

Müller S¹, Baur H¹, Hirschmüller A², Mayer F¹

Validität des COP-Verlaufes zur Quantifizierung der funktionalen Gangentwicklung bei Kindern

Validity of the COP-Path to quantify functional gait development in children

¹ Institut für Sportmedizin und Prävention, Universität Potsdam

² Abteilung Präventive und Rehabilitative Sportmedizin, Medizinische Klinik, Universität Freiburg

Zusammenfassung

Die Beurteilung der funktionalen Gangentwicklung bei Kindern anhand biomechanischer Größen wird derzeit kontrovers diskutiert. Ziel der Untersuchung war die Überprüfung einer validen Charakterisierung der kindlichen Gangentwicklung über den Verlauf des plantaren Druckschwerpunktes (COP) während der Abrollbewegung des Fußes.

255 Kinder zwischen 2 und 15 Jahren wurden im Gang barfuß mittels einer Druckmessplatte untersucht. Der mediolaterale Verlauf des COPs, über die mit der Fußhalbierenden medial/lateral eingeschlossenen Fläche (A_{med} , A_{lat} , $\Sigma: A_{ml}$), und die Zeitdauer des COP-Verlaufes in den Fußregionen Ferse (COP_{timeF}), Mittelfuß (COP_{timeM}) und Vorfuß (COP_{timeV}), wurde analysiert. Als Maß für die interindividuelle Variabilität wurde der Variationskoeffizient (VC) berechnet. Zusätzlich wurde eine Lastverteilungsanalyse im medialen und lateralen Vorfuß durchgeführt. Die mediolaterale Abweichung des COP (A_{ml}) sinkt im Verlauf der Entwicklung zuerst ab (-20,2%), bevor ein erneuter kontinuierlicher Anstieg folgt (+27,2%). Der VC von A_{med} , A_{lat} und A_{ml} bleibt über die Entwicklung unverändert. COP_{timeM} ist bei allen Kindern konstant. Dem gegenüber nimmt COP_{timeF} im Verlauf ab (-31,0%), COP_{timeV} dagegen steigt an (+41,7%). Die Lastverteilungsanalyse ergab keine Unterschiede.

Der COP-Verlauf kann die funktionale Gangentwicklung bei Kindern charakterisieren. Die Werte des Variationskoeffizienten deuten jedoch auf ein hohes Maß an Individualität der kindlichen Gangbewegung hin. Altersbezogene Normwerte sind in diesem Zusammenhang kritisch zu betrachten.

Schlüsselwörter: funktional, Gangentwicklung, Kinder, plantare Druckverteilung, Validierung

Einleitung/Problem- und Zielstellung

Unterschiede zwischen dem Gang von Kindern und dem von Erwachsenen sind unbestritten (1, 13, 14, 15, 19, 20, 30, 35). Im Gegensatz dazu wird die Ausdifferenzierung der Gangbewegung in verschiedene Entwicklungsabschnitte kontrovers diskutiert. Die Entwicklungsphasen vom kindlichen Gang bis hin zum ausgereiften erwachsenen Gang werden dabei im Allgemeinen über Begriffe wie „supported locomotion“, „independent walking“, „matur similar gait“ und schließlich „mature gait“ beschrieben (9, 8, 33). Die Abgrenzung der unterschiedlichen Phasen gestaltet sich jedoch schwierig. Besonders hohe inter- und

Summary

Functional gait development in children is discussed controversially. Differentiated information about the roll-over process of the foot, represented by the “Center of Pressure” (COP), are still missing. The purpose of the study was the validation of the COP-path to quantify the functional gait development of children.

Plantar pressure distribution was measured barefoot with an individual speed on a walkway (tartan) - in 255 children aged between 2 and 15 years. The medial and lateral area enclosed between the COP-path and the bisection of plantar angle (A_{med} , A_{lat} , $\Sigma: A_{ml}$) was calculated from plantar pressure data. Furthermore, the duration of the COP-path in the heel (COP_{timeF}), midfoot (COP_{timeM}) and forefoot (COP_{timeV}) was analysed. The load distribution under the medial and lateral forefoot was also calculated. The variation coefficient (VC) was calculated as a measure of interindividual variability.

The medio-lateral divergency of the COP (A_{ml}) initially decreases with advancing age (-20.2%), followed by a continuous increase (+27.2%). No changes in VC (A_{med} , A_{lat} , and A_{ml}) appeared during age-related development. COP_{timeM} remains constant in all children over time. In contrast to COP_{timeM} , COP_{timeF} decreases from youngest to oldest children (-31.0%), and COP_{timeV} increases (+41.7%). After initial descent up to 8 years of age, VC (COP_{timeF} , COP_{timeM} , COP_{timeV}) remains constant. The mediolateral load under the forefoot did not change.

The COP-Path is able to characterise the functional gait development of children. VC values indicate high individual variability of gait pattern. In this context, age-based standard values should be critically discussed.

Key words: children, functional, gait development, plantar pressure, validation

intraindividuelle Unterschiede sind für den Gang bei Kindern charakteristisch und erschweren eine Einteilung in Entwicklungsphasen (13). Für eine optimale Schuhversorgung in der praktischen Anwendung wie auch zur medizinischen Beurteilung der kindlichen Gangbewegung sind jedoch differenzierte Ergebnisse hinsichtlich der funktionalen Gangentwicklung essentiell. So wird beispielsweise bislang der Zeitpunkt, ab dem Kinder sich wie Erwachsene fortbewegen, unterschiedlichen Altersabschnitten zugeordnet. Häufig wird bis zu einem Alter von ca. 7 Jahren eine Stabilisierung der meisten Gangparameter festgestellt und damit von einem dem Erwachsenen ähnlichen Gangmuster („matur similar gait“) ausgegangen (10, 33). In der aktuellen Literatur wird dem gegen-

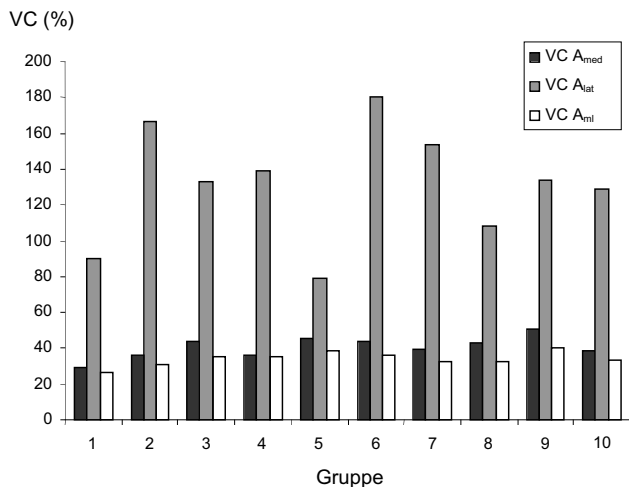


Abbildung 1: Variationskoeffizient VC (%) für A_{med}, A_{lat} und A_{ml} nach Gruppe

über auch vermehrt von einer längeren Entwicklung und damit einem späteren Erreichen des Erwachsenengangs ausgegangen (25). Interessant ist in diesem Zusammenhang darüber hinaus, dass in höherem Alter erneut eine teilweise Rückentwicklung zu kindlichen Gangmustern berichtet wird (13). Von einer initialen Gangentwicklung bis zu einem definierten Alter und einer darauf folgenden gleich bleibenden Bewegungsform über das gesamte Erwachsenenalter ist dementsprechend nicht auszugehen.

Biomechanische Messmethoden (kinematisch, kinetisch, neurophysiologisch) helfen bei der Beurteilung der Gangbewegung und -entwicklung über die Quantifizierung charakteristischer Merkmale (6, 11, 24, 26). Die dabei zugrunde liegenden Messgrößen sind einerseits mehr dem strukturell/ morphologischen und andererseits dem funktionalen Bereich zuzuordnen. Häufig verwendete Messvariablen, die eher dem funktionalen Bereich zuzuordnen sind, wie z.B. der maximal auftretende Druck (PP) an der Fußsohle, gemessen über eine plantare Druckverteilung (2, 15, 23), beschreiben zeitlich und räumlich nur begrenzt die komplexe Gangbewegung. Der Informationsgehalt der plantaren Druckmessung, wird, abhängig von Messgröße, auf z.B. das Auftreten der maximalen Druckbelastung eines Einzelsensors beim PP, stark reduziert. Für eine differenzierte Betrachtung der Gangentwicklung unter funktionalen Aspekten wäre es deshalb von Vorteil, valide Messgrößen unter möglichst komplexer Berücksichtigung des zeitlichen und räumlichen Verlaufes zu betrachten. Die dynamische plantare Druckverteilungsmessung stellt mit der zeitlichen und räumlichen Erfassung der Belastung am Fuß hierfür grundsätzlich eine sinnvolle Methode dar (7, 15, 17, 21, 24). Neben dem PP setzten sich deshalb zunehmend auch weitere Messgrößen der plantaren Druckmessung durch (7, 12, 24). Der Verlauf des Druckschwerpunktes (COP-Verlauf) bietet dabei eine Möglichkeit, sowohl die zeitliche, als auch die räumliche Komponente des gesamten Fußes in der Abrollbewegung zu berücksichtigen und zu analysieren. Ergebnisse unter Verwendung des PP und einer Lastverteilungsanalyse anhand von regionalen Masken, zeigen so-

wohl Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen als auch eine Medialisierung der Druckverteilung im Vorfuß über den Altersgang bei Kindern (15). Bezüglich des COP-Verlaufes wurden Ergebnisse von Cornwall hinsichtlich des Geschwindigkeitsverlaufes des COPs bei Erwachsenen veröffentlicht (7). Bei Kindern liegen nur für die ersten zwei Monate des freien Gehens (independent walking) Ergebnisse hinsichtlich des COP-Verlaufes vor (12). Es konnte gezeigt werden, dass sich der COP-Verlauf nach einem initial äußerst instabilen Muster zunehmend im Mittelfuß lateralisiert, bevor dieser im Vorfuß nach medial geht. Den bisherigen Studien zufolge ist in Bezug auf die plantare Druckverteilung bei Kindern eine Stabilisierung der Abrollbewegung mit zunehmender mediolateraler Undulation des COP-Verlaufes zu erwarten. In wieweit der COP-Verlauf eine geeignete Messgröße darstellt, ist ungeklärt, da differenzierte Informationen, und dies über eine größere Altersspanne bei Kindern, über den COP-Verlauf bislang fehlen (4, 12).

Ziel dieser Studie war entsprechend die Validierung des COP-Verlaufes zur Quantifizierung der funktionalen Gangentwicklung bei Kindern im Altersgang.

Material und Methode

255 Kinder (53 % Jungen, 47 % Mädchen) im Alter zwischen 2 und 15 Jahren (Alter $7,7 \pm 3,1$ (Jahre); Größe $129,5 \pm 18,1$ (cm); Gewicht $29,4 \pm 10,9$ (kg)) wurden in die Studie eingeschlossen. Die Teilnahme erfolgte nach schriftlicher Einverständniserklärung der Eltern. Entsprechend den Einschlusskriterien musste die Schuhgröße der Kinder zwischen 25 und 40 liegen. Ausschlusskriterien waren ein akuter oder chronischer Allgemeinfekt, Beschwerden im Bereich der unteren Extremität wie auch bestehende Voroperationen im Bereich der Füße. In einem ersten Schritt wurde die Fußlänge (Fl) (cm) erfasst. Barfuß, bei individueller Ganggeschwindigkeit (GG; Lichtschrankenkontrolliert; Alge Timing[®]), wurde dann über eine im Boden eingelassene Druckmessplattform (Novel Emed SF[®], 4 Sensoren pro cm², Messfrequenz 50Hz) die plantare Druckverteilung beim Gang über Grund erhoben. Der Untergrund bestand aus einem glatten Tartanboden. Nach einer Übungs- und Gewöhnungsphase wurden die Kinder mit einem entsprechenden Abstand zur Messplattform so platziert, dass sie frühestens mit dem vierten Schritt auf die Messfläche traten und so ein möglichst natürliches Gangmuster zeigten (3). Es folgten so viele Gangversuche mit dem rechten Bein, bis 5 (mindestens 3) flüssige gültige Messungen (vollständiger separater Fußabdruck auf der Messfläche, ohne Stand oder Stolperbewegung) absolviert waren (22). Gerade bei den kleinsten Kindern war es nicht immer möglich, 5 gültige Versuche zu erreichen. Dementsprechend wurde nach 3 absolvierten brauchbaren Durchgängen abgebrochen. Die Auswertung der Druckmessdaten erfolgte mittels der Herstellersoftware Novel pedar-standard[®], basics[®], multimask[®] und gaitline[®]. Als Messgrößen der mediolateralen Undulation (räumliche Komponente) des COP-Verlaufes wurde die von dem COP-Verlauf

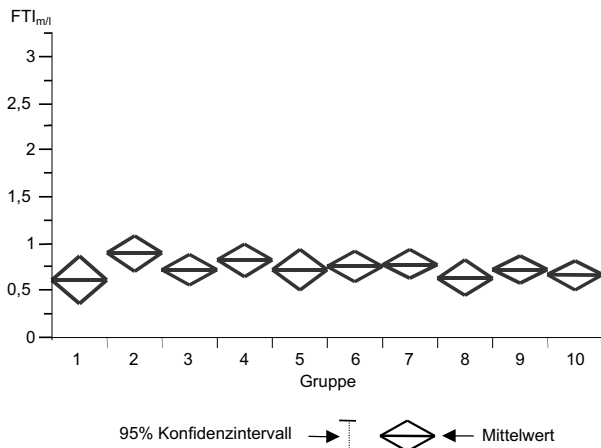


Abbildung 2: Quotient des medialen und lateralen Kraft-Zeit-Integrals $FTI_{m/l}$ im Vorfußbereichs ($FTI_{m/l}$) in den Gruppen. Dargestellt mit Mittelwert und 95 % Konfidenzintervall

und der Fußballierenden (bisection of plantar angle) lateral und medial eingeschlossenen Fläche (A_{lat} und A_{med}) (cm^2) als Einzelkomponente und in der Summe (A_{ml}), über den gesamten Fuß, berechnet (Softwaretool axis®) und anschließend auf die Kontaktfläche (cm^2) des Fußes normalisiert. Die angegebenen Werte für A_{lat}/A_{med} u A_{ml} verstehen sich deshalb als Prozentangabe bezogen auf die Kontaktfläche des Fußes (%). Zusätzlich fand die Bestimmung (in der Zeitdomäne) der Dauer des COP-Verlaufes (COP_{time}) in Prozent der Bodenkontaktzeit (%) in den Fußregionen Ferse ($COP_{time F}$), Mittelfuß ($COP_{time M}$) und Vorfuß ($COP_{time V}$) (Soft-

Tabelle 1: COP-Verlaufsanalyse: Gruppierung der Kinder (nach Fußlänge (Fl)) mit zugehörigem Alter und der Anzahl N der analysierten Kinder. Dargestellt ist die Ganggeschwindigkeit (GG), die mediale (A_{med}), laterale (A_{lat}) und die gesamte (A_{ml}) Fläche, die der COP-Verlauf mit der Fußlängsachse einschließt (in % der gesamten Fußfläche), sowie der zeitliche Verlauf des COPs im Bereich der Ferse ($COP_{time F}$), Mittelfuß ($COP_{time M}$) und Vorfuß ($COP_{time V}$) (in % der Bodenkontaktzeit). Angegeben ist der Mittelwert +- Standardabweichung

Gruppe (N)	Fl (cmZ)	Alter (J.)	GG (km/h)	A_{med} %	A_{lat} %	A_{ml} %	$COP_{time F}$ %	$COP_{time M}$ %	$COP_{time V}$ %
1 (14)	15-16	2,6 ±0,6	2,8	9,5 ±2,8	3,4 ±3,1	12,9 ±3,5	24,2 ±13,5	39,6 ±14,2	36,2 ±14,5
2 (21)	16-17	4,4 ±1,0	2,5	11,7 ±4,2	0,9 ±1,6	12,7 ±3,9	19,3 ±14,1	37,8 ±10,0	42,8 ±9,3
3 (32)	17-18	4,9 ±1,0	2,9	10,2 ±4,5	1,8 ±2,4	12,0 ±4,2	18,3 ±13,1	38,4 ±13,2	43,3 ±12,2
4 (26)	18-19	5,6 ±1,3	3,4	10,0 ±3,6	1,0 ±1,4	11,0 ±3,9	22,7 ±12,7	37,0 ±12,7	40,3 ±10,6
5 (16)	19-20	6,3 ±1,0	3,9	10,0 ±4,6	1,0 ±0,8	11,0 ±4,2	20,0 ±10,2	32,3 ±8,5	46,8 ±8,8
6 (29)	20-21	7,2 ±1,5	3,7	9,4 ±4,1	0,9 ±1,7	10,3 ±3,8	23,9 ±10,8	31,8 ±7,3	44,7 ±9,9
7 (31)	21-22	9,1 ±1,4	4,4	10,0 ±3,9	1,4 ±2,1	11,4 ±3,7	19,6 ±7,2	32,4 ±8,0	48,0 ±8,9
8 (21)	22-23	10,3 ±1,5	4,7	9,9 ±4,2	1,5 ±1,6	11,4 ±3,7	17,5 ±5,8	31,3 ±10,1	51,1 ±9,5
9 (33)	23-24	11,1 ±1,6	4,2	10,2 ±5,2	2,2 ±3,0	12,5 ±5,1	19,2 ±8,5	33,0 ±7,7	47,5 ±9,9
10 (32)	24-25	11,3 ±1,5	4,3	11,7 ±4,5	1,4 ±1,9	13,1 ±4,3	16,7 ±7,6	31,9 ±7,0	51,3 ±8,1

waretool podometry®) statt (31). Um Vergleiche mit der vorhandenen Literatur zu erlauben, wurde außerdem eine Lastverteilungsanalyse über den Quotient des Kraftzeitintegrals ($FTI_{m/l}$) zwischen der lateralen (MFK3-5) und der medialen (MFK1) Region im Vorfuß (Abb. 2). Die Basis der Analyse war ein aus 5 (minimal 3) Schritten gemittelter durchschnittlicher rechter Schritt pro Kind (Softwaretool average®). Einzelne Datenfiles waren softwarebegründet nicht auswertbar, so dass bei diesen Kindern keine Daten für den rechten Fuß (messgrößenabhängig) vorlagen.

Die statistische Analyse beinhaltete eine initiale Gruppierung der Daten. Dies erfolgte nach dem strukturellen Merkmal der statischen Fußlänge in 1cm-Abständen. Die Gang-

geschwindigkeit wurde in Bezug auf die Fußlänge dargestellt. Nach abgeschlossener Plausibilitätskontrolle wurde zunächst eine deskriptive Analyse mit Mittelwert, Standardabweichung und 95 % Konfidenzintervall durchgeführt. Anschließend folgte die hypothesenprüfende Auswertung auf statistische Signifikanz mittels einfaktorierlicher, univariater Varianzanalyse sowie dem Post hoc-Test nach Tukey-Kramer auf dem zweiseitigen Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha=0,05$). Zusätzlich wurde der Variationskoeffizient zur Bestimmung der Interindividuellen Variabilität für die Messgrößen des COP berechnet.

Ergebnisse

Die Entwicklung des strukturellen Merkmales „Fußlänge“ in Bezug auf das kalendarische Alter verläuft, im Mittel über die Altersgruppen betrachtet, linear ansteigend. Zwischen der Fußlänge und dem kalendarischen Alter besteht ein enger Zusammenhang ($r = 0,90$). Die Ganggeschwindigkeit nimmt bis zu den Kindern in Gruppe 7 von 2,8 auf 4,7 km/h zu und stagniert anschließend (Tab. 1).

Mediolaterale Undulation des COP: Die mediolaterale Abweichung des COP-Verlaufes A_{ml} von der Fußlängsachse nimmt bis zur Gruppe 6 ab (Tab. 1) und steigt anschließend wieder kontinuierlich an. Die Kinder der Gruppe 1 und der Gruppe 10 unterscheiden sich nicht statistisch signifikant. A_{ml} nimmt von der Gruppe 1 zu den Kindern der Gruppe 7 um 20,2 % ab. Die folgende Zu-

nahme hin zu den größten Kindern (Gruppe 10) beträgt für A_{ml} 27,2 % (Tab. 1). Unterteilt in den medialen und lateralen Anteil (A_{med}/A_{lat}), kann für A_{med} und A_{lat} eine diskontinuierliche Entwicklung über die gesamte Spanne festgestellt werden. Der Variati-

onskoeffizient ist bei A_{lat} am höchsten, bleibt aber bei allen drei Messgrößen über die Entwicklung der Fußlänge konstant (Abb. 1).

Zeitverlauf des COP: Der $COP_{time F}$ verläuft bei den kleinsten im Gegensatz zu den größeren Kindern länger im Rückfußbereich und unterscheidet sich dabei auch statistisch signifikant ($p < 0,05$) zwischen den kleinsten und größten Kindern. $COP_{time M}$ bleibt über die unterschiedlichen Gruppen unverändert. Der $COP_{time V}$ nimmt mit zunehmender Fußlänge zu (Tab. 1). Die Veränderung, von den kleinsten Kindern (Gruppe 1) ausgegangen, beträgt 31,0 %. $COP_{time V}$ unterscheidet sich statistisch signifikant zwischen den kleinsten (Gruppe 1) und größten Kindern

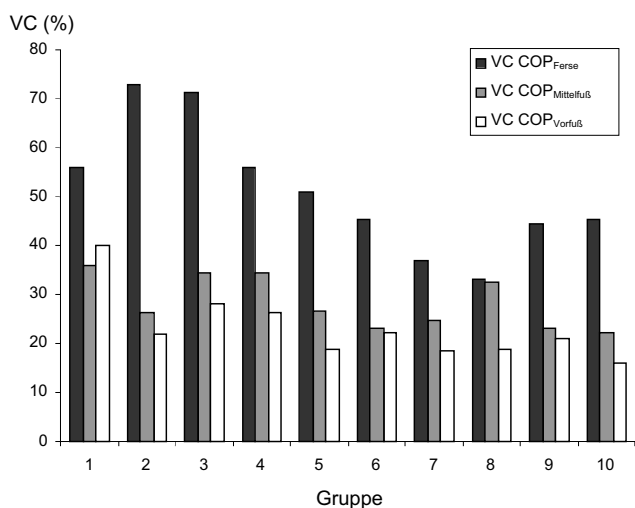


Abbildung 3: Variationskoeffizient VC (%) des COP_{time} nach Fußregion (Ferse: COP_{time F}; Mittelfuß: COP_{time M}; Vorfuß: COP_{time V}) und Gruppe unterteilt

(Gruppe 10) (Tab. 1). Der Variationskoeffizient nimmt für die drei Messgrößen COP_{time F}, COP_{time M} und COP_{time V} bis zu der Gruppe 6 bis 7 ab und stagniert im weiteren Verlauf (Abb. 3). FTI_{m/l} zeigt über den Altersgang der Kinder keinen statistisch signifikanten Unterschied (Abb. 2).

Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte bestätigt werden, dass sich die kindliche Gangbewegung im Altersgang verändert. Die Entwicklung hin zu einem ausgereiften erwachsenen Gangmuster erfolgt dabei sowohl bezüglich strukturell/morphologischer als auch funktionaler Kriterien (12, 15, 16, 18, 28). Im Rahmen der Ganganalyse von Kindern ist dabei eine Beurteilung der individuellen Gangbewegung/-entwicklung allerdings nur realisierbar, wenn valide Kriterien zugrunde liegen. Gerade die plantare Druckmessung erlangte dabei, bislang vor allem mit Messgrößen wie dem maximalen Druck oder dem Kraft-Zeit-Integral, eine zunehmende Bedeutung (15, 16). Die Validität des COP-Verlaufes als Messgröße zur quantitativen Beurteilung der komplexen funktionalen Gangentwicklung ist jedoch noch weitgehend unbeachtet geblieben. Ziel dieser Studie war dementsprechend die Validierung des COP-Verlaufes zur Quantifizierung der funktionalen Gangentwicklung bei Kindern. Diese sollte primär über die Berechnung der mediolateralen Abweichung in Bezug auf die Fußhalbierenden und den Zeitverlauf in den Fußregionen Ferse, Mittelfuß und Vorfuß bestimmt werden.

Die mediolaterale Abweichung des COP von der Fußlängsachse verändert sich mit der zunehmenden Größe der untersuchten Kinder nicht statistisch signifikant, weist jedoch bei einem Mittelwertsvergleich erhebliche prozentuale Unterschiede auf. Mit zunehmender Fußlänge ist jedoch diesbezüglich keine gleichgerichtete Entwicklung festzustellen, da einer Reduktion der mediolateralen Undulation eine Zunahme folgt. Zu diskutieren ist in diesem Zusammenhang der mögliche Einfluss der steigenden Ganggeschwindigkeit

der Kinder mit zunehmender Größe. Eine mit der Geschwindigkeit einhergehende Medialisierung der Abrollbewegung des Fußes scheint jedoch nicht der Fall zu sein (27, 36).

Entgegen bisherigen Ergebnissen konnte bei der Lastverteilungsanalyse im Vorfuß keine Verschiebung der Belastung (FTI) auf die mediale Seite nachgewiesen werden (15). In diesem Zusammenhang ist die Veränderung der plantaren Druckverteilung bei unterschiedlichen Ganggeschwindigkeiten zwischen den Gruppen zu diskutieren. Vergangene Untersuchungen haben für unterschiedliche Ganggeschwindigkeiten eine modifizierte plantare Druckverteilung nachgewiesen (30, 34). Taylor et al. konnten bei 20 gesunden Erwachsenen in allen Fußregionen, außer dem lateralen Mittelfuß, eine Erhöhung des maximalen Druckes mit steigender Ganggeschwindigkeit nachweisen (30). Insbesondere wurde eine Maximaldruckerhöhung im Fersen- und Zehenbereich medial wie lateral festgestellt. Auch Segal konnte mit steigender Ganggeschwindigkeit eine lineare Erhöhung der maximalen Fersen- und Großzehenbelastung feststellen. Im Vorfuß wurde ein initialer Anstieg der maximalen Druckbelastung mit folgendem Plateau gemessen (34). In den aktuellen Studien werden primär Belastungsanstiege im Fersen-, Vorfuß- und Zehenbereich mit steigender Geschwindigkeit beschrieben. Veränderungen in der mediolateralen Lastverteilung, aufgrund dessen ein Einfluss auf den COP-Verlauf zu erwarten wäre, scheinen dagegen bisher nicht abschließend geklärt (30, 34).

Entsprechend den Ergebnissen von Bril (5) besteht bei Kindern ein höherer Stabilisationsbedarf, der es ihnen zu Beginn anscheinend nicht ermöglicht, den COP-Verlauf nahe an der Fußlängsachse zu gestalten. Die Abnahme von A_{ml} bis zu einer Fußlänge von 21 cm (dort trat eine gegenläufige Entwicklung auf) könnte möglicherweise mit dem Lernen der Gleichgewichtskontrolle zusammenhängen. Dies würde aber auch bedeuten, dass sich die Kinder zuerst einen stabilen Bewegungsablauf aneignen, wobei ein möglichst zentraler Verlauf der Abrollbewegung des Fußes gewählt wird (kleine A_{ml} Werte)(12). Sie sind jedoch nicht in der Lage, diesen stabileren zentralen Verlauf der Abrollbewegung von Beginn an zu realisieren. Mit zunehmendem Alter wird dann der stabile zentrale Verlauf verlassen und eine differenzierte Bewegung ausgeführt. Charakterisiert scheint diese Bewegung durch eine erhöhte mediolaterale Undulation des COP's zu sein, die sich in einer Lateralisierung im Mittelfuß und Medialisierung im Vorfuß-/Zehenbereich auszeichnet (12). Neben dem Stabilitätsbedarf der kleinen Kinder sind in den ersten Jahren der Gangentwicklung auch andere Einflussgrößen, wie die Aufrichtung des Längsgewölbes (15, 28, 29), zu berücksichtigen. Für den diskontinuierlichen Verlauf von A_{med} sind somit drei sich eventuell gegenläufig auswirkende Entwicklungen zu beachten. Eine Längsgewölbeaufrichtung, die sich durch eine Reduktion der Druckbelastung im medialen Mittelfuß auswirkt und damit A_{med} reduzieren kann, eine unausgereifte Gleichgewichtskontrolle, sowie ein Einfluss der steigenden Ganggeschwindigkeit. Der zweite und dritte Aspekt ist diesbezüglich mit einer vermehrten Bewegung und Abdruck über die Großzehen zu diskutieren, der

eine Erhöhung von A_{med} zu Folge haben könnte. Die laterale Abweichung des COP von der Fußlängsachse (A_{lat}) lässt als separate Messgröße keine näheren Aussagen über die Gangentwicklung zu.

Der gleich bleibende Variationskoeffizient (A_{ml} , A_{med} und A_{lat}) zeigt, dass sich die interindividuellen Unterschiede nicht systematisch mit zunehmender Fußlänge verringern und somit anscheinend entwicklungsunabhängig sind.

Die Betrachtung des COP_{time} in den Fußregionen konnte die Annahme, dass Kinder einen erhöhten Stabilitätsbedarf haben und deshalb möglicherweise länger im Mittelfußbereich verweilen, nicht bestätigen. Demgegenüber scheint sich die Entwicklung insbesondere am Bewegungsbeginn und Bewegungsende abzuspielen. Dem kürzer werdenden COP-Verlauf im Fersenbereich steht ein mit zunehmender Fußlänge steigender $COP_{time} V$ gegenüber. Breniere berichtete unter anderem, dass die kleinen Kinder die Vorwärtsbewegung durch sich nach vorne Fallenlassen erreichen und sie sich nicht wie Erwachsene aktiv abdrücken (3). Auch die größeren $COP_{time} V$ -Werte bei den weiterentwickelten Kindern lassen hierauf schließen. Ein möglicher Einfluss der Ganggeschwindigkeit auf den COP-Verlauf könnte lediglich eine Reduktion des $COP_{time} F$ erklären nicht aber die Veränderungen von $COP_{time} V$. Gerade die Veränderungen im Vorfuß- und Zehenbereich scheint ein Entwicklungskriterium zu sein, da nach Taylor et al. mit steigender Ganggeschwindigkeit bei Erwachsenen sich keine Veränderung der Kontaktzeit (in % der Standphase) im Vorfuß ergab (30).

Der Variationskoeffizient nahm für den COP_{time} in allen drei Fußregionen bis zu der Gruppe 6 bis 7 ab und blieb danach konstant niedrig. Dies deutet auf eine Entwicklung zur Bewegungsoptimierung hin. Der Zeitpunkt, an dem sich die Messgröße hinsichtlich der interindividuellen Variabilität stabilisiert, ist wie in vergangenen Studien bereits beschrieben einem Alter von ca. 7 Jahren zuzuordnen (13, 33). Dieser Zeitpunkt stimmt auch mit dem Umkehrpunkt bei der Messgröße A_{ml} überein.

Die Sensitivität der einzelnen Messgrößen zur Charakterisierung der funktionalen Gangentwicklung bei Kindern zwischen 2 und 15 Jahren kann für A_{lat} und $COP_{time} M$ als am geringsten bzw. für A_{ml} , $COP_{time} F$ und $COP_{time} V$ am höchsten angesehen werden. Die interindividuelle Variabilität ist bezüglich des regionalen Verlaufes des COPs kein sinnvolles funktionales Kriterium, dem gegenüber lässt sie jedoch bezüglich des zeitlichen Verlaufes eine sinnvolle Interpretation zu. Die Ergebnisse zeigen des Weiteren über die Werte des Variationskoeffizienten, dass die Individualität in allen Entwicklungsstufen eine nicht zu vernachlässigende Größe ist. Abschließend lässt sich bemerken, dass die Analyse des COP-Verlaufes einen Informationsgewinn bei der Analyse der kindlichen Gangbewegung ermöglicht. Es konnte die Entwicklung hin zu einem vermehrten Abdruck, wie auch einer veränderten mediolateralen Undulation der Abrollbewegung gezeigt werden. In zukünftigen Untersuchungen ist aus klinischer Sicht nun der Einfluss von Pathologien auf den COP-Verlauf zu klären, um die Anwendungsmöglichkeiten in der Diagnostik und der klinischen Praxis zu erhöhen.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden unterstützt von der RICOSTA Schuhfabriken GmbH.

Literatur

1. Beck R, Andriacchi T, Kuo K, Fermier R, Galante J: Changes in the gait patterns of growing children. *J Bone Joint Surg Am* 63 (1981) 1452-1457.
2. Bertsch C, Unger H, Winkelmann W, Rosenbaum D: Evaluation of early walking patterns from plantar pressure distribution measurements. First year results of 42 children. *Gait and Posture* 19 (2004) 235-242.
3. Breniere Y, Bril B, Fontaine R: Analysis of the transition from upright stance to steady state locomotion in children with under 200 days of autonomous walking. *J Mot Behav* 21 (1989) 20-37.
4. Breniere Y: How locomotor parameters adapt to gravity and body structure changes during gait development in children. *Motor Control* 3 (1999) 186-204.
5. Bril B, Breniere Y: Posture and independent locomotion in early childhood: Learning to walk or learning dynamic postural control?, in: Savelsbergh G (Hrsg): *The development of coordination in infancy*. North Holland, Amsterdam, 1993, 337-358.
6. Cornwall M, McPoil T: Three-dimensional movement of the foot during the stance phase of walking. *J Am Podiatr Med Assoc* 89 (1999) 56-66.
7. Cornwall M, McPoil T: Velocity of the center of pressure during walking. *J Am Podiatr Med Assoc* 90 (2000) 334-338.
8. Farmer S: Key factors in the development of lower limb coordination: implications for the acquisition of walking in children with cerebral palsy. *Disabil Rehabil* 22 (2003) 807-816.
9. Forssberg H: Ontogeny of human locomotor control. I. Infant stepping, supported locomotion and transition to independent locomotion. *Exp Brain Res* 57 (1985) 480-493.
10. Gorton G, Stevens C, Masso P, Vannah W: Repeatability of the Walking Patterns of Normal Children. *Gait and Posture* 5 (1997) 155.
11. Grimshaw P, Marques-Bruna P, Salo A, Messenger N: The 3-dimensional kinematics of the walking gait cycle of children aged between 10 and 24 months: cross sectional and repeated measures. *Gait and Posture* 7 (1998) 7-15.
12. Hallemaans A, Aout K, De Clerq D, Aerts P: Pressure distribution patterns under the feet of new walkers: The first two months of independent walking. *Foot Ankle Int* 24 (2003) 444-453.
13. Hausdorff J, Zeman L, Peng C, Goldberger A: Maturation of gait dynamics: stride-to-stride variability and its temporal organization in children. *J Appl Physiol* 86 (1999) 1040-1047.
14. Hennig E, Rosenbaum D: Pressure distribution patterns under the feet of children in comparison with adults. *Foot Ankle* 11 (1991) 306-311.
15. Hennig E, Rosenbaum D: Plantar pressure distribution patterns of young school children in comparison to adults. *Foot Ankle Int* 15 (1994) 35-40.
16. Imhauser C, Abidi M, Frankel D, Gavin K, Siegler S: Biomechanical evaluation of the efficacy of external stabilizers in the conservative treatment of acquired flatfoot deformity. *Foot Ankle Int* 23 (2002) 727-737.
17. Kellis E: Plantar pressure distribution during barefoot standing, walking and landing in preschool boys. *Gait and Posture* 14 (2001) 92-97.
18. Klein B: Der Fuß im Wachstum – anatomische und biologische Grundlagen. *Orthopädieschuhtechnik* 4 (1998) 16-19.
19. Ledebt A, Bril B, Breniere Y: The build-up of anticipatory behaviour – An analysis of the development of gait initiation in children. *Exp Brain Res* 120 (1998) 9-17.
20. McGibbon C, Krebs D: Discriminating age and disability effects in locomotion: neuromuscular adaptations in musculoskeletal pathology. *J Appl Physiol* 96 (2004) 149-160.
21. McPoil T, Cornwall M: Variability of the center of pressure pattern integral during walking. *J Am Podiatr Med Assoc* 88 (1998) 259-267.
22. McPoil T, Cornwall M, Dupuis L, Cornwell M: Variability of plantar pressure data: A comparison of the two-step and midgait methods. *J Am Podiatr Med Assoc* 89 (1999) 495-501.
23. Morag E, Cavanagh P: Structural and functional predictors of regional peak pressures under the foot during walking. *J Biomech* 32 (1999) 359-370.

24. *Nigg B, Stergiou P, Cole G, Stefanyshyn D, Mündermann A, Humble N*: Effect of shoe inserts on kinematics, center of pressure, and leg joint moments during running. *Med Sci Sports Exerc* 35 (2003) 314-319.
25. *Öffinger D, Augsburg S, Cupp T*: Age related changes in able-bodied populations. *Gait and Posture* 5 (1997) 155-156.
26. *Öffinger D, Brauch B, Cranfill S, Hisle C, Wynn C, Hicks R, Augsburg S*: Comparison of gait with and without shoes in children. *Gait & Posture* 9 (1999) 95-100.
27. *Rosenbaum D, Hautmann S, Gold M, Claes L*: Effects of walking speed on plantar pressure patterns and hindfoot angular motion. *Gait & Posture* 2 (1994) 191-197.
28. *Schilling W*: Der Säuglings- und Kleinkinderfuß. Ferdinand enke Verlag, Stuttgart, 1994.
29. *Staheli L, Chew D, Corbett M*: The longitudinal arch. *J Bone Joint Surg* 69 (1987) 426-428.
30. *Segal A, Rohr E, Orendurff M, Shofer J, O'Brien M, Sangeorzan B*: The Effect of Walking Speed on Peak Plantar Pressure. *Foot & Ankle International* 25 (2004) 926-933.
31. *Staheli L*: Shoes for children: A Review. *Pediatrics* 88 (1991) 371-375.
32. *Stansfield B, Hillman S, Hazlewood M, Lawson A, Mann A*: Normalisation of gait data in children. *Gait and Posture* 17 (2003) 81-87.
33. *Sutherland D*: The development of mature gait. *Gait & Posture* 6 (1997) 163-170.
34. *Taylor A, Menz H, Keenan A*: The influence of walking speed on plantar pressure measurements using the two-step gait initiation protocol. *The Foot* 14 (2004) 49-55.
35. *VanSant A*: Life-span development in functional tasks. *Phys Ther* 70 (1990) 788-798.
36. *Warren G, Maher R, Higbie E*: Temporal patterns of plantar pressures and lower-leg muscle activity during walking: effect of speed. *Gait & Posture* 19 (2004) 91-100.

Korrespondenzadresse:
Dipl.-Sportwiss. Steffen Müller
Universität Potsdam
Institut für Sportmedizin und Prävention
Am Neuen Palais 10
14469 Potsdam
E-mail: stefmue@uni-potsdam.de