

Ganganalyse im Spannungsfeld zwischen Mensch und Technik

Einleitung

Das Gehen und Laufen sind die ursprünglichsten Fortbewegungsarten des Menschen und Basis jeder Bewegung in Alltag, Beruf und Sport. Ist diese Fortbewegungsmöglichkeit durch Krankheit, Verschleiß oder Unfall gestört, bedeutet das meist eine wesentliche Beeinträchtigung von Mobilität, Lebensqualität und sozialer Teilhabe. Eine medizinische Befunderhebung und Behandlung beinhaltet je nach Schweregrad und Ausprägung verschiedene diagnostische und therapeutische Maßnahmen. Ein wesentliches diagnostisches und therapiebegleitendes Verfahren ist die Ganganalyse oder allgemeiner die Bewegungsanalyse, bei der wiederum verschiedene technologische Lösungen zum Einsatz kommen. Ganganalysen können einen wesentlichen Beitrag nicht nur zur Diagnose, sondern auch zur bestmöglichen Wiederherstellung einer gestörten Bewegung leisten, wenn sie ihr vorhandenes Potential ausschöpfen. In der Folge soll versucht werden, die Ganganalyse in ihrem komplexen Spannungsfeld zwischen den beteiligten Wissenschaftsdisziplinen ebenso wie zwischen Mensch und Technik zu beschreiben.

Definition und Gegenstandsbereiche der Ganganalyse

Unter Ganganalyse wird die systematische Erfassung des menschlichen Ganges und seiner Parameter verstanden. Die Ganganalyse gilt als etabliertes Standardverfahren moderner Bewegungsanalysen und wird um die Sonderformen der Laufanalyse und Laufbandanalyse ergänzt. Neben den Standardwerken der Fachliteratur (Perry, 2003; Whittle, 2002; Winter, 1991) haben sich einige Fachgesellschaften etabliert, die sich mit der Analyse des menschlichen Ganges intensiv beschäftigen (u.a. GCMAS: Gait and Clinical Movement Association; ISPGR: International Society for Posture and Gait Research; ESMAC: European Scientific Society for Clinical Gait and Movement Analysis; GAMMA: Gesellschaft für die Analyse Menschlicher Motorik in ihrer klinischen Anwendung). Als zugehörige Fachzeitschrift ist v.a. „Gait & Posture“ anerkannt (Jöllenbeck, 2015).

Das wesentliche Anwendungsfeld ist die klinische Ganganalyse in den (sport-) medizinischen Fachgebieten Neurologie und Orthopädie. Das Anwendungsspektrum der Ganganalyse ist entsprechend weit gefächert und reicht von der Analyse von Bewegungsabläufen über die Erhebung von Bewegungsparametern und die Bestimmung von Belastungsparametern bis hin zur Erfolgskontrolle von Rehabilitationsmaßnahmen und der Entwicklung und

Überprüfung von Hilfsmitteln (Götz-Neumann, 2003; Ludwig, 2012; Perry, 2003; Rosenbaum, 1999). Die Ziele der Ganganalyse liegen in der

- Beschreibung und Definition des „normalen“ wie des pathologischen Gehens und Laufens in verschiedenen Altersgruppen,
- Aufdeckung von Fehl- und Überbelastungen zur Prävention von Beschwerden des Bewegungsapparates, zur Behandlung bei Beeinträchtigungen, nach Verletzungen oder Unfällen,
- Festlegung des Schweregrades einer Funktionsstörung als Entscheidungshilfe für therapeutische Maßnahmen ebenso wie zur Vorbereitung von chirurgischen Eingriffen,
- Wiederherstellung und Optimierung von Bewegungsabläufen.

Doch trotz dieses sehr gut entwickelten Gegenstandsbereiches liegen bis heute keine einheitlichen Analysestandards vor (Jöllenbeck, 2015) und es stellt sich die Frage nach den Ursachen.

Problemfeld Ganganalyse

Der Blick in die Praxis aus Sicht der Patienten lässt den Gegenstandsbereich auf zwei Kernprobleme reduzieren. Zum einen haben Patienten ein Bewegungsdefizit, das zu behandeln ist. Zum anderen stellen Patienten aber auch die Frage, ob und wann sie denn wieder gehen, laufen und darüber hinaus aktiv sein können. Ein Leitsatz für klinische Gang- und Bewegungsanalysen ist daher wie folgt zu formulieren:

“Das Verstehen von Bewegung sowie die Aufdeckung und Behandlung der primären Bewegungsdefizite ist die Schlüsselkomponente einer erfolgreichen und nachhaltigen Diagnostik und Behandlung” (Jöllenbeck, 2015)

Für die Aufdeckung von Bewegungsdefiziten ist die Ganganalyse ein adäquates Diagnosetool. Für das zweite Problem hingegen, für die Wiederherstellung und Optimierung des Gehens liefert die Ganganalyse trotz des explizit formulierten Zieles kaum Lösungen. Als mögliche Ursache ist zu vermuten, dass hierfür insbesondere motorisches Lernen und Koordination von großem praktischem wie theoretischem Interesse sind. Doch im biomechanisch basierten Selbstverständnis der Fachgesellschaften zur Ganganalyse fehlt dieser motorische Ansatz. Die klinische Ganganalyse wird reduziert auf eine Untersuchungsmethode zu „... Beurteilung und ... Vergleich des prä- und postoperativen Gangbildes ...“ (GAMMA, 2015). Damit positioniert sich v.a. die Biomechanik mit ihren Ganganalysen als untergeordneter „Dienstleister“ für medizinische Fragestellungen. Während die internistisch-kardiologische (Sport-) Medizin Patienten vom Zustand der Ruhe bis hin zu maximalen Belastung untersucht (z.B. Belastungs-EKG, Spiro-Ergometrie), insbesondere weil hiervon Vitalfunktionen betroffen sind, ist die orthopädisch-traumatologische wie die neurologische Diagnostik mit ihren Verfahren (Röntgen, MRT,

CT, statischer Bewegungsumfang, Limitationen, etc.) beschränkt auf den Zustand der Ruhe und Statik. Und das, obwohl Patienten ein Problem bei der Bewegung und nicht in Ruhe haben. Gerade hier besitzt die einzig die Sportwissenschaft mit ihren Teildisziplinen Biomechanik, Sportmotorik und Sporttechnologie die erforderlichen Kompetenzen, Bewegung und bestehende Defizite in ihrer Komplexität und Dynamik sichtbar zu machen, detailliert zu analysieren und Lösungen anzubieten. Folglich erweitert erst die moderne Sportwissenschaft die klinische Diagnostik um die bisher fehlende und unverzichtbare Komponente der Bewegung (Jöllenbeck, 2012).

Für eine moderne Bewegungsdiagnostik und Behandlung in Orthopädie, Traumatologie und Neurologie ist daher die Forderung nach Einbeziehung der Sportwissenschaft als gleichberechtigter Disziplin neben Medizin und Therapie abzuleiten. Die Sportwissenschaft wiederum hat insbesondere die Teildisziplinen Biomechanik, Motorik und Technik für eine integrative apparative Bewegungsanalytik ebenso wie für integrative Prozesse des Bewegungslernens einzubeziehen. Und der Bereich Sporttechnologie wiederum sollte mit den benachbarten und etablierten Disziplinen der Medizin-Technik und der Orthopädie-Technik kooperieren.

Aber wo bleibt in diesem Kontext der Mensch mit seinem individuellen Bewegungsproblem? Und wie ist der Theorie-Praxis-Graben zwischen neuen Technologien auf der einen und individuellen praxisbasierten Problemstellungen auf der anderen Seite zu überbrücken? Der Entwicklungsansatz für Gang- und Bewegungsanalysen könnte wie folgt formuliert werden:

„Nicht die Methoden und Technologien bestimmen die Gang- und Bewegungsanalysen, sondern der Mensch mit seinen individuellen Gang- und Bewegungsproblemen bestimmt und leitet die Methoden und Technologien.“

In der Folge sollen die Methoden und Verfahren vorgestellt werden, die aktuell eingesetzt werden oder sich in der Entwicklung befinden.

Ganganalysen und Technologien in der Praxis

Grundsätzlich wird zwischen der beobachtenden und der instrumentierten Ganganalyse unterschieden. Die instrumentierte Ganganalyse integriert als objektives Verfahren je nach Fragestellung eine Reihe von biomechanischen Messmethoden mit einer Vielzahl von messbaren Bewegungsparametern in Raum und Zeit, liefert reliable und valide Informationen und hebt sich in ihrer Präzision und Aussagekraft deutlich von der im therapeutischen Bereich verbreiteten subjektiven Bewegungsbeschreibung auf Basis der beobachtenden Ganganalyse v.a. durch Screening auffälliger Gangpathologien ab (Jöllenbeck, 2015). Erste dreidimensionale Ganganalysen mit aktiven Marken wurden bereits 1895 durchgeführt. Aktuelle Systeme können Bewegungen nicht nur in allen Detailstufen erfassen, sondern auch in virtuelle Umgebungen

transferieren (Motek Medical). Je nach Fragestellung, Untersuchungsansatz und Technologie finden instrumentierte Ganganalysen mit zunehmendem Detaillierungsgrad als Langzeitmessung, Alltagsmessung, Feldmessung oder Labormessung statt. Langzeit- oder Alltagsmessungen (z.B. Stepcount, ADL-Monitoring) sind meist mit geringem messtechnischem Aufwand verbunden und lassen realistische Abbildungen des Bewegungsverhaltens von großen Probandenzahlen zu. So können bereits mit 3 Beschleunigungssensoren (z.B. DynaPort) Alltagstätigkeiten wie Liegen, Sitzen, Stehen, Gehen, Laufen oder Radfahren automatisch erkannt und über lange Zeiträume erfasst werden. Aktuell drängen sogenannte Fitness-Apps für Smartphones und Smartwatches auf den Markt, die ähnliche Funktionen versprechen bis hin zum Gesundheits-Monitoring. Labormessungen hingegen sind meist mit hohem instrumentellem, personellem, zeitlichem und finanziellem Aufwand verbunden, bieten dafür aber eine wesentlich detailliertere Analyse und Beschreibung der menschlichen Bewegung (z.B. 3D-Ganganalyse).

Kinetische Ganganalysen

Die Aufzeichnung der Kraft-Zeit-Verläufe einer Bewegung mittels Kraftmessplatten (AMTI, Bertec, Kistler) ist Standardmethode der kinetischen Ganganalyse (Rosenbaum, 1999) und ermöglichen eine exakte Erfassung der Bodenreaktionskräfte, Momente, Kraftangriffslinien und -punkte beim Gehen oder Laufen. Zunehmende Verbreitung finden Kraft- oder Druckmessplatten in instrumentierten Laufbändern. Diese überwiegend 1-dimensionalen (Zebris, Kistler) und nur vereinzelt 3-dimensionalen (Bertec) Verfahren erfassen die Bodenreaktionskräfte auf dem Laufband bei einer Vielzahl von Schritten. Unterschiede zwischen dem Gehen in der Ebene und auf dem Laufband sind hinreichend dokumentiert (Terrier & Dériaz, 2011). Auf dem Laufband kann frei wählbar eine feste Geschwindigkeit eingestellt werden. Unregelmäßigkeiten im Gang müssen bei jedem Schritt kompensiert werden und es kann zu erhöhten Unsicherheiten bei bestehenden Beeinträchtigungen oder höherem Lebensalter kommen (Schache, Blanch, Rath, Wrightley, Starr & Benell, 2001). Bei den Gangparametern werden Unterschiede in Kadenz, Standzeit, Hüftwinkel sowie den Kraftwerten in Mittelstütz- und Abdruckphase sowie beim Laufen ein flacherer Fußaufsatz berichtet, so dass Ganganalysen in der Ebene und auf dem Laufband nicht direkt vergleichbar sind (Vogt & Banzer, 2005). Die Vorteile eines Laufbandes liegen in der Standardisierbarkeit, in der Anzahl der erfassten Schrittzyklen sowie im geringeren Platzbedarf und Zeitaufwand. Fussdrucksohlen und -platten (Zebris, Novel, Medilogic, Moticon, Fastscan, etc.) werden in der medizinischen Diagnostik (diabetischer Fuß) und für Outdoor- oder Feldmessungen verwendet. Alternativ stehen auch mobile Druckplatten (GaitRite) zur Verfügung. Eine besondere Rolle nehmen instrumentierte Endoprothesen ein, die die Gelenkkräfte und -momente in Hüfte, Knie oder Schulter exakt erfassen können (Orthoload).

Kinematische Ganganalysen

Im Bereich der Kinematik sind moderne (High-Speed-) Videoanalysen weit verbreitet. Sie zeigen die Bewegung im Original und ggf. in verschiedenen Ebenen, sind kostengünstig, können in Zeitlupe betrachtet werden und lassen einfache kinematische Analysen zu. Videoanalysen sind ein wichtiges Tool für Therapeuten und Patienten, zum Verständnis von Bewegung, zur Begutachtung, Kontrolle und Dokumentation und ermöglichen bereits wichtige Seitenvergleiche. Wesentliches Analyseverfahren der Kinematik sind jedoch 3D-Analysesysteme mit aktiven oder passiven Markern (Infrarot, Ultraschall, LED), die auf Grundlage anatomisch-biomechanischer Modelle positioniert werden und eine zumindest semi-automatische Datenerfassung und Auswertung ermöglichen (z.B. Vicon, Zebris, ProPhysics, Simi, Lukotronic, Optogait). In Verbindung mit kinetischen Verfahren lassen sich auch Gelenkmomente mittels inverser Dynamik zumindest abschätzen. Eine Sonderrolle wird von der strahlungsfreien Erfassung der Wirbelsäule und des Beckens mittels Streifenprojektion eingenommen, die eine umfassende Analyse der vielfältigen Fehlhaltungen und -bewegungen im Bereich HWS, BWS, LWS, Becken und Beinachsen im Stand und in der Bewegung ermöglicht (Diers).

Die aktuelle Entwicklung geht hin zum Einsatz von Inertialsensoren, die bei geringem Gewicht und Größe die Orientierung, Beschleunigung und Drehung im Raum ebenso wie das Magnetfeld und den statischen Druck erfassen und eine drahtlose und automatische Bewegungserfassung nahezu online ermöglichen (Noraxon/Velamed, XSens). Sobald die bestehenden Probleme bei der Kalibrierung und beim Drift geklärt sind, beinhalten diese Systeme ein hohes Analysepotential.

Ein neuer Ansatz ist die markerlose Bewegungsanalyse und Bewegungssteuerung auf Basis des Microsoft Kinect Sensors, der im physiotherapeutischen Bereich als Therapiegerät bereits im Einsatz ist (FysioGaming: Velamed). Die Genauigkeit bei Ganganalysen bedarf hier jedoch noch der Verbesserung. Eine weitere völlig markerlose Bewegungsanalyse befindet sich in der Entwicklung, ohne das bisher Ergebnisse vorlägen (Organic Motion: Openstage). Hier ist die Entwicklung abzuwarten.

Elektromyographie

Muskelfunktionsanalysen mittels Oberflächen-Elektromyographie (Biovision, Delsys, Myon, Noraxon, ProPhysics, etc.) ergänzen kinetische oder kinematische Ganganalysen (Freiwald, Baumgart & Konrad, 2007). Die Ergebnisse zeigen, welcher Muskel wann, wie lange, mit welcher Aktivität und in welchem intra- und intermuskulären Zusammenspiel aktiv ist, und helfen, muskuläre, neuronale oder sensomotorische Auffälligkeiten sichtbar zu machen und mögliche Erklärungen zu liefern (Jöllenbeck, 2015). Umgekehrt ermöglicht der Einsatz von Elektroden an Muskeln oder Stümpfen über die erzeugte Aktivität die Ansteuerung von Prothesen als Hand-, Arm- oder Beinersatz.

Komplexe Lösungen vs. Aussagekraft

Bei allen verfügbaren Technologien und Neuentwicklungen ist immer zu prüfen, welche Aussagekraft die eingesetzten Sensoren und Systeme haben und v.a. auch wo die Grenzen sind. So repräsentieren 3D-Bodenreaktionskräfte auf einer Kraftmessplatte zwar äußerst exakt das Gesamtergebnis aller Aktivitäten des Körpers und ermöglichen wichtige Rückschlüsse auf Fehlbelastungen oder problematische Bewegungsphasen, eine Eingrenzung auf betroffene Körperteile hingegen ist jedoch nicht möglich. Kinematische Daten wiederum können Körperteilbewegungen genau erfassen, welche Kräfte jedoch dabei wirken oder welche Muskeln einen Beitrag dazu leisten, lässt sich nicht ablesen. Der Einsatz inverser Dynamik zur Bestimmung von Gelenkmomenten auf Basis kinetischer und kinematischer Daten schließlich basiert lediglich auf Näherungsmodellen für Gelenkmittelpunkte, die - wie am Beispiel des Kniegelenkes als Roll-Gleit-Gelenk – teilweise nur unzureichend bestimmt werden können (Jöllnbeck, 2015).

Schafft Technologie Lösungen für das Individuum Mensch?

Insgesamt existieren aktuell viele hervorragende technologische Entwicklungen im Bereich der Gang- und Bewegungsanalyse, an der unterschiedliche Spezialisten aus Physik, Mechatronik, Elektrotechnik, Informatik, Medizintechnik, Orthopädietechnik, Sport und Technik etc. alleine oder im Team mitgearbeitet haben. Doch bei allen technischen Möglichkeiten und technologischen Entwicklungen stellen sich auch einige Fragen. Wo bleibt dabei das Individuum Mensch mit seinem individuellen Bewegungsproblem? Finden technologischer Fortschritt und individuelle Bewegungsdefizite über den Theorie-Praxis-Graben zusammen? Und wenn ja, wie sehen die Lösungen aus?

Faszinierend ist die Entwicklung z.B. des Exoskeletts, mit dessen Hilfe Querschnittgelähmte unter bestimmten Voraussetzungen und unter Zuhilfenahme von Gehstützen wieder gehen können (ReWalk). Diese Entwicklung basiert zunächst auf einer Normbewegung der unteren Extremitäten bei einem bestimmten Gangtempo, die bezüglich Gleichgewicht und Ansteuerung an den Patienten angepasst werden muss. Aber ist eine solche normative Lösung auch geeignet zur Wiederherstellung etwa des „normalen Ganges“ nach endoprothetischem Ersatz des Hüft- oder Kniegelenkes? Immerhin werden in Deutschland mehr als 350.000 Patienten / Jahr mit einem neuen Hüft- oder Kniegelenk versorgt und Ergebnisse zeigen noch Jahre post-op ein defizitäres Gangbild (Jöllnbeck & Schönle, 2012).

Normkurven vs. Individualität

Im physiotherapeutischen Bereich besteht ein gewisses Diagnose-Dilemma, nach dem Abweichungen von intra- und interindividuellen Normwerten als

durch Therapiemaßnahmen auszugleichende Defizite stigmatisiert werden (Freiwald & Engelhardt, 1999). Die Frage, ob es sich hierbei um phylogenetisch bewährte Anpassungen von Motorik und Koordination handelt und der Patient nur seine individuellen Freiheitsgrade für kompensatorische bzw. alternative Lösungen von Bewegungshandlungen nutzt, wird nicht gestellt. Hinzu kommt die Sehnsucht nach Wahrheit und Sicherheit gepaart mit fehlender Zeit, die dazu verleitet, komplexe Fragestellungen und Bedingungsgefüge auf bifaktorielle Untersuchungsansätze unter Missachtung grundlegender wissenschaftliche Methodiken zu verkürzen (Freiwald & Engelhardt, 1999). So bestimmt auch ein allgemeines Leitbild - die Normkurve - die „normale Bewegung“. Die Erstellung von Normkurven und Normwerten (Perry, 2003; Winter, 1991) führt jedoch dazu, dass sich nach Bildung von Mittelwert und 1-facher Standardabweichungen nur noch rd. 68% aller vormals völlig „normalen“ Probanden innerhalb der Norm befinden, während sich nun rd. 32% als „nicht normal“ wiederfinden. Zudem ist keine Untersuchung bekannt, bei der sich auch nur ein Proband genau auf der Normkurve bewegt hätte. Insofern kann und darf eine Norm bezogen auf die menschliche Bewegung immer nur eine Orientierungshilfe sein, wie in etwa eine Bewegung aussehen könnte, aber niemals wie eine Bewegung genau auszusehen hat. In Konsequenz ist eine „individuelle Norm“ zu propagieren, die berücksichtigt, welche Bewegung für das jeweilige Individuum „normal“ ist (Jöllnbeck, 2011). Im Fall eines einseitigen Defizites z.B. der unteren Extremitäten ist die Wiederherstellung einer individuell symmetrischen Bewegung einer äußeren Norm vorzuziehen.

Individuelle Lösungen für das Individuum Mensch

Bei der Suche nach individuellen Lösungen für das Individuum Mensch kommt der Entwicklung neuer oder der Anpassung bestehender Technologien besondere Bedeutung zu. Erste Ansätze bestehen bereits. So wird in der orthopädischen wie neurologischen Rehabilitation mittels adaptivem visuellem Cueing versucht, z.B. gleichmäßige Schritte zu erzeugen. Hierbei werden die Fußabdrücke und Schrittlängen von Patienten auf dem Laufband erfasst, programmgesteuert modifiziert, d.h. z.B. in der Schrittlänge angepasst und dann als Vorgabe auf das Laufband projiziert. Die Patienten haben nun die Aufgabe, die vorgeblendeten Fußabdrücke mit angepasster Schrittlänge so genau wie möglich zu treffen (Zebris Gait Training, Jöllnbeck & Pietschmann, 2014). Weitere hochkomplexe Lösungen gehen in den Bereich der virtuellen Realität. Hier kommen beweglich gelagerte Laufbänder zum Einsatz, deren Bewegung an die virtuelle Umgebung angepasst ist und deren Geschwindigkeit sich automatisch an das individuelle Gangtempo anpasst. Mögliche Aufgaben bestehen z.B. darin, vorgeblendete eigene ipsi- oder kontralaterale Bewegungskurven möglichst genau abzubilden oder in bestimmter Weise zu verändern (Motek Medical: Careen, Grail). Eigene Untersuchungen zum Hüft- und Kniegelenksverlauf nach endoprothetischem Gelenkersatz

zeigen stereotypische defizitäre Bewegungsverläufe (Jöllenbeck, 2015). Die Herausforderung besteht darin, diese Schlüsselparameter neuen Technologien anzusteuern und zu modifizieren. Hier ist die Kooperation von Motorik, Biomechanik und Technik gefordert, um zielgerichtete individuelle Lösungen für die Rehabilitation oder für eine Integration in den Alltag zu generieren.

Fazit

Die Ganganalyse im Spannungsfeld von Mensch und Technik enthält viele spannende Fragen, aber auch ebenso viele ungelöste Probleme. Die Sport- und Bewegungswissenschaft sollte ihre Kompetenz für Bewegung und ihre Analyse gerade im medizinischen Umfeld viel stärker wahrnehmen. Insbesondere die Biomechanik sollte sich von der Rolle des Dienstleister für Neurologie und Orthopädie lösen und ihre Lösungen dort anbieten, wo die Medizin mangels Ausbildung und Kompetenz noch keine Lösungen bereithält.

Die sport- und bewegungswissenschaftlichen Teildisziplinen sind aufgefordert, enger zusammenzuarbeiten und gemeinsam problemorientierte Lösungen für das Individuum Mensch zu erarbeiten. Patienten mit ihren individuellen Bewegungsproblemen brauchen nicht nur die Ganganalyse zur genauen Diagnose. Patienten brauchen v.a. auch individuelle therapeutische Lösungen, die ihnen helfen, ihre Bewegungsprobleme zu minimieren. Hier ist insbesondere auch die Sportmotorik mit ihrer Kompetenz für das Bewegungslernen, sei als Neulernen, Umlernen oder Wiedererlernen, zu integrieren.

Mit den hohen Fallzahlen in Orthopädie und Neurologie wie auch mit dem immer stärker gefragten Gesundheitsmarkt eröffnet sich für die Sport- und Bewegungswissenschaft neben den klassischen Pfaden des Leistungs- und Schulsports ein weiteres großes Betätigungsfeld im Bereich der problemorientierten Prävention und Rehabilitation. Dieses Feld gilt es zu besetzen und dabei genau auf die Fragen des Patienten bzw. Kunden zu hören.

Autor

THOMAS JÖLLENBECK: Institut für Biomechanik, Klinik Lindenplatz GmbH, Bad Sassendorf, zugleich: Department Sport & Gesundheit, Fachbereich Naturwissenschaften, Universität Paderborn.

Literatur

Freiwald, J., Baumgart. C., Konrad. P. (2007). *Einführung in die Elektromyographie, Sport - Prävention - Rehabilitation*. Balingen: Spitta.

- Freiwald, J, Engelhard, M. (2002). Stand des motorischen Lernens und der Koordination in der Orthopädisch-traumatologischen Rehabilitation. *Sport-Orthopädie - Sport-Traumatologie*, 18, 5–10.
- GAMMA (2015). www.g-a-m-m-a.org/index.php/gamma-gesellschaft.
- Götz-Neumann, K. (2003). *Gehen verstehen – Ganganalyse in der Physiotherapie*. Stuttgart: Thieme.
- Jöllnbeck, T. (2011). Gait- and treadmill-analysis. In: M. Engelhardt, A. Dorr (Eds.), *Sports Orthopedics – Official Manual of GOTS* (S. 125–136). Berlin: Neunplus 1.
- Jöllnbeck, T. (2012). Biomechanische Bewegungsanalyse – Unverzichtbarer Bestandteil moderner sportmedizinischer Diagnostik. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 63 (3), 59–60.
- Jöllnbeck, T. (2015). Ganganalyse. In: V. Stein, B. Greitemann (Hrsg.), *Rehabilitation in Orthopädie und Unfallchirurgie*, 2. Auflage (S. 20-33). Berlin-Heidelberg: Springer.
- Jöllnbeck, T., Pietschmann, J. (2014). Gangtraining zur Normalisierung des Gangbildes nach Knie-TEP. *Bewegungstherapie & Gesundheitssport*, 30, 240.
- Jöllnbeck, T., Schönle, C. (2012). Gangverhalten von Patienten nach Knie-TEP während der Rehabilitation. *Orthopädie & Rheuma* 15 (1), 37–41.
- Ludwig, O. (2012). *Ganganalyse in der Praxis*. Geislingen: Maurer.
- Perry, J. (2003). *Ganganalyse – Norm und Pathologie des Gehens*. München Jena: Urban & Fischer.
- Rosenbaum, D. (1999). Klinische Ganganalyse in der Orthopädie und Traumatologie. In: J. Jerosch, K. Nicol, K. Peikenkamp (Hrsg.), *Rechnergestützte Verfahren in Orthopädie und Unfallchirurgie* (S. 145–158). Darmstadt: Steinkopff.
- Schache, A.G., Blanch, P.D., Rath, D.A., Wrightley, T.V., Starr, R., Benell, K.L. (2001). A comparison of overground and treadmill running for measuring the three-dimensional kinematics of the lumbo-pelvic-hip complex. *Clinical Biomechanics* 16, 667-680.
- Terrier, P., Dériaz, O. (2011). Kinematic variability, fractal dynamics and local dynamic stability of treadmill walking. *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation* 8 (12), 1–13.
- Vogt, L., Banzer, W. (2005). Instrumentelle Ganganalyse. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 56 (4), 108–109.
- Whittle, M.W. (2002). *Gait analysis – an introduction* (3rd Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Winter, D.A. (1991). *The biomechanics and motor control of human gait* (2nd Edition). Waterloo: Waterloo Biomechanics.