

CHRISTIAN SIMON/WOLFGANG SCHÖLLHORN/LUIS MENDOZA

Mechanische Effizienz des Mittel-/Langstreckenlaufs¹

1 Problemstellung

Beim Mittel-/Langstreckenlauf ist die Energiebereitstellung ein leistungslimitierender Faktor, d.h. der Läufer kann seine Laufgeschwindigkeit nur so lange aufrechterhalten bzw. erhöhen, wie er in der Lage ist seiner Muskulatur die dazu benötigte Energie bereitzustellen. Aus der Sicht der Biomechanik stellt sich daher die praktische Frage, wie man sich bei hoher Geschwindigkeit mit möglichst geringem Energieverbrauch fortbewegen kann. Eine Beantwortung dieser Frage setzt die Analyse der Energetik der Bewegung voraus, d.h. es ist zu klären, wofür die mechanische Energie verbraucht wird, welche die Muskelkontraktionen freisetzen (SAZIORSKI u.a. 1987, 9). Energetisch gesehen handelt es sich bei der Laufbewegung um eine Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Arbeit. Um eine bestimmte Laufgeschwindigkeit zu erreichen und zu erhalten, muß der Läufer mechanische Arbeit verrichten, die eine Erhöhung bzw. Erhaltung der kinetischen Energie des Körperschwerpunkts (KSP) bewirkt. Aufgrund von physiologischen, mechanischen und anatomischen Randbedingungen treten bei der Umwandlung chemischer Energieträger in mechanische Arbeit Energieverluste auf, denen hinsichtlich der Effizienz der Lauftechnik eine Schlüsselstellung zukommt. Eine effiziente Lauftechnik sollte durch ein relatives Minimum dieser „Energieverluste“ gekennzeichnet sein. Schematisch sind die „mechanischen Energieverluste“ in Abb. 1 dargestellt.

In der Literatur existieren drei Ansätze zur Beschreibung der Effizienz der Lauftechnik. Beim physiologischen Ansatz dient der physiologische Energieverbrauch als Effizienzkriterium (DANIELS/DANIELS 1992; CONLEY/KRAHENBRUHL 1990). Bei den rein mechanischen Ansätzen wird die mechanische Gesamtarbeit (MARTIN u.a. 1992; MATSUO u.a. 1985), die elastische Energiespeicherung (WILLIAMS/CAVANAGH 1983; ITO u.a. 1983; SHORTEN 1985) sowie die vertikale KSP-Arbeit (MATSUO u.a. 1985) zur Beschreibung der Effizienz herangezogen. Das Verhältnis aus mechanischer Arbeit und physiologischem Energieverbrauch (BOURDIN u.a. 1995, GREGOR/KIRKENDALL 1978) sowie das Verhältnis von mechanischer Arbeit und integriertem EMG (ITO u.a. 1985) wird bei den interdisziplinären Ansätzen als Effizienzkriterium verwendet. Forschungsdefizite liegen hinsichtlich der Bestimmung der Effizienz durch die Relation der effektiven (vortriebswirksamen) Arbeit zur vertikalen und transversalen Arbeit des Läufers vor. Die Effizienz als Verhältnis aus effektiver Arbeit und Gesamtarbeit wurde bisher lediglich beim Radfahren bestimmt (LAFORTUNE/CAVANAGH 1983; ZSCHORLICH/SCHMÜCKER 1989).

¹ Dieses Projekt wurde mit Forschungsmitteln des Bundesinstituts für Sportwissenschaft unter dem Geschäftszeichen VF 0407/05/07/95 gefördert.

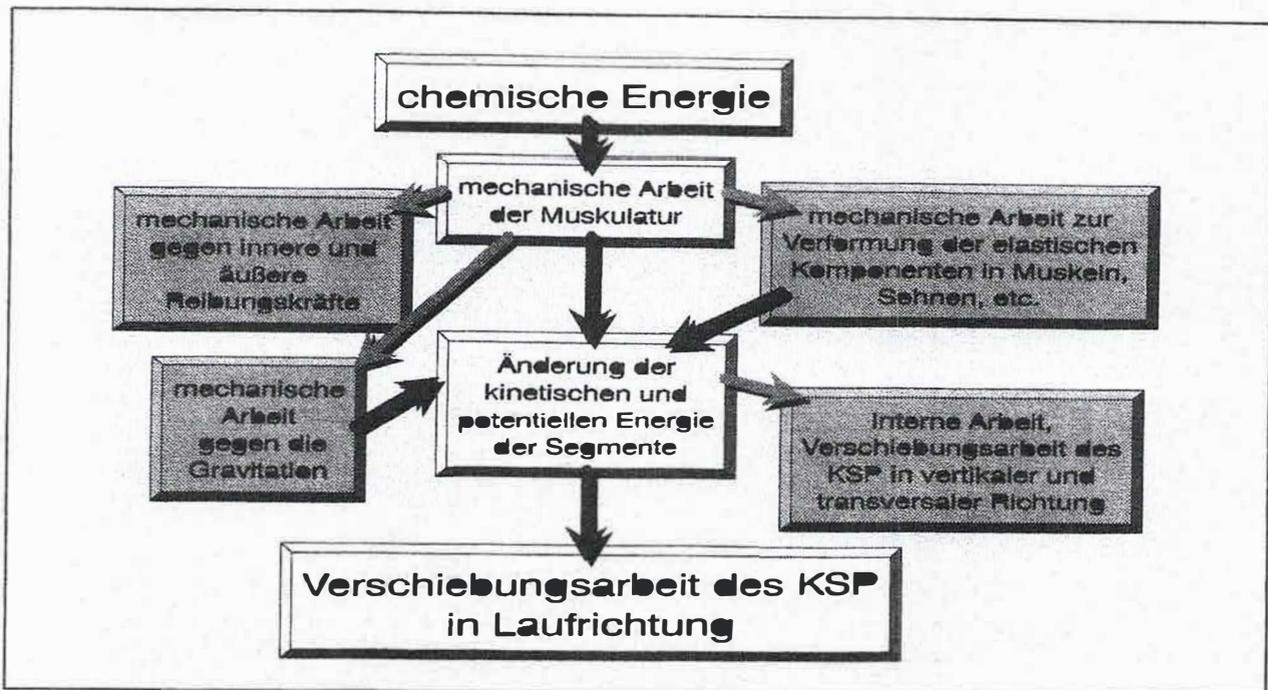


Abb. 1: Mechanische Energieverluste bei der Umwandlung von chemischer Energie in mechanische Verschiebungsarbeit des KSP in Laufrichtung

2 Untersuchungsmethodik

Ausgehend von einer Selbstoptimierung der Lauftechnik durch hohe Trainingsumfänge (MARTIN/COE 1992,16; WILLIAMS 1990, 279), wählten wir den Ansatz, die Lauftechnik von Spezialisten und Sportstudenten zu analysieren, um anhand der Relation von Segmentarbeit zur effektiven KSP-Arbeit Aussagen über die Effizienz der Lauftechnik machen zu können.

2.1 Versuchsplan

- Feldstufentest 3-5*2000m auf einer 200m Bahn in der Halle

2.2 Meßmethodik

- 3D-Kinematographie mit 2 Kameras (LOCAM-Bildfrequenz 150 Hz)
- Aufnahme eines Laufschriffs (rechter u. linker Fußkontakt) in jeder Stufe
- Anthropometrische Vermessung der Probanden

2.3 Personenstichprobe

- 10 trainierte Mittel-/Langstreckenläufer und 9 Sportstudenten

2.4 Datenverarbeitung

- 3D-Auswertung mit DLT-Algorithmus
- Bestimmung der Gruppenunterschiede durch Kovarianzanalyse der Probandenmittelwerte mit der Laufgeschwindigkeit als Kovariate

2.5 Verwendetes Energiemodell

Ausgehend von der translatorischen, rotatorischen und potentiellen Energie der Körpersegmente berechneten wir für die rechte und linke Stützphase die mechanische Arbeit der Körpersegmente und des KSP in allen drei Raumrichtungen. Um den Einfluß der Stützdauer zu eliminieren, normierten wir die berechnete Arbeit zeitlich auf die Stützzeit. Zur Bestimmung der Effizienz relativierten wir die Segment- bzw. KSP-Arbeit auf die effektive KSP-Arbeit in Laufrichtung (A_{ksp_x}). Im einzelnen berechneten wir folgende Koeffizienten:

$$A_{segx_{rel}} = \frac{A_{segx}}{A_{ksp_x}}, \quad A_{segy_{rel}} = \frac{A_{segy}}{A_{ksp_x}}, \quad A_{segz_{rel}} = \frac{A_{segz}}{A_{ksp_x}}, \quad A_{kspx_{rel}} = \frac{A_{ksp_x}}{A_{ksp_{ges}}}$$

$A_{seg_{x,y,z}}$: Segmentarbeit in x-, y- und z-Richtung,

A_{ksp_x} : KSP- Arbeit in x-Richtung (Laufrichtung)

$A_{ksp_{ges}}$: Gesamtarbeit des KSP)

3 Untersuchungsergebnisse

Die Signifikanzen der Gruppenunterschiede der Effizienzkriterien sind für die linke und rechte Stützphase in der folgenden Tabelle dargestellt:

Tab. 1: Signifikanz der Gruppenunterschiede (** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, n.s. $p > 0.05$)

Effizienzkriterium	re. Stütz	ll. Stütz
Segmentarbeit x-Richtung / KSP-Arbeit x-Richtung	**	n.s.
Segmentarbeit z-Richtung / KSP-Arbeit x-Richtung	n.s.	*
Segmentarbeit y-Richtung / KSP-Arbeit x-Richtung	n.s.	n.s.
KSP-Arbeit x-Richtung / KSP-Gesamtarbeit	n.s.	**

Auffallend ist die große kontralaterale Variation der Effizienz. Keines der vier Effizienzkriterien weist signifikante Gruppenunterschiede für beide Stützphasen auf. Die Ursachen hierfür können in der Seitigkeitsproblematik (VAGENAS/HOSHIZAKI 1992) liegen oder untersuchungsmethodisch bedingt sein. In den folgenden Abbildungen sind die Mittelwerte Konfidenzintervalle der signifikanten Gruppenunterschiede grafisch dargestellt:

Betrachtet man die in Abb. 2 und 3 dargestellten Gruppenmittelwerte, so ist deutlich zu erkennen, daß sich die Gruppe der trainierten Mittel-/Langstreckenläufer durch geringere vertikale Segmentarbeit sowie größere Segment- und KSP-Arbeit in Laufrichtung auszeichnet. Bezogen auf die KSP-Arbeit verrichten die Spezialisten im Mittel 82% der Gesamtarbeit in Laufrichtung, während die Sportstudenten lediglich 77% der Gesamtarbeit in Laufrichtung verrichten.

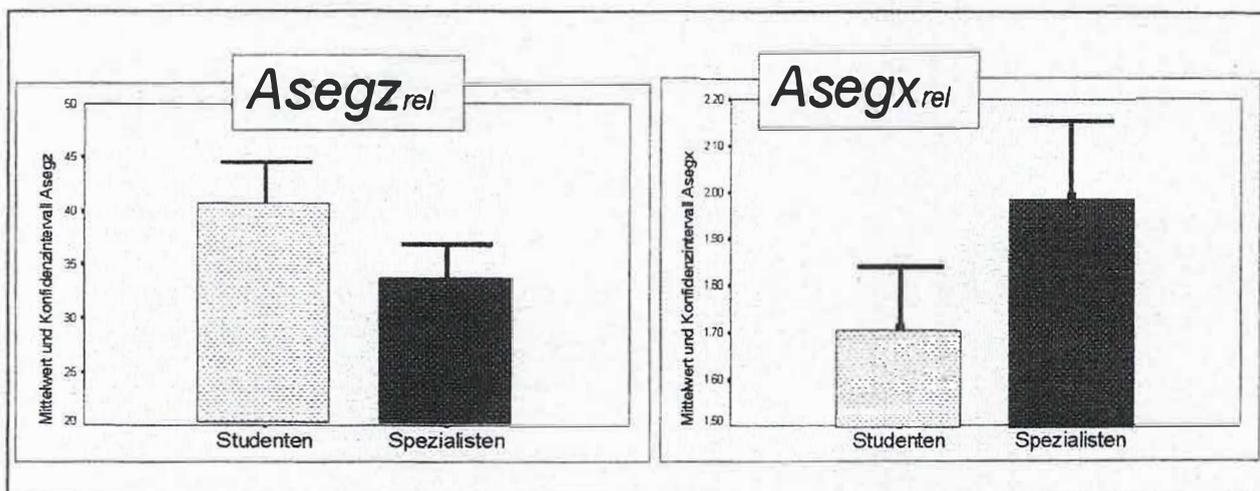


Abb. 2: Mittelwert und Konfidenzintervall (95%) von $Asegz_{rel}$ (linke Stützphase), $Asegx_{rel}$ (rechte Stützphase)

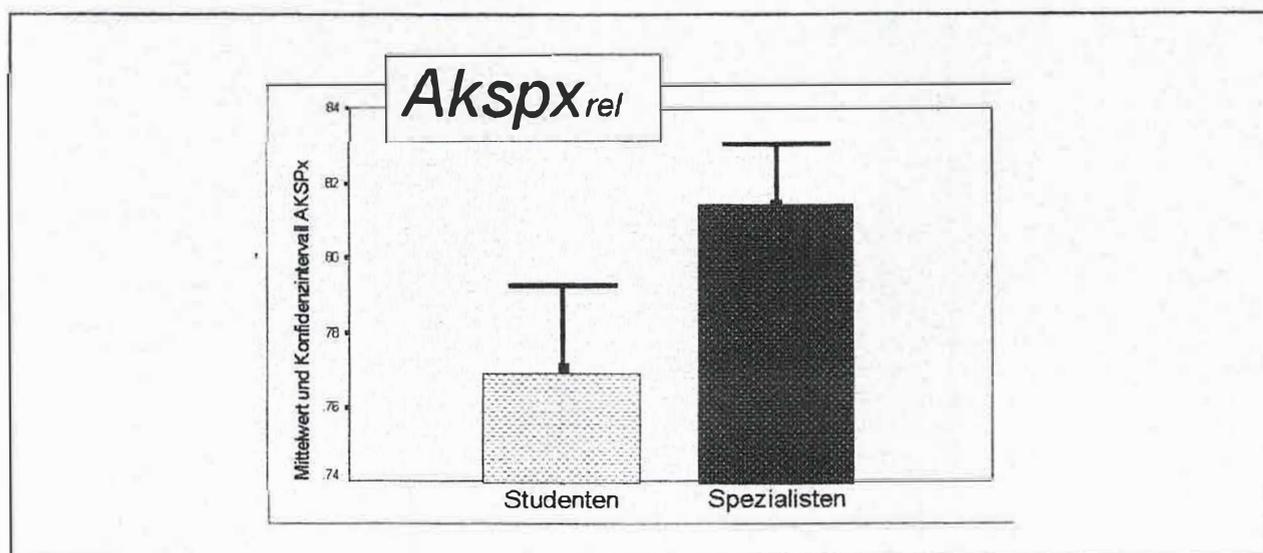


Abb. 3: Mittelwert und Konfidenzintervall (95%) $Akspx_{rel}$ (linke Stützphase)

4 Folgerungen und Ausblick

Unter der Annahme, daß sich Spezialisten aufgrund ihrer großen Trainingsumfänge durch eine effizientere Lauftechnik im Vergleich zu den Sportstudenten auszeichnen, erscheint es zweckmäßig, die Effizienz der Lauftechnik durch verschiedene Formen der mechanischen Arbeit zu beschreiben. Eine effizientere Lauftechnik ist durch geringere relative vertikale Arbeit und größere relative sagitale Arbeitsanteile gekennzeichnet. In weitergehenden Analysen sind diejenigen Bewegungsmerkmale zu identifizieren, welche die Unterschiede in der Effizienz der Lauftechnik determinieren. Weiterhin sollten die Effizienzkriterien durch Daten des physiologischen Energieverbrauchs verifiziert werden. Trainingsmethodisch erscheint eine stärkere Ausrichtung des Laufkoordinationstraining auf geringere vertikale Bewegungen der Körpersegmente zweckmäßig.

Literatur

- BOURDIN, M./BELLI, A./ARSAC, L.M./BOSCO, C./LACOUR, J.R.: Effect of Velocity on Mechanics and Energy Cost of Running, In: XVth Congress of the International Society of Biomechanics. Jyväskylä 1995, 124-125
- CONLEY, D.L./KRAHENBUHL, G.S.: Running economy and distance running performance of highly trained athletes. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 22 (1990), 5, 357-360
- DANIELS, J./DANIELS, N.: Running economy of elite male and elite female runners. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 24 (1992), 4, 483-489
- GREGOR, R.J./KIRKENDALL, D.: Performance efficiency of world class female marathon runners. In: ASMUSSEN, E./JORGENSEN, K. (Eds.): *Biomechanics VI-A*. Maryland 1978, 41-45
- ITO, A./FUCHIMOTO, T./KANEKO, M.: Quantitative Analysis of EMG During Various Speeds of Running. In: WINTER, D.A./NORMAN, R.W./WELLS, R.P./HAYES, K.C./PATLA, A.E. (Eds.): *Biomechanics IX-B*. Champaign, Ill. 1985, 301-306
- ITO, A./KOMI, P./SJÖDIN, B./BOSCO, C./KARLSSON, J.: Mechanical efficiency of positive work in running at different speed. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 15 (1983), 4, 299-308
- LAFORTUNE, M.A./CAVANAGH, P.R.: Effectiveness and efficiency in bicycle riding, In: MATSUI, H./KOBAYASHI, K. (Eds.): *Biomechanics VIII-B*. Champaign, Ill. 1983, 928-936
- MARTIN, D.E./COE, P.N.: Biomechanische, technische und stilistische Aspekte des Mittel- und Langstreckenlaufs. In: *Leichtathletik* 19 (1992), 17-18
- MARTIN, P.E./HEISE, G.D./MORGAN, D.W.: Interrelationships between mechanical power, energy transfer and walking and running economy. In: *Medicine and Science in Sports and Exercise* 24 (1992), 4, 508-515
- MATSUO, A./FUKUNAGA, T./ASAMI, T.: Relation Between External Work and Running Performance in Athletes. In: WINTER, D.A./NORMAN, R.W./WELLS, R.P./HAYES, K.C./PATLA, A.E. (Eds.): *Biomechanics IX-B*. Champaign, Ill. 1985, 319-324
- SAZIORSKI, W.M./ALIJESCHINSKI, S.J./JAKUNIN, N.A.: *Biomechanische Grundlagen der Ausdauer*. Berlin (Ost) 1987
- SHORTEN, M.R.: Mechanical Energy Changes and Elastic Energy Storage During Treadmill Running. In: WINTER, D.A./NORMAN, R.W./WELLS, R.P./HAYES, K.C./PATLA, A.E. (Eds.): *Biomechanics IX-B*. Champaign, Ill. 1985, 313-318
- VAGENAS, G./HOSHIZAKI, B.A.: Multivariable Analysis of Lower Extremity Kinematic Asymmetry in Running. In: *International Journal of Sport Biomechanics* 8 (1992), 1, 11-29
- WILLIAMS, K.R.: Relationships Between Distance Running Biomechanics and Running Economy. In: CAVANAGH, P.R. (Ed.): *Biomechanics of Distance Running*. Champaign, Ill. 1990, 271-305
- WILLIAMS, K.R./CAVANAGH, P.R.: A model for the calculations of mechanical power during distance running. In: *Journal of Biomechanics* 16 (1983), 2, 115-128
- ZSCHORLICH, V./SCHMÜCKER, B.: Der Einfluß des koordinativen Wirkungsgrades bei Fahrrad-Ergometer-Messungen. In: BÖNING, D./BRAUMANN, K.M./BUSSE, M.W./MAASSEN, N./SCHMIDT, W. (Hrsg.): 31. Deutscher Sportmedizin Kongress. Köln 1989, 477-481

Schriften der Deutschen Vereinigung für Sportwissenschaft
Band 87



Hirtz/Nüske (Hrsg.)

Bewegungskoordination und sportliche Leistung integrativ betrachtet

2. Bernstein-Konferenz und 2. gemeinsames Symposium
der dvs-Sektionen Biomechanik, Sportmotorik und
Trainingswissenschaft vom 25.-27.9.1996 in Zinnowitz

The logo for Czwalina is located at the bottom center of the page. It features the word 'Czwalina' in a white, stylized, cursive font, set against a solid black rectangular background.

Czwalina