

Funktionelle Diagnostik am kindlichen Fuss

Vor allem in den letzten zwei Jahrzehnten wurden neue Untersuchungstechniken zur Analyse der dynamischen Komponente des Fusses entwickelt. Doch wann und wie sollen diese eingesetzt werden?

Von Michèle Widmer, Jacqueline Romkes und Elke Viehweger

Die klinische Untersuchung des kindlichen Fusses gestaltet sich oft nicht einfach. Es ist jedoch unabdingbar, die dynamische Komponente des Fusses zu untersuchen, da die Stabilität des Fusses beim Bodenkontakt und seine motorische Funktionalität die wichtigsten Komponenten für ein normales und effizientes Gehen sind. Zudem muss bei Kindern die weitere Entwicklung des Fusses berücksichtigt werden, was die Komplexität der Untersuchung erhöht.

Pedobarografie

Die Pedobarografie erlaubt, den plantaren Druck zwischen dem Fuss und dem Boden während der gesamten Belastungsphase zu messen. Die Pedobarografie-Analyse zeigt die regionalen plantaren Druckverteilungen des Fusses, und sie kann Informationen (z. B. maximale Druckbelastung, Kontaktort, Kontaktzeit usw.) liefern, wie verschiedene Zonen des Fusses während verschiedener Phasen des Gehens belastet werden. Ermöglicht wird dies durch kleine elektronische Sensoren, welche sich in einer Druckmessplatte befinden, über die die Patienten gehen. Daraus errechnet eine Software dreidimensionale Bilder des Fusses mit der Druckverteilung in verschiedenen Bereichen des Fusses, und es entsteht eine Landkarte der Zonen mit geringer und hoher Druckbelastung. Die Pedobarografie wird bei Kindern für die Abklärung von vielen verschiedenen Fussproblemen eingesetzt, um

ein besseres Bild bezüglich der plantaren Druckbelastung während des Gehens zu erhalten. Sie ist für die Auswahl eines entsprechenden Hilfsmittels, für die Indikationsstellung von Operationen und zur Verlaufskontrolle hilfreich. So wird die Pedobarografie zum Beispiel zur Analyse des Fusses nach einer Klumpfussbehandlung (1), bei Pes planovalgus (2) und bei neurologischen Problemen (z. B. Morbus Charcot-Marie-Tooth, Zerebralparese, Spina bifida) eingesetzt.

Videoanalyse

Videoaufnahmen der Füße während des Gehens bringen im Vergleich zu einer einfachen Beobachtung des Gehens zusätzliche Informationen. Videos können wiederholt und in Zeitlupe abgespielt werden und erlauben damit eine genauere Beobachtung. Die Videos können aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen und Veränderungen der Fussform oder des Alignments sowie Veränderungen während des Gangzyklus zusätzlich analysiert werden.

Trotz dieser Vorteile gegenüber einer einfachen klinischen Beobachtung hat die Videoanalyse einige signifikante Limitationen. So ist die Bewegung zwischen den anatomischen Segmenten des Fusses auf einem einfachen Video nicht quantifizierbar. Die dreidimensionale Bewegung von relativ kleinen anatomischen Strukturen in einem zweidimensionalen Video ist schwierig zu erkennen, insbesondere beim Vorliegen von Deformitäten und/oder wenn Videoaufnahmen nicht in den gleichen anatomischen Achsen des Fusses gemacht werden. Es kann dadurch zu ungenauen, fehlerhaften und irreführenden Interpretationen kommen (3).

3-D-Ganganalyse

Die dreidimensionale Ganganalyse wurde eingeführt, um eine detaillierte Untersuchung und Quantifizierung von Bewegungen anatomischer Körpersegmente während des Gehens oder anderer Aktivitäten zu ermöglichen. Zu Beginn wurde diese Methode vor allem für das Management von gehfähigen Kindern mit Zerebralparese eingesetzt, und sie ist derzeit international der Goldstandard zur Indikationsstellung für und Ergebnisbewertung

Tabelle:

Vor- und Nachteile verschiedener Verfahren zur funktionellen Diagnostik am kindlichen Fuss

	Breite Verfügbarkeit	Kostengünstig	3-D-Analyse möglich	Analyse einzelner Segmente möglich
Pedobarografie	–	+	–	–
Videoanalyse	+	+	–	–
3-D-Ganganalyse mit Fussmodell	–	–	+	+

nach operativen, aber auch konservativen Therapien (z. B. Orthesenversorgung) bei Patienten mit Zerebralparese. In den letzten Jahren wird sie jedoch auch für andere neuromuskuläre Erkrankungen und orthopädische Fragestellungen genutzt, bei denen das komplexe Gangbild klinisch nur schwer zu untersuchen ist.

Die Patientenanamnese sowie die klinische Untersuchung sind ein bedeutender Bestandteil der 3-D-Ganganalyse, Videoaufnahmen sind dabei immer eingeschlossen. Weg-Zeit-Parameter des Gangs wie Gehgeschwindigkeit, Kadenz oder Schrittlänge liefern bereits wichtige Informationen zur Gangqualität und Symmetrie. Die weitere kinematische Analyse beinhaltet die Studie der einzelnen

Bewegungen der Körpersegmente. Deren Resultate werden normalerweise als Graphen dargestellt, welche die Bewegungen der Gelenke während des Gangzyklus repräsentieren. Wenn man diese Information mit Messungen der Bodenreaktionskraft mittels Kraftplatten kombiniert, kann die Kinetik analysiert werden, das heisst die Berechnung der Drehmomente sowie die Leistung jedes Gelenks. Eine dynamische Elektromyografie informiert zusätzlich über die detaillierten Muskelaktivitäten während des Gehens. Eine dynamische Pedobarografie kann zusätzliche Hinweise auf die regionale plantare Druckverteilung unter dem Fuss während des Gangzyklus liefern. Die konventionelle Ganganalyse präsentiert den Fuss nor-

Fall 1: Klumpfussrezidiv

Es handelt sich um einen 16 Jahre alten Patienten mit Klumpfussrezidiv rechts bei Status nach einem Tibialis-anterior-Split-Transfer auf das Cuneiforme laterale und Durchtrennung der Plantaraponeurose nach Steindler bei kongenitalem Klumpfuss beidseits 7 Jahre zuvor. Er entwickelte rechts eine zunehmende strukturelle Supination des Fusses, und eine einfache Schuhzurichtung reichte nicht mehr aus, um den Fuss zu korrigieren. Mithilfe der 3-D-Ganganalyse soll die Frage nach operativen Behandlungsvorschlägen geklärt werden.

Die klinische Untersuchung ergab eine normale passive Beweglichkeit der Hüft- und Kniegelenke ohne Beinlängendifferenz. Das Sprunggelenk rechts wies einen Spitzfuss von 15 Grad bei gestrecktem und gebeugtem Kniegelenk auf. Das linke Sprunggelenk liess sich bei Kniestreckung in Neutralposition bringen und bei Bewegung in 5 Grad Dorsalexension. Der Rückfuss zeigte beidseits einen Varus, rechts 20 Grad, links 15 Grad. Des Weiteren zeigten sich eine Adduktion des Mittelfusses von 40 Grad rechts und 30 Grad links sowie eine Supination von 20 Grad rechts und 15 Grad links. Es gab keine Hinweise auf eine Spastik, jedoch klinisch auf eine leicht verminderte Kraft der Plantarflexoren beidseits.

In der Videoanalyse waren auf der rechten Seite ein deutlicher Varus im Bereich der Ferse und ein Abrollen über den lateralen Fussrand zu sehen. Frontal gesehen zeigte sich jedoch eine recht ähnliche Supinationstendenz beider Füsse.

Die Weg-Zeit-Parameter dokumentierten eine etwas langsamere Ganggeschwindigkeit mit breiteren Schritten bei normaler Kadenz und recht symmetrischem Bild. Auf der linken Seite zeigte die Kinematik ein Rückfusskontakt mit schneller Dorsalflexion bei der Gewichtsverlagerung auf den Fuss, was eine gewisse Instabilität mit Insuffizienz der Stabilisation ausdrückt. Rechts zeigte sich ein plantigrades Auftreten mit einem steifen Fuss während der Standphase. Die kinematischen Daten des Fussmodells ergaben deutlich mehr Rückfussvarus rechts und mehr Rückfussvalgus links. Im linken Fuss zeigte sich Vorfussadduktion in Bezug auf den Rückfuss, hingegen rechts mehr Supination im Vorfuss in Bezug auf den Rückfuss. In der Kinetik war ein guter Push-off im Sprunggelenk rechts ersichtlich, mit einem leichten Double-Bump, der typisch für den Spitzfuss im Sprunggelenksmoment ist.

Die Pedobarografie zeigte eine deutlich stärkere Druckbelastung über dem lateralen Vorfuss (*Abbildung 1*). Bei deutlich mehr Belastung im Bereich des lateralen Vorfusses sowie bei deutlichem Spitzfuss wurde die Indikation für eine operative Therapie gestellt. Als Behandlung wurde eine operative Therapie zur Korrektur des Spitzfusses und des Varus empfohlen. Bei flexibler Deformität wurden hierfür eine lateralisierende Calcaneus-Osteotomie, eine Tibialis-anterior-Verlagerung und -Verkürzung sowie eine Achillessehnenverlängerung empfohlen, bei rigider Deformität eine korrigierende Mittelfuss- und eine lateralisierende Calcaneus-Osteotomie.

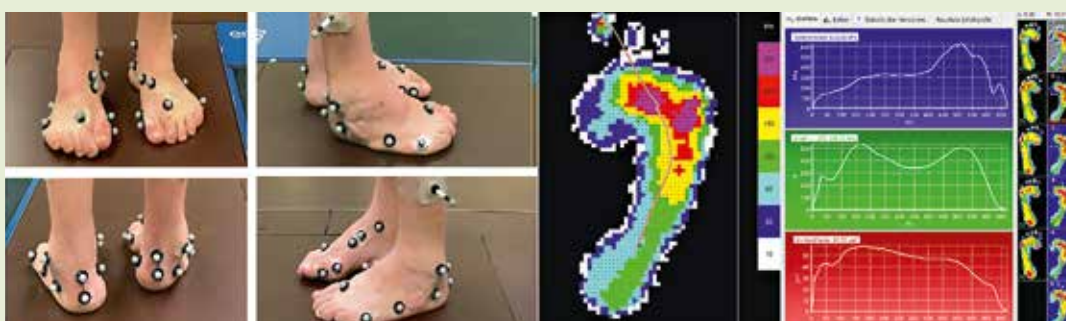


Abbildung 1: Darstellung der Deformität aus verschiedenen Perspektiven mit den platzierten Markern des Oxford-Fussmodells und Pedobarografie des linken Fusses bei einem Jugendlichen mit Klumpfuss rechts

malerweise als einzelnen steifen Körperteil oder als einzelnen Vektor, und sie berücksichtigt nur Bewegungen zwischen diesem Vektor und der Tibia. Wenn Fussdeformitäten vorliegen, kann diese Vereinfachung zu signifikanten Fehlern führen (4). Denn der Fuss ist ein komplexes biomechanisches Konstrukt aus 28 Knochen und 33 Gelenken, und er funktioniert im Vergleich zu den ande-

ren Segmenten der unteren Extremität nicht wie eine rigide Struktur.

Mehrere Studiengruppen weltweit haben während der letzten Jahren Fussmodelle entwickelt. All diese Modelle haben ihre Vor- und Nachteile (5). In Basel wird das «Oxford foot model» (6) verwendet. Es verwendet als Segmente die Tibia, den Rück- und Vorfuss sowie den Hallux.

Fall 2: Hohlfuss bei hereditärer peripherer Neuropathie

Bei dem 17 Jahre alten Patienten mit Pes cavovarus adductus beidseits fand im Rahmen einer hereditären peripheren Neuropathie 2 Jahre zuvor ein Release der Plantaraponeurose nach Steindler auf beiden Seiten statt. Nun kam es zu einer Zunahme der Spitzfusskomponente. Die 3-D-Ganganalyse wurde durchgeführt, um bei der Indikation weiterer therapeutischer Massnahmen zu helfen und den Verlauf der zunehmenden Deformität zu dokumentieren.

Klinisch zeigten sich eine ausgeglichene Beinlänge sowie eine fast ausgeglichene tibiale Torsion und femorale Antetorsion (links 10 Grad, rechts 20 Grad). Im Bereich der Hüfte zeigte sich eine Aussenrotation/Innenrotation links 80/0/10 Grad, rechts 70/0/5 Grad; Spitzfuss bei gebeugtem Knie links 15 Grad, rechts 25 Grad; bei gestrecktem Knie beidseits 20 Grad. Spastik lag keine vor, es zeigten sich jedoch eine Schwäche der Plantarflexoren beidseits M2+ und eine leichte Kräfteinschränkung der Knieflexoren beidseits M4. Im Video war beidseits ein knapper Fersenballengang zu sehen. Von hinten zeigte sich beidseits ein deutlicher Rückfussvarus, mit einem Abrollen über den lateralen Fussrand.

Die Ganggeschwindigkeit war leicht vermindert, das vor allem bei verminderter Kadenz und Schrittlänge. Die Spurbreite ist im Vergleich zur Norm vergrössert. Die Kinematik wies einen Fersenballengang mit ausreichender Dorsalextension im oberen Sprunggelenk

während der Standphase auf, jedoch mit ungenügender Plantarflexion während des Push-off. Es bestand eine Beckenkipfung beidseits nach ventral. Die Fussrotation war während der Standphase vermehrt nach innen gerichtet. In der Kinetik zeigten sich ein leichter Doppelpeak im Plantarflexorenmoment auf beiden Seiten und eine leicht verminderte Gesamtleistung im oberen Sprunggelenk zum Zeitpunkt des Abstossens. Das Oxford-Fussmodell zeigte den Vorfuss in Bezug auf den Unterschenkel vermehrt adduziert, auch in Bezug auf den Rückfuss bestand eine vermehrte Vorfuss-Adduktion. Nach Gewichtsübernahme positionierte sich der Vorfuss dynamisch stark in die Supination in Bezug auf den Unterschenkel, aber ebenso in Bezug auf den Rückfuss, was die Instabilität im Mittelfuss lokalisiert, rechts mehr als links.

Die Pedobarografie dokumentierte einen Fersenkontakt und dann eine vermehrte Druckbelastung unter den MTP-III-V-Gelenken (*Abbildung 2*).

Die Ganglaborbefunde wurden zusätzlich mit den Vorbefunden verglichen. Das ergab eine zunehmende Cavusstellung auf beiden Seiten, welche zu einer vermehrten Fussaussenrandbelastung und zu einem cavusbedingten Spitzfuss führte. Bei Plantarflexoren-schwäche ist, entsprechend den aktuellen Empfehlungen zu peripheren Neuropathien, eine Versteifung des Rück- und Mittelfusses wenn möglich zu vermeiden. Deshalb wurde eine orthopädische Schuhzurichtung mit leichter Fersenerhöhung und Pronationsstütze empfohlen, um eine dynamische Eversion zu erzeugen.

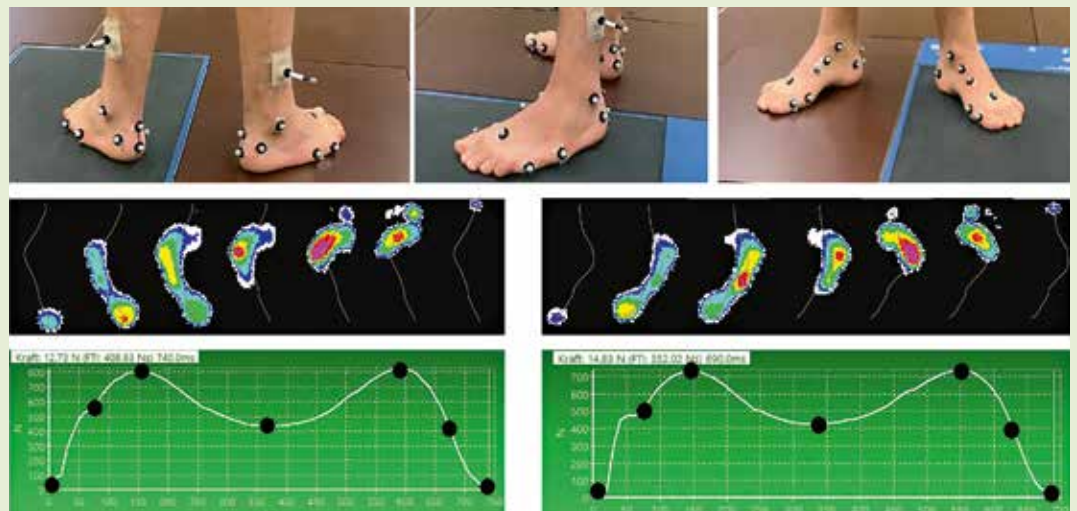


Abbildung 2: Darstellung der Deformität aus verschiedenen Perspektiven mit den platzierten Markern des Oxford-Fussmodells und Pedobarografie beider Füße bei einem Patienten mit beidseitigem Ballenhohlfuss

Das «Oxford foot model» wurde auch für Analysen des Fusses bei Kindern (7) entwickelt, insbesondere für den Klumpfuß (8) und die Hemiplegie bei Zerebralparese (3). Die Ganganalyse mit Verwendung dieses Fussmodells kann bei komplexen Fussdeformitäten (Klumpfußrezidiv, voroperierte Füße usw.) klären helfen, wo sich die dynamische Deformität befindet (9). Sie kann bei kontroversen Ergebnissen der klinischen Untersuchung oder der konventionellen Ganganalyse Klarheit schaffen.

Mit der 3-D-Ganganalyse können dynamische Fussdeformitäten über einen gewissen Zeitraum monitorisiert werden, um den Verlauf nach therapeutischen Massnahmen zu beurteilen. All dies trägt zur Indikationsstellung für eine Operation oder eine orthetische Versorgung bei.

Zusammenfassung

Alle drei genannten Untersuchungsmethoden haben ihre Berechtigung und ihre Vor- und Nachteile (*Tabelle*).

- Die einfache Videoanalyse kann als günstiges Hilfsmittel für Analysen in der Praxis, in der Physiotherapie oder beim Orthopädietechniker eingesetzt werden. Sie kann zur Verlaufsbeurteilung herangezogen werden und beim Austausch zwischen Fachpersonen nützlich sein.
- Die Pedografie wird zum Teil von den Orthopädietechnikern als Hilfsmittel zur Orthesenanpassung verwendet.
- Die dynamische Pedobarografie ist in Kombination mit der dynamischen Elektromyografie ein wichtiger Bestandteil der 3-D-Ganganalyse zur Beurteilung von Fusspathologien.
- Die 3-D-Ganganalyse ist bei komplexen Fragestellungen hilfreich, indem sie ein genaueres Bild des gesamten Fusses, seines Einflusses auf die Funktionalität der gesamten unteren Extremität und gegebenenfalls auf die Wirbelsäule zeigt. Beispiele für die Anwendung der 3-D-Ganganalyse sind komplexe Fussfehlstellungen (z. B. im Rahmen mehrfacher Voroperationen), eine Zunahme von Fussdeformitäten, die Indikationsstellung für eine Operation oder die Beurteilung der Effizienz einer Orthesenversorgung. Die beiden Fallvignetten (*Kasten 1 und 2*) illustrieren die Anwendung der 3-D-Ganganalyse.



Abbildung 3: Videoaufnahmen im 3-D-Ganglabor mit aufgeklebten Markern (Kugeln) zur kinematischen Analyse und EMG-Elektroden zur Analyse der Muskelaktivität am Patienten sowie der Druckmessplatte am Boden

Korrespondenzadresse:

Dr. med. Michèle Widmer
Stv. Oberärztin
Orthopädie
Universitätskinderhospital beider Basel
Spitalstrasse 33
4056 Basel
E-Mail: neuroorthopaedie@ukbb.ch

Interessenlage: Die Autorinnen erklären, dass keine Interessenkonflikte im Zusammenhang mit diesem Beitrag bestehen.

Die Abbildungen wurden von den Autorinnen zur Verfügung gestellt.

Literatur:

1. Sinclair MF et al.: Pedobarographic analysis following Ponseti treatment for congenital clubfoot. *Clin Orthop Relat Res.* 2009;467(5):1223-1230.
2. Hosl M et al.: Self-perceived foot function and pain in children and adolescents with flexible flatfeet – Relationship between dynamic pedobarography and the foot function index. *Gait Posture.* 2020;77:225-230.
3. Theologis T, Stebbins J: The use of gait analysis in the treatment of pediatric foot and ankle disorders. *Foot Ankle Clin.* 2010;15(2):365-382.
4. Pothrat C et al.: Quantifying foot deformation using finite helical angle. *J Biomech.* 2015; 48(13):3716-3719.
5. Pothrat et al.: One- and multi-segment foot models lead to opposite results on ankle joint kinematics during gait: Implications for clinical assessment. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2015;30(5):493-499.
6. Carson MC et al.: Kinematic analysis of a multi-segment foot model for research and clinical applications: a repeatability analysis. *J Biomech.* 2001;34(10):1299-1307.
7. McCahill J et al.: Repeatability of the Oxford Foot Model in children with foot deformity. *Gait Posture.* 2018;61:86-89.
8. Mindler GT et al.: Results of gait analysis including the Oxford foot model in children with clubfoot treated with the Ponseti method. *J Bone Joint Surg Am.* 2014;96(19):1593-1599.
9. Pothrat C et al.: Multifactorial gait analysis of children with flat foot and hind foot valgus deformity. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2013;16(Suppl 1):80-81.