

H. Tober, T. Köhler

## Grundlagen und technische Realisierungskonzepte zur Stand- und Bewegungsanalyse

Basics and Concepts for the Technical Realization of the Analysis of Standing and Motion

Mittels der modernen Messtechnologien ist inzwischen die Stand- und Bewegungsanalyse auf einem hohen technischen Niveau möglich. Allerdings gilt es eine Reihe von Randbedingungen zu beachten, wie zum Beispiel das diagnostische Gespräch (Anamnese) mit dem Patienten. Die Bewegungsanalyse ist dabei ein Element im Diagnose- und Therapieprozess. Sie ist immer im Zusammenhang mit anderen diagnostischen Mitteln zu sehen. In Zukunft wird die anwendergerechte Aufbereitung der Messergebnisse von größter Bedeutung für den Nutzwert der Stand- und Bewegungsanalytik sein.

Using modern measuring technologies it is now possible to analyse stance and locomotion on a high technological level. Nonetheless it is still important to take a number of other factors into account. This is for example the diagnostic interview with the patient. The analysis of locomotion is thus one element in the diagnostic and therapeutic process. Its results need to be viewed in the context of other diagnostic means. In the future the user friendly presentation of results will be of highest importance for the usefulness of the stance and locomotor analysis.

### Historische Aspekte

Die Bewegungsanalyse ist fast so alt wie die Menschheit. Bereits die Urmenschen analysierten das Bewegungsverhalten von Gruppenmitgliedern hinsichtlich deren Eignung für eine Teilnahme an der Jagd. Das Bewusstsein für die Bedeutung der Fortbewegung zeigen erste Prothesenversorgungen aus Ägypten bereits zur Pharaonenzeit. Die technisch gestützte Bewegungsanalyse hat ihre Anfänge im 19. Jahrhundert. So entwickelte Eadweard Muybridge die so genannte Chronophotographie im Jahre 1872. Basierend auf einer Wette, die die Frage zum Thema hatte, ob Pferde im Galopp alle Hufe in der Luft haben, entwickelte er eine Vorrichtung, die aus mehreren, nacheinander ausgelösten Kameras bestand. Mithilfe dieser Konstruktion gelang ihm der Nachweis, dass in der Tat alle Hufe zeitweise in der Luft sind. Gleichzeitig wird diese Entwicklung als Beginn der heutigen Kinematographie betrachtet [5].

Eine große wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der menschlichen Fortbewegung lieferten Braune und Fischer in ihrem fünfteiligen Werk „Der Gang des Menschen“ von 1895 bis 1905. Sie entwickelten noch heute gültige mathematisch-physikalische Beschreibungen für das Gehen [1]. Im Gegensatz zu den rein optischen Methoden von Braune und Fischer entwickelte Elftmann 1938 eine Druckverteilungsmessung am Fuß. Er benutzte eine Matte mit pyramidenförmigen Noppen. Durch die unterschiedliche Druckbelastung am Fuß ergaben sich unterschiedlich stark deformierte Pyramiden, die er fotografieren konnte [2].

### Grundsätzliche Überlegungen zum Gehen

In historischen Quellen wird das Gehen häufig als kontrolliertes Nach-Vorne-Fallen bezeichnet. Endler [3] definiert 1981 in der „Orthopädie in Praxis und Klinik“ die menschliche Fortbewegung: „[...] die Fortbewegung des Menschen kommt durch rhythmisch wiederkehrende sinusförmige Oszillationen zustande. Der Gang des Menschen ist daher als zyklisch sich wiederholende Lageverschiebung des Gesamtschwerpunktes eines Individuums charakterisiert. Die Oszillationen werden in harmonisierte Bewegungsmuster umgesetzt [...]“. Daraus abgeleitet hat der menschliche Gang im Wesentlichen zwei Wirkungen, anhand derer er gemessen und analysiert werden kann. Die erste Wirkung ist die so genannte kinematische Wirkung und meint die Lageveränderung, sowohl des gesamten Körpers als auch von Körpersegmenten im Raum. Dabei sind laut Definition insbesondere Winkelgrößen für die zyklische Bewegung bestimmend. Die zweite Wirkung des menschlichen Ganges ist die kinetische Wirkung. Damit wird die Tatsache der Kraftwirkung des Körpers auf die Umgebung beziehungsweise von Körpersegmenten im Innern erfasst. Für die Charakterisierung des Zustandes des menschlichen Stütz- und Bewegungsapparates muss das Bewegungsverhalten in den beiden Komponenten – Kinetik und Kinematik – gemessen werden. Jedoch kann die Messung nur ein Teilelement der Ganganalyse sein.

Abgeleitet von der Definition nach Endler und der damit verbun-

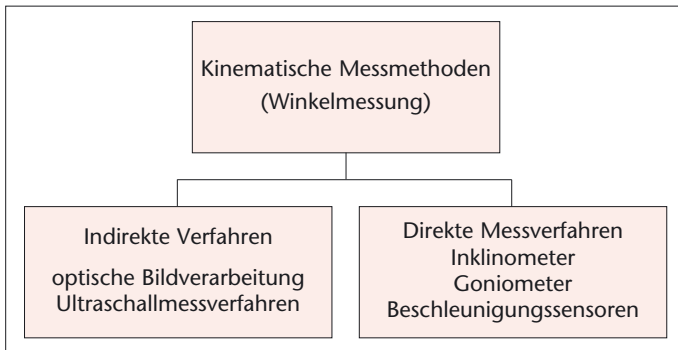


Abb. 1 Übersicht kinematischer Messmethoden.

denen Aufteilung des menschlichen Bewegungsverhaltens in kinetische und kinematische Komponenten lassen sich die für diese Messung notwendigen Technologien ebenfalls in kinetische und kinematische Messsysteme untergliedern. Gemäß der Definition sind die Messungen der Winkelverläufe, insbesondere an den für die menschliche Fortbewegung notwendigen Grundgelenken, charakteristisch für die Kinematik.

Die Messtechniken für die Kinematik der menschlichen Fortbewegung werden in direkte und indirekte Verfahren unterschieden (Abb. 1). Zu den direkten Verfahren gehören Goniometer, Inklinometer und Beschleunigungsmesser. Ein Goniometer besteht beispielsweise aus zwei gelenkig miteinander verbundenen Schenkeln, in deren Drehpunkt ein elektronischer Geber in Form eines Potentiometers befestigt ist. Es wird üblicherweise mit seinem Drehpunkt direkt am Drehpunkt des jeweiligen Gelenkes (Hüfte, Knie, OSG) platziert. Die Schenkel des Goniometers werden an den anliegenden Körpersegmenten befestigt, was zu der Bezeichnung direktes Verfahren führt. Abgesehen von der Tatsache, dass die Goniometer nur sehr unvollständig die Anatomie der jeweiligen Gelenke abbilden können, kommt es durch das direkte Anbringen am Menschen zu Rückwirkungen, indem der Bewegungsumfang der Gelenke eingeschränkt wird. Für die direkten kinematischen Messtechniken sprechen ihre einfache Handhabung, ihre Ortsunabhängigkeit sowie die geringen Kosten.

Die indirekten kinematischen Messverfahren beruhen auf am Patienten angebrachten optischen (reflektierenden) oder akustischen (Ultraschall aussendenden) Mar-

kern. Diese werden in einem definierten Beobachtungsraum durch Kamerabeziehungsweise Mikrofonsysteme in ihrer dreidimensionalen Bewegung erfasst. Inzwischen sind auch erste markerlose Videoanalyseysteme am

Markt. Aufgrund der heutigen Möglichkeiten der rechnergestützten Bildverarbeitung gelingt es per Software, virtuelle Marker am Patienten zu platzieren und zu verfolgen. Bei den indirekten kinematischen Messverfahren werden aufgrund der Lage der Marker im Raum anschließend die Winkel berechnet.

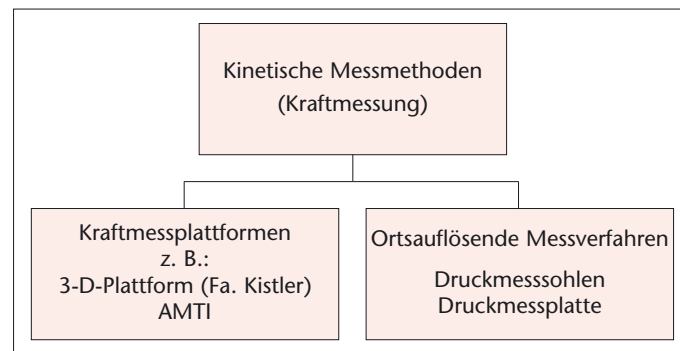


Abb. 2 Übersicht kinetischer Messmethoden.

Um möglichst genaue Ergebnisse zu erzielen, muss der Beobachtungsraum, in dem sich der Patient bewegt, exakt festgelegt werden. Das führt dazu, dass der Beobachtungsraum vielfach eine Größe von zwei mal zwei mal zwei Metern nicht überschreitet und dass daher häufig Laufbänder für die Messung der Kinematik eingesetzt werden. Abgesehen vom Laufband ist die geringe Rückwirkung der Messtechnik auf den Patienten von Vorteil. Vielfach stehen dem allerdings hohe Anschaffungskosten entgegen für Hard- und Software zur Bildverarbeitung. Die Softwarelösungen zur Verfolgung virtueller Marker liegen in ihren Anschaffungskosten sicherlich tiefer, allerdings sind die

Kosten für notwendige Hardwarekomponenten noch zu beachten.

Auch für die Erfassung der Kinetik der menschlichen Fortbewegung lassen sich grundsätzlich zwei verschiedene Messtechnologien benennen (Abb. 2). Die bereits seit vielen Jahren bekannten Kraftmessplattformen stellen die eine Technologie dar. Sie werden meistens im Boden eingelassen und verankert. Kraftmessplattformen messen die summatorischen Bodenreaktionskräfte in den vertikalen und horizontalen Ebenen medio-lateral sowie anterior-posterior (Abb. 3). Der dabei entstehende Kraftvektor ist das Spiegelbild der am Boden ankommenden Gesamtkräfte. Die meisten gängigen Kraftmessplattformen sind nicht mobil einsetzbar und haben hohe Anschaffungskosten.

Beim Einsatz von Kraftmessplattformen ist darauf zu achten, dass der Patient beim Gehen nicht auf das Treffen der Plattform fixiert ist. Das heißt, dass die Plattformen abgedeckt sein müssen, so dass der Patient nicht sieht, worauf er läuft. Dies führt dazu, dass das Treffen der Plattformen eher zufällig erfolgt, so dass auch die Aufzeichnung einer Schrittfolge (Sequenz) problematisch ist.

Die ortsauflösende Druckmessung ist die alternative Messtechnologie zu den Kraftmessplattformen. Die Vertreter dieser Technologie sind die Druckmesssohlen und

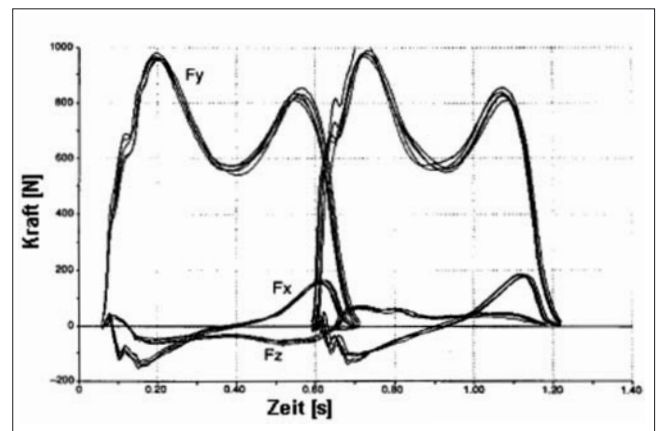


Abb. 3 Messergebnisse einer Kraftmessplattform.

Druckmessplattformen. Wobei die Druckmessplattformen in ihren Vor- und Nachteilen den Kraftmessplattformen sehr ähnlich sind. Die Druckmesssohlen werden üblicherweise im Schuh des Patienten platziert. Dadurch ist das Risiko eines Verfehlens der Sensorik nicht gegeben. Allerdings müssen die Druckmesssohlen möglichst passgenau im Schuh liegen, was zur Folge hat, dass verschiedene Größen beziehungsweise Formen von Messsohlen zur Verfügung stehen müssen. Trotzdem ist diese Messtechnologie vielfach günstiger in der Anschaffung als Kraftmessplattformen. Ein weiterer Aspekt ist die Tatsache, dass mit Messsohlen im Schuh ge-

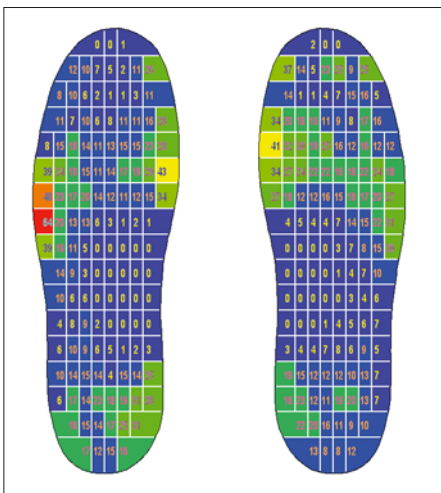


Abb. 4 Messergebnisse von ortsauflösenden Druckmesssohlen.

messen wird. Dies hat zur Folge, dass man neben der Kinetik des Stütz- und Bewegungssystems auch die Eigenschaften der Schuhe mit erfasst. Dies ist nicht nur nachteilig zu sehen, steht doch in der Orthopädienschuhtechnik auch der Schuh mit seinen Eigenschaften im Zentrum des Interesses. Druckmesssohlen und Druckmessplattformen messen im Gegensatz zu Kraftmessplattformen den ungerichteten Druck und sind daher nicht in der Lage, Kraftvektoren zu ermitteln (Abb. 4). Ein besonderer Vorteil der Druckmesssohlen ist ihre Ortsunabhängigkeit. Das bedeutet, sie können in jeder Messsituation zum Einsatz gebracht werden, beispielsweise im Sport (Marathon, Stadion oder Halle), aber auch im Alltag des Patienten (zum Beispiel beim Treppauf- beziehungsweise Treppab-Gehen).

Moderne Ganganalysesysteme stellen eine Kombination sowohl

kinematischer als auch kinetischer Messtechnologien dar. Vielfach werden diese Messtechnologien ergänzt um die Messung von Vitalparametern wie beispielsweise Puls, Muskelpotentiale und Atemfrequenz. Allerdings steht dem dafür notwendigen hohen technischen Aufwand die Frage der Alltagstauglichkeit entgegen. Da viele Systeme heutzutage modular aufgebaut sind, ist einem potentiellen Anwender dieser Messtechniken zu empfehlen, sich schrittweise der Bewegungsanalyse zu nähern, da sich seine Kenntnisse und Fähigkeiten auch schrittweise weiterentwickeln. Grundlage der Ganganalyse ist das Abrollverhalten des Fußes, somit bilden die Druckmessungen unter dem Fuß die Grundlage der Auswertungen.

## Durchführung von Bewegungsanalysen

Neben den technischen Anforderungen an die Bewegungsanalyse gelten auch bestimmte Anforderungen an die Durchführung einer Bewegungs- und Haltungsanalyse. Kernanliegen der Analysen muss es sein, den Patienten in seinem typischen, meist pathologischen Bewegungsmuster zu erfassen. Grundsätzlich sollte die Bewegungsanalyse mit einer Befragung (Anamnese) des Patienten eingeleitet werden. Vielfach geht bereits aus der ärztlichen Verordnung ein Hinweis auf die Pathologie hervor. Trotzdem sollte dieser Hinweis durch eigenes Befragen des Patienten vertieft werden. Oft zeigen sich Nebendiagnosen, die auf der ärztlichen Verordnung nicht erkennbar waren. Im Rahmen der Befragung des Patienten sollte auch sein Lebensumfeld beachtet werden. So gehören Fragen nach seiner körperlichen, beruflichen Aktivität wie auch seiner sportlichen Neigung mit dazu. Es gilt zu beachten, dass auch psychische Probleme körperliche Fehlhaltungen induzieren können.

Eine Bewegungsanalyse sollte sich möglichst am Bewegungsalltag des Patienten orientieren. Das bedeutet, dass der Patient beispielsweise mit seinen Alltagsschuhen vermessen wird. Vielfach sind sie schon ein Spiegelbild des Zustandes des Stütz- und Bewegungssystems. Vor einer Bewegungsanalyse sollte

sich der Patient einlaufen. Vor der eigentlichen Messung sollte er zirka 15 bis 20 Schrittzyklen absolviert haben. Dies dient der Minimierung sowohl physiologischer als auch psychologischer Einflüsse. Aus physiologischer Sicht ist bekannt, dass aufgrund von physikalischen Effekten in der Anlaufphase ein zunächst höherer Energiebedarf besteht. Im weiteren Gehen stabilisiert sich der Energiebedarf auf einem für den Patienten typischen, niedrigeren Niveau. Dieses Niveau wird in der Literatur als das für seine Fortbewegung angemessene betrachtet. Einen weiteren nicht unerheblichen Einfluss stellt die Messsituation dar, die von dem Patienten in psychologischer Hinsicht als Stress empfunden wird. Dies führt häufig zu verkrampften, untypischen Bewegungen. In der Einlaufphase kann der Patient sich auf die Messsituation einstellen und findet zu einem entspannten und damit für ihn typischeren Bewegungsmuster. Viele Patienten reagieren sehr positiv auf den Einsatz neuester Messtechniken, daher sollte man den Nutzeffekt der Messtechnik als Werbeinstrument einsetzen, indem man die Wirkung der für den Patienten individuell angefertigten Versorgung demonstriert.

Für die Analyse der menschlichen Fortbewegung erscheint es sinnvoll, sich nicht auf die Beurteilung einzelner Schritte zu konzentrieren, da sie von zufälligen Ereignissen (zum Beispiel Stolpern) geprägt sein können. Daher lohnt es sich, möglichst eine Folge von Schritten (Sequenz) aufzuzeichnen und zu analysieren. Auch im Hinblick auf spätere statistische Auswertungen, beispielsweise Maximalwerte oder Durchschnittswerte,

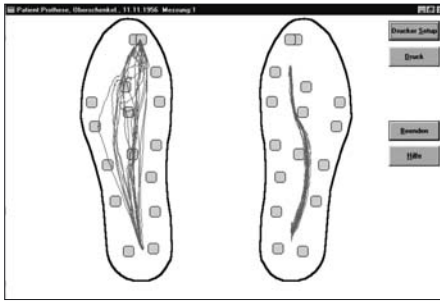


Abb. 5 Gangliniendarstellung beim überbetonten Gehen.

ist die Aufzeichnung von wenigstens 15 bis 20 Schrittzyklen günstig.

Kern der Überlegung in diesem Abschnitt ist die Sensibilisierung der Nutzer von Bewegungsanalyse-systemen für eine reproduzierbare und möglichst patiententypische Durchführung der Messungen. Vielfach hängt der Wert der späteren Analysen von einer diesen Qualitätsmerkmalen entsprechenden Messung ab.

## Auswertungsmöglichkeiten

An dieser Stelle sollen einige der gängigen Auswertungsmöglichkeiten dargestellt werden, insbesondere die Fußdruckmessung. Bei allen Auswertungen muss sich der Anwender bewusst sein, dass er bei der Fußdruckmessung ein Spiegelbild des Zustandes des gesamten Stütz- und Bewegungssystems vor sich hat. Umso wichtiger ist daher das diagnostische Gespräch mit dem Patienten vor der Messung. Es muss dem Anwender klar sein, dass jedes Bewegungsanalyse-system seinen Diagnoseprozess unterstützt. Die abschließende Diagnose sowie die Schlussfolgerungen daraus sind das Ergebnis einer Reihe von Informationen (Gespräch, Palpation, Bewegungsanalyse und so weiter) und den Erfahrungen des Anwenders.

Eine der am häufigsten verwendeten Auswertungen ist die Maximalwertdarstellung. In dieser Darstellungsform werden die höchsten Messwerte über die gesamte Messdauer gezeigt. Mithilfe dieses Bildes kann man schnell Belastungsspitzen lokalisieren. Daher wird sie vielfach bei der Analyse des diabetischen Fußsyndroms eingesetzt. Allerdings haftet dieser Darstellung eine gewisse Zufälligkeit an, da auch nur einmalig aufgetretene

Druckspitzen dargestellt werden. Besser geeignet ist die Ermittlung der durchschnittlichen Maximalwerte über alle Schrittzyklen hinweg. Eine stabilere Aussage bietet die Mittelwertdarstellung. Sie vereinigt die mittlere Belastung des Fußes während der Standphasen. Vielfach werden farbige die unterschiedlichen Druckwerte dargestellt, so dass man einen schnellen und repräsentativen Überblick über die Belastungssituation am Fuß hat. Neben der Erkennung von Fußfehlbelastungen in Folge von Diabetes, Rheuma usw. kann man mit diesen Darstellungen auch die klassischen

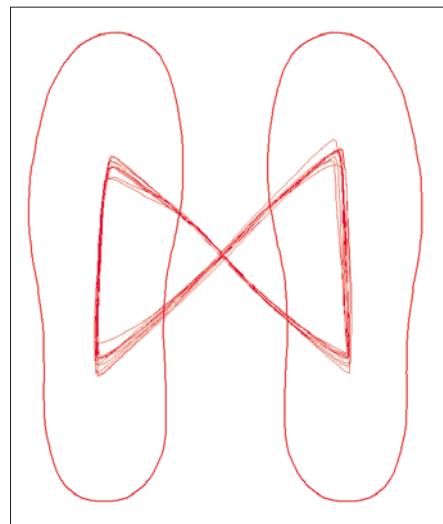


Abb. 6 Zylogramm.

Fußfehlhaltungen, wie beispielsweise Senk-, Spreizfuß und so weiter, diagnostizieren. Auch die Gegenüberstellung von Messergebnissen vor beziehungsweise nach einer Versorgung ist eine wichtige Auswertungsmöglichkeit.

Eine weitere Auswertungsmöglichkeit ist die Analyse der Ganglinie beziehungsweise des Abrollverhaltens des Fußes. Nicht nur ihr Verlauf, sondern auch ihre Wiederholung ist dabei von Interesse. Anhand des Verlaufs lässt sich das Abrollverhalten des Fußes auf dem Boden erkennen. Die Ganglinie läuft vom mittleren Fersenbereich über den lateralen Mittelfußbereich in Richtung erster

Zehenstrahl. Ein solcher Verlauf stellt einen optimalen Abrollvorgang vom Fersenauftritt zum Zehenabhub dar. So deuten kurze beziehungsweise lange Ganglinien auf ein ungenügendes Abrollverhalten hin. Die Ursachen für derartige Gangfehler sind dabei vielfältig und bedürfen einer sorgfältigen Analyse des diagnostischen Gespräches mit dem Patienten. Die Wiederholgenauigkeit der Ganglinie ist ein Indikator für den Trainingsgrad des Patienten. Eine hohe oder sehr geringe Varianz der Ganglinie kann als Indikator für pathologische Veränderungen im menschlichen Stütz- und Bewegungssystem gelten. Auf den ersten Blick mag dies für die sehr geringe Varianz etwas ungewöhnlich scheinen. Die sehr geringe Varianz der Ganglinie steht aber im Widerspruch zu einer natürlichen, etwas größeren Streubreite (Abb. 5). Diese natürliche Streubreite gewährleistet eine möglichst gleichmäßige Benutzung aller Elemente des Stütz- und Bewegungssystems. Ein einseitiges Bewegungsmuster führt zu vermehrter Abnutzung und zu einem erhöhten Verschleiß einzelner Segmente des Stütz- und Bewegungssystems [6]. In Fortsetzung der Analyse der Ganglinie ist auch eine Analyse des Zylogramms interessant. Das Zylogramm ist die Darstellung des Verlaufs des Druckschwerpunktes (DSP) während des Gehens. Im Allgemeinen ergibt sich eine Schmetterlingsfigur (Abb. 6). Große, symmetrische „Flügel“ dieser Figur weisen auf ein unauffälliges, gleichmäßiges Bewegungsmuster hin. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Sensibilität der Figur für Beinlängenverkürzungen. An dieser



Abb. 7 Wissenschaftlich gestützte Vergleichsparameter.

Stelle sei aber darauf hingewiesen, dass eine unsymmetrische Figur nicht nur ein Indikator für Beinlängenverkürzungen ist. Auch hier gilt es, in Abstimmung mit dem diagnostischen Gespräch nach weiteren Ursachen für diese Asymmetrien zu suchen.

Neben diesen eher graphisch orientierten Auswertungen ist selbstverständlich auch eine kurven- und parameterorientierte Analyse wichtig. Insbesondere mittels der Parameter ist ein objektiverer Vergleich von Messergebnissen möglich. In den letzten Jahren erfolgten viele Anstrengungen hin zur Schaffung von Vergleichswerten und Kurvenverläufen, die die Analyse erleichtern sollen. Verschiedene Messsysteme bieten bereits erste derartige Vergleichswerte an. Trotzdem sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass diese Parameter auch immer im Zusammenhang mit anderen diagnostischen Mitteln zu setzen sind und die Ergebnisse immer vom Anwender sorgfältig überprüft werden müssen. In Abbildung 7 ist ein Beispiel zu sehen, bei dem Vergleichsparameter den aktuellen Messwerten gegenübergestellt und bewertet werden [4].

## Zusammenfassung

Der Zustand des menschlichen Stütz- und Bewegungssystems lässt sich anhand seiner Funktion – der zielgerichteten Fortbewegung – analysieren. Dies umfasst sowohl die Beurteilung des Stütz- und Bewegungssystems in Aktion (dynamisch) als auch im Stehen (statisch). Die computergestützte Bewegungsanalyse stellt die Methode zur Quantifizierung des Bewegungsverhaltens dar. Sie ist somit die Beurteilungsmethodik für den Zustand des Stütz- und Bewegungssystems. Die computergestützte Bewegungsanalyse ermöglicht eine exakte und reproduzierbare Erfassung bisher meist verbal beschriebener Sachverhalte. Sie ist ein Element im Diagnose- und Therapieprozess am Patienten und muss immer im Zusammenhang mit weiteren diagnostischen Elementen abgeglichen werden.

Die Anwendungsgebiete der computergestützten Bewegungsanalyse sind sehr vielfältig und reichen durch nahezu alle medizinischen Disziplinen. Die computergestützte

Bewegungsanalyse begleitet sowohl die Diagnose als auch die Therapie und die Rehabilitation. Selbstverständlich ist die Orthopädie das Hauptanwendungsgebiet, aber auch die Neurologie nutzt inzwischen intensiv die Möglichkeiten der Stand- und Bewegungsanalysen. Im Vordergrund stehen dabei Anwendungen wie die Begleitung der Versorgung des diabetischen Fußes, prä- und postoperative Kontrollen, Versorgungen mit Prothesen und Orthesen sowie Einlagen.

## Ausblick

Der unvermindert anhaltende Fortschritt in der Computertechnik, Elektrotechnik und im Maschinenbau wird sicherlich auch neue Sensortechnologien für die Stand- und Bewegungsanalysen bringen. Allerdings bieten bereits die heute verfügbaren Messtechnologien eine Vielfalt an Ergebnissen, die von vielen Anwendern bisher wenig genutzt werden. Die Ursachen dafür sind sicherlich auch in einer

ungenügenden Aufbereitung und Darstellung der Messergebnisse zu sehen. So ist es in Zukunft notwendig, dem Anwender neben verbesserten Messtechnologien vor allem verbesserte Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung zu stellen. Eine Möglichkeit der Verbesserung ist die Bereitstellung von Vergleichswerten. Bereits die Einführung einheitlicher Befundbögen würde einen ersten Schritt in Richtung Vergleichbarkeit darstellen. Der vor einigen Jahren vorgestellte Profilerhebungsbogen für die prothetische Versorgung war ein erster Ansatz einer transparenteren Befundung. Notwendig für die Erzeugung von tragfähigen Vergleichswerten ist ein interdisziplinärer Ansatz.

### Die Autoren:

*Dr.-Ing. Heiko Tober*

*Dipl.-Ing. Thomas Köhler*

*T&T medilogic Medizintechnik GmbH*

*Mittelstraße 9*

*12529 Schönefeld*

### Literatur:

- [1] Braune, W., O. Fischer: Der Gang des Menschen, 1. Teil: Versuche am unbelasteten und belasteten Menschen. Leipzig, Abhandlungen der mathematisch-physischen Klasse der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, Band XXXV, 1895
- [2] Elftman, H.: The measurement of external force in walking. *Science* 88 (1938), 152-153
- [3] Endler, F.: Einführung in die Biomechanik und Biotechnik des Bewegungsapparates, Orthopädie in Praxis und Klinik, Band 1. Stuttgart, Thieme Verlag, 1981

- [4] Hegewald, G.: Ganganalytische Bestimmung und Bewertung der Druckverteilung unterm Fuß und von Gelenkwinkelverläufen. Humboldt Universität zu Berlin. Dissertation, 2000
- [5] Maray, E. J.: Emploi des photographies partielles pour etudier la locomotion de l'homme et des animaux, *Comptes rendus*, tome 961883
- [6] Tober, H., R. Tscheuschner: Bewegungsanalyse als Element der Qualitätssicherung bei der Versorgung orthopädischer Hilfsmittel. Dresden, TUDpress Verlag der Wissenschaften, 2006