

Friedmann, Birgit

Entwicklungen im Höhentraining: Trends und Fragen

Altitude training: Trends and questions

Abteilung Innere Medizin VII (Sportmedizin), Medizinische Klinik und Poliklinik, Universitätsklinikum Heidelberg

Zusammenfassung

Die Ausdauerleistungsfähigkeit in der Höhe kann durch ein Höhentraining verbessert werden. Es ist allerdings nach wie vor umstritten, ob ein solches Training auch zu einer Leistungssteigerung im Tiefland führt. Das gilt ebenfalls für eine seit ein paar Jahren von einigen Untersuchern favorisierte Form des Höhentrainings, die nach dem Motto: "oben leben - unten trainieren" durchgeführt wird. Diese Strategie wird als besonders erfolgversprechend angesehen in der Annahme, dass die Erythropoese infolge Höhenakklimatisation in der trainingsfreien Zeit gesteigert wird, während gleichzeitig das Training wie gewohnt und ohne Intensitätsreduktion fortgeführt werden kann. Für alle Formen des Höhentrainings ist bisher nicht geklärt, wie ausgeprägt und von welcher Dauer eine Hypoxieexposition sein muss, um relevante Akklimationsreaktionen für eine Leistungssteigerung im Tiefland auszulösen. Weiterhin scheint eine interindividuelle Variabilität hinsichtlich Akklimationsreaktionen, Leistungsreduktion bei akuter Höhenexposition und Leistungsverbesserung während eines Höhenaufenthaltes bedeutsam zu sein.

Schlüsselwörter: Höhentraining; Leistungsfähigkeit; Hypoxie; Akklimation; Erythropoese.

Einleitung

Die sportmedizinische Forschung setzt sich seit ca. 35 Jahren mit der Leistungsfähigkeit und dem Training unter Höhenbedingungen auseinander. Erste Untersuchungen hierzu fanden anlässlich der Olympischen Spiele 1968 im ca. 2300 m hoch gelegenen Mexiko City statt - damals unter anderem auch noch mit der Fragestellung, ob man die Athleten durch hohe Belastungen in Hypoxie nicht gefährde (27). Heute besteht kein Zweifel daran, dass in Ausdauersportarten ein Training unter Höhenbedingungen die Leistungsfähigkeit in der Höhe aufgrund der einsetzenden Akklimationsvorgänge verbessert. Deshalb sollten Athleten in Disziplinen mit mindestens mehrminütiger Belastungsdauer rechtzeitig, in der Regel ca. 1 -2 Wochen vor Wettkampfbeginn in höher gelegenen Orten anreisen. Bei der Terminierung der Anreise sollte allerdings bedacht werden, dass nicht nur Erfahrungsberichte von Athleten und Trainern, sondern auch die Resultate wissenschaftlicher Untersuchungen auf eine individuell unterschiedliche Höhenverträglichkeit hin-

Summary

Aerobic performance capacity at high altitude is improved after altitude training. However, the issue of whether altitude training enhances sea level performance remains a controversial topic. The training strategy: "live high - train low" was favoured by some investigators in recent years. This model is based on the assumption that altitude acclimatization combined with sea level training is superior to equivalent sea level or altitude training because it leads to increased erythropoiesis without a reduction of training intensity in hypoxia. For all forms of altitude training the duration and magnitude of hypoxia necessary to cause significant reactions in altitude acclimatization for an improvement of aerobic performance capacity at sea level are not known. There is some evidence that individual variation plays an important role in the response to altitude training with respect to the reduction and improvement of aerobic performance capacity during altitude exposure as well as altitude acclimatization.

Key words: altitude training, aerobic performance capacity, hypoxia, acclimatization, erythropoiesis

weisen (6, 7, 23, 26). Deutliche interindividuelle Unterschiede zeigten sich sowohl in der Reduktion der Leistungsfähigkeit bei akuter Höhenexposition als auch hinsichtlich der Akklimationsreaktionen und der Leistungsverbesserung nach Akklimation. Dieser Aspekt sollte nach Möglichkeit berücksichtigt werden, wenn demnächst Trainer und Betreuer vor der Frage stehen, welcher Athlet wie zeitig vor den Skilanglauf- und Biathlonwettkämpfen der Olympischen Winterspiele 2002 in ca. 1800 m Höhe nach Park City anreist.

Die individuell unterschiedlichen Reaktionen auf Hypoxieexposition sind wahrscheinlich auch eine Erklärung für zum Teil widersprüchliche Ergebnisse zum Höhentraining. So konnte die Frage, ob das klassische Höhen Trainingslager ("oben leben, oben trainieren") effektiver ist als ein vergleichbares Training im Tiefland, nach wissenschaftlichen Kriterien bisher nicht sicher beantwortet werden. Gleiches gilt für die Form des Höhentrainings, bei der das tägliche Leben im Tiefland und das Training in Hypoxie stattfinden ("unten leben, oben trainieren"). Für diese Form des Höhen-

Tabelle 1: Übersicht über Ergebnisse kontrollierter Studien zu der Trainingsmodalität „oben wohnen – unten trainieren“. *: Bisher nur als Abstract veröffentlicht; ⇔: keine signifikante Änderung; ↑: signifikanter Anstieg; ---: kein Ergebnis berichtet.

Untersucher	Probanden	Hypoxieexposition	Erythropoetin	Retikulozyten	Erythrozytenmasse	Leistungsfähigkeit
Laitinen H et al. 1995 *	7 Sportler	2500 m, 20–28 Tage, 16 – 18 Std. tägl. „Höhenhaus“	↑	--	↑	--
Puranen AS et al. 1996 *	5 Ausdauer-sportler	2500 m, 5 Tage, ? Std. tägl. „Höhenhaus“	↑	↑	--	--
Levine/Stray-Gundersen; 1997; Chapman 1998	13 College-läufer	2500 m, 28 Tage, natürliche Höhe	↑	--	↑	↑ VO ₂ max, 5000 m-Lauf
Dehnert et al. 1997 *	11 Triathleten	1956 m, 14 Tage, 14 Std. tägl. natürliche Höhe	↑	↑	--	⇔ VO ₂ max, Schwelle
Ashenden et al. 1999	13 Ausdauer-sportler	3000 m, 23 Tage, 8–10 Std. tägl. „Höhenhaus“	--	⇔	⇔	--
Ashenden et al. 1999	6 Rad-fahrerinnen	2650 m, 12 Tage, 8–10 Std. tägl. „Höhenhaus“	--	⇔	⇔	--
Ashenden et al. 2000	11 Mittel-streckenläufer	2650 m 3x5 Tage, 8–11 Std. tägl. „Höhenhaus“	↑	⇔	--	--

trainings können künstliche Sauerstoffmangelbedingungen durch Absenken des Umgebungsluftdrucks in Unterdruckkammern, wie z.B. in Kienbaum in der ehemaligen DDR, oder durch Anreicherung der Umgebungsluft mit Stickstoff in Hypoxieräumen hergestellt werden. Eine weitere Möglichkeit stellt das Einatmen von Sauerstoffmangelgemischen aus Gasflaschen oder speziellen Gasmischsystemen dar.

Besondere Beachtung findet derzeit eine dritte Variante des Höhentrainings. Statt zum Training werden die künstlich hergestellten Hypoxiebedingungen in der trainingsfreien Zeit, vor allem beim Schlafen, genutzt durch Aufenthalt in Hypoxieräumen, „Stickstoffhäusern“ oder „Stickstoffzelten“, während das Training wie gewohnt in Normoxie erfolgt („oben leben bzw. schlafen, unten trainieren“). Dies geschieht in der Annahme, dass eine täglich mehrstündige Hypoxieeinwirkung ausreicht, um die am meisten gewünschte Akklimatisationsreaktion hervorzurufen: die durch Erythropoetinanstieg induzierte Erythropoese mit nachfolgender Zunahme der Erythrozytenmasse und damit der Sauerstofftransportkapazität.

In dem folgenden Übersichtsartikel werden die Erkenntnisse zu Akklimatisationsreaktionen in trainingsrelevanten Höhen (bis ca. 3000 m) dargestellt. Ferner wird erläutert, warum das Höhentraining nach dem Motto „oben wohnen – unten trainieren“ und eine mögliche individuelle Tauglichkeit für Höhentraining zur Zeit im Mittelpunkt des Interesses stehen.

Höhenakklimatisation

Die bei Hypoxieexposition einsetzenden Akklimatisationsvorgänge werden durch einen Abfall der arteriellen O₂-Sättigung (SaO₂) hervorgerufen, die z. B. in 2500 m Höhe ca. 91% beträgt gegenüber 96 % auf Meereshöhe. In natürlicher Höhe und in Unterdruckkammern ist dieser Abfall durch den

reduzierten Umgebungsluftdruck (in 2500 m Höhe ca. 560 mmHg gegenüber ca. 760 mmHg auf Meereshöhe) bedingt, da infolge des verminderten O₂-Partialdrucks (pO₂) auch der arterielle pO₂ (paO₂) abfällt von ca. 90 mmHg in Meereshöhe auf ca. 65 mmHg in 2500 m Höhe (hypobare Hypoxie). Ein Abfall der SaO₂ kann aber auch durch Reduktion des O₂-Gehaltes in der Inspirationsluft (fraktionelle inspiratorische O₂-Konzentration, FiO₂) durch Zumischung von Stickstoff erreicht werden. Um eine Höhe von 2500 m bei Luftdruck auf Meereshöhe zu simulieren (normobare Hypoxie), ist eine Absenkung der FiO₂ von normalerweise 20.9 % auf ca. 15.1 % nötig. Folgende Akklimatisationsreaktionen sind für das Höhentraining von Bedeutung:

Atmung

Eine sofort nach Hypoxieexposition einsetzende Akklimatisationsreaktion ist die Steigerung der Atmung in Ruhe und während Belastung, wodurch innerhalb weniger Tage ein Anstieg des in 2500 m Höhe initial auf ca. 55 mmHg reduzierten paO₂ auf ca. 65 mmHg erreicht wird. In der Literatur werden in verschiedenen Studien sehr unterschiedliche Steigerungen des maximalen Atemminutenvolumens um durchschnittlich 10 bis 42 % gefunden mit Hinweisen auf eine erhebliche interindividuelle Variation (7, 10). Während kein Zweifel darüber besteht, dass die hypoxieinduzierte Hyperventilation zu einer Leistungssteigerung in der Höhe führt, sind mögliche Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit nach Rückkehr in das Tiefland noch unklar. Eine gesteigerte Ventilation wird noch einige Tage nach Ende eines Höhenaufenthaltes beobachtet und könnte sich einerseits als Trainingseffekt positiv auf die Atemmuskulatur auswirken, andererseits aber auch infolge der gesteigerten Atemantwort auf Hypoxie einen erhöhten Energieverbrauch durch diese Muskulatur bei hoher Belastung bedeuten (35).

Sauerstoffdissoziationskurve

Bereits wenige Stunden nach Beginn der Hypoxieexposition ist ein Anstieg von 2,3-Diphosphoglycerat (2,3 - DPG) zu beobachten, der während eines länger dauernden Höhenttraininges erhalten bleibt. Hierdurch wird die Sauerstoffbindungskurve nach rechts verschoben und die O₂-Abgabe an das Gewebe erleichtert. Zwei Tage nach Rückkehr in das Tiefland ist diese Veränderung nicht mehr nachweisbar (19).

Erythropoese

Folgende Beobachtungen führten zu der Annahme, dass durch ein Höhenttraining auf legale Weise die O₂-Transportkapazität erhöht und die Leistungsfähigkeit im Tiefland verbessert werden könne: deutlich höhere Werte für Hämoglobin und Hämatokrit bei Höhenbewohnern, ein schneller Anstieg dieser Parameter bei Athleten im und nach Höhenttraining, schon wenige Stunden nach Höhenexposition erhöhte Erythropoetinspiegel und eine während des Höhenttrainings beobachtete Retikulozytose (4, 29). Zahlreiche anekdotische Berichte über sportliche Höchstleistungen nach Höhenttraining sowie die überragenden Erfolge der Läufer aus dem afrikanischen Hochland in den letzten Jahren untermauerten diese Theorie. Die Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen jedoch werfen einige Fragen auf.

Zunächst einmal gilt es festzuhalten, dass einfache Konzentrationsmessungen von Hämoglobin und Hämatokrit nicht ausreichen, um das Ausmaß der Erythropoese zu beurteilen und auf eine Zunahme der Sauerstofftransportkapazität zu schließen. So ist der zu Beginn eines Höhenttrainings zu beobachtende Hämoglobinkonzentrations- und Hämatokritanstieg nicht durch eine Vermehrung der Erythrozytenmasse sondern durch eine Abnahme des Plasmavolumens bedingt, deren Ursache bis heute ungeklärt ist. Zwar nimmt hierdurch die O₂-Transportkapazität pro definierter Menge Blut zu, das Blutvolumen jedoch ist reduziert. Die durch den Verlust an Plasmavolumen bedingte Reduktion des Blutvolumens hält ca. 3 - 4 Wochen an (29).

Um Veränderungen im Plasma- oder Erythrozytenvolumen zu erfassen, wird bei Sportlern entweder das Plasmavolumen durch Verdünnungsmessungen eines an Albumin bindenden Farbstoffes (Evans Blau) gemessen oder das Gesamtkörperhämoglobin durch Messung der Konzentrationsänderungen im CO-Hämoglobin nach Einatmung einer definierten Menge CO bestimmt.

Die Ergebnisse von Studien, in denen die Auswirkungen von Training in moderaten Höhen (1500 - 3000 m) auf die Erythrozytenmasse und das Blutvolumen unter Anwendung dieser Methoden untersucht wurden, sind kontrovers. In sieben Untersuchungen wurde ein signifikanter Anstieg der Erythrozytenmasse festgestellt, in sechs wurde dieser Effekt nicht gesehen (1, 5, 29). *Levine und Stray-Gundersen*, deren Arbeitsgruppen seit 1991 in mehreren Untersuchungen wiederholt signifikante Zunahmen der Erythrozytenmasse nach Höhenttraining fanden, äußerten die Vermutung, dass für eine erfolgreiche Stimu-

lation der Erythropoese ein mindestens 3-wöchiger Aufenthalt in einer Höhe von mindestens 2500 m erforderlich ist (16).

Grundsätzlich erhebt sich in diesem Zusammenhang die Frage, in welchem Ausmaß eine Zunahme der Erythrozytenmasse nach Höhenttraining erwartet werden kann. *Sawka et al.* (29) stellen in ihrem Übersichtsartikel fest, dass die von der Arbeitsgruppe um *Levine und Stray-Gundersen* gefundene durchschnittliche Zuwachsrate von 35 ml/Woche nahe an dem bei maximaler Stimulation durch Erythropoetinjgaben gefundenen Wert von 50 ml/Woche liegt, obwohl in dem Probandenkollektiv auch "Non-Responder" beschrieben wurden, bei denen es zu keiner signifikanten Erythropoese kam. Sie folgern deshalb, dass einzelne Probanden sogar eine noch höhere Zunahme aufgewiesen haben, die durch eine besondere genetische Prädisposition erklärt werden müsste. Auf der anderen Seite fanden *Ashenden et al.* bei Ausdauersportlern, die in normobarer Hypoxie übernachteten und in Normoxie trainierten, keine signifikante Stimulation der Erythropoese (Tab. 1). Aufgrund eines Vergleichs der in moderater Höhe gemessenen Erythropoetinspiegel mit denen bei einer Erythropoetinbehandlung erreichten vermuteten sie, dass der relativ geringe Erythropoetinanstieg bei intermittierender Hypoxieexposition nicht ausreicht, um die Erythropoese effektiv zu stimulieren (1).

Muskulatur

Struktur, oxidative Kapazität, Pufferkapazität

Die theoretisch erwartbaren Akklimatisationsreaktionen in der Muskulatur entsprechen denen, die bei einem regelmäßigen Ausdauertraining beobachtet werden: Zunahme der Kapillarisation, der Mitochondrienzahl und der Aktivität der oxidativen Enzyme (25, 35). In muskelbiopsischen Untersuchungen wurden zu dieser Frage uneinheitliche und zum Teil widersprüchliche Ergebnisse erzielt (10). Übereinstimmung besteht darin, dass sich die Muskelfaserverteilung durch Höhenttraining nicht verändert. In Studien, in denen jeweils ein Bein in Normoxie, das andere mit gleicher absoluter Belastungsintensität in Hypoxie trainiert wurde, zeigte sich eine signifikant größere Zunahme der Aktivität der Citratsynthetase im unter Hypoxiebedingungen trainierten Bein. Die Kapillarisation änderte sich jeweils nicht (20, 31). In Muskelbiopsien von Sportlern, die in einem Höhenttraining mit gleicher relativer Belastungsintensität wie eine Kontrollgruppe im Tiefland trainierten, waren die Befunde nicht so eindeutig (21, 28, 32). Deshalb gewinnt man den Eindruck, dass Anpassungsreaktionen im oxidativen Muskelstoffwechsel vor allem dann zu erwarten sind, wenn Hypoxie als zusätzlicher Reiz zur Steigerung der Belastungsintensität genutzt wird.

Darüber hinaus wurde eine verbesserte Pufferkapazität in der Muskulatur von Skilangläufern bzw. Mittel- und Langstreckenläufern nach Höhenttraining beschrieben (21, 28). Somit sind durchaus auch günstige Auswirkungen auf die anaerobe Leistungsfähigkeit denkbar, die in diesem Zusammenhang bisher meist vernachlässigt wurden.

Leistungsfähigkeit in der Höhe**Veränderungen der Leistungsfähigkeit in der Höhe**

Die maximale Sauerstoffaufnahme ($VO_2\max$) als wichtiges Maß der aeroben Leistungsfähigkeit nimmt mit zunehmender Höhe ab. Im Mittel kann man von einer Reduktion von ca. 1% je 100 m bei Höhen über 1500 m ausgehen (12, 16). Allerdings ist zu bedenken, dass bei Ausdauertrainierten aufgrund des häufig schon in Normoxie bei Maximalbelastung zu beobachtenden Abfalls der SaO_2 die Reduktion der $VO_2\max$ in Hypoxie ausgeprägter ist als bei Untrainierten und schon in geringer Höhe (900 m) signifikant wird (9, 33). Aufgrund dieser Leistungsreduktion findet ein Höhenttraining in der Regel nur in moderaten Höhen und nicht höher als 3000 m statt.

Die Abnahme der Ausdauerleistungsfähigkeit in Hypoxie ist ferner an einer Linksverschiebung der Laktatleistungskurve und folglich auch geringerer Leistung an der individuellen Laktatschwelle erkennbar. In der Höhe sind somit bei gleicher absoluter Submaximalbelastung die Laktatkonzentrationen höher, während gleichzeitig der O_2 -Verbrauch niedriger liegt als im Tiefland (14, 27, 32, 34).

Mit zunehmender Dauer eines Höhenaufenthaltes verbessert sich die Ausdauerleistungsfähigkeit infolge der beschriebenen Akklimatisationsreaktionen, ist aber weiterhin geringer als im Tiefland. Objektivierbar wird dies durch einen Anstieg der $VO_2\max$ und eine Rechtsverschiebung der Laktatleistungskurve, die dann zwischen der bei akuter Hypoxieexposition und der im Tiefland ableitbaren Kurve verläuft (27). Gleichzeitig ist die bei Maximalbelastung erreichbare Laktatkonzentration reduziert ["Laktatparadox"(13)]. Bei ausdauertrainierten Sportlern wurden während Submaximalbelastungen sofort nach Ende eines Höhenttrainings im Tiefland signifikant niedrigere Laktatkonzentrationen gemessen als vorher. Schon 14 Tage später lagen die Laktatwerte wieder auf dem Ausgangsniveau (10). Die beschriebenen Laktatveränderungen werden einerseits auf eine verbesserte oxidative Kapazität der Muskulatur zurückgeführt, aber auch die bereits erwähnte Erhöhung der Pufferkapazität wäre als Erklärung hierfür denkbar (18, 21, 28, 32).

Interindividuelle Variabilität in der Reaktion auf Hypoxieexposition.

Nicht nur das Ausmaß der Leistungsreduktion bei akuter Höhenexposition scheint individuell unterschiedlich zu sein, sondern auch die Steigerung der Leistungsfähigkeit während eines länger dauernden Höhenaufenthaltes. So fanden *Pugh* (23) sowie *Daniels/Oldrige* (7) bei Mittelstreckenläufern der internationalen Spitzenklasse am Anfang eines Höhenttrainings in 2300 m $VO_2\max$ -Reduktionen zwischen 8.8 und 22.3 % bzw. 4.7 und 20.9 %. *Karlsen et al.* (12) aus der Arbeitsgruppe von *Stray-Gundersen* beschrieben bei ausdauertrainierten Männern bei akuter Exposition in normobarer Hypoxie (3300 m) eine interindividuell unterschiedliche Reduktion der $VO_2\max$ zwischen 10 und 22% (7, 11, 21). Aus den beiden Untersuchungen im Höhenttraining von Spitzenläufern geht ferner hervor, dass auch die Leistungssteige-

rungen im Verlauf eines Höhenttrainings individuell unterschiedlich sind. Beide Untersucher fanden bei fast allen Läufern einen Anstieg der $VO_2\max$ von individuell unterschiedlicher Größe. In der Studie von *Pugh* (23) lag er zwischen 7 und 12%, in der Untersuchung von *Daniels/Oldrige* (7) zwischen 5 und 16 %. Die Leistung in einem 3-Meilen-Lauf (23) wurde um 9 - 35 s (1 - 7%) verbessert. Jeweils ein Läufer verschlechterte sich im Laufe des Höhenttrainings.

In einer neueren Veröffentlichung postulieren *Chapman et al.* (6) aus der Arbeitsgruppe von *Levine*, dass es "Responder" und "Non-Responder" auf Höhenttraining gibt. Sie fanden nach Höhenttraining bei den Läufern die 5000 m-Zeit im Tiefland verbessert, deren Leistungsfähigkeit in der Höhe nicht zu stark reduziert war und die somit näher an der Geschwindigkeit trainierten, die bei einem vergleichbaren Training im Tiefland gewählt worden wäre. Gleichzeitig war bei den Athleten der Erythropoetinanstieg in der Höhe am größten, die nach dem Höhenttraining eine Steigerung ihrer Erythrozytenmasse und $VO_2\max$ aufwiesen (6). Diese individuell unterschiedliche Erythropoetinantwort und die oben beschriebene interindividuelle Variation in der beobachtbaren Hyperventilation weisen auf individuell unterschiedlich ausgeprägte Akklimatisationsreaktionen hin.

Konsequenzen für das Höhenttraining

Soll in der Höhe mit gleicher relativer Intensität wie im Tiefland trainiert werden, muss diese reduziert und im Laufe eines Höhenaufenthaltes angepasst werden. Die Trainingssteuerung in der Höhe ist erschwert, da neben dem Laktat auch das Herzfrequenzverhalten verändert ist. Meistens wird über eine niedrigere maximale Herzfrequenz als im Tiefland berichtet, aber auch diesbezüglich existieren Hinweise auf eine interindividuelle Variabilität (10). In der ehemaligen DDR wurden zur Trainingssteuerung in der Höhe zahlreiche Erfahrungen gesammelt und von *Fuchs/Reiss* veröffentlicht (11). Bedenkt man die vielen Hinweise auf individuell unterschiedliche Reaktionen auf Höhenexposition, so sind hierdurch bedingte Fehler in der Wahl der Trainingsintensität eine naheliegende Erklärung dafür, dass einige Sportler nicht von einem Höhenttraining profitieren [(45 % deutsche Ausdauersportler/innen konnten die Wettkampfvorbereitung im Olympiajahr 1995/96 nach einem Höhenttraining nicht erfolgreich abschließen (25)].

Formen des Höhenttrainings**Oben leben - oben trainieren.**

Bei diesem klassischen Höhenttraining verspricht man sich eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit im Tiefland durch eine Vermehrung der Erythrozytenmasse, eine Erhöhung der oxidativen Kapazität in der Muskulatur sowie möglicherweise auch der Pufferkapazität. Die Ergebnisse kontrollierter wissenschaftlicher Untersuchungen sind widersprüchlich (10). Interessant ist das Ergebnis einer - allerdings unkontrollierten- Untersuchung, in der fünf von sechs Spitzenläufern nach intermittierendem Höhenttraining (2300 m) nicht

nur ihre $VO_2\text{max}$ zum Teil erheblich steigern, sondern auch ihre Zeit in einem 3-Meilen Lauf deutlich verbessern konnten (7). Diese Läufer versuchten, in der Höhe mit gleicher absoluter Intensität zu trainieren wie im Tiefland. Aus einer Veröffentlichung von *Niess et al.* (22) über das Training der deutschen Mittel- und Langstreckler in Höhen von 1800 - 2100 m geht hervor, dass bei Tempolaufprogrammen in der Höhe trotz Reduktion der Trainingsintensität höhere Laktatkonzentrationen erreicht wurden als im Tiefland. Das führt zu der Vermutung, dass ein Training in Hypoxie möglicherweise zu einer im Tiefland nur schwer zu verwirklichenden Steigerung der Trainingsintensität führt und somit eine Leistungsverbesserung im Tiefland nach sich ziehen könnte.

Unten leben - oben trainieren.

Diese Art des Höhentrainings kam in der ehemaligen DDR als Vorbereitung auf ein klassisches Höhentraining zum Einsatz unter der Vorstellung, dass hierdurch die Höhenakklimatisation gefördert werden könne. Wissenschaftliche Veröffentlichungen liegen hierzu nicht vor. Wie bereits ausgeführt, ist es denkbar, dass Hypoxie als zusätzlicher Reiz zu einer Steigerung der Trainingsintensität führen und damit vor allem den Muskelstoffwechsel beeinflussen könnte. Um eine Zunahme der Erythrozytenmasse zu erreichen, sind die Hypoxieexpositionen hierbei sicherlich zu kurz.

Oben leben/schlafen - unten trainieren.

Um die Schwierigkeiten bei der Trainingssteuerung in der Höhe zu vermeiden, die Akklimatisationsreaktionen aber zu nutzen, halten sich bei dieser Form des Höhentrainings die Sportler in ihrer Freizeit in Hypoxie auf und führen ihr Training wie gewohnt im Tiefland durch. *Levine/Stray-Gundersen* (17) zeigten in einer kontrollierten Studie mit Collegeläufern, dass die Sportler, die in einer Höhe von 2500 m wohnten, ihr Training aber in ca. 1300 m Höhe durchführten, sowohl ihre $VO_2\text{max}$, ihre Erythrozytenmasse als auch ihre 5000 m-Zeit im Tiefland verbessern konnten. Hingegen konnten diejenigen, die in 2500 m Höhe wohnten und trainierten, zwar $VO_2\text{max}$ und Erythrozytenmasse, nicht aber ihre 5000 m -Zeit steigern. Eine dritte im Tiefland vergleichbar trainierende Gruppe verbesserte sich überhaupt nicht (17). Der Kritik, dass diese Ergebnisse mit drittklassigen Läufern erzielt wurden, traten die Untersucher mit einer (unkontrollierten) Studie mit Spitzenläufern entgegen, die ein vergleichbares Resultat brachte (30). Eine in Deutschland durchgeführte Studie konnte diese Ergebnisse bei Triathleten, die zwei Wochen in 1956 m Höhe schliefen und in 700 m Höhe trainierten, nicht bestätigen (8). Hier gilt es allerdings zu bedenken, dass sowohl die Höhe als auch die Dauer der Hypoxieexposition deutlich geringer waren.

Da ein solches Höhentraining logistisch nur an wenigen Orten zu verwirklichen ist, wurden in den letzten Jahren zunächst in Vuokatti (Finnland), später an weiteren Orten "Höhenhäuser" ("Stickstoffhäuser") gebaut und zuletzt auch "Hypoxiezelte" auf den Markt gebracht. Eine finnische Arbeitsgruppe um *Rusko* beobachtete bei Sportlern, die 16 - 18 Stunden täglich für 20 - 28 Tage in einem Höhenhaus ent-

sprechend ca. 2500 m Höhe verbrachten, einen signifikanten Anstieg sowohl der Erythropoetinkonzentration als auch der Erythrozytenmasse. Bei einer anderen Gruppe von Ausdauersportlern beschrieben sie eine signifikante Retikulozytose nach 5 Nächten in dieser Höhe (15, 24). Hingegen fanden *Ashenden et al.* aus einer australische Arbeitsgruppe weder einen Anstieg der Erythrozytenmasse noch eine signifikante Retikulozytose bei männlichen Ausdauersportlern nach 23 Nächten in 3000 m Höhe (jeweils ca. 8 -10 Stunden) oder Radfahrerinnen nach 12 Nächten in 2650 m Höhe (jeweils 8-11 Stunden), (2, 3). Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die zu dieser Trainingsmodalität vorliegenden Untersuchungsergebnisse.

Aus diesen widersprüchlichen Untersuchungsergebnissen leiten sich die Fragen ab, wie hoch, wie viele Stunden täglich und über wie viele Wochen sich ein Sportler in seiner trainingsfreien Zeit in Hypoxie aufhalten muss, um die Erythropoese signifikant zu stimulieren und eine Zunahme der Erythrozytenmasse zu erreichen.

Fazit und Ausblick

Die lange Zeit viel und kontrovers diskutierte Frage, ob bei Spitzensportlern ein Höhentraining zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit im Tiefland wirkungsvoller ist als ein vergleichbares Training auf Meereshöhe, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht präzise zu beantworten. Dies hat damit zu tun, dass Hochleistungssportlern nicht wie anderen Probanden ein Losentscheid zugemutet werden kann, ob sie einem standardisierten Training in der Höhe oder im Tiefland zugeteilt werden. Auch sind weitere Einflussgrößen (Klima, Motivation, Gruppendynamik, etc.) nur schwer zu evaluieren. Im Mittelpunkt des gegenwärtigen Forschungsinteresses stehen die individuelle Tauglichkeit für Höhentraining und die Möglichkeiten, die sich durch Hypoxieexposition und Höhenakklimatisation in der trainingsfreien Zeit ergeben können.

Literatur

- (1) *Ashenden MJ, Gore CJ, Dobson GP, Boston TT, Parisotto R, Emslie KR, Trout GJ, Hahn AG:* Simulated moderate altitude elevates serum erythropoietin but does not increase reticulocyte production in well-trained runners. *Eur J Appl Physiol* 81 (2000) 428-435.
- (2) *Ashenden MJ, Gore CJ, Martin DT, Dobson GP, Hahn AG:* Effects of a 12-day „live high, train low“ camp on reticulocyte production and haemoglobin mass in elite female road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 80 (1999) 472-478.
- (3) *Ashenden MJ, Gore CJ, Dobson GP, Hahn AG:* „Live High, train low“ does not change the total haemoglobin mass of male endurance athletes sleeping at a simulated altitude of 3000 m for 23 nights. *Eur J Appl Physiol* 80 (1999) 479-484.
- (4) *Berglund B:* High-Altitude Training. Aspects of Haematological Adaptation. *Sports Med* 14 (1992) 289-303.
- (5) *Böning D:* Altitude and Hypoxia Training - A Short Review. *Int J Sports Med* 18 (1997) 565-570.
- (6) *Chapman RF, Stray-Gundersen J, Levine BD:* Individual variation in response to altitude training. *J Appl Physiol* 85 (1998) 1448-1456.
- (7) *Daniels J, Oldridge N:* The effects of alternate exposure to altitude and sea level on world-class middle-distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 2 (1970) 107-112.

- (8) *Dehnert C, Peterle C, Lormes W, Liu Y, Baur S, Steinacker J, Hütler M, Böning D, Gabriel H, Gomez-Islinger R, Kubanek B, Lehmann M*: Influence of the training concept „sleep high – train low“ on erythropoiesis and performance level. *Int J Sports Med* 19 (1998) S15.
- (9) *Ferretti G, Moia C, Thomet J-M, Kayser B*: The decrease of maximal oxygen consumption during hypoxia in man: a mirror image of the oxygen equilibrium curve. *J Physiol* 498 (1997) 231-237
- (10) *Friedmann B, Bärtsch P*: Möglichkeiten und Grenzen des Höhentrainings im Ausdauersport. *Leistungssport* 29 (1999) 43-48.
- (11) *Fuchs U, Reiss M*: Höhentraining: das Erfolgskonzept der Ausdauersportarten. Philippka, Münster. Trainerbibliothek 27 (1998).
- (12) *Karlsen T, Hallen J, Stray-Gundersen J*: Individual differences in the relationship between $\dot{V}O_{2,max}$ and acute moderate hypobaric hypoxia. *Med Sci Sports Exerc* 32 (2000) S48.
- (13) *Kayser B*: Lactate during exercise at high altitude. *Eur J Appl Physiol* 74 (1996) 195-205.
- (14) *Koistinen P, Takala T, Martikkala V, Leppäluoto J*: Aerobic fitness influences the response of maximal oxygen uptake and lactate threshold in acute hypobaric hypoxia. *Int J Sports Med* 26 (1995) 78-81.
- (15) *Laitinen H, Alopaeus K, Heikkinen R, Hietanen H, Mikkelsen L, Tikkanen H, Rusko HK*: Acclimatization to living in normobaric hypoxia and training in normoxia at sea level in runners. *Med Sci Sports Exerc* 27 (1995) S109.
- (16) *Levine BD, Stray-Gundersen J*: A practical approach to altitude training: Where to live and train for optimal performance enhancement. *Int J Sports Med* 13 (1992) S209-S212.
- (17) *Levine BD, Stray-Gundersen J*: „Living high-training low“: effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *J Appl Physiol* 83 (1997) 102-112.
- (18) *Maher JT, Jones LG, Hartley H*: Effects of high-altitude exposure on sub-maximal endurance capacity of men. *J Appl Physiol* 37 (1974) 895-898.
- (19) *Mairbäurl H*: Red blood cell function in hypoxia at altitude and exercise. *Int J Sports Med* 15 (1994) 51-63.
- (20) *Melissa L, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Cipriano N, Green HJ*: Skeletal muscle adaptations to training under normobaric hypoxic versus normoxic conditions. *Med Sci Sports Exerc* 29 (1997) 238-243.
- (21) *Mizuno M, Juel C, Bro-Rasmussen T, Mygind E, Schibye B, Rasmussen B, Saltin B*: Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol* 68 (1990) 496-502.
- (22) *Niess AM, Röcker K, Baumann I, Striegler H, Dickhuth H-H*: Laktatverhalten bei extensiven Tempolastbelastungen unter Flachland- und moderaten Höhenbedingungen. *Leistungssport* 29 (1999) 49-53
- (23) *Pugh LGCE*: Athletes at altitude. *J Physiol* 192 (1967) 619-646.
- (24) *Puranen AS, Rusko HK*: On- and off-responses of epo, reticulocytes, 2,3-DPG and plasma volume to living high, training low. *Med Sci Sports Exerc* 28 (1996) S159.
- (25) *Reiss M*: Hauptrichtungen des Einsatzes und der Methodik des Höhentrainings in den Ausdauersportarten. *Leistungssport* 4 (1998) 21-28.
- (26) *Robergs RA, Quintana R, Parker DL, Frankel CC*: Multiple variables explain the variability in the decrement in $\dot{V}O_{2,max}$ during acute hypobaric hypoxia. *Med.Sci.Sports Exerc.* 30 (1998) 869-879.
- (27) *Roskamm H, Samek L, Weidemann H*: Leistung und Höhe. Knoll AG, Ludwigshafen (1968).
- (28) *Saltin B, Kim CK, Terrados N, Larsen H, Svedenhag J, Rolf CJ*: Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports* 5 (1995) 222-230.
- (29) *Sawka MN, Convertino VA, Eichner ER, Schnieder SM, Young AJ*: Blood volume: importance and adaptations to exercise training, environmental stresses, and trauma/sickness. *Med Sci Sports Exerc* 32 (2000) 332-348.
- (30) *Stray-Gundersen J, Chapman RF, Levine BD*: HiLo Training improves performance in elite runners. *Med Sci Sports Exerc* 30 (1998) S35.
- (31) *Terrados N, Jansson E, Sylven C, Kaijser L*: Is hypoxia a stimulus for synthesis of oxidative enzymes and myoglobin? *J Appl Physiol* 68 (1990) 2369-2372.
- (32) *Terrados N, Melichna J, Sylven C, Jansson E, Kaijser L*: Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 57 (1988) 203-209.
- (33) *Terrados N, Mizuno M, Andersen H*: Reduction in maximal oxygen at low altitudes; role of training status and lung function. *Clin Physiol* 5 (1985) 75-79.
- (34) *Wagner PD, Gale GE, Moon RE, Torre-Bueno JR, Stolp BW, Saltzman HA*: Pulmonary gas exchange in humans exercising at sea level and simulated altitude. *J Appl Physiol* 61 (1986) 260-270.
- (35) *Wolski LA, McKenzie DC, Wenger HA*: Altitude training for improvements in sea level performance. Is there scientific evidence or benefit? *Sports Med* 22 (1996) 251-263.

Korrespondenzadresse:

Dr. Birgit Friedmann

Medizinische Klinik und Poliklinik, Abteilung VII: Sportmedizin

Medizinische Universitätsklinik Heidelberg

Im Neuenheimer Feld 710

69120 Heidelberg

Fax: 06221-565363

e-mail: birgit_friedmann@med.uni-heidelberg.de