
Adaptabilität im Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus

A. Gollhofer (Projektleiter), D. Bubeck

Universität Freiburg

Institut für Sport und Sportwissenschaft

1 Problem

Bewegungsformen des Dehnungs-Verkürzungs-Zyklus (DVZ) unter variierenden Belastungsbedingungen stellen einen häufig angewandten spezifischen Inhalt im Trainingsalltag des Leistungssports dar (ZATSIORSKY 1996). Dabei ist es von entscheidender Bedeutung, die Art und Weise der Belastungseinwirkung genau zu definieren und die dadurch hervorgerufenen funktionellen Anpassungen zu analysieren. Bei den funktionellen Anpassungen spielen vor allem die neuromuskulären Aktivierungsprozesse und -muster eine entscheidende Rolle (vgl. AVELA et al. 1996; KYRÖLÄINEN et al. 1989). Das Ziel dieses Projektes war es daher, die Auswirkungen von unterschiedlichen Belastungseinwirkungen auf das neuromuskuläre System und die mechanischen Bewegungsparameter beim DVZ der unteren Extremitäten zu untersuchen. Die Belastungsveränderungen wurden dabei einerseits über die Veränderung des Sprungsystems (Nieder-Hochsprung und Schlittensprung) und andererseits über die Variation der Fallhöhe bzw. der Körpergewichtsbelastung verursacht.

2 Methode

Die Vielfalt der zu untersuchenden Belastungsvariationen machte eine Unterteilung des Gesamtprojektes in zwei Untersuchungsabschnitte notwendig. Bei beiden Projektabschnitten wurde eine Variation des Sprungsystems vorgenommen. Hierzu mussten die Probanden einerseits normale Nieder-Hochsprünge (Drop Jumps - DJ) von einer variablen Absprungplattform und andererseits Sprünge an einem speziell hierfür konstruierten Schlittensprungsystem (SJS) durchführen. Die Bewegungsebene des SJS's lag, in Variation zu den DJ's, in der Horizontalen. Zusätzlich wurden die Probanden im ersten Projektabschnitt mit ansteigenden Fallhöhen von 0,1 - 0,7 m in 0,1 m Inkrementen konfrontiert. Der zweite Projektabschnitt war durch eine gleichbleibende Fallhöhe und eine Variation der beschleunigenden Körpergewichtsbelastung in den Stufen -30 %, -20 %, 0 %, +20 %, +30 % des Körpergewichts (BW) charakterisiert. Die Probanden beider Projektabschnitte stammten aus dem leistungssportlichen Schnellkraftbereich und verfügten über ein sehr hohes Niveau bei der Sprungleistungsfähigkeit im DVZ. Zur Bestimmung der Belastungseinwirkung und deren Variation sowie der dadurch hervorgerufenen mechanischen und neuromuskulären Veränderungen wurden die tatsächlich realisierten Fallhöhen, die Kör-

perschwerpunktgeschwindigkeiten und Energiebeträge zu Beginn und am Ende des Bodenkontaktes, die Bodenreaktionskräfte, Gelenkwinkel in Sprung-, Knie- und Hüftgelenk gemessen bzw. berechnet. Die Erfassung des zeitlichen Verhaltens der muskulären Aktivierung von acht an der Bewegung beteiligten Beinmuskeln erfolgte mit Hilfe der Oberflächen-Elektromyographie (EMG).

3 Ergebnisse

Infolge der Erhöhung der Belastungseinwirkung konnten bei beiden Projektabschnitten sprungsysteminterne Erhöhungen der Energiebeträge zum Zeitpunkt des ersten Bodenkontaktes hervorgerufen werden. Die vergleichbaren Energiebeträge zum Zeitpunkt des letzten Bodenkontaktes wiesen innerhalb des Sprungsystems geringere Veränderungen in Abhängigkeit von der Belastungseinwirkung auf, wohingegen beim Vergleich der Sprungsysteme deutlich größere Unterschiede zu beobachten waren (Abb. 1). Dies belegen die Korrelations- und Regressionsberechnungen der Energiebeträge zu den beiden Zeitpunkten.

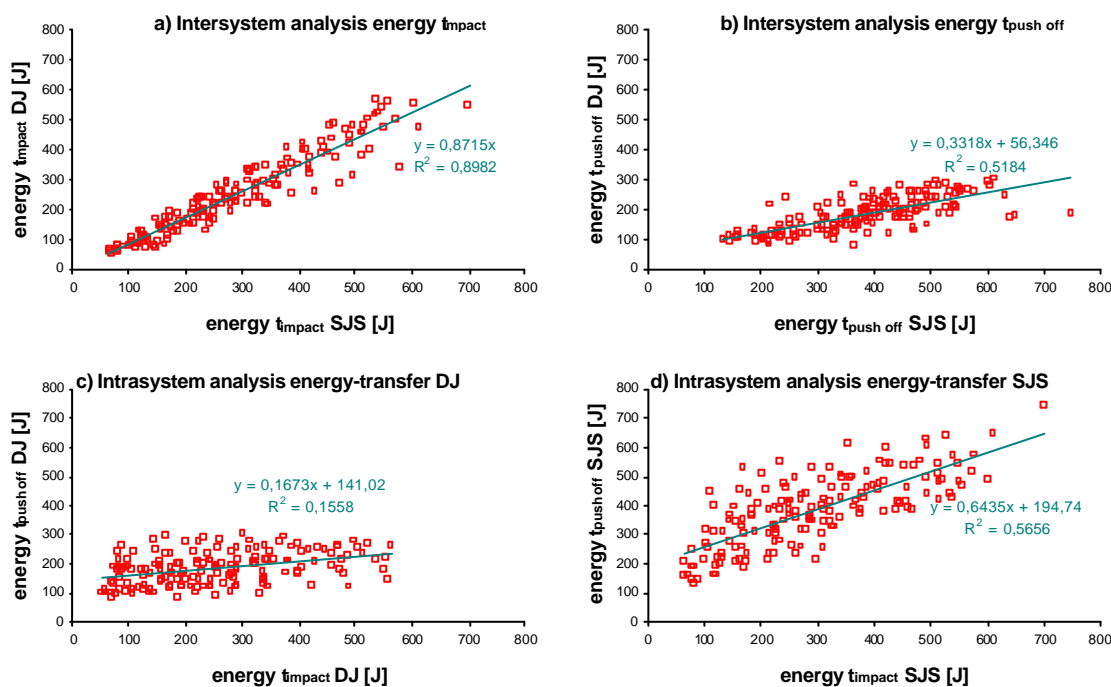


Abb. 1: Korrelation, Regression und Zusammenhang der Energiebeträge zum Zeitpunkt des ersten und letzten Bodenkontaktes innerhalb und zwischen den Sprungsystemen: DJ und SJS. (Jeder Punkt markiert einen individuellen Wert einer vorgegebenen Belastungsbedingung.)

Bei der Betrachtung der Bodenkontaktzeiten zeigten sich innerhalb der Sprungsysteme ebenfalls nur geringe Veränderungen, wohingegen zwischen den Sprungsystemen erhebliche Unterschiede zu beobachten waren.

Betrachtet man die Veränderungen der Gelenkwinkelamplituden am Sprung- und Kniegelenk, so haben sich teilweise deutliche Vergrößerungen mit der Zunahme der Belastung bei beiden Sprungsystemen nachweisen lassen. Dies deutet auf eine Veränderung der Amortisationsbewegung und somit auch der Sprungtechnik hin.

Bei der Analyse der Belastungsauswirkungen auf die neuromuskulären Aktivierungscharakteristika zeigten sich innerhalb der Sprungsysteme nur geringe und nicht signifikante Veränderungen in den einzelnen funktionellen Phasen der Voraktivierung (PRE), der Reflexphase (RIA) und der Phase der späten EMG-Antworten (LER) infolge von Belastungserhöhungen. Betrachtet man aber die Unterschiede zwischen den Sprungsystemen, so fielen hier die Veränderungen deutlicher aus. Nahezu alle Muskeln unterschieden sich in den funktionellen Phasen zwischen den Systemen signifikant. In der PRE- und RIA-Phase waren die IEMG-Werte beim Drop Jump im Vergleich zum Sledge Jump signifikant höher. In der LER-Phase, der Phase der willkürlichen Aktivierungsbeiträge, waren die Anteile umgekehrt: Signifikant höhere IEMG-Werte bei nahezu allen Muskeln beim SJS.

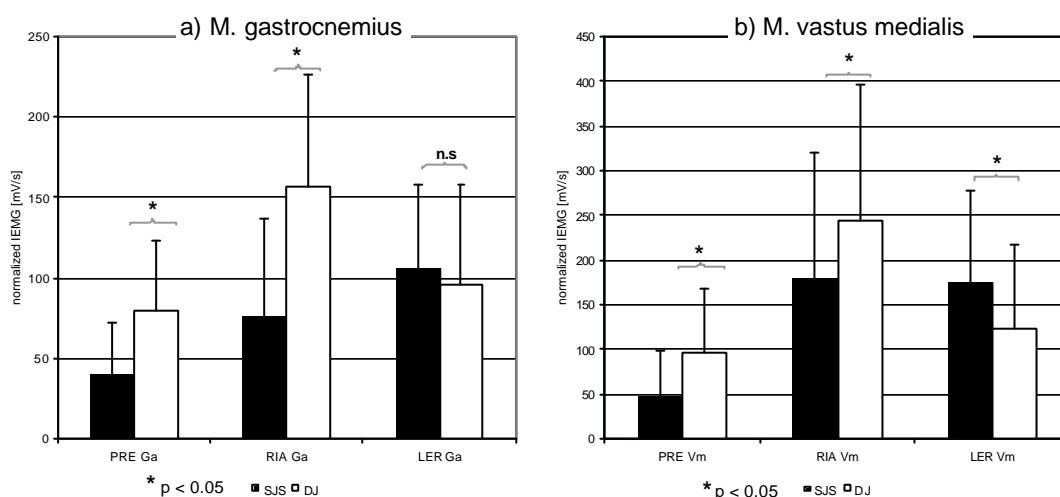


Abb. 2: IEMG-Werte des a) M. gastrocnemius und b) M. vastus medialis während der PRE-, RIA- und LER-Phasen beim Drop Jump (DJ) und Sledge Jump System (SJS).

Die beobachtbaren Veränderungen deuten somit auf eine zeitliche Verschiebung der Hauptaktivität der Muskeln beim SJS im Vergleich zum DJ in die Phasen der späten EMG-Antworten und somit auch auf unterschiedliche neuromuskuläre Bewegungssteuerungsmechanismen hin.

4 Diskussion

Nach ASMUSSEN/BONDE-PETERSEN (1974), ZATSIORSKY (1996) und VAN INGEN, SCHENAU et al. (1997) stellt die Energie zum Zeitpunkt des ersten Bodenkontaktes den wichtigsten Parameter zur Determinierung der Belastungseinwirkung beim DVZ dar. Hier zeigten sich infolge der Belastungserhöhung bzw. der Systemvariation deutliche Veränderungen (vgl. Abbildung 1). Die sich daraus ergebenden sprungsysteminternen Veränderungen im Energieoutput (letzter Bodenkontakt) erwiesen sich aber als nicht so gravierend bzw. ab einem bestimmten Punkt nicht mehr weiter veränderbar. Demgegenüber zeigten sich hier die Systemunterschiede sehr viel deutlicher. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Generierung von zusätzlicher positiver Arbeit durch die Energiespeicherung, wie es z. B. ROBERTS et al. (1996) bei Tieren nachgewiesen haben, nur zur Erhöhung der Effizienz der Bewegung beitragen kann (vgl. BOBBERT et al. 1996), nicht aber unbegrenzt zur Erhöhung des Energieoutputs. Dies liegt zum einen in der muskulären Stiffness und zum anderen in der dafür notwendigen neuromuskulären Aktivierung begründet. Um eine entsprechende Energieübertragung der einwirkenden Energie in den Bewegungsoutput zu gewährleisten, bedarf es einer hohen muskulären Stiffness und einer Speicherung dieser Energiebeträge in den serienelastischen Komponenten (EDMAN 1997, FARLEY/MORGENROTH 1999). Die in diesem Zusammenhang durchgeführte Betrachtung der maximalen Bodenreaktionskräfte und des Kraftanstiegsverhaltens bestätigt eine Erhöhung dieser Werte bis zu einem bestimmten Punkt. Hier ist somit von einer limitierten Leistungsfähigkeit beim Kraftoutput auszugehen, welche die Stiffnesswerte der unteren Extremitäten beeinflusst. Als weiterer Indikator hierfür können die Vergrößerungen der Gelenkwinkelamplituden in den betrachteten Gelenken angesehen werden, was in Analogie zu den Erkenntnissen von GOLLHOFER/KYRÖLÄINEN (1991) steht. Anhand dieser Veränderungen lassen sich auch die Verlängerungen bei den Bodenkontaktzeiten erklären.

Als Hauptursache für die Veränderungen der Stiffness und somit des Energieoutputs sind jedoch die Unterschiede in den neuromuskulären Aktivierungsbeiträgen der betrachteten Muskeln heranziehen. Innerhalb der Sprungsysteme konnten dabei nur geringe Veränderungen bei der Voraktivierungs- und Reflexaktivität der betrachteten Muskeln festgestellt werden. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die hier untersuchten sehr gut trainierten Athleten ihr Bewegungsprogramm nahezu in der gleichen Art und Weise, unabhängig von der Belastung, generieren. Die Variation des Sprungsystems verändert die muskuläre Aktivierung dagegen signifikant, so dass hier von einem Einfluss der unterschiedlichen Bewegungsebenen oder Ausgangspositionen auf die Bewegungsprogrammierung ausgegangen werden kann. Als auslösende Rezeptoren können hierfür die Golgi Sehnenorgane und das vestibuläre System in Betracht gezogen werden (DIETZ 1992). Ineffiziente Bewegungsprogrammierungen werden dann durch Erhöhungen der muskulären Aktivität während der Phase der willkürlichen Aktivierungsbeiträge zu kompensieren versucht. Dies geht aber zu

Lasten der Bewegungsgeschwindigkeit und des Leistungsoutputs. Somit führen geringere Voraktivierungsbeiträge zu einer geringeren muskulären Stiffness zu Beginn des Bodenkontaktes und somit zu einer geringeren Reflexaktivität und Energiespeicherung. Die einwirkende Energie wird über eine größere Bewegungsamplitude amortisiert, wodurch sich die Vergrößerungen der Gelenkwinkelamplituden und der Bodenkontaktzeiten ergeben. Dies zeigt sich besonders deutlich bei den Sprüngen am SJS. Die erhöhten neuromuskulären Aktivierungsbeiträge in der LER-Phase können dann zwar den Bruttowert des Energieoutputs im Zusammenhang mit den größeren Bewegungsamplituden erhöhen, nicht aber die Effizienz bzw. den Leistungsoutput. Die Sprünge werden daher an diesem System in einer vermehrt „countermovement“-artigen Form durchgeführt, wohingegen beim DJ die „bouncing“-Form dominiert (vgl. BOBBERT et al. 1996).

Die hier gefundenen Ergebnisse stützen die Aussage, dass die Leistungsfähigkeit im DVZ sehr stark durch die Spezifität der muskulären Aktion und der Bewegungssteuerung geprägt ist. Daher sollte die Zielstellung, welche mit der jeweiligen Trainingsform angesteuert werden soll, auch den gewünschten Anforderungen entsprechen.

5 Literatur

- ASMUSSEN, E.; BONDE-PETERSEN, F.: Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiologica Scandinavica* 91 (1974), 385–392
- AVELA, J.; SANTOS, P.M.; KOMI, P.V.: Effects of differently induced stretch loads on neuromuscular control in drop jump exercise. *European Journal of Applied Physiology* 72 (1996), 553–562
- BOBBERT, M.F.; GERRITSEN, K.G.M.; LITJENS, M.C.A.; VAN SOEST, A.J.: Why is countermovement jump height greater than squat jump height? *Medicine and Science in Sports and Exercise* 28 (1996), 140–1412
- DIETZ, V.: Human neuronal control of automatic functional movements: Interactions between central programs and afferent input. *Physiological Reviews* 72 (1992) 1, 33–69
- EDMAN, K.A.P.: Force enhancement by stretch. *Journal of Applied Biomechanics* 13 (1997) 4, 432–436
- FARLEY, C.T.; MORGENROTH, D.C.: Leg stiffness primarily depends on ankle stiffness during human hopping. *Journal of Biomechanics* 32 (1999), 267–273
- GOLLHOFER, A.; KYRÖLÄINEN, H.: Neuromuscular control of the human leg extensor muscles in jump exercises under various stretch-load conditions. *International Journal of Sports Medicine* 12 (1991), 34–40
- KYRÖLÄINEN, H.; AVELA, J.; KOMI, P.V.: Regulation of muscle force and stiffness during long jump take-off. In: XII International Congress on Biomechanics, Congress Proceedings, University of California, Los Angeles 1989, 364–365

- ROBERTS, T.J.; MARSH, R.L.; WEYAND, P.G.; TAYLOR, C.R.: Muscular force in running turkeys: The economy of minimizing work. *Science* 275 (1997), 1113-1115
- VAN INGEN-SCHENAU, G. J.; BOBBERT, M.F.; DE HAAN, A.: Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch-shortening cycle? *Journal of Applied Biomechanics* 13 (1997) 4, 389-415
- ZATSIORSKY, V.M.: Krafttraining. Praxis und Wissenschaft. Aachen 1996

Aus diesem Projekt hervorgegangene Veröffentlichungen:

- BUBECK, D.; GOLLHOFER, A.: Load induced changes of activation patterns in free jump exercises and in sledge jumps. In: AVELA, J.; KOMI, P.V.; KOMULAINEN, J. (Eds.): Proceedings of the 5th Annual Congress of the European College of Sport Science. Jyväskylä 2000, 181
- BUBECK, D.; GOLLHOFER, A.: Auswirkungen von Belastungsvariationen auf die Leistung und die neuronalen Aktivierungsmuster beim Dehnungs- Verkürzungs- Zyklus. In: ALT, W.; GOLLHOFER, A. (Hrsg.): Tagungsband – 2. Tagung der Deutschen Gesellschaft für Biomechanik. Freiburg i. Br. 2000, 33-34
- BUBECK, D.; GOLLHOFER, A.: Effects of load variations on jump performance and muscle activation patterns. In: MESTER, J.; KING, G.; STRÜDER, H.; TSOLAKIDIS, E.; OSTERBURG, A. (Eds.): Book of Abstracts, 6th Annual Congress of the European College of Sport Science. Köln 2001, 321
- BUBECK, D.; GOLLHOFER, A.: Load induced changes of jump performance and activation patterns in free drop jump exercises and in sledge jumps. *European Journal of Sport Science* 3 (2001) 1