

Instrumentelle Ganganalyse

Messverfahren und Indikationen

Die vielfältigen Möglichkeiten der Bewegungsanalyse führten dazu, dass dieses Verfahren jetzt auch vermehrt im klinischen Bereich eingesetzt wird. Dort wird es als instrumentelle Ganganalyse bezeichnet und umfasst oft mehrere Messmethoden. Ziel aller Verfahren ist, das menschliche Gangbild und evtl. pathologische Abweichungen in der Bewegung zu untersuchen und zu quantifizieren [2, 4]. Anhand von biomechanischen Modellen und kinetischen Berechnungen können auch Rückschlüsse auf die Gelenkbelastungen gezogen werden.

Teilbereiche der instrumentellen Ganganalyse

Im Rahmen der instrumentellen Ganganalyse kommen häufig verschiedene Verfahren zum Einsatz. Eines davon ist die Pedobarographie, welche die Druckverteilung an der Fußsohle während des Gehens oder auch im Stand erfassen kann. Ein noch aufwendigeres Messverfahren

ist die markerbasierte Ganganalyse. Sie ermöglicht es, anhand von reflektierenden Markern und biomechanischen Modellen die Gelenkwinkel und -belastungen des Patienten zu bestimmen.

Beide Messverfahren werden meist in eigens eingerichteten Ganglaboren durchgeführt. In deren Raummitte befindet sich eine Laufstrecke (etwa 8–10 m Länge), und an den Wänden sind spezielle Infrarotkameras montiert, welche die Bewegung der reflektierenden Marker erfassen können. Im Boden sind zur Registrierung der Bodenreaktionskräfte mehrdimensionale Kraftmessplatten und zur Durchführung der Pedobarographie eine Druckmessplatte eingelassen (■ Abb. 1).

Pedobarographie

Dieses Verfahren ermöglicht es, die Druckbelastung an der Fußsohle sowohl statisch als auch dynamisch zu erfassen. Die Messung erfolgt mit speziellen Drucksensoren, die in einer stationären

Messplatte oder auch in portablen Messsohlen angeordnet sind:

- Bei einer Messung mit stationären Messplatten wird der Fuß in Form einer Barfußmessung, also ohne äußere Einflüsse (Schuhwerk), untersucht.
- Werden Messsohlen verwendet, wird der Einfluss von Schuh und Einlegesohle miterfasst, sodass dieses Verfahren insbesondere für Fragestellungen zur orthopädischen Schuhzurichtung geeignet ist.

Die Messsysteme erlauben eine Auflösung der Belastung an der Fußsohle bis zu 0,5 cm. Als Ergebnis kann eine sog. Isobarendarstellung der Druckverläufe einen ersten Gesamteindruck vermitteln. Aber auch die Quantifizierung des Drucks und damit die Angabe in kPa oder in N/cm^2 sind mittels dieses Verfahrens möglich. Insbesondere im Bereich der Neuropathien aufgrund von Diabetes mellitus ist die Höhe des jeweiligen Drucks für eine

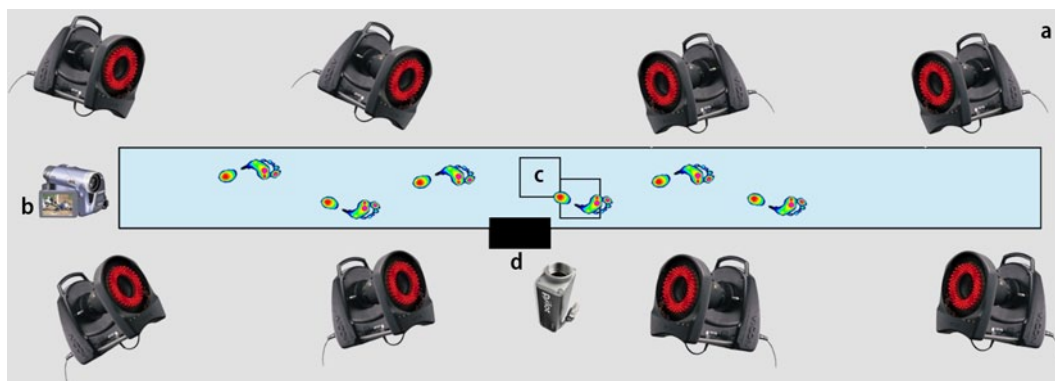


Abb. 1 ◀ Beispiel für den Aufbau eines Ganglabors mit Gangstrecke, a Infrarotkameras zur Markererfassung, b Videokamera zur Dokumentation, c Kraft- und d Druckmessplatten

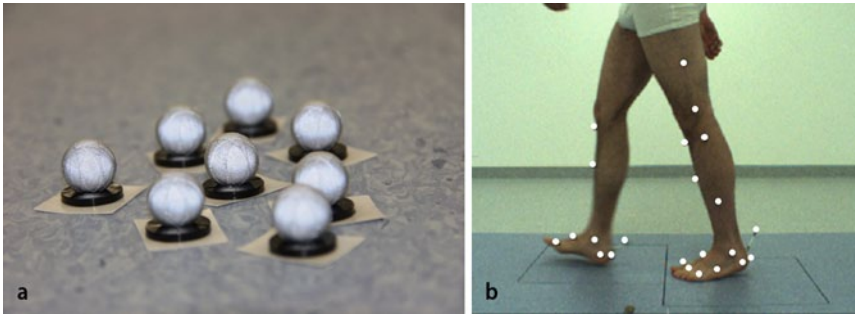


Abb. 2 ◀ Markerbasierte Ganganalyse, **a** reflektierende Marker (Fa. Vicon), 12 mm, **b** Patient beim Gang über die Kraftmessplatte

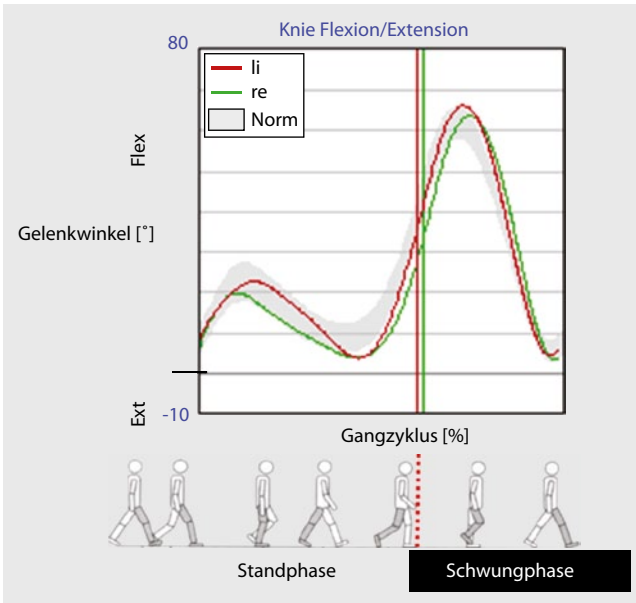


Abb. 3 ◀ Darstellung des Gelenkwinkelverlaufs des Kniegelenks während eines kompletten Gangzyklus in der Sagittalebene [Flexion (Flex)/Extension (Ext)], *li* links, *re* rechts, *grau* Daten einer gesunden Normpopulation, *senkrechte Linien* Ende der Standphase, weitere Erläuterungen s. Text

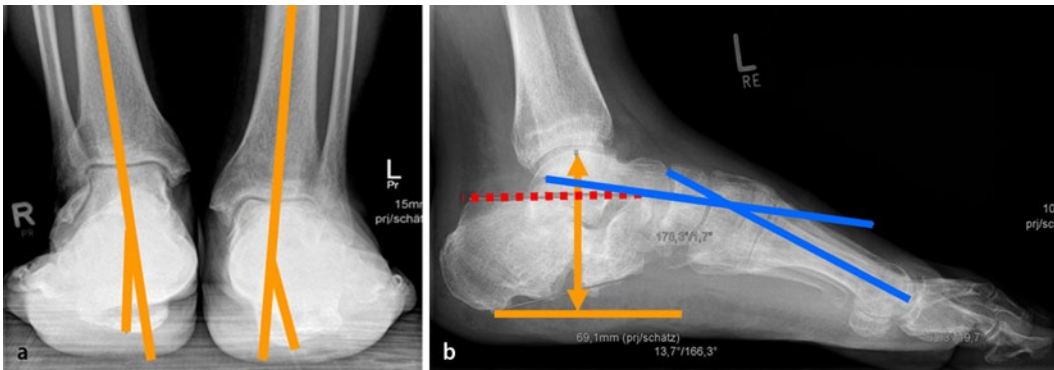


Abb. 4 ◀ Fallbeispiel, **a** Salzmann-Aufnahme: vergrößertes Rückfußwinkel links von 17,5°, **b** seitliche Belastungsaufnahme: aufgehobener Tubergelenkwinkel (*rot*), reduzierte talokalkaneare Höhe (*orange*), pathologischer Winkel von 20° für die talometatarsale Achse (*blau*)

optimale Einlagenversorgung und damit die Ulkusvermeidung von Interesse [1]. Doch auch in der Fußchirurgie können aus der Pedobarographie entsprechende Hinweise z. B. für eine ideale Einstellung des Fußes (Varus/Valgus) für Arthrodesen oder auch andere operative Korrekturen abgeleitet werden [5].

In der Ergebnisdarstellung spielt u. a. das sog. Maximaldruckbild eine Rolle. Dabei handelt es sich um ein fiktives Bild,

in welchem für jede Fußregion der maximal aufgetretene Druck während des Abrollvorgangs dargestellt wird. Zur Interpretation von Interesse sind

- Lage und Höhe von Druckspitzen,
- die Größe der Kontaktflächen (z. B. im Mittelfußbereich),
- der Verlauf der Ganglinie [COP-Verlauf (COP: „center of pressure“) oder auch

- die Belastungssymmetrie von verletzter und gesunder Seite (s. auch **Abb. 5**).

Markerbasierte Ganganalyse

Für diese Messung werden die Patienten mit reflektierenden Markern bestückt (etwa 9–12 mm Durchmesser), die mittels Klebeband auf der Hautoberfläche befestigt werden (**Abb. 2**). Dabei kommen

validierte Markersets zum Einsatz, welche die Positionierung der Marker auf anatomischen Referenzpunkten genau vorgeben.

Für eine Messung wird der Patient gebeten, die Laufstrecke mehrmals auf- und abzugehen. Dabei werden die Bewegung der Marker – und somit des Patienten – durch die Infrarotkameras erfasst und über die Software in dreidimensionale Raumkoordinaten umgerechnet. Mit Hilfe hinterlegter biomechanischer Modelle werden aus den einzelnen Markern Körpersegmente definiert (z. B. Oberschenkel, Unterschenkel, Fuß) und schließlich aus deren Position und Stellung zueinander die Gelenkwinkel berechnet. Anhand der im Boden eingelassenen Kraftmessplatten kann zusätzlich die Bodenreaktionskraft bestimmt werden, welche zur Berechnung der Gelenkbelastungen erforderlich ist.

Nach der Datenbearbeitung können die Gelenkwinkelverläufe in allen 3 Ebenen (frontal, sagittal, transversal) sowie die Gelenkmomente und -leistungen angegeben werden. Dies erfolgt, wie aus **Abb. 3** ersichtlich, meist standardisiert, sowohl für die untersuchten Gelenke als auch alle Raumebenen. Die Abszisse zeigt dabei den Zeitpunkt im Gangzyklus (%) und die Ordinate den Gelenkwinkel (°). In einem Streuband (in **Abb. 3** grau dargestellt) werden als Referenz die Daten einer gesunden Normpopulation angezeigt, die Verläufe des Patienten für die linke und die rechte Körperseite sind rot bzw. grün dargestellt. Senkrechte Striche geben zusätzlich das Ende der Standphasen an.

Inverse Dynamik

Da die Kräfte in den Gelenken nicht – bzw. nur invasiv – direkt gemessen werden können, werden sie indirekt mittels der inversen Dynamik berechnet. Dies bedeutet, dass unter Anwendung der newtonschen Gesetze (1. und 2. newtonsches Gesetz) aus der gemessenen Bewegung (Kinematik) auf die Muskelkräfte (Kinetik), welche diese Bewegung erzeugten, zurückgerechnet wird.

Für diese Berechnungen wird z. B. die untere Extremität in separate starre Körper unterteilt (Fuß, Unterschen-

Trauma Berufskrankh 2015 · 17[Suppl 1]:10–14 DOI 10.1007/s10039-012-1908-3
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

I. Klöpfer-Krämer · P. Augat

Instrumentelle Ganganalyse. Messverfahren und Indikationen

Zusammenfassung

Die instrumentelle Ganganalyse etabliert sich im klinischen Bereich zunehmend als Ergänzung der standardisierten diagnostischen Verfahren. Ihr Haupteinsatzgebiet findet sich bisher v. a. in der Pädiatrie, vornehmlich bei Kindern mit infantiler Zerebralparese (ICP), um operative Planungen, z. B. Sehnentransfers, mit objektiven Daten aus der Ganganalyse zu ergänzen. Aber auch in anderen Bereichen, wie der Fußchirurgie, der Endo- und Exoprothetik oder der Rehabilitation ergeben sich viele Einsatzmöglichkeiten. Der Vorteil der instrumentellen Ganganalyse liegt in der Möglichkeit, objektive und quantifi-

zierbare Messdaten zu liefern. So können anhand der markerbasierten Ganganalyse genau die Gelenkwinkelverläufe während des Gehens ermittelt sowie die Belastung in den Gelenken bestimmt werden. Die Pedobarographie (plantare Druckverteilungsmessung) ergänzt das vorgenannte Verfahren um die genauere Analyse des Fußes und dessen Belastung.

Schlüsselwörter

Instrumentelle Ganganalyse · Gelenke · Gehen · Belastung · Pedobarographie

Instrumental gait analysis. Measuring methods and indications

Abstract

Instrumental gait analysis is gradually becoming established in the clinical context as a supplement to standardized diagnostics. So far, it has mainly been employed in pediatrics, especially in cerebral palsy. Here, the objective data of clinical gait analysis may add to surgical planning, e.g., tendon transfers. However, other fields such as foot surgery, joint replacement, lower limb prosthetics or rehabilitation may also benefit. The main advantage of instrumental gait analysis is its potential to generate objective and quantifying

data. Thus, marker-based gait analysis can be employed in order to measure exact joint angles during walking, as well as to determine loading inside the joints. Pedobarography (plantar pressure analysis) enhances marker-based gait analysis by a more detailed analysis of the foot and its loading.

Keywords

Diagnostic equipment · Joints · Walking · Weight-bearing · Pedobarography

kel, Oberschenkel; [2, 6]). Um die Berechnungen durchführen zu können, sind zusätzlich Informationen zu Masse (m), Trägheitsmoment (I) und Massenschwerpunkt [CoM („center of mass“)] des jeweiligen Körpersegments notwendig, welche in Tabellen zu anthropometrischen Daten vorliegen. Anhand der Daten aus der Ganganalyse (Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung für jedes Segment, externe Kontaktkräfte, Kraftangriffspunkt) können schließlich mit Gl. 1 und Gl. 2 die Gelenkmomente (M) berechnet werden:

$$F = m \times a \text{ (Gl. 1)}$$

mit

- F: Gelenkkraft
- m: Masse
- a: Beschleunigung

$$M = I \times \alpha \text{ (Gl. 2)}$$

mit

- M: Gelenkmoment
- I: Trägheitsmoment
- α : Winkelbeschleunigung

Erkenntnisse aus der Ganganalyse

Zusammengefasst können mit Hilfe der instrumentellen Ganganalyse folgende Informationen erhalten werden:

- Anhand der markerbasierten Ganganalyse können die Gangqualität, die Gelenkwinkelverläufe und -belastungen objektiv bestimmt werden.
- Die Pedobarographie ermöglicht es, die Druckverteilung an der Fußsohle im Stand und in der Bewegung zu analysieren.

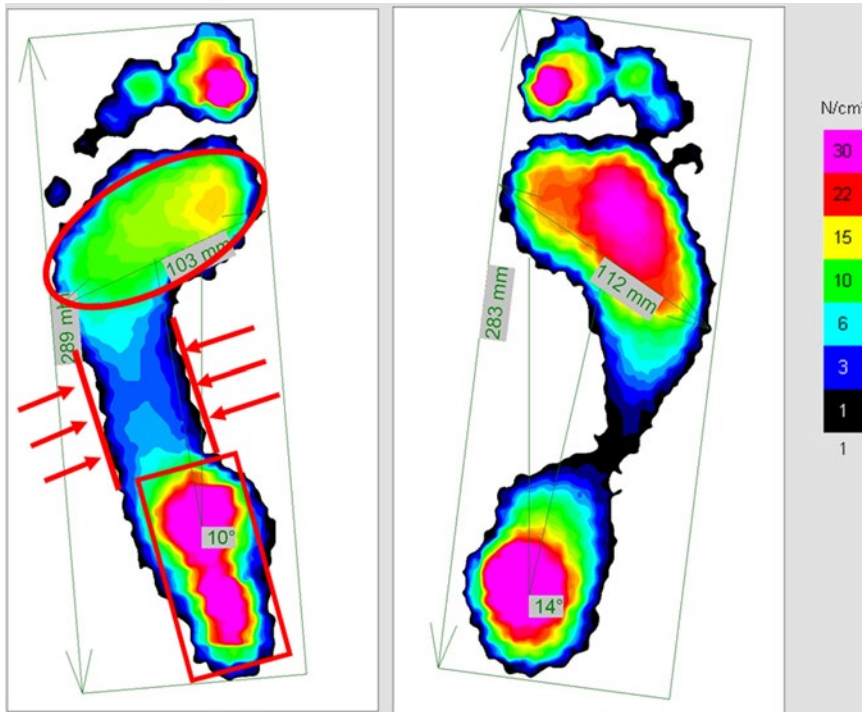


Abb. 5 ▲ Maximaldruckbilder einer pedobarographischen Untersuchung mit Erläuterungen in Isobarendarstellung

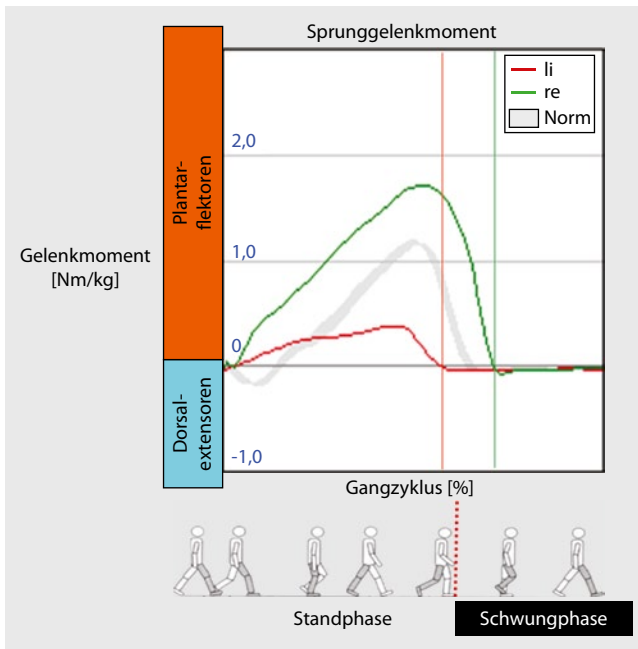


Abb. 6 ◀ Darstellung des Momentenverlaufs im Sprunggelenk in der Sagittalebene (Flexion/Extension), *li* links, *re* rechts, *grau* Daten einer gesunden Normpopulation,

Nachfolgend sollen an einem Fallbeispiel die Interpretationsmöglichkeiten von Pedobarographie und markerbasierter Ganganalyse dargestellt werden.

Fallbeispiel

Bei dem Patienten mit Zustand nach einer Fersenbeintrümmerfraktur am linken Fuß kam es im Verlauf zu einer Deformität mit Verlängerung des Rückfußes sowie einer Pseudarthrose im Bereich des distalen Kalkaneus. Im Rah-

men einer fortführenden operativen Therapie erfolgten eine Pseudarthrosenresektion, Aufrichtung und Verkürzung des Kalkaneus mit Spongiosaplastik und Arthrodesse im USG (unteres Sprunggelenk).

Bildgebung. Die seitliche Belastungsaufnahme und die Salzmann-Aufnahme (■ **Abb. 4**) zeigten die pathologischen Werte für Tubergelenkwinkel, talokalkaneare Höhe, talometatarsale Achse und Rückfußwinkel.

Ganganalyse. In der präoperativen Pedobarographie ergab sich für den verletzten linken Fuß das in ■ **Abb. 5** dargestellte Bild einer deutlich vergrößerten Kontaktfläche im Mittelfußbereich, welche durch das abgesunkene Längsgewölbe hervorgerufen wurde. In der Druckverteilung an der Ferse war eine veränderte Kontur aufgrund der Deformität des Kalkaneus zu erkennen, und im Vorfußbereich zeigte sich eine reduzierte Belastung, die auf eine Schwäche der Plantarflektoren zurückzuführen war. Diese war durch die Fehlstellung des *Tuber calcanei* zu erklären: Zum einen ergaben sich dadurch schlechtere Hebelverhältnisse der Achillessehne zur Achse des oberen Sprunggelenks, zum anderen befanden sich die Plantarflektoren nicht mehr im optimalen Kontraktionsbereich. Insgesamt führte dies zu einer Schwäche der Plantarflektoren mit einem reduzierten Abdruck über den Vorfuß [3]. Diese Schwäche der Plantarflektoren zeigte sich auch in den Ergebnissen der markerbasierten Ganganalyse bei der Prüfung der Sprunggelenkmomente (■ **Abb. 6**). Die graue Kurve in ■ **Abb. 6** stellt den Verlauf einer gesunden Normpopulation dar. Der Vergleich mit den Patientendaten (rot für den linken, grün für den rechten Fuß) zeigt das deutlich reduzierte Drehmoment in der Standphase für den linken Fuß des Patienten. Dies beruht, wie bereits angeführt, auf der Schwäche der Plantarflektoren, welche aufgrund der veränderten Gelenkgeometrie kräftemäßig weniger effektiv sind.

Fazit für die Praxis

Die instrumentelle Ganganalyse ist ein Verfahren, welches sowohl in der Messsituation als auch der Auswertung sehr aufwendig ist. Allerdings bieten sowohl Pedobarographie als auch markerbasierte Ganganalyse die Möglichkeit, das Verhalten anatomischer Strukturen in der Bewegung zu prüfen, was standardisierte Diagnostikverfahren bisher nicht leisten können. Zudem können Bewegungen mittels dieses Verfahrens auch objektiv, anhand quantitativer Messdaten, beurteilt werden. Aus diesem Grund sind die Indikationen der instrumentellen Ganganalyse im klinischen Bereich sehr vielfältig: Einsatzbereiche sind z. B. die operative Planung sowie prä- und postoperative Vergleiche. In der Rehabilitation und auch der Gutachterstellung können mit Hilfe der Ganganalyse der Verlauf bzw. der aktuelle Zustand dokumentiert werden. Zudem eignen sich diese Verfahren auch für die Forschung zum Einsatz im Rahmen von Interventionsstudien.

- Mitternacht J, Lampe R (2006) Ermittlung funktioneller kinetischer Parameter aus der plantaren Druckverteilungsmessung. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 144:410–418
- Perry J (2003) Ganganalyse – Norm und Pathologie des Gehens. Urban & Fischer, München
- Richter M, Zech S (2009) Intraoperative pedobarography leads to improved outcome scores: a level I study. *Foot Ankle Int* 30(11):1029–1036
- Winter DA (2009) Biomechanics and motor control of human movement. Wiley & Sons, Hoboken, S 107–116

Korrespondenzadresse



Dr. I. Klöpfer-Krämer
Institut für Biomechanik,
BG-Unfallklinik Murnau,
Prof.-Küntschers-Straße 8,
82418 Murnau am Staffelsee
isabella.kloepfer-kraemer@
bgu-murnau.de

Einhaltung ethischer Richtlinien

Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor gibt für sich und seinen Koautor an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

The supplement containing this article is not sponsored by industry.

Literatur

- Hamel J (2009) Dynamische Pedografie. In: Valderabano V, Engelhardt M, Küster HH (Hrsg) Fuß & Sprunggelenk im Sport. Empfehlungen von Sportarten aus orthopädischer und sportmedizinischer Sicht. Deutscher Ärzteverlag, Köln, S 56–63
- Kirtley C (2006) Clinical gait analysis – theory and practice. Elsevier, Edinburgh London New York