

Trainingsinterventionen zur Modifikation der Laufökonomie im Mittel- und Langstreckenlauf

Interventions to Modify Running Economy in Middle and Long Distance Runners

Zusammenfassung

- › **Die Laufökonomie** (engl.: „running economy“, RE) ist als Energieverbrauch bei submaximaler Laufgeschwindigkeit definiert und wird als Sauerstoffverbrauch bei konstanter und submaximaler Laufgeschwindigkeit quantifiziert.
- › **Der vorliegende Artikel** fasst relevante Trainingsinterventionen zur Verbesserung der RE zusammen und welche Mechanismen diesen Veränderungen zugrunde liegen. Zu diesem Zweck wurden Originalstudien mit „peer review“-Verfahren ausgewertet, die verschiedene Ausdauer-, Kraft- und Höhentrainingsmethoden und ihre Auswirkungen auf die RE bzw. die Leistungsfähigkeit von gesunden trainierten oder untrainierten Läufer/innen untersuchten. Bei kurzer- bis mittelfristiger Interventionsdauer (4–10 Wochen) scheint hoch-intensives Intervalltraining die RE bei Läufern um 1–8 % zu verbessern. Nach Maximalkraft- sowie plyometrischem Training (4–12 Wochen) ist mit einer Verbesserung der Laufökonomie von 3–8 % zu rechnen.
- › **Die Literaturlage** bezüglich unterschiedlicher Formen des Höhentrainings und deren Auswirkungen auf die RE sind uneinheitlich. Untersuchungen zur Modifikation der RE mit Läuferinnen fehlen fast gänzlich. Die vorliegende Literaturübersicht zeigt, dass die RE von Läufern mit unterschiedlichem Leistungsniveau durch verschiedene Trainingsinterventionen aufgrund metabolischer, kardiorespiratorischer, biomechanischer oder neuromuskulärer Anpassungen modifiziert werden kann.
- › **Nach derzeitiger Datenlage** können verschiedene Formen des Ausdauer-, Kraft- und Höhentrainings dazu beitragen die RE zu verbessern, wobei die über mehrere Jahre akkumulierten Trainingsumfänge von Läufern am höchsten mit der Verbesserung der Laufökonomie korrelieren.

SCHLÜSSELWÖRTER:

Ausdauerleistungsfähigkeit, Ausdauertraining, Biomechanik, Sauerstoffverbrauch, Trainingseffekte

Summary

- › **Running economy (RE)** is defined as energy consumption during submaximal running speed and is quantified as oxygen consumption at steady-state and submaximal running speed.
- › **This article** aimed to analyze the effects of different training interventions on RE and the underlying mechanisms. For this reason, original peer-review publications were analyzed including studies with training interventions (endurance, resistance and high altitude training) investigating the influences on running economy and/or on performance in healthy male and/or female trained and untrained individuals. In short to medium-term interventions (4–10 weeks), high-intensity interval training improves RE by 1–8%. After maximum strength and plyometric training (4–12 weeks) RE is expected to improve by 3–8%.
- › **The data from available literature** regarding different forms of altitude training and the impact on RE remain contradictory. Studies including female runners are almost unavailable. The present review demonstrates that different training interventions improve running economy in trained and less trained runners by metabolic, cardio-respiratory, biomechanical, or neuro-muscular adaptations.
- › **Various forms of endurance**, strength and altitude training may contribute to enhancing RE. The long term training experience and accumulated training volume of several years display the greatest correlation with improved running economy.

KEY WORDS:

Endurance Training, Middle and Long Distance Running, Biomechanics, Oxygen Uptake, Training Effect

Einleitung

Im Mittel- und Langstreckenlauf werden zur Quantifizierung von Leistungsreserven sowie als Prädiktoren der Wettkampfleistung neben der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2max}), Geschwindigkeit an der VO_{2max} (vVO_{2max}), Laufgeschwindigkeit am Anstieg der Laktatleistungskurve, %-Ausschöpfung der Sauerstoffaufnahme an ventilatorischer oder laktatbasierter Schwelle in Bezug zur VO_{2max} auch die Bewegungsökonomie ermittelt (22, 36). Die Laufökonomie (englisch „running economy“ (RE)),

scheint jedoch bei Läufern ein bisher „vergessener“ Faktor in der Betrachtung leistungsbeschreibender Determinanten zu sein (22).

Als Bezugsgröße für die Laufökonomie werden der körperrgewichtbezogene (VO_2 in ml/min/kg), körperrgewichtbezogene pro Kilometer (VO_2 in ml/kg/km) sowie absolute Sauerstoffverbrauch (VO_2 in ml/min) bei konstanter Laufgeschwindigkeit bei <85 % VO_{2max} angesehen (42). Trainierte Läufer weisen bei gleicher submaximaler Laufgeschwindigkeit >

ÜBERSICHT

ACCEPTED: July 2015

PUBLISHED ONLINE: September 2015

DOI: 10.5960/dzsm.2015.192

Sperlich B, Engel FA, Zinner C.

Trainingsinterventionen zur Modifikation der Laufökonomie im Mittel- und Langstreckenlauf. Dtsch Z Sportmed. 2015; 66: 229–234.

1. JULIUS-MAXIMILIANS UNIVERSITÄT WÜRZBURG, Arbeitsbereich Integrative und Experimentelle Trainingswissenschaft, Institut für Sportwissenschaft, Würzburg
2. KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, Forschungszentrum für den Schulsport und den Sport von Kindern und Jugendlichen, Karlsruhe



QR-Code scannen und Artikel online lesen.

KORRESPONDENZADRESSE:

Univ.-Prof. Dr. Billy Sperlich
Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Institut für Sportwissenschaft
Integrative und experimentelle Trainingswissenschaft
Judenbühlweg 11, 97082 Würzburg
✉: billy.sperlich@uni-wuerzburg.de

eine geringere VO_2 auf als Untrainierte (7, 48). Bei Marathonläufern der Weltklasse (VO_{2max} : 83 ml/min/kg) beträgt die VO_2 bei 16 km/h ca. 40 ml/min/kg (36), bei Läuferinnen (VO_{2max} : 75 ml/min/kg) ca. 44 ml/min/kg (27). Männliche, nicht ausdauertrainierte Sportstudenten zeigen bei 2,4 m/s (=10,1 km/h) eine VO_2 von $35,6 \pm 7,6$ ml/min/kg auf, Sportstudentinnen eine VO_2 von $34,7 \pm 5,6$ ml/min/kg (Mittelwert (MW) \pm Standardabweichung (SD); Daten aus eigenem Labor). Älteren Berechnungen zur Folge führt die Verbesserung der RE um 5 % zur Steigerung der Laufleistung um ca. 4 % (17), was bei einem 3:30h Marathonläufer theoretisch zu einem Zeitgewinn von 5 min 12 s führen würde.

Da die RE ebenso wie die VO_{2max} ein leistungsbestimmender Faktor der Ausdauerleistungsfähigkeit ist und die Laufleistung im Mittel- und Langstreckenlauf in hohem Maße durch die RE beeinflusst wird (22, 42), stellen sich die Fragen: i) durch welche Intervention die RE verbessert werden kann und ii) welche biologischen Mechanismen zur RE-Modifikation beitragen?

Ziel des vorliegenden Übersichtsartikels ist es i) die Ergebnisse vorliegender Untersuchungen (7, 48) kritisch zu überprüfen und ii) evidenzbasierte Empfehlungen für Athleten und Trainer zur Verbesserung der RE auszusprechen.

Methodik

Im November 2014 wurde eine elektronische Datenbankrecherche (PubMed, SPORTDiscus, Web of Science) durchgeführt. Die Suche nach relevanten Studien mit folgenden Stichwörtern bzw. Wortkombinationen beinhaltete: running economy, running performance, exercise performance, endurance performance, oxygen consumption, oxygen costs of running, energy costs of running, distance running, long distance running, endurance runners, neuromuscular performance, strength training, resistance training. Zusätzlich wurden die Literaturlisten der verwendeten Artikel und von bereits vorher identifizierten Artikeln nach weiteren relevanten Studien durchsucht.

Ein- und Ausschlusskriterien: Es wurden nur Originalstudien mit „peer review“-Verfahren akzeptiert, die eine Intervention (z.B. Ausdauertrainings- oder Krafttrainingsformen) über mehr als sechs Trainingseinheiten und die Auswirkungen auf die RE bzw. die Leistungsfähigkeit von gesunden männlichen und/oder weiblichen trainierten oder untrainierten Individuen jeweils vor und nach einer Intervention untersuchten. Zur Analyse der Effekte der verschiedenen Interventionen auf die RE bzw. auf die Leistung wurden leistungsphysiologische Parameter und wettkampfnähe Testverfahren akzeptiert. Darüber hinaus wurden Studien mit und ohne Kontrollgruppen akzeptiert.

Die Effekte der Trainingsinterventionen auf die RE bzw. auf die Laufleistung wurden als prozentuale Veränderung der RE bzw. der Laufleistung von pre (vor Beginn der Intervention) zu post (nach Ende der Intervention) mit folgender Formel berechnet: Prozentuale Veränderung der RE = $(RE_{post} - RE_{pre}) / RE_{pre} \times 100$.

Ergebnisse

Basierend auf den Ein- und Ausschlusskriterien wurden 46 Studien in diesem Übersichtsartikel analysiert (siehe Abb. 1).

Sämtliche Studien sind nach Interventionsschwerpunkt in Tabellenform online unter www.zeitschrift-sportmedizin.de abrufbar.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Studien nach Interventionsschwerpunkt zusammengefasst dargestellt.

Hoch-intensives Intervalltraining (HIIT)

HIIT über einen Zeitraum von 4-10 Wochen im flachen Gelände zeigt unterschiedliche Effekte auf die RE von Mittel- und Langstreckenläufern. Acht HIIT-Studien mit verschiedenen Protokollen und Intensitäten von 93-120 % der vVO_{2max} zeigten eine Verbesserung der RE von 1-8 % (10, 16, 23, 33, 54, 56). Vier Subgruppen aus drei verschiedenen HIIT Studien hingegen konnte keine oder nur geringe Effekte auf die RE nachweisen (23, 57, 68). Kritisch anzumerken bleibt, dass in allen Studien mit verbesserter RE parallel zum HIIT das aerobe Lauftraining weiterhin durchgeführt und HIIT jeweils nur ergänzend trainiert wurde (9, 16, 18, 23, 33, 54, 56, 57, 68).

Bei einer näheren Analyse der Studienergebnisse wird deutlich, dass es eine Abhängigkeit von Länge und Intensität von HIIT auf die RE zu geben scheint. Sehr kurze Intervalle (30-40 x 15 s bei 92% der vVO_{2max} mit 15 s Pause) haben nur eine geringe bis keine Auswirkung auf die RE, wohingegen längere Intervalle (4-6 x 4 min bei 94 % vVO_{2max} mit 2 min Pause) eine Verbesserung der RE um 3% ergeben (23). Die Ursache für eine ausbleibende Verbesserung der RE nach sehr kurzen HIIT-Intervallen besteht eventuell im geringeren Trainingsumfang der mit einem hohen Anteil an kurzen und intensiven Intervallen einhergeht (38). Die höchste Verbesserung der RE wurden bei einer Intensität von etwa 90-100% der vVO_{2max} und einer Intervalldauer von 3-4 min mit einer Interventionsdauer von vier (16) bis acht (10, 33) Wochen erzielt.

Sechswöchiges HIIT führte zwar zur Verbesserungen der VO_{2max} (von $57,7 \pm 6,2$ auf $61,3 \pm 6,3$ ml/min/kg), aber zu keiner Veränderungen biomechanischer Variablen bei trainierten Läufern (34), u.a.: i.) die vertikale Auslenkung während eines Laufzyklus; ii.) der Winkel des Unterschenkels zum Zeitpunkt des Fußaufsatzes; iii.) der durchschnittliche Oberkörperwinkel während eines Laufzyklus; iv.) das Bewegungsausmaß des lateralen Oberkörperwinkels während eines Laufzyklus; v.) der maximale Plantarflexionswinkel des Sprunggelenks während oder in der Nähe des Fußabhebens („toe-off“); vi.) die maximale Knieflexion während der Stützphase). Aus diesem Grund scheinen biomechanische Faktoren eher nicht ursächlich für die Verbesserung der RE nach HIIT zu sein. Insgesamt ist nach den vorliegenden Analysen eine Verbesserung der RE durch HIIT mit durchschnittlich $+3,5 \pm 2,2$ % möglich.

Bergaufläufe

Bergaufläufe stellen eine kombinierte Variante von HIIT und Krafttraining dar (7) und werden als laufspezifisches Krafttraining betrachtet (4, 7). Die Integration von Bergaufläufen in das Training bei Langstreckenläufern auf nationalem Niveau hat sich als effektive Trainingsmethode zur Steigerung der 10.000 m Leistung erwiesen (32). Trotz der positiven Wirkung auf die Leistungsfähigkeit von Läufern existieren bisher relativ wenige Untersuchungen über die Effekte des Bergauflauftrainings in Intervallform auf die RE. Nur zwei Studien konnten identifiziert werden die Bergaufläufe als Intervalltraining (12-24 x 8-12 s bergauf) untersucht haben. Davon zeigte nur eine Studie signifikante Verbesserung (+ 2,4 %) der RE (4). Allerdings wirkten sich alle fünf durchgeführten Trainingsprotokolle dieser Studie (1. 120% vVO_{2max} : 12-24 x 8-12 s bergauf; 2. 110% vVO_{2max} : 8-16 x 30-45 s bergauf; 3. 100% vVO_{2max} : 5-9 x 2-2,5 min bergauf; 4. 90% vVO_{2max} : 4-7 x 4-5 min bergauf; 5. 80 % vVO_{2max} : 1-3 x 10-25 min bergauf) signifikant auf die 5 km Laufleistung aus (ca. +2%) (4).

Zusammengefasst sind Bergaufläufe zur Verbesserung der RE vielversprechend, allerdings ist weiterer Forschungsbedarf, insbesondere bzgl. Art, Dauer, Intensität sowie Auswirkungen auf biomechanische Lauftechnikvariablen notwendig.

Krafttrainingsmethoden

Zu alternativen Trainingsmethoden im Mittel- und Langstreckenlauf gehört das Krafttraining, welches durch die Verbesserung der Laufökonomie „indirekt“ einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben kann. Das Krafttraining bewirkt sowohl bei Freizeitläufern ($VO_{2max} \geq 40$ ml/min/kg) (1, 8, 45, 46, 55, 62) sowie bei hochtrainierten Läufern ($VO_{2max} \geq 65$ ml/min/kg) (41, 51, 53) positive Effekte auf die RE und teilweise auch auf die Laufleistung. Bei den hier untersuchten Krafttrainingsinterventionen ist zu beachten, dass in fast allen Studien das Krafttraining zusätzlich zum normalen Lauftraining ergänzend durchgeführt wurde.

Maximalkrafttraining

Die Ergebnisse bzgl. des Einflusses von Maximalkrafttraining auf die RE sind widersprüchlich. Maximalkrafttraining mit hohen Lasten und ca. 4–5 Serien à 3–4 Wiederholungen/Trainingseinheit über einen Zeitraum von 6 bis 10 Wochen führte zu einer deutlichen Verbesserung der RE (3,2–7 %) sowie der Laufleistung (2,6–6 %) (1, 21, 46, 60) wohingegen andere Studien mit ähnlicher Intensität, Dauer und Häufigkeit keine oder nur sehr geringe Veränderungen der RE und der Laufleistung aufwiesen (6, 20, 40, 63). Negative Effekte des Maximalkrafttrainings auf die RE und/oder die Laufleistung sind bei keiner der analysierten Studien dokumentiert.

Keine der Studien zeigte eine krafttrainingsbedingte Veränderung der Körpermasse, der fettfreien Masse, des Körperfettgehaltes sowie eine Erhöhung des Umfangs von Extremitäten. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Kraftzunahme primär durch neuronale Anpassungen verursacht worden ist, was besonders zu Beginn eines Maximalkrafttrainings eine der ersten Anpassungserscheinungen darstellt (31). Die Verbesserung der Maximalkraft durch veränderte Rekrutierungsmuster und Synchronisation von motorischen Einheiten im Anschluss an das Maximalkrafttraining können Gründe für eine mechanisch-bedingte verbesserte Laufökonomie bzw. verzögerte muskuläre Ermüdung während des Langstreckenlaufs sein (31). Unabhängig davon ob der Kraftzuwachs auf muskulärer Ebene durch Proteinsynthese oder durch neuronale Anpassungen stattfindet, zeigen die Ergebnisse aus den Studien mit Maximalkraftinterventionen, dass die Sauerstoffaufnahme bei definierter Geschwindigkeit geringer ist, wenn ein effizienteres Rekrutierungsmuster beim Läufer vorliegt (11).

Plyometrisches und Explosivkrafttraining

Plyometrisches- und Explosivkrafttraining sind Krafttrainingsformen die mit laufspezifischen Bewegungsformen (z.B. Sprünge und Sprints) mit hoher bis maximaler Geschwindigkeit absolviert werden. Ziel dieser Trainingsformen ist eine trainingsinduzierte Beschleunigung des Dehnungs-Verkürzungszyklus des Muskels zu erreichen, was wiederum eine Kraftzunahme bewirkt. Die elf Studien mit plyometrischem und/oder Explosivkrafttraining zur Modifikation der RE zeigen hierzu uneinheitliche Ergebnisse. Sieben Subgruppen der elf Studien erreichten Verbesserungen der RE und der Laufleistung (13, 40, 45, 46, 59, 62, 63) wohingegen sieben weitere Subgruppen der elf Studien keine (signifikanten) Veränderungen der RE aufwiesen (13, 40, 45, 46, 59, 62, 63). Eine Studie (53) zeigte Verbesserungen der RE um 5% bei trainierten Läufern ($VO_{2max} \geq 65$ ml/kg/min) nach plyometrischem Explosivkrafttraining. In weiteren „erfolgreichen“ Studien mit laufspezifischem, plyometrischem Explosivkrafttraining steigerte das Training die RE um 3–7 % und die Laufleistung um 2,7–5 % (8, 39, 45, 51, 58, 62). Dabei wurde über einen Zeitraum von 6–12 Wochen mit

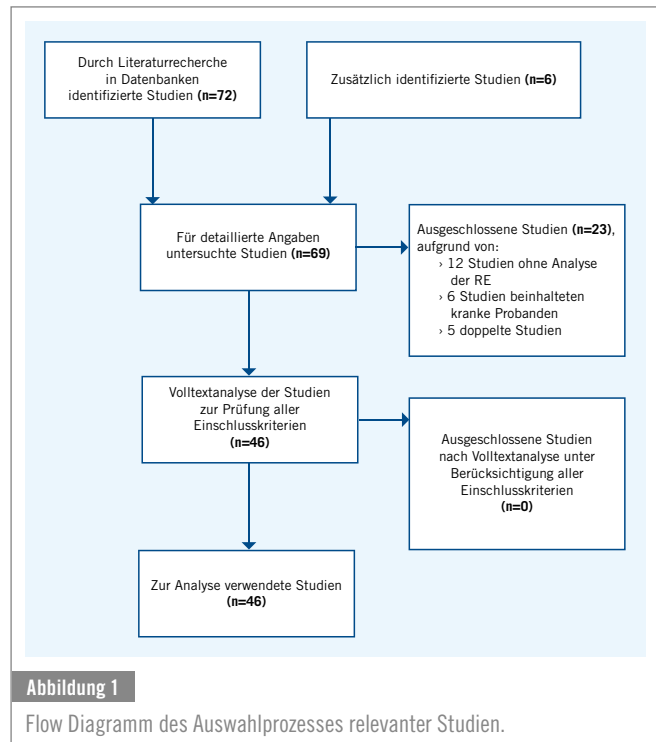


Abbildung 1

Flow Diagramm des Auswahlprozesses relevanter Studien.

durchschnittlich 2–3 Trainingseinheiten pro Woche trainiert. Das Training beinhaltete zumeist Sprints und Sprünge mit hoher Geschwindigkeit und geringen bis keinen zusätzlichen Gewichten.

Die Wirkungsweise des plyometrischen Explosivkrafttrainings basiert unter anderem auf dem Effekt, dass die Steifigkeit (engl. „stiffness“) des Muskel-Sehnenapparates erhöht wird und dadurch die (elastisch) gespeicherte Energie effizient für verringerte Bodenkontaktzeit und geringeren Energieaufwand genutzt werden kann (2, 58). Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang, dass sechs zehn-sekündige submaximale Läufe (im individuellen 1500 m Wettkampftempo) mit Gewichtsweste i.) zur „Versteifung“ des Muskelsehnenapparats im Bein (7) und ii.) unmittelbar (ohne zeitraubendes Training) zu einer Verbesserung der RE um 6 % im Anschluss an die submaximalen Läufe führte.

Kraftausdauertraining

Das Kraftausdauertraining ist durch eine hohe Wiederholungszahl (3–4 x 10–25 Wiederholungen oder 45–60 s Belastungsdauer) mit geringen oder keinen Zusatzgewichten charakterisiert. Der materielle Aufwand ist beim Kraftausdauertraining gering, da oft nur Übungen mit dem eigenen Körpergewicht absolviert werden. Die hier analysierten Kraftausdauertrainingsstudien zeigten keine oder nur sehr geringe Auswirkungen auf die RE und die Laufleistung (13, 40, 45, 46, 59, 62, 63). Lediglich zwei Studien konnten durch Kraftausdauertraining die RE um 2,4–4% steigern (26, 53). Die 3 km Laufleistung hingegen blieb unverändert.

Zusammenfassung Krafttrainingsmethoden

Krafttraining, welches in einem Zeitraum bis zu 10 Wochen parallel zum Lauftraining durchgeführt wurde, zeigte bei Freizeit- und trainierten Läufern eine Verbesserung der RE um 3–7% sowie eine um 2–6% verbesserte Laufleistung. Negative Effekte von Krafttraining auf die RE oder die Laufleistung sind bislang nicht dokumentiert. Die höchsten prozentualen Verbesserungen der RE zeigt sich durch Maximalkrafttraining sowie durch plyometrisches Explosivkrafttraining. Das Kraftausdauertraining zeigte in der Mehrheit der Studien keine Verbesserung der RE. >

Als Wirkmechanismen für eine gesteigerte Bewegungseffizienz in Folge des Krafttrainings ist eine Kombination aus verbesserten biomechanischen Faktoren (Steifigkeit der unteren Extremitäten), gemeinsam mit einer verbesserten Rekrutierung und Ansteuerung motorischer Einheiten wahrscheinlich (25). Die meisten Autoren nehmen neuromuskuläre Anpassungen als hauptsächlichsten Adaptationsmechanismus für eine verbesserte RE im Zuge von Krafttraining an (31, 41, 62).

Höhentraining

In den letzten Jahren rückte die Modifikation der RE durch Höhentraining in den Wissenschaftsfokus (u.a. 29, 35, 37, 64). Allerdings ist die Datenlage speziell zum Einfluss von Höhentraining auf die Laufökonomie nicht eindeutig.

In fünf Studien wurde der Einfluss des klassischen „live high/train high“-Konzeptes auf die Laufökonomie untersucht. In zwei dieser Studien konnte eine Verbesserung der RE in der Höhenexposition festgestellt werden, mit keinerlei Unterschieden der RE in der Kontrollgruppe (3, 64). Jedoch konnten einige Studien ebenso keine Veränderung der RE durch „live high/train high“ feststellen (35, 37, 49).

Am vielversprechendsten scheint das „live high/train low“-Konzept zu sein. Die meisten Studien mit diesem Konzept stellten eine Verbesserung der Laufökonomie um 3–7 % nach Interventionsdauern von 18–29 Tagen fest (44, 49, 50, 52). Studien mit diesem Konzept, in denen keine Verbesserung der RE festgestellt wurde, führten das Training nicht auf Meereshöhe durch, sondern auf Höhen von >1000m (35, 37, 47). Die Dauer der Höhenexposition scheint ein wesentlicher Faktor zu sein, wenn Verbesserungen der RE erzielt werden sollen. So zeigten fünf Studien, in denen die Athleten nur wenige Stunden pro Tag Hypoxie ausgesetzt waren (70 min–3 h, auf 4000–5500 m) stark variierende Ergebnisse: die Veränderungen der RE variierten von 0 bis +4% (12, 28, 29, 30, 66).

Die genauen Anpassungsmechanismen in Folge verschiedener Höhenexpositionen sind vielfältig und nicht vollständig geklärt. Die Ergebnisse können dahingehend interpretiert werden, dass eine „sichere“ Möglichkeit Verbesserungen der RE herbeizuführen, eine Kombination aus Hypoxie (live high) mit hohen Intensitäten im Flachland (train low) zu sein scheint. Hierfür sprechen zentrale sowie periphere Anpassungen von Sauerstoffaufnahme, -transport und -verwertung nach live high/train low (35). Die Hauptgründe für die kontroverse Datenlage der vorliegenden Studien zum Einfluss von Höhentraining auf die RE sind: i) eine geringe Stichprobengröße in nahezu allen Studien, ii) verschiedene „Höhendosen“ mit unterschiedlichen Höhen (von 1500–5500 m) und Expositionsdauern (wenige Stunden bis 13 Wochen), iii) nicht kontrollierte (Essgewohnheiten) und nicht kontrollierbare Faktoren (Umgebungstemperatur im Feld, Schlafverhalten).

Weiterhin wird die Sauerstoffaufnahme für eine gegebene Leistung durch das Verhältnis von Kohlehydrat- und Fettverbrennung beeinflusst (15). Sinkt beispielsweise der Glykogengehalt der Muskulatur bei langen Läufen, steigt die Fettverbrennung und damit einhergehend der Sauerstoffverbrauch. Auch Unterschiede der Körpertemperatur unter dem Einfluss länger dauernder Wettbewerbe, höherer oder niedrigerer Umgebungstemperatur oder der Einnahme von Stickoxidquellen (z. B. Rote Beete Konzentrat) könnten die Sauerstoffaufnahme beeinflussen. Es ist daher zu beachten, dass die heterogene Datenlage auf den Einfluss unterschiedlicher metabolischer, thermoregulatorischer sowie hämodynamischer Prozesse zurückzuführen ist.

Zusammenfassung

Die vorliegende Literaturübersicht zeigt, dass verschiedene Trainingsinterventionen die RE von trainierten und weniger gut trainierten Läufern durch metabolische, kardiorespiratorische, biomechanische und neuromuskuläre Anpassungen verbessern. Die Veränderung wird durch eine Reduktion der submaximalen Sauerstoffaufnahme bei konstanter Laufgeschwindigkeit ersichtlich. Durch hoch-intensives Intervalltraining (10, 16, 23) und Berglauftraining (4) sind Verbesserungen der RE von 1–8 % möglich. Unterschiedliche Arten von Krafttraining (Maximalkrafttraining und plyometrisches Explosivkrafttraining) bei trainierten Läufern (51, 67) und bei mittel bis gut trainierten Läufern (26, 45, 48) können die RE um 3–8 % verbessern. Das Höhentraining bewirkt, je nach Höhentrainingskonzept, Dauer und Intensität der Höhenexposition eine Veränderung der RE von 0–7% (12, 49, 50). Anzumerken bleibt, dass Studien mit Läuferinnen fast gänzlich fehlen.

Letztlich scheinen die Trainingsjahre einen entscheidenden Einfluss auf die RE von Läufern zu haben (43). Erfolgreiche Langstreckenläufer weisen eine hohe Anzahl von Trainingsjahren auf, in denen kontinuierlich Lauftraining in hohen Umfängen absolviert wurde. Das Trainingsalter und die absolvierten Trainingsumfänge über mehrere Jahre hinweg determinieren besonders im Hochleistungsbereich, aber auch bei untrainierten bis zu sehr gut trainierten Läufern die RE positiv (14, 27, 61).

Kurz- und mittelfristige Interventionen, wie Ausdauer- und Krafttraining, Bergaufläufe sowie Höhentraining können zwar die RE verbessern, allerdings scheint regelmäßiges und über mehrere Jahre betriebenes Ausdauertraining wesentlich für biomechanische Anpassungen. ■

Angaben zu finanziellen Interessen und Beziehungen, wie Patente, Honorare oder Unterstützung durch Firmen:

Keine

Literatur

- (1) **ALBRACHT K, ARAMPATZIS A.** Exercise-induced changes in triceps surae tendon stiffness and muscle strength affect running economy in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2013; 113: 1605-1615. doi:10.1007/s00421-012-2585-4
- (2) **ANDERSON T.** Biomechanics and running economy. *Sports Med.* 1996; 22: 76-89. doi:10.2165/00007256-199622020-00003
- (3) **BAILEY DM, DAVIES B, ROMER L, CASTELL L, NEWSHOLME E, GANDY G.** Implications of moderate altitude training for sea-level endurance in elite distance runners. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1998; 78: 360-368. doi:10.1007/s004210050432
- (4) **BARNES KR, HOPKINS WG, MCGUIGAN MR, KILDING AE.** Effects of different uphill interval-training programs on running economy and performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 2013; 8: 639-647.
- (5) **BARNES KR, HOPKINS WG, MCGUIGAN MR, KILDING AE.** Warm-up with a weighted vest improves running performance via leg stiffness and running economy. *J Sci Med Sport.* 2015; 18: 103-108. doi:10.1016/j.jsams.2013.12.005
- (6) **BARNES KR, HOPKINS WG, MCGUIGAN MR, NORTUIS ME, KILDING AE.** Effects of resistance training on running economy and cross-country performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2013; 45: 2322-2331. doi:10.1249/MSS.0b013e31829af603
- (7) **BARNES KR, KILDING AE.** Strategies to improve running economy. *Sports Med.* 2015; 45: 37-56. doi:10.1007/s40279-014-0246-y
- (8) **BERRYMAN N, MAUREL D, BOSQUET L.** Effect of plyometric vs. dynamic weight training on the energy cost of running. *J Strength Cond Res.* 2010; 24: 1818-1825. doi:10.1519/JSC.0b013e3181def1f5
- (9) **BILLAT VL, DEMARLE A, SLAWINSKI J, PAIVA M, KORALSZTEIN JP.** Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2001; 33: 2089-2097. doi:10.1097/00005768-200112000-00018
- (10) **BILLAT VL, FLECHET B, PETIT B, MURIAUX G, KORALSZTEIN JP.** Interval training at VO₂max: effects on aerobic performance and overtraining markers. *Med Sci Sports Exerc.* 1999; 31: 156-163. doi:10.1097/00005768-199901000-00024
- (11) **BRANSFORD DR, HOWLEY ET.** Oxygen cost of running in trained and untrained men and women. *Med Sci Sports.* 1977; 9: 41-44.
- (12) **BURTSCHER M, GATTERER H, FAULHABER M, GERSTGRASSER W, SCHENK K.** Effects of intermittent hypoxia on running economy. *Int J Sports Med.* 2010; 31: 644-650. doi:10.1055/s-0030-1255067
- (13) **CHENG C-F, CHENG K-H, LEE Y-M, HUANG H-W, KUO Y-H, LEE H-J.** Improvement in running economy after 8 weeks of whole-body vibration training. *J Strength Cond Res.* 2012; 26: 3349-3357. doi:10.1519/JSC.0b013e31824e0eb1
- (14) **CONLEY D, KRAHENBUHL G, BURKETT L, MILLER A.** Following Steve Scott: physiological changes accompanying training. *Physician Sports Med.* 1984; 12: 103-6.
- (15) **CROCI I, BORRANI F, BYRNE N, WOOD R, HICKMAN I, CHENEVIÈRE X, MALATESTA D.** Reproducibility of Fatmax and fat oxidation rates during exercise in recreationally trained males. *PLoS ONE.* 2014; 9: e97930. doi:10.1371/journal.pone.0097930
- (16) **DENADAI BS, ORTIZ MJ, GRECO CC, DE MELLO MT.** Interval training at 95% and 100% of the velocity at VO₂ max: effects on aerobic physiological indexes and running performance. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2006; 31: 737-743. doi:10.1139/h06-080
- (17) **DI PRAMPERO PE, ATCHOU G, BRUCKNER JC, MOIA C.** The energetics of endurance running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1986; 55: 259-266. doi:10.1007/BF02343797
- (18) **ENOKSEN E, SHALFAWI SAI, TØNNESSEN E.** The effect of high- vs. low-intensity training on aerobic capacity in well-trained male middle-distance runners. *J Strength Cond Res.* 2011; 25: 812-818. doi:10.1519/JSC.0b013e3181cc2291
- (19) **FERLEY DD, OSBORN RW, VUKOVICH MD.** The effects of incline and level-grade high-intensity interval treadmill training on running economy and muscle power in well-trained distance runners. *J Strength Cond Res.* 2014; 28: 1298-1309. doi:10.1519/JSC.0000000000000274
- (20) **FERRAUTI A, BERGERMANN M, FERNANDEZ-FERNANDEZ J.** Effects of a concurrent strength and endurance training on running performance and running economy in recreational marathon runners. *J Strength Cond Res.* 2010; 24: 2770-2778. doi:10.1519/JSC.0b013e3181d64e9c
- (21) **FLETCHER JR, ESAU SP, MACINTOSH BR.** Changes in tendon stiffness and running economy in highly trained distance runners. *Eur J Appl Physiol.* 2010; 110: 1037-1046. doi:10.1007/s00421-010-1582-8
- (22) **FOSTER C, LUCIA A.** Running economy: The forgotten factor in elite performance. *Sports Med.* 2007; 37: 316-319. doi:10.2165/00007256-200737040-00011
- (23) **FRANCH J, MADSEN K, DJURHUUS MS, PEDERSEN PK.** Improved running economy following intensified training correlates with reduced ventilatory demands. *Med Sci Sports Exerc.* 1998; 30: 1250-1256. doi:10.1097/00005768-199808000-00011
- (24) **GUGLIELMO LGA, GRECO CC, DENADAI BS.** Effects of strength training on running economy. *Int J Sports Med.* 2009;30:27-32. doi: 10.1055/s-2008-1038792
- (25) **HOFF J, HELGERUD J, WISLOFF U.** Maximal strength training improves work economy in trained female cross-country skiers. *Med Sci Sports Exerc.* 1999; 31: 870-877. doi:10.1097/00005768-199906000-00016
- (26) **JOHNSTON RE, QUINN TJ, KERTZER R, VROMAN NB.** Strength Training in Female Distance Runners: Impact on Running Economy. *J Strength Cond Res.* 1997; 11: 224-229.
- (27) **JONES AM.** The physiology of the women's world record holder for the women's marathon. *Int J Sports Sci Coaching.* 2006; 1: 101-116. doi:10.1260/17479540677641258
- (28) **JULIAN CG, GORE CJ, WILBER RL, DANIELS JT, FREDERICSON M, STRAY-GUNDERSEN J, HAHN AG, PARISOTTO R, LEVINE BD.** Intermittent normobaric hypoxia does not alter performance or erythropoietic markers in highly trained distance runners. *J Appl Physiol.* 1985; 2004: 1800-1807. doi:10.1152/jappphysiol.00969.2003
- (29) **KATAYAMA K, MATSUO H, ISHIDA K, MORI S, MIYAMURA M.** Intermittent hypoxia improves endurance performance and submaximal exercise efficiency. *High Alt Med Biol.* 2003; 4: 291-304. doi:10.1089/152702903769192250
- (30) **KATAYAMA K, SATO K, MATSUO H, ISHIDA K, IWASAKI K, MIYAMURA M.** Effect of intermittent hypoxia on oxygen uptake during submaximal exercise in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2004; 92: 75-83. doi:10.1007/s00421-004-1054-0
- (31) **KRAEMER WJ, FLECK SJ, EVANS WJ.** Strength and power training: physiological mechanisms of adaptation. *Exerc Sport Sci Rev.* 1996;24:363-397.
- (32) **KURZ MJ, BERG K, LATIN R, DEGRAW W.** The Relationship of Training Methods in NCAA Division I Cross-Country Runners and 10,000-Meter Performance. *J Strength Cond Res.* 2000; 14: 185-192.
- (33) **LAFFITE LP, MILLE-HAMARD L, KORALSZTEIN JP, BILLAT VL.** The effects of interval training on oxygen pulse and performance in supra-threshold runs. *Arch Physiol Biochem.* 2003; 111: 202-210. doi:10.1076/apab.111.3.202.23455
- (34) **LAKE MJ, CAVANAGH PR.** Six weeks of training does not change running mechanics or improve running economy. *Med Sci Sports Exerc.* 1996; 28: 860-869. doi:10.1097/00005768-199607000-00013
- (35) **LEVINE BD, STRAY-GUNDERSEN J.** „Living high-training low“: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol.* 1985; 1997: 102-112.
- (36) **LUCIA A, OLIVAN J, BRAVO J, GONZALEZ-FREIRE M, FOSTER C.** The key to top-level endurance running performance: a unique example. *Br J Sports Med.* 2008; 42: 172-4. doi: 4.10.1136/bjism.2007.040725
- (37) **LUNDBY C, CALBET JA, SANDER M, VAN HALL G, MAZZEO RS, STRAY-GUNDERSEN J, STAGER M, CHAPMAN RF, SALTIN B, LEVINE D.** Exercise economy does not change after acclimatization to moderate to very high altitude. *Scand J Med Sci Sports.* 2007; 17: 281-291. doi:10.1111/j.1600-0838.2006.00530.x
- (38) **MIDGLEY AW, MCNAUGHTON LR, JONES AM.** Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med.* 2007; 37: 857-880. doi:10.2165/00007256-200737100-00003
- (39) **MIKKOLA J, RUSKO H, NUMMELA A, POLLARI T, HÄKKINEN K.** Concurrent endurance and explosive type strength training improves neuromuscular and anaerobic characteristics in young distance runners. *Int J Sports Med.* 2007; 28: 602-611. doi:10.1055/s-2007-964849

- (40) MIKKOLA J, VESTERINEN V, TAIPALE R, CAPOSTAGNO B, HÄKKINEN K, NUMMELA A. Effect of resistance training regimens on treadmill running and neuromuscular performance in recreational endurance runners. *J Sports Sci.* 2011; 29: 1359-1371. doi:10.1080/02640414.2011.589467
- (41) MILLET GP, JAOUEN B, BORRANI F, CANDAU R. Effects of concurrent endurance and strength training on running economy and VO(2) kinetics. *Med Sci Sports Exerc.* 2002; 34: 1351-1359. doi:10.1097/00005768-200208000-00018
- (42) MORGAN DW, MARTIN PE, KRAHENBUHL GS. Factors affecting running economy. *Sports Med.* 1989; 7: 310-330. doi:10.2165/00007256-198907050-00003
- (43) NELSON RC, GREGOR RJ. Biomechanics of distance running: a longitudinal study. *Res Quarter.* 1976; 47: 417-428.
- (44) NEYA M, ENOKI T, KUMAI Y, SUGOH T, KAWAHARA T. The effects of nightly normobaric hypoxia and high intensity training under intermittent normobaric hypoxia on running economy and hemoglobin mass. *J Appl Physiol.* 1985; 2007: 828-834. doi:10.1152/jappphysiol.00265.2007
- (45) PAAVOLAINEN L, HAKKINEN K, HAMALAINEN I, NUMMELA A, RUSKO H. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol.* 1985; 1999: 1527-1533.
- (46) PIACENTINI MF, DE IOANNON G, COMOTTO S, SPEDICATO A, VERNILLO G, LA TORRE A. Concurrent strength and endurance training effects on running economy in master endurance runners. *J Strength Cond Res.* 2013; 27: 2295-2303. doi:10.1519/JSC.0b013e3182794485
- (47) ROBERTSON EY, SAUNDERS PU, PYNE DB, GORE CJ, ANSON JM. Effectiveness of intermittent training in hypoxia combined with live high/train low. *Eur J Appl Physiol.* 2010; 110: 379-387. doi:10.1007/s00421-010-1516-5.
- (48) SAUNDERS PU, PYNE DB, TELFORD RD, HAWLEY JA. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med.* 2004; 34: 465-485. doi:10.2165/00007256-200434070-00005
- (49) SAUNDERS PU, TELFORD RD, PYNE DB, CUNNINGHAM RB, GORE CJ, HAHN AG, HAWLEY JA. Improved running economy in elite runners after 20 days of simulated moderate-altitude exposure. *J Appl Physiol.* 1985; 2004: 931-937. doi:10.1152/jappphysiol.00725.2003
- (50) SAUNDERS PU, TELFORD RD, PYNE DB, HAHN AG, GORE CJ. Improved running economy and increased hemoglobin mass in elite runners after extended moderate altitude exposure. *J Sci Med Sport.* 2009; 12: 67-72. doi:10.1016/j.jsams.2007.08.014
- (51) SAUNDERS PU, TELFORD RD, PYNE DB, PELTOLA EM, CUNNINGHAM RB, GORE CJ, HAWLEY JA. Short-term plyometric training improves running economy in highly trained middle and long distance runners. *J Strength Cond Res.* 2006; 20: 947-954. doi:10.1519/r-18235.1
- (52) SCHMITT L, MILLET G, ROBACH P, NICOLET B, BRUGNIAUX JV, FOUILLOT J-P, RICHALET J-P. Influence of „living high-training low“ on aerobic performance and economy of work in elite athletes. *Eur J Appl Physiol.* 2006; 97: 627-636. doi:10.1007/s00421-006-0228-3
- (53) SEDANO S, MARÍN PJ, CUADRADO G, REDONDO JC. Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. *J Strength Cond Res.* 2013; 27: 2433-2443. doi:10.1519/JSC.0b013e318280cc26
- (54) SJÖDIN B, JACOBS I, SVEDENHAG J. Changes in onset of blood lactate accumulation (OBLA) and muscle enzymes after training at OBLA. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1982; 49: 45-57. doi:10.1007/BF00428962
- (55) SKOVGAARD C, CHRISTENSEN PM, LARSEN S, ANDERSEN TR, THOMASSEN M, BANGSBO J. Concurrent speed endurance and resistance training improves performance, running economy, and muscle NHE1 in moderately trained runners. *J Appl Physiol.* 1985; 2014: 1097-1109. doi:10.1152/jappphysiol.01226.2013
- (56) SLAWSKI J, DEMARLE A, KORALSZTEIN JP, BILLAT V. Effect of supra-lactate threshold training on the relationship between mechanical stride descriptors and aerobic energy cost in trained runners. *Arch Physiol Biochem.* 2001; 109: 110-116. doi:10.1076/apab.109.2.110.4270
- (57) SMITH TP, COOMBES JS, GERAGHTY DP. Optimising high-intensity treadmill training using the running speed at maximal O(2) uptake and the time for which this can be maintained. *Eur J Appl Physiol.* 2003; 89: 337-343. doi:10.1007/s00421-003-0806-6
- (58) SPURRS RW, MURPHY AJ, WATSFORD ML. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl Physiol.* 2003; 89: 1-7. doi:10.1007/s00421-002-0741-y
- (59) STANTON R, REABURN PR, HUMPHRIES B. The effect of short-term Swiss ball training on core stability and running economy. *J Strength Cond Res.* 2004; 18: 522-528. doi:10.1519/1533-4287
- (60) STØREN O, HELGERUD J, STØA EM, HOFF J. Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 2008; 40: 1087-1092. doi:10.1249/MSS.0b013e318168da2f
- (61) SVEDENHAG J, SJÖDIN B. Physiological characteristics of elite male runners in and off-season. *Can J Appl Sport Sci.* 1985; 10: 127-133.
- (62) TAIPALE RS, MIKKOLA J, NUMMELA A, VESTERINEN V, CAPOSTAGNO B, WALKER S, GITONGA D, KRAEMER W, HÄKKINEN K. Strength training in endurance runners. *Int J Sports Med.* 2010; 31: 468-476. doi:10.1055/s-0029-1243639
- (63) TAIPALE RS, MIKKOLA J, VESTERINEN V, NUMMELA A, HÄKKINEN K. Neuromuscular adaptations during combined strength and endurance training in endurance runners: maximal versus explosive strength training or a mix of both. *Eur J Appl Physiol.* 2013; 113: 325-335. doi:10.1007/s00421-012-2440-7
- (64) TELFORD RD, GRAHAM K, SUTTON J. Medium altitude training and sea level performance [abstract]. *Med Sci Sports Exerc.* 1996: 28.
- (65) TONG TK, MCCONNELL AK, LIN H, NIE J, ZHANG H, WANG J. „Functional“ inspiratory and core muscle training enhances running performance and economy. *J Strength Cond Res.* 2014. doi:10.1519/JSC.0000000000000656
- (66) TRUIJENS MJ, RODRIGUEZ FA, TOWNSEND NE, STRAY-GUNDERSEN J, GORE CJ, LEVINE BD. The effect of intermittent hypobaric hypoxic exposure and sea level training on submaximal economy in well-trained swimmers and runners. *J Appl Physiol.* 1985; 2008: 328-337. doi:10.1152/jappphysiol.01324.2006
- (67) YAMAMOTO LM, LOPEZ RM, KLAU JF, CASA DJ, KRAEMER WJ, MARESH CM. The effects of resistance training on endurance distance running performance among highly trained runners: a systematic review. *J Strength Cond Res.* 2008; 22: 2036-2044. doi:10.1519/JSC.0b013e318185f2f0
- (68) YOSHIDA T, UDO M, CHIDA M, ICHIOKA M, MAKIGUCHI K, YAMAGUCHI T. Specificity of physiological adaptation to endurance training in distance runners and competitive walkers. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1990; 61: 197-201. doi:10.1007/BF00357599