). Plantar pressure distribution measurements. Technical background and clinical application. *Foot Ankle*, 3(1), 1-14.
- Schaff, P., Reinisch, P., Mitternacht, J. & Senner, V. (1991). Praktikabilität contra Messtechnik. *Orthopädie-Technik*, 787-795.
- Schinkhof, C. (2003). *Pedobarometrische Analyse der Restdeformität nach Klumpfußkorrektur*. (Med Diss), Universität Münster.
- Schlegel, U. J., Batal, A., Pritsch, M., Sobottke, R., Roellinghoff, M., Eysel, P., Michael, J. W. (2010). Functional midterm outcome in 131 consecutive cases of surgical clubfoot treatment. *Arch Orthop Trauma Surg*, 130(9), 1077-1081.
- Schlegel, W. & Krämer, J. (Eds.). (1994). *Der Säuglings- und Kleinkinderfuß: Grenzen des Normalen und Anfänge des Pathologischen*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag.
- Schuh, A., Goske, R., Salminen, S., Zeiler, G. & Schraml, A. (2005). Ergebnisse der operativen Behandlung des idiopathischen Klumpfußes unter

- Verwendung eines dorsomedialen Zuganges mit Weichteilpreparation "a la carte". *Zentralbl Chir*, 130(6), 568-575.
- Schünke, M., Voll, M. & Wesker, K. (Eds.). (2004). *Prometheus Lernatlas der Anatomie*. Stuttgart, New York: Thieme.
- Simons, G. W. (1978). A standardized method for the radiographic evaluation of clubfeet. *Clin Orthop Relat Res*(135), 107-118.
- Simons, G. W. (1985). Complete subtalar release in club feet. Part II - Comparison with less extensive procedures. *J Bone Joint Surg Am*, 67(7), 1056-1065.
- Sinclair, M. F., Bosch, K., Rosenbaum, D. & Böhm, S. (2009). Pedobarographic analysis following Ponseti treatment for congenital clubfoot. *Clin Orthop Relat Res*, 467(5), 1223-1230.
- Singh, B. I. & Vaishnavi, A. J. (2005). Modified Turco procedure for treatment of idiopathic clubfoot. *Clin Orthop Relat Res*, 438, 209-214.
- Trobisch, P. & Neidel, J. (2009). Comparison of clinical and pedobarographic measures in clubfeet treated with posteromedial soft-tissue release. *Current Orthopaedic Practice*, 20(2), 170-174.
- v. Lanz, T., Wachsmuth, W. & Lang, J. (Eds.). (1972). *Klassiker der Medizin - praktische Anatomie - Bein und Statik* (2. ed.). Berlin: Springer.
- van der Leeden, M., Dekker, J. H., Siemonsma, P. C., Lek-Westerhof, S. S. & Steultjens, M. P. (2004). Reproducibility of plantar pressure measurements in patients with chronic arthritis: a comparison of one-step, two-step, and three-step protocols and an estimate of the number of measurements required. *Foot Ankle Int*, 25(10), 739-744.
- van Gelder, J. H., van Ruiten, A. G., Visser, J. D. & Maathuis, P. G. (2010). Long-term results of the posteromedial release in the treatment of idiopathic clubfoot. *J Pediatr Orthop*, 30(7), 700-704.
- Waschak, K., Radler, C. & Grill, F. (2009). Der kongenitale Klumpfuß. *Z Orthop Unfall*, 147, 241-262.

- Weimann-Stahlschmidt, K., Krauspe, R. & Westhoff, B. (2010). Kongenitaler Klumpfuß. *Orthopade*, 39(11), 1071-1084.
- Wess, K. M. (2009). *Charakterisierung des Kollagens im Ligamentum deltoideum beim kongenitalen Klumpfuß und beim gesunden Fuß*. (Med. Diss.), Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.
- Westhoff, B., Weimann-Stahlschmidt, K. & Krauspe, R. (2008). Der kongenitale Klumpfuß. *Orthopädie und Unfallchirurgie up2date*, 3(2), 95-114.
- Windisch, G., Anderhuber, F., Haldi-Brandle, V. & Exner, G. U. (2007a). Anatomical study for an update comprehension of clubfoot. Part I: Bones and joints. *J Child Orthop*, 1(1), 69-77.
- Windisch, G., Anderhuber, F., Haldi-Brandle, V. & Exner, G. U. (2007b). Anatomical study for an updated comprehension of clubfoot. Part II: Ligaments, tendons and muscles. *J Child Orthop*, 1(1), 79-85.
- Wirth, C. J. & Mutschler, W. (Eds.). (2009). *Praxis der Orthopädie und Unfallchirurgie* (Vol. 2). Stuttgart: Thieme.
- Wrage-Brors, E. (2006). *Ergebnisse chirurgischer Klumpfußversorgung: unter Berücksichtigung von 3-D-Ganganalyse, Pedobarographie, Röntgen und klinischer Untersuchung*. (Med. Diss.), Medizinische Hochschule Hannover.
- Wynne-Davies, R. (1964). Family Studies and the Cause of Congenital Club Foot. Talipes Equinovarus, Talipes Calcaneo-Valgus and Metatarsus Varus. *J Bone Joint Surg Br*, 46, 445-463.
- Zionts, L. E., Zhao, G., Hitchcock, K., Maewal, J. & Ebramzadeh, E. (2010). Has the rate of extensive surgery to treat idiopathic clubfoot declined in the United States? *J Bone Joint Surg Am*, 92(4), 882-889.