

Laufanalyse – Systeme und ihre Anwendung

Björn Gustafsson: Die Bewegungsanalyse gewinnt in der Orthopädieschuhtechnik zusehends an Bedeutung. Dieser Artikel soll dem Leser einen Überblick über die zur Zeit in Deutschland gängigen Systeme bieten.

Die Bewegungsanalyse ist ein weitreichendes Feld mit vielfältigen Anwendungen. Sie beschreibt Bewegungen von Körpern anhand von kinematischen Parametern wie Weg/Zeit-Verläufen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen (Kinematik: Lehre von den Bewegungen ohne Berücksichtigung der Ursachen).

Die Körperbewegung wird dabei nicht ganzheitlich erfasst, sondern nur von einzelnen ausgewählten Teilbereichen der Körper. So werden beim Menschen Gelenkbewegungen beschrieben, während bei Maschinen die Bewegung einzelner Maschinenteile erfasst wird.

Das Interesse einer Bewegungsanalyse liegt beim OSM hauptsächlich im Sportbereich oder zur Kontrolle der Wirkungsweise eines Hilfsmittels. So wird versucht, den Bewegungsablauf eines Probanden durch Weg/Zeit-Verläufe oder Winkelstellungen einzelner Körperteile zueinander zu beschreiben. Überdies findet die Bewegungsanalyse in folgenden Einsatzfeldern Anwendung:

- der Medizin und Arbeitsmedizin
- Rehabilitationszentren
- der Biomechanik
- der Ergonomie
- der Neurologie
- Sporteinrichtungen
- der industriellen Anwendung (zum Beispiel Crash-Tests bei Autoherstellern)
- Animationen im Filmbereich
- der Neuentwicklung und Testung von Sportschuhen

Rechnergestützte Bewegungsanalysen beschleunigen und präzisieren den Prozess der Koordinatengewinnung der zu analysierenden Objekte. Dies geschieht häufig durch Darstellung des Bildmaterials auf einem Monitor mit der Möglichkeit von Punkteditierfunktionen (typischerweise Fadenkreuzcursor mit Maus). Durch den wachsenden Fortschritt in dieser Technologie werden mittlerweile auch Methoden der Bildverarbeitung zur weiteren Effizienzsteigerung verwendet. Durch die Markierung der zu analysierenden Objekte kann unter gewissen Umgebungsbedingungen der Prozess der Koordinatengewinnung automatisiert werden. Als Ergebnis liefern solche Systeme Datensätze, die auf Strichmännchen übertragen werden können (Abb. 2). Der Untersucher kann diese in der Auswertung aus mehreren Perspektiven begutachten.

Stand der Technik

Noch immer wird die nachträgliche (offline) Videobildauswertung meist manuell bewerkstelligt (Online-Systeme extrahieren die Koordinaten speziell markierter Objekte automatisch in Echtzeit, haben jedoch den Nachteil, dass eine nachträgliche weitere Analyse an der Aufnahme nicht mehr möglich ist).

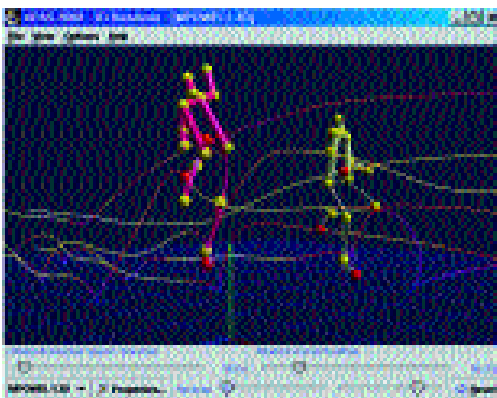
Meist wird ein extern steuerbarer Videorecorder mit einem PC verbunden oder die Kamerasignale direkt über eine PC-Videokarte in den PC eingespeist. Software ermöglicht die Darstellung des Videobildes auf dem Computerbildschirm und die Eingabe mehrerer Objektpunkte. Sind in einem Bild alle interessierenden Objektpunkte gesetzt worden, kann der Videorecorder oder die digitale Aufzeichnung via Software zur Darstellung des nächsten Einzelbildes veranlasst werden – und der Vorgang der Punkteingabe beginnt von neuem. Da bei der Fernsehnorm PAL 25 Vollbilder (bei Halbbildtrennung 50 Bilder) pro Sekunde anfallen, muss dieser Vorgang für mehrere Bewegungszyklen im Schnitt mehrere hundert Male wiederholt werden. Erst nach Abschluss dieser langwierigen Prozedur liegen alle Objektpunkte vor, aus denen Werte wie Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Winkelstellungen berechnet werden können.

Dieses zeitraubende Vorgehen führt dazu, dass man bei älteren Systemen die Ergebnisse der Bewegungsanalyse meist erst einige Zeit nach der Aufnahme erhält – was insbesondere für den Anwender umständlich ist, da die Analyse des Bewegungsablaufes eines Probanden möglichst ohne große Zeitverzögerung durchgeführt werden sollte.

Erst seit einigen Jahren erscheinen Programme, die mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung versuchen, Objekte automatisch zu verfolgen. Voraussetzung für diese Programme sind Marker, die vor der Analyse an bestimmten Stellen angebracht werden. Solche Marker können dann von der Software automatisch erkannt und verfolgt werden.



1 Die automatische Laufschuhermittlung von motionQuest.



2 Screenshot einer 3D-Analysesoftware nach Auswertung der Gelenkpunkte (Weitsprung).

Grundsätzlich lassen sich zwei unterschiedliche Methoden der Datenabnahme unterscheiden:

- Online Systeme
- Offline oder videobasierende Systeme

Online Systeme

Hier werden aktive oder passive Marker am Körper angebracht und die jeweilige Position der Marker gespeichert. Die passiven Marker werden von Strahlungsquellen (Infrarot, Ultraschall) aktiviert und die Strahlen auf einen Detektor zurückgeworfen. Die aktiven Marker strahlen den Detektor selbstständig an.

Der Detektor (Kamera) registriert nur die Position (keine Bilder!) jedes einzelnen Markers (durch den Strahl) und speichert die x,y,z-Koordinate ab. Daraus lassen sich durch mathematische Weiterbearbeitung alle kinematischen Parameter der Bewegung errechnen und darstellen.

Die Beschreibung der Bewegung am PC erfolgt quasi sofort nach der realen Bewegung (online).

Offline oder videobasierendes System

Alle Systeme arbeiten mit Videobildern (Standard- oder Hochgeschwindigkeitskameras), die von der Bewegung aufgenommen werden. Diese Sequenzen werden digitalisiert und im PC gespeichert. Die Auswertung erfolgt danach (offline) anhand von Bildverarbeitungsverfahren. Meistens werden auch hier vor der Aufnahme Marker (in Form von Klebepunkten oder -Kugeln) oder Markierungen (an den Gelenkdrehpunkten) angebracht, deren Positionen dann mit der Auswertesoftware berechnet werden. Die benötigte Größe dieser

Marker richtet sich nach der Entfernung von der Kamera zum Objekt und der Monitorauflösung der Software. Wird in der Analyse nur eine kleine Körperregion (zum Beispiel ein einzelnes Gelenk) aufgenommen, kann der Marker kleiner (ca. 5 mm) als bei Analyse der ganzen Beinachse gewählt werden.

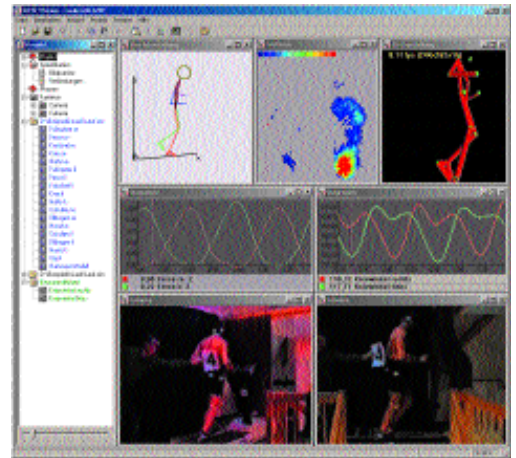
Nachdem auf die verschiedenen Verfahren (online/offline) eingegangen wurde, stellt sich für den Bereich der Orthopädieschuhtechnik die Frage:

Wie viel Genauigkeit braucht die Analyse?

Die Antwort dieser Frage lässt sich nicht einfach geben, denn dem Aspekt der Wissenschaftlichkeit einer Analyse folgt der Aspekt der Wirtschaftlichkeit auf dem Fuße.

Bedenkt man, dass viele OSM eine Bewegungsanalyse bei Einlagenkauf kostenlos anbieten, sind Summen zur Anschaffung der alleinigen Software über die Grenze von 25.000,- DM utopisch (s. Tabelle Seite 38). Dieses unterstreicht die Forderung, die Bewegungsanalyse als eine eigenständige Dienstleistung mit festen Schemata und Preisen im Betriebsablauf des OSM zu integrieren. Ein Modell hierzu stellte Best (1999) vor. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Analyse nach ernsthaften, objektiven Gesichtspunkten und nicht als „Verkaufsgimmick“ durchgeführt wird.

Unter dem wissenschaftlichen Aspekt sei darauf hingewiesen, dass die Analyse nicht nur auf den Sprunggelenkskomplex und Unterschenkel ausgerichtet sein darf, sondern nach Möglichkeit immer die gesamte Beinachse und bestenfalls das Becken beinhalten

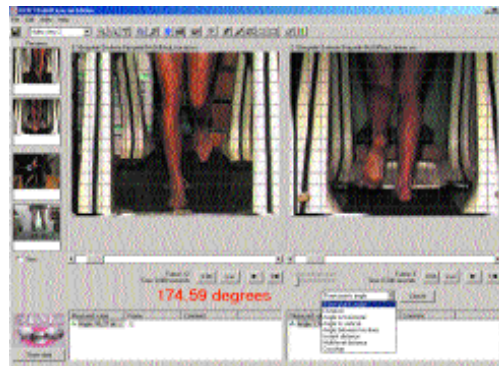


3 Screenshot der 3D-Software SIMImotion.

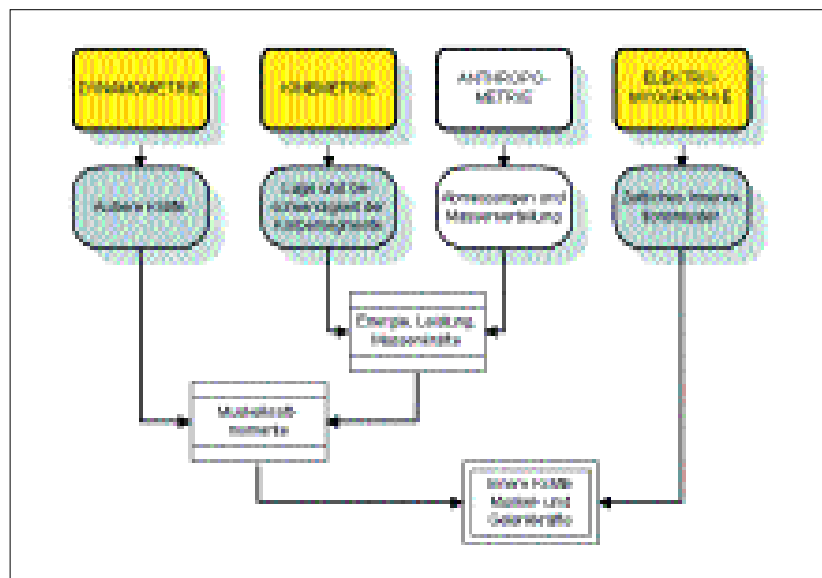


4 Screenshot einer 3D-Ganganalyse.

sollte. Diese Parameter sind von unbedingter Relevanz, denn nur durch einen vermeintlichen „Pronationswert“ im unteren Sprunggelenk lassen sich keine Beschwerden ergründen oder erklären. Auch haben neueste Forschungen (vgl. Hintermann und Nigg, 1993; Reischl et al., 1999) ergeben, dass es nicht möglich ist, durch die Quantifizierung (in messbaren Größen oder Mengenbegriff-



5 Screenshot einer zwei-dimensionalen Messung.



6 Biomechanische Untersuchungsmethoden (Baumann, 1989)

fen darstellen) einer Rückfußpronation auf eine damit gekoppelte Tibiarotation zu schließen, wie es noch Inman (1976) und Langelaan (1983) postulierten (vgl. Debrunner). Vielmehr ist die statische Beinachse (Genu Varum/Valgum; O-Bein/X-Bein)^v und ihr verändertes Verhalten in der Dynamik (Varisierung/Valgisierung oder Rotation) zu beurteilen. Auch fließen Bewegungseinschränkungen im Sprunggelenk und der Fußwinkel (Ab-/Adduktion der Fußlängsachse) maßgeblich in das Analyseergebnis ein. Eine gesicherte Vorgehensweise, unter Berücksichtigung der o. a. Punkte, mit einer automatischen Auswertung und anschließendem Bericht zur Analyse, liefert das Softwaresystem „motionQuest“. Diese Software misst zwar keine Winkel, bietet aber durch ihre Konzeption dem eher unerfahrenen Untersucher einen festen Ablaufplan für seine Bewegungsanalyse. Innerhalb kürzester Zeit werden indivi-

duelle Lösungen und perfekt auf die Bewegung abgestimmte Laufschuhe angezeigt (s. 1). Zudem lässt sich diese Software neben einem bisher benutzten Meßsystem (gleich welcher Art) ergänzend einsetzen.

2D oder 3D?

Die Frage der Genauigkeit lässt in dieser Hinsicht nach wissenschaftlichen Aspekten keine Zweifel offen. Die Zukunft der Bewegungsanalyse gehört der Dreidimensionalität. Nur mit dieser Messmethode können Fragen wie Rotationen der Körperteile zueinander und absolute Stellungen von Körpersegmenten im Raum geklärt werden.

Durch verschiedenartige Auswertungssoftware (Abb. 2, 3, 4) können außerdem Seitenvergleiche, Weg/Zeit-Verläufe, Beschleunigungen etc. ergründet werden.

In der 3-dimensionalen Analyse wird die Bewegung des Körpers synchron aus

drei Ebenen heraus betrachtet. Diese sind die Seitenansicht (sagittal), die Ansicht von hinten oder vorn (frontal) und der Ansicht von oben oder unten (transversal).

Für die menschliche Bewegung ergeben sich folgende Ebenen:

- a) Die Seitenansicht ermöglicht die Feststellung der Streckung und Beugung (Extension/Flexion) der Hüfte (wie steht der Oberschenkel zum Oberkörper), des Knies und des oberen Sprunggelenkes. Solche Daten sind sehr aussagekräftig, bei der Beurteilung von Gangbildasymmetrien oder bei Verlaufskontrollen einer zum Beispiel physiotherapeutischen Behandlung
- b) Die Frontalansicht – dies ist die Ebene auf die der Proband zu- oder weggeht – lässt die Abduktion und Adduktion der Hüftgelenke, der Beinachse und die Beckenkipfung erkennen.
- c) Die Ansicht von oben oder unten zeigt zum Beispiel die Rotation der Fußlängsachse, des Beckens oder des Oberkörpers.

Besonderheiten der 3D-Analyse

Prinzipiell kann aus der Kenntnis der Koordinaten eines Objektes in mindestens zwei Bildsequenzen die dreidimensionale Koordinate errechnet werden. Dazu benötigt man jedoch genaue Kenntnis über Lage und interne Parameter aller verwendeten Kameras. Deshalb ist für eine 3D Analyse der Vorgang der Kalibrierung unerlässlich, und bestimmt weitgehend die zu erreichenden Genauigkeiten der errechneten Koordinaten.

Fast alle dreidimensionalen Meßsysteme arbeiten mit einer sehr hohen Bildwiederholungsrate (Highspeed). An der Spitze steht das System ALBAVISION mit 10 Mio. Bildern in der Sekunde (zum Vergleich: Die normale PAL Fernsehnorm beträgt 25 Bilder pro Sekunde, bei Halbbildtrennung können 50 Bilder/sek. verwertet werden). Für die Lauf- oder Ganganalyse sind 200 Bilder pro Sekunde völlig ausreichend und für zukünftige Standards in der Orthopädie-schuhtechnik anzustreben. Diese Informationen liefern bis auf das ZEBRIS (100 Hz.) alle 3D-Systeme in der Übersichtstabelle.

Nachteile einer 3D-Analyse

Als Nachteil einer 3D Analyse sind der hohe technische Einsatz und der An-

Software	Albavision	COVILAS	motionQuest	orthoview
Internetadresse	www.albavision.com	www.ietec.de	www.currex.de	www.cosinos.de
Fußdruck sync.	ja	ja	nein	nein
EMG sync.	ja	nein	nein	nein
Bilder/sec.	50 bis 10 Mio.	50 bis 200	keine Angaben	50
Auflösung	keine Angaben	768 x 576	keine Angaben	768 x 576
Kameras	bis 18 (eine Kamera incl.)	standard PAL	keine	standard PAL
Art der Messung	videobasiert/offline o. Infrarot/online	videobasiert/offline	visuell/quantitativ	Video/offline
2D/3D	2D/3D	2D	keine Angaben	2D
Preis	2D DM 23 000,-; 3D DM 68 095,- incl. 2 Kameras und Zubehör	Einstieg DM 3 000,- Basis DM 14 000,-	DM 1 990,- inkl. Berichtssystem	DM 3 980,- inkl. Videokarte für PC
Übertragung in Datenblatt	ab 3D-Analyse	ja	ja	ja
Berichtssystem	nein	nein	ja – wird automatisch generiert	ja
Markererkennung	manuell/automatisch	manuell/automatisch	keine Marker	manuell
aufsetzbare Module	Für Ganganalyse: misst alle 6 Freiheitsgrade der Gelenke der UE	COVILAS Rad, COVILAS Wirbelsäule	Berichtssystem, Stretching-übungen, Einlagenvorschläge	keine
Updates	kostenlos	DM 7 000,-	halbjährlich à DM 290,-	DM 1 500,-
Hardware Anforderungen	PC wird mitgeliefert	keine Angaben	moderner PC	moderner PC mit Videokarte
Software	ProReflex	SIMI	WINalyze	zebris
Internetadresse	www.qualisys.com	www.simi.com	www.micromak.com	www.zebris.de
Fußdruck sync.	ja	ja	ja	ja
EMG sync.	ja	ja	ja	ja
Bilder/sec.	240 bis 1000	50 bis 200	50 bis 460	25 bis 100
Auflösung	1 : 60 000	720 x 576	1024 x 1024	keine Angaben
Kameras	Infrarot incl. Prozessor	bis 4 standard PAL oder Highspeed	standard PAL oder Highspeed	ultraschallaufnehmer
Art der Messung	Infrarot/online	videobasiert/offline	videobasiert/offline	Ultraschall/online
2D/3D	3D	2D/3D	2D/3D	3D
Preis	ab DM 125 000,- incl. Installation	2D Einstieg ab DM 2 990,- 3D ab DM 25 900,-	2D DM 8 600,- 3D ab DM 19 800,-	3D Einstieg für eine Körperseite DM 36 380,-
Übertragung in Datenblatt	keine Angaben	ab MoStill Master (DM 6 900,-)	keine Angaben	ja
Berichtssystem	keine Angaben	nein	nein	ja
Markererkennung	automatisch	manuell/automatisch	automatisch	automatisch
aufsetzbare Module	keine Angaben	modularer Aufbau auf 3D möglich	modularer Aufbau auf 3D möglich	WinSpine (Bewegungsanalyse der Wirbelsäule)
Updates	keine Angaben	erstes kostenlos, dann DM 5 000,- bei 2D	1. Jahr kostenlos. Dann 50 % des regulären Preises	keine Angaben
Hardware Anforderungen	PC wird mitgeliefert	moderner PC mit Videokarte	moderner PC mit Videokarte	keine Angaben

schaffungspreis zu nennen. Die günstigste Variante in den Einstieg der dreidimensionalen Messung bietet in Deutschland derzeit MIKROMAK. Auch die Firma SIMI Motion bietet in etwa der gleichen Preislage eine 3D-Software an. Beide Systeme arbeiten offline und videobasiert. SIMI lässt außerdem den modularen Aufbau von 2D auf 3D zu.

Die 2D-Analyse

Im Bereich der heutigen Orthopädie-schuhtechnik haben sich zweidimensionale Systeme etabliert, und dies aus gutem Grund: Zum einen liegen solche Systeme deutlich unter dem Anschaffungspreis ihrer dreidimensionalen (Über)Brüder, zum anderen stellt der OSM keine Forschungseinrichtung, sondern ein Wirtschaftsunternehmen dar. Die Zielrichtung der Bewegungsanalyse durch den OSM sollte es sein, eine bessere und angepasstere Versorgung zu gewährleisten.

Dazu werden nach Möglichkeit in Verlängerung jeder Körperachse eine oder mehrere Kameras postiert, die es

dann zulassen, Winkelstellungen von Körpersegmenten zueinander zu messen. Der Unterschied zur 3D-Messung besteht darin, dass die Daten der Körperachsen nicht synchron zueinander in Beziehung gesetzt werden können, sondern jede Körperebene für sich isoliert betrachtet werden muss. Die Bewegung eines mehrachsigen Gelenks ist aber immer dreidimensional und wird so nur zweidimensional auf dem Bildschirm abgebildet (Abb. 5). Rotationen von einzelnen Körpersegmenten werden nicht abgebildet und verursachen einen unsystematischen Messfehler^{vi}, den Gustafsson und Kriwat (1998) für den Bereich des Unterschenkels bereits beschrieben haben. (Als systematischen Messfehler bezeichnet man Funktions- und Skalierungsfehler von Messgeräten, die einen konstanten Einfluss auf das Messergebnis haben. Unsystematische Messfehler sind nicht vorherbestimmbar.)

Diese Rotation lässt es nicht zu, absolute Messwerte zu nehmen; eher dient eine 2D-Analyse dazu, einige Win-

kelstellungen als Hilfe der Ergebnisfindung heranzuziehen. Es sei nachdrücklich davor gewarnt, Winkel einer solchen Messung als absolut darzustellen und nur aufgrund dieser eine Versorgung einzuleiten. Einen weiteren Messfehler – der aber auch für den Bereich der 3D Messung gilt – verursacht immer die Verschiebung der Haut. Sämtliche Messpunkte müssen an den Gelenkdrehpunkten angebracht werden. Diese werden auf die Haut projiziert und verschieben sich während der Datenaufnahme unsystematisch. Untersuchungen zu diesen Verschiebungen lieferten Karlsson und Lundberg (1994) sowie Reinschmidt et al. (1997). So wurde für die interne/externe Knierotation ein großer Fehler im Verhältnis zur Bewegungsamplitude festgestellt. Durchschnittliche Fehler relativ zur Bewegungsamplitude waren nach Reinschmidt et al. 21% in der Knieflexion/-extension und 63% für die interne/externe Tibiarotation. Karlsson und Lundberg berechneten bei der Abduktion des Unterschenkels keinen Unter-



7 Screenshot der Software Orthoview.

schied der in-vivo-Messung (in einem lebendem Organismus) gegenüber den Hautmarkierungen, bei der Knieflexion/-extension jedoch Abweichungen von 8° und für die Tibiarotation einen Fehler von 30° . Bei diesen Messungen wurden die Marker unter Lokalanästhesie direkt am Knochen befestigt.

Um die Genauigkeit in einem 2D-Messdurchgang dennoch möglichst hoch zu halten, sollte bei der Anschaffung der Kameras auf eine gute Auflösung geachtet werden. Derzeit bieten digitale Kameras akzeptable Standards zu einem vernünftigen Preis (um DM 2.500,-). Auch ist es mit handelsüblichen Digitalkameras einiger Hersteller möglich, in den 200-Hz-Bereich (200 Bilder pro Minute) überzugehen. Fast alle Softwaresysteme unterstützen diese Anbindung.

Zukünftige Trends

In der Zukunft der Bewegungsanalyse sollten nicht nur o.a. Punkte berück-

sichtigt, sondern auch auf zusätzliche Untersuchungsmöglichkeiten synchron zur kinematischen Bewegungsanalyse zugegriffen werden. Im Bereich der Sportbiomechanik sind hier die Elektromyographie (EMG) und die Dynamometrie zu nennen. Durch EMG-Messungen kann muskuläre Arbeit erfasst werden. Der Untersucher erhält Informationen über das Innervationsmuster einzelner Muskeln während einer Beanspruchung. EMG Untersuchungen sind im Alltag des OSM noch undenkbar, fordern sie doch einen hohen zeitlichen und personellen Einsatz.

Die dynamografischen Verfahren werden im Bereich der Orthopädienschuhtechnik hingegen schon seit vielen Jahren eingesetzt und haben sich etabliert. Als dynamografische Systeme verstehen sich plantare Druckmeßsysteme, wie elektronische Fußdruckmessplatten oder In-Schuh-Messsysteme. Gelingt es dem Untersucher, die Daten solcher Systeme mit denen der kinematischen Bewegungsanalyse zu koppeln, werden die Parameter gehaltvoller und wissenschaftlich valider. Eine solche Zusammenführung verschiedener Messmöglichkeiten sollte als zukünftige Untersuchungsstrategie im Bereich der Orthopädienschuhtechnik angesehen werden. Einen Überblick hierüber gibt die Abbildung 6.]

● ● Anschrift des Verfassers:

Björn Gustafsson
Currex GmbH
Lerchenstr. 21
D-24103 Kiel

Literatur:

- Baumann, W.: Grundlagen der Biomechanik. Schorndorf: Hofmann 1989.
- Best, W.: Laufanalyse – nicht über den Daumen peilen. Orthopädienschuhtechnik, 5 (1999), 28 – 31.
- Debrunner/Jacob: Biomechanik des Fußes. 2., völlig neu bearbeitete Auflage. Bücherei des Orthopäden, Band 49, Enke, Stuttgart 1998.
- Frischholz, R.: Software zur automatischen Bewegungsanalyse. Erlangen: Interne Publikation Mikromak GmbH 1998.
- Gustafsson, B.; Kriwat, M.: Objektivität nur bedingt möglich. In: Orthopädienschuhtechnik, 11 (1998), 56 – 59.
- Hintermann, B.; Nigg, B.M.: Pronation from the viewpoint of the transfer of movement between the calcaneus and the tibia. In: Schweiz Z. Sportmed., 4 (1993), 151 – 156.
- Karlson, D.; Lundberg, A.: Accuracy estimation of kinematic data derived from bone anchored external markers. Interne Publikation Fa. Qualisys AB. Partille, Schweden.
- Reinschmidt, C.; van den Bogert, A.J.; Nigg, B.M.; Lundberg, A.; Murphy, N.: Effect of skin movement on the analysis of skeletal knee joint motion during running. In: Journal of Biomechanics, 7 (1997), 729 – 732.
- Reischl, S.F., Powers, C.M., Rao, S., Perry, J.: Relationship between foot pronation and rotation of the tibia and femur during walking. In: Foot Ankle Int, 8, (1999), 513 – 520.
- Zebris Medizintechnik GmbH: 3D Echtzeit Ganganalyse auf Laufband und Gehstrecke. Isny im Allgäu: Interne Publikation 1999.

Nachtrag

Nach Redaktionsschluss erreichten uns noch Informationen zum „GP Video View“-System, das erst seit kurzer Zeit auf dem Markt angeboten wird.

Internetadresse: www.gebiom.de
Fußdrucksynchr.: ja
EMG synchr.: ja
Bilder/sec.: 50
Auflösung: 720x576
Kameras: standard PAL
Art der Messung: Videobasiert/ offline
2D/3D: 2D
Preis: DM 4000,- inkl. Videokarte für PC
Übertragung in Datenblatt: ja
Berichtssystem: ja
Markererkennung: manuell
aufsetzbare Module: GP Sport zur statischen Auswertung
Updates: 1. Jahr kostenlos
Hardware-Anforderungen: moderner PC mit Videokarte.