Bewegungsanalyse: wichtige Informationen für Sport und Alltag

Beat Göpfert[a], Julien Frère[b], Cora Huber[a], Corina Nüesch[c], Jacqueline Romkes[d]

[a] Labor für Biomechanik & Biokalorimetrie (LOB²), CM & BE Universität Basel, Schweiz, [b] Centre d'Etude des Transformations des APS (CETAPS), Université de Rouen, Frankreich, [c] Orthopädische Universitätsklinik, Universitätsspital Basel, [d] Labor für Bewegungsuntersuchungen, CM & BE, Universitätskinderspital beider Basel

Zusammenfassung

Die Bewegungsanalyse ist ein objektives Instrument zum Erfassen von Bewegungen im täglichen Leben. In Kombination mit weiteren Messtechniken, wie der Kraftmessung und der Elektromyographie sowie den entsprechenden mathematischen Analysemethoden, entsteht ein einzigartiges Instrumentarium zur Untersuchung der Bewegungsdynamik des Körpers. Dieser Artikel soll einen Einblick über die Methoden und Möglichkeiten der Bewegungsanalyse in den unterschiedlichsten Aktivitäten geben.

Einleitung

Die heutige Bewegungsanalysetechnik geht zurück auf Eadweard Muybridge, welcher im Juni 1878 in Palo Alto (Kalifornien) zum ersten Mal öffentlich eine Serienaufnahme eines Rennpferdes machte. Er brauchte damals bereits 12 präzis auslösende Kameras und konnte mit dieser Infrastruktur die exakten Beinbewegungen eines Rennpferdes aufzeigen [1]. Heute können digitale Hochgeschwindigkeitskameras mit einer Auflösung von bis zu 16 Megapixeln und bis zu 2000 Bildern pro Sekunde (VICON, Oxford, UK) verwendet werden.

Die Bewegungsanalysetechnologie wird heutzutage in vielen Anwendungsgebieten genutzt, wobei der grösste Anwendungsbereich die Film- und Videospielindustrie ist. In der Biomechanikforschung liegt der Schwerpunkt im Verstehen von Bewegungsabläufen bei Lebewesen, aber auch im klinischen Alltag findet die Bewegungsanalyse eine regelmässige Verwendung. In der Klinik soll mit solchen Messungen die Lebensqualität der Patienten verbessert werden, sei es zum Beispiel zur Planung von Operationen oder auch zur Kontrolle von komplexen Behandlungen. Eine weitere Anwendung der Bewegungsanalyse ist die Forschung im Sport. Dabei geht es vor allem um die Verbesserung der Leistung durch eine Optimierung der Ausrüstung auf das persönliche Bewegungsmuster und die individuellen Anforderungen. Damit aus den vorher genannten Anwendungen ein umfassenderes Bild der Bewegung gewonnen werden kann, müssen die am und auf den Körper wirkenden Kräfte sowie die dazugehörenden Muskelaktivierungen während einer Bewegung erfasst werden. Zur Analyse der Daten kommen verschiedene mathematische Methoden zum Einsatz, wie zum Beispiel die Wavelet-Transformation, welche neue Einblicke in die Muskelaktivierung ermöglicht.

Beat Göpfert

Die Autoren erklären, dass sie keine Interessenkonflikte im Zusammenhang mit diesem Beitrag haben.

Methode

Der heutige Standard zur Erfassung von dreidimensionalen Bewegungen sind digitale Hochgeschwindigkeitskameras. Dabei werden in der Regel passiv reflektierende Marker an klar definierten Stellen auf dem Körper der Probanden oder Patienten aufgeklebt und die Bewegung der aufgeklebten Marker auf dem Körper mit 6 bis 12 oder auch mehr synchron aufzeichnenden digitalen Hochgeschwindigkeitskameras erfasst. Diese grosse Anzahl von Kameras ist notwendig, da jeder Marker zu jedem Zeitpunkt von mindestens zwei der aufzeichnenden Kameras erfasst werden muss, damit die Position klar im Raum definiert werden kann. Aus den mit jeder Kamera erfassten zweidimensionalen Daten werden anschliessend mittels einer linearen Transformationsmethode [2] die dreidimensionalen Positionen jedes Markers im Raum berechnet. Im nächsten Schritt werden mit Hilfe der kinematischen Analyse die Bewegungsgeschwindigkeiten und die Beschleunigung des Köpers sowie der einzelnen Körpersegmente zueinander berechnet. Neben den kinematischen Daten sind die am und auf den Körper wirkenden Kräfte wichtig für das Bewegungsverständnis. Diese lassen sich mit einer Vielzahl unterschiedlicher Kraft- und Drucksensoren messen. Am häufigsten werden zur Messung der Bodenreaktionskräfte dreidimensional aufzeichnende Kraftmessplatten verwendet. Aus der Kombination der kinematischen Daten und der wirkenden Kräfte lassen sich mittels inverser Dynamik [3] die Belastungen in den Gelenken berechnen und somit eine kinetische Analyse der Bewegung durchführen.

> Bei der Bewegungsanalyse im Sport geht es vor allem um die Verbesserung der Leistung durch eine Optimierung der Ausrüstung auf das persönliche Bewegungsmuster und die individuellen Anforderungen

Neben den kinematischen und kinetischen Informationen einer Bewegung liefert die Muskelaktivierung weitere wichtige Hinweise. Sie lässt sich am einfachsten mit dem Oberflächen-Elektromyogramm (EMG) [4] messen. Das über dem Muskel gemessene elektrische Signal, das sogenannte Roh-EMG-Signal, gibt Auskunft über die Signalqualität, den Zeitpunkt und die Dauer der Aktivierung des gemessenen Muskels. Um weitere Informationen über die Muskelaktivität zu bekommen, sind detailliertere Analysen notwendig. Häufig verwendete Methoden geben Auskunft über die Zeit-Amplituden-Eigenschaft oder über die Frequenzverteilung. Die

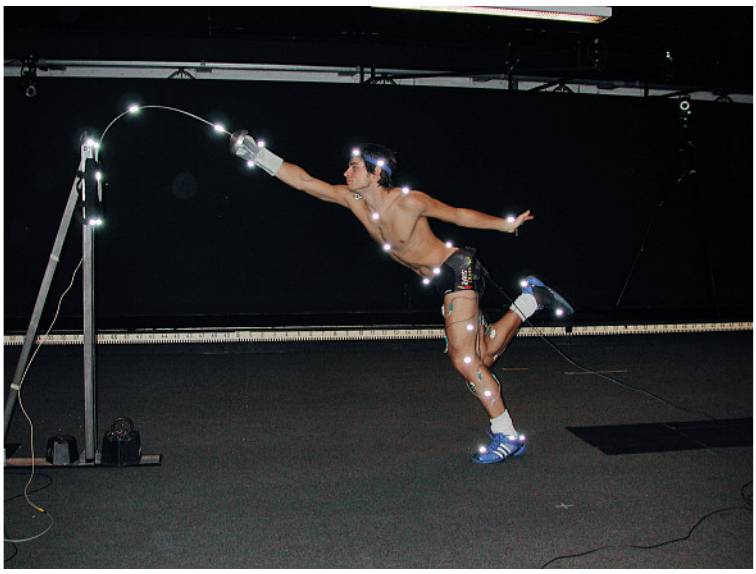

Abbildung 1
Fechter führt einen Flèche-Angriff im Labor für Bewegungsuntersuchung, Basel, aus.

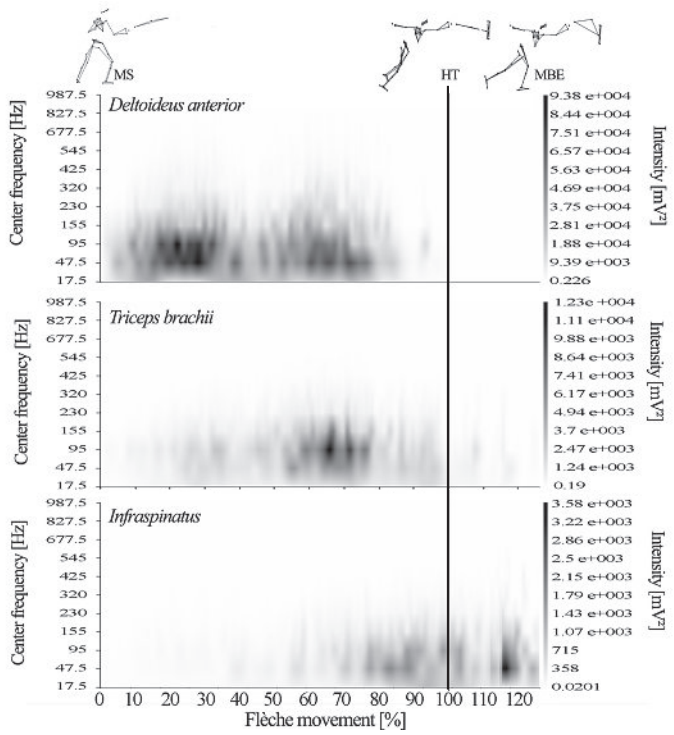

Abbildung 2
Mittelwert von zehn Flèche-Angriffen eines Probanden, dargestellt in einem Multi-Muskel-Intensitätsmuster. Die Grauskalierung zeigt die Intensitäten der muskulären Aktivität auf (tief: weiss; hoch: schwarz).
MS = Start der Bewegung; HT = Treffen des Ziels; MBE = maximale Biegung der Waffe.

Wavelet-Transformation der EMG-Signale [5] erlaubt hingegen eine gleichzeitige Analyse der Zeit-Frequenz-Intensitätskomponenten während der Bewegungen. Das daraus gewonnene Intensitätsmuster ermöglicht eine detaillierte Betrachtung der hohen und niedrigen Frequenzanteile und deren relativen Intensität in einem Bewegungsablauf. Dadurch lassen sich Hinweise über die Anpassung der Muskulatur, das sogenannte Muskeltuning, gewinnen. Weiter ermöglicht die Wavelet-Transformation auch die Mittelwertbildung zwischen einzelnen Versuchen, Probanden oder Probandengruppen.
Die Anwendung der oben beschriebenen Techniken und Methoden erlaubt die Untersuchung der unterschiedlichsten Bewegungen und ermöglicht es, diese Informationen bei orthopädischen Fragestellungen (z.B. Behandlungsart, aber auch in der Rehabilitation) zu nutzen. Als Beispiel für die vielseitigsten Einsatzmöglichkeiten sind nachfolgend drei Anwendungen beschrieben.

Fechten

Das Ziel der Fechtstudie war es, ein besseres Verständnis über den Bewegungsablauf und das muskuläre Aktivierungsmuster bei Elitefechtern zu bekommen, um damit die Qualität des Trainings zu steigern und gleichzeitig das Verletzungsrisiko zu mindern. In der beschriebenen Studie nahmen acht erfahrene Elitefechter teil. Dabei wurde während des Sturzangriffs, des sogenannten Flèches, eine dreidimensionale Bewegungsanalyse durchgeführt und das EMG von ausgewählten Muskeln erfasst. Die Resultate zeigen, dass der Fechter den Angriff durch eine Streckung des Waffenarms und eine Absenkung des Körperschwerpunkts in Richtung Ziel mittels einer beidseitigen Aktivierung der M. tibialis anterior auslöst. Die Abstossbewegung des hinteren Beins für die Vorwärtsbewegung beginnt mittels Aktivierung der Mm. vastus medialis, rectus femoris und gastrocnemius medialis [6]. Die Erfahrung der Fechter beeinflusst die muskuläre Koordination zwischen den Armen und Beinen deutlich. Die weniger erfahrenen Fechter führen die Bewegung und die Muskelaktivierung sequenziell aus, während die sehr erfahrenen Fechter eine synchrone Strategie wählen. Diese zweite Variante ermöglicht es den Fechtern, die Angriffsstrategie länger vor dem Gegner geheim zu halten, was im Wettkampf ein klarer Vorteil ist. Die EMG-Analyse der Schulterbewegung beim Flèche zeigt das Zusammenspiel der Mm. deltoideus anterior und infraspinatus auf, d.h., eine hohe Aktivität des M. deltoideus anterior führt zu einer niedrigen Aktivität des M. infraspinatus und umgekehrt [7]. Zusätzlich hat der M. infraspinatus eine grössere Aktivierung als die Mm. deltoideus anterior und triceps brachii, wenn sich die Waffe nach dem Treffen des Ziels durchbiegt. Dieses muskuläre Aktivierungsmuster ist zuständig für die Stabilisierung des Schultergelenks, wobei der M. infraspinatus kontrahiert wird [8] (Abb. 1 und 2).

Gehen mit einem MBT-Schuh

Dieser Schuh basiert auf der Masai-Barfuss-Technik (MBT) und kann während der täglichen Aktivitäten getragen werden. Die Entwickler glauben, dass die konventionellen flachen Alltagsschuhe in Kombination mit dem harten Untergrund einen negativen Einfluss auf den menschlichen Körper haben. Durch die Verwen-

dung des MBT-Schuhs soll die natürliche Instabilität des weichen Bodens der ostafrikanischen Savanne erzeugt werden. Aus klinischer und wissenschaftlicher Sicht lag das Interesse dieser Studie darin zu sehen, ob der MBT-Schuh einen Einfluss auf das Gangmuster von gesunden Probanden und Patienten hat. Die Resultate können Richtlinien geben, für welche Patienten der MBT-Schuh besonders gut geeignet ist und welche Personen das Tragen meiden sollten, da er ein Gesundheitsrisiko darstellt.

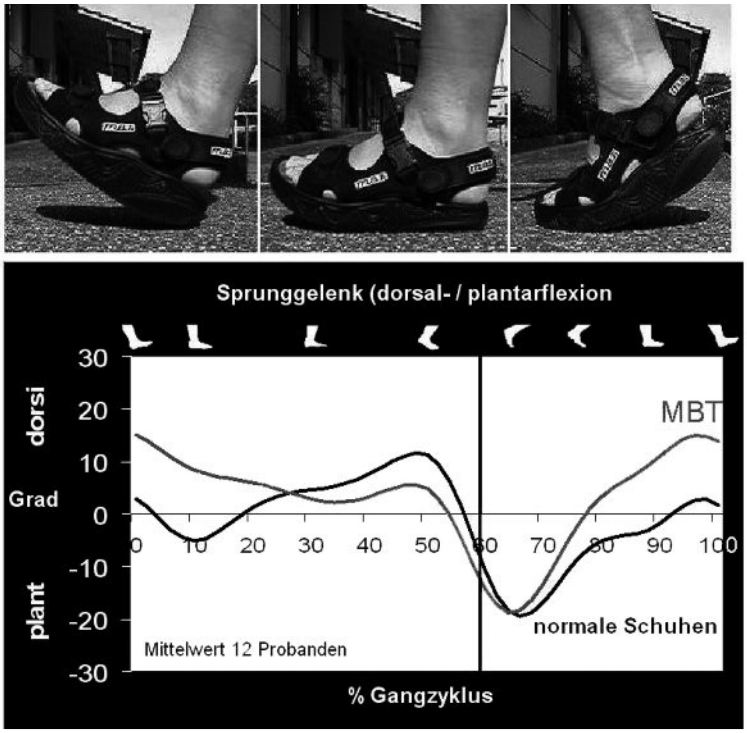

Abbildung 3
Dorsi- und Plantarflexionsbewegung im Fussgelenk während eines Gangzyklus mit Alltags- (schwarz) und mit MBT-Schuhen (grau). Mittelwert des Bewegungsmusters von 12 gesunden Probanden, die gewohnt waren, mit einem MBT-Schuh zu laufen.

Abbildung 4
Skiakrobat auf der Spunganlage auf dem Hasliberg (Berner Oberland).

In zwei wissenschaftlichen Studien [9, 10] wurden beim Tragen des MBT-Schuhs das Gangmuster, die Muskelaktivität der Beine und der Einfluss auf das Gleichgewicht untersucht. Es nahmen zwölf gesunde Probanden an der Studie teil, welche den MBT-Schuh bereits über eine längere Zeit trugen. Der Einfluss des MBT-Schuhs auf das Gleichgewicht [9] wurde folgendermassen untersucht:

1. Beidbeiniges Stehen der Probanden mit offenen und geschlossenen Augen auf der Kraftmessplatte.
2. Einbeiniges Stehen der Probanden auf dem dominanten und nichtdominanten Bein auf der Kraftmessplatte.

Dabei wurden die Schwankung des Kraftangriffspunkts (centre of pressure) in antero-posteriorer sowie medio-lateraler Richtung beim Tragen des MBT-Schuhs und normalen Alltagsschuhen erfasst. Die Resultate zeigten, dass beim beidbeinigen Stehen die antero-posterioren und medio-lateralen Schwankungen beim MBT-Schuh signifikant grösser waren als beim normalen Alltagsschuh. Kein signifikanter Unterschied konnte hingegen beim Einbeinstand gefunden werden. Mit Hilfe dieser Resultate kann gesagt werden, dass der MBT-Schuh eine Instabilität aufweist und zum Stabilitätstraining verwendet werden kann und soll. Hingegen muss berücksichtigt werden, dass der MBT-Schuh bei Personen mit einem erhöhten Sturzrisiko (z.B. ältere Menschen) oder mit neurologischen Erkrankungen möglicherweise ein Gesundheitsrisiko darstellt.

Die Muskelaktivierung sowie das Gangmuster beim Tragen eines MBT-Schuhs wurden mit Hilfe einer Ganguntersuchung und gleichzeitiger EMG-Messungen analysiert [9]. In Abbildung 3 ist der Verlauf der dorsalplantaren Fussbewegung über einen Gangzyklus zu sehen. Beim Gehen mit dem MBT-Schuh ist die Dorsalflexion beim ersten Bodenkontakt des Fusses grösser als bei Alltagsschuhen. Im weiteren Verlauf der Standphase kommt es zu einer kontinuierlichen Plantarflexion. In der Schwungphase erfolgt ebenfalls eine verstärkte Dorsalflexion, um den erneuten Bodenkontakt vorzubereiten. Als Konsequenz zu diesem Bewegungsmuster tritt eine erhöhte Aktivität der Mm. gastrocnemius und tibialis anterior auf, was zugleich einen Trainingseffekt auf diese Muskeln hat. Um den maximalen Nutzen aus dem MBT-Schuh zu ziehen, muss die MBT-Schuh tragende Person einen normalen Bewegungsumfang der Dorsalflexion haben und im Fersen-Ballen-Gang gehen. Diese Anforderungen zeigen, dass der MBT-Schuh für bestimmte Patientengruppen, wie z.B. Hemiplegiker, schlecht geeignet ist.

Skiakrobatik

Das Ziel der Skiakrobatik-Messungen war, das muskuläre Aktivierungsmuster von Skiakrobaten während der einzelnen Sprungelemente beim Springen zu er-

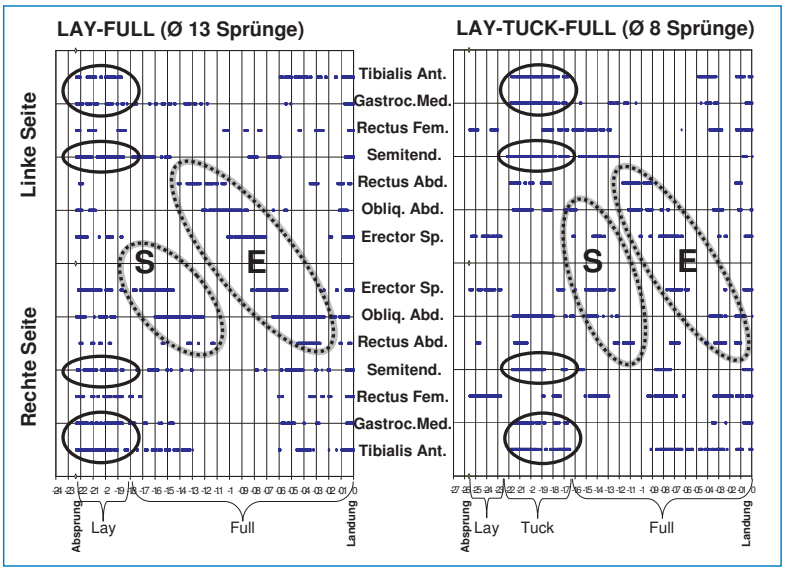

Abbildung 5
ON-OFF-Muskel-Aktivierungsmuster beim Sprung Lay-Full und Lay-Tuck-Full.
Schwarze Kreise: Die Voraktivierung der Beinmuskulatur im Sprungelement «Full» erfolgt im vorhergehenden Sprungelement.
Grau gestrichelte Kreise: Die unterschiedliche sequenzielle Aktivierung der Rumpfmuskulatur im Sprungelement «Full» bei der Auslösung (S) und Abschluss (E) der Rotationsbewegung.

fassen. Die daraus gewonnen Resultate sollen helfen, die Qualität des Trainings und der Landung zu verbessern. Dies soll schlussendlich zu besseren Wettkampfresultaten und einer Verminderung des Verletzungsrisikos bei schlechten Landungen, besonders am Kniegelenk, führen. Das EMG von 14 ausgewählten Muskeln wurde mit einem mobilen EMG-System aufgezeichnet und mittels Wavelet-Analyse ausgewertet. Zusätzlich wurden Videoaufnahmen des gesamten Sprunges gemacht.

Die beiden folgenden Sprünge wurden untersucht:

1. Lay-Full: zweifach gestreckter Rückwärtssalto, mit einer Schraube im zweiten Salto.
2. Lay-Tuck-Full: dreifacher Rückwärtssalto, der erste gestreckt, der zweite gehockt, der dritte gestreckt mit einer Schraube.

Die Resultate zeigen, dass jedes Sprungelement ein typisches Aktivierungsmuster hat und die Reihenfolge der Sprungelemente die muskuläre Aktivierung zwischen den einzelnen Elementen beeinflusst (Abb. 4 und 5 📷). Weiter konnte gezeigt werden, dass die Aktivierung der Rumpfmuskulatur zur Auslösung und zum Abschliessen der Rotationsbewegung für die Schraube im Sprungelement «Full» wegen der ungleichen Körperhaltung unterschiedlich ist. Diese Informationen helfen den Trainern, die allgemeinen Trainingsmethoden zu verbessern und gezielt die Übergänge zwischen den einzelnen Sprungelementen zu trainieren [11].

Diskussion

Die Bewegungsanalyse und die ergänzenden Techniken eröffnen unglaubliche Möglichkeiten in der Bewegungsdynamik von Lebewesen. Für die Interpretation der Resultate braucht es viel Erfahrung, da die Software der Messsysteme nur den Bewegungsablauf der einzelnen Körpersegmente im Raum berechnen kann und sie keine Aussage über deren Funktionalität macht. So kann eine beim Gehen gemessene Varus-Bewegung am Knie in Wirklichkeit von einer Innenrotation des Hüftgelenks stammen. Damit das Risiko von Fehlinterpretationen reduziert werden kann, sollte immer der gesamte Bewegungsablauf des Körpers betrachtet werden. Durch die Kombination mit Kraftmessung und EMG-Analyse lässt sich eine verbesserte Aussage über die Bewegung erzielen. Es wird damit möglich, die muskuläre Vorbereitung und Reaktion auf die auftretenden Kräfte in einem Bewegungsablauf zu erfassen. Ein typisches Beispiel dazu ist das Joggen. Hier ist die muskuläre Aktivierung vor dem Bodenkontakt abhängig von der Härte der Schuhe und dem Geschlecht des Läufers [12]. Solche Informationen können helfen, Ausrüstungsgegenstände den Anforderungen der Benutzer anzupassen oder aber auch das persönliche Bewegungsmuster zu optimieren. Im besten Fall kann dies auch zu einer Goldmedaille führen, wie jene der Skiakrobatin Eveline Leu an den Olympischen Winterspielen 2006 in Turin [13]. Es muss aber nicht immer eine olympische Medaille sein, auch im Alltag hat die Bewegungsanalyse zur Verbesserung der Lebensqualität ihren Nutzen.

> Damit das Risiko von Fehlinterpretationen reduziert werden kann, sollte immer der gesamte Bewegungsablauf des Körpers betrachtet werden

Korrespondenz:
Beat Göpfert
Labor für Biomechanik & Biokalorimetrie (LOB²)
CM & BE Universität Basel
c/o Bio-/Pharmazentrum
Klingelbergstr. 50–70
CH-4056 Basel
beat.goepfert@unibas.ch

Empfohlene Literatur

– Frère J, Huber C, Nüesch C, Fischer M, Göpfert B, Wirz D, et al. Electromyographic analysis of three shoulder muscles using wavelet transformation and spherical separation. Archivos de Medicina del Deporte. 2008;25:439.
– Romkes J. Statische Gleichgewichtskontrolle mit dem MBT-Schuh. Schweiz Z Sportmedizin und Traumatologie. 2008;56:61–5.
– Göpfert B, Huber C, Lüthi A, Wirz D. Analysis of muscular coordination in different jumping elements in aerial freestyle skiing. In Proceedings of the World Congress of Performance Analysis of Sport VIII: Magdeburg, Germany, Sept. 3–6. 2008.
Die vollständige nummerierte Literaturliste finden Sie unter www.medicalforum.ch