

## **Untersuchung der Hämoglobinmenge bei Kenianischen Mittel- und Langstreckenläufern**

Walter Schmidt (Projektleiter)

Universität Bayreuth, Institut für Sportwissenschaft

### **Vorbemerkungen**

Das Projekt wurde planmäßig Anfang des Jahres 2005 begonnen. Ziel des ersten Jahres war es, eine Querschnittstudie im kenianischen Hochland in Eldoret zu initiieren, bei der Mittel- und Langstreckenläufer mit untrainierten Kontrollpersonen desselben Volksstammes verglichen werden sollten. Während eines ersten einwöchigen Aufenthaltes von zwei am Projekt beteiligten Wissenschaftlern in Kenia wurden konkrete Untersuchungstermine sowie die Messmodalitäten vereinbart. Als Versuchspersonen konnten durch die Vermittlung von Isabelle und Dieter Baumann die Athleten der Trainingsgruppe von Yobes Ondieki, einem ehemaligen Weltrekordhalter über 10.000 m, und von Brother Colm O'Connell, einem seit mehreren Jahrzehnten an der St. Patrick's High School in Iten (nahe Eldoret) tätigen Lehrer und Trainer, gewonnen werden. Es war geplant, die Leistungstests (maximale O<sub>2</sub>-Aufnahme) im Stadion von Eldoret durchzuführen und die Hämoglobinmenge in einem Fitnessstudio zu bestimmen.

Weiter wurde Kontakt zum „International Centre for East African Running Science“ unter der Leitung von Dr. Yannis Pitsiladis (University of Glasgow) aufgenommen, mit dem eine enge Kooperation vereinbart wurde. Über Herrn Vincent Onywera, einem kenianischer Wissenschaftler von der Kenyatta University in Nairobi, wurde ein Ethikantrag an die zuständige Kommission in Nairobi gestellt, der Kontakt zu kenianischen Sportbehörden beschafft sowie die Unterstützung bei der Auslösung der Messgeräte aus dem kenianischen Zoll vereinbart.

Dennoch konnte die für September/Oktober 2005 geplante Untersuchung aus organisatorischen Gründen (Zollprobleme bei der Einfuhr von Meßgeräten, Einführung von Kohlenmonoxid, siehe auch Zwischenbericht vom 27.09.2005) nicht stattfinden, so dass die Zielsetzung des Projekts und die Versuchsdurchführung modifiziert wurden.

Es wurde für April/Mai 2007 ein 6-wöchiges Trainingslager an der Universität Bayreuth geplant, an dem 10 Athleten der Trainingsgruppe von Yobes Ondieki unter der Leitung von zwei den Läufern vertrauten Trainern teilnahmen. Da alle Läufer in diesem Zeitraum mehrere internationale Wettkämpfe durchführten, wurde der Trainingsumfang gegenüber demjenigen in Eldoret geringfügig verringert. Das Training konnte unter optimalen Bedingungen stattfinden. Es standen einerseits die Sportanlagen der Universität Bayreuth ohne Einschränkungen zur Verfügung und es konnten die in unmittelbarer Nähe gelegenen Wald- und Parkanlagen genutzt werden. Die Unterbringung erfolgte in der nahe gelegenen Jugendherberge.

Während des Aufenthaltes verletzten sich zwei Läufer, was einerseits an einer Überlastung vor dem Aufenthalt in Deutschland, bzw. an einer übermäßigen Wett-

kampfteilnahme während des Aufenthaltes lag. Davon abgesehen traten keinerlei ernsthafte Probleme hinsichtlich Unterkunft, Verpflegung oder sozialer Aspekte auf. Alle Läufer würden es begrüßen, wieder nach Deutschland/Bayreuth kommen und an einem ähnlichen Programm teilnehmen zu können.

Bislang ist es noch keiner Wissenschaftlergruppe gelungen, eine ähnliche Studie mit Kenianischen Spitzenläufern über einen vergleichbar langen Zeitraum unter standardisierten Verhältnissen durchzuführen, so dass die Änderung des ursprünglichen Versuchsplans keinerlei Einbuße in der Qualität der Ergebnisse mit sich brachte und zudem einen wichtigen neuen Aspekt, d. h. die Adaptation an Flachlandbedingungen, ermöglichte.

## Einleitung und Problemstellung

Ostafrikanische Läufer, und hier insbesondere kenianische Läufer, dominieren seit 4 Jahrzehnten in nahezu allen Langstreckendisziplinen. Erklärungsansätze für diese Überlegenheit reichen von physiologischen, biomechanischen, sozialen und ökonomischen Ursachen, wobei sich bislang kein Parameter als allein entscheidender herausgestellt hat. Aus physiologisch basierten Studien ist bislang bekannt, dass die Laufökonomie (Saltin et al., 1995, S. 209-221; Weston et al., 2000) und auch die fraktionelle Ausschöpfung der  $VO_{2max}$  (Weston et al., 2000; Bosch et al., 1990) bei kenianischen Läufern besser ausgeprägt ist, als bei vergleichbaren europäischen Läufern. Die zugrundeliegenden Ursachen für diese Vorteile wurden auf der sauerstoffverbrauchenden Seite, d.h. der muskulären Ebene gesucht. Kenianische Läufer zeigen jedoch im Hinblick auf die Muskelfaserverteilung, die Kapillarisation oder auch die Aktivität des oxydativen Enzyms Citrat Synthase keine Unterschiede zu skandinavischen Läufern (Saltin et al., 1995, S. 222-230). Lediglich die Aktivität des Fettstoffwechsel-Enzyms 3-Hydroxy-Acyl-CoA-Dehydrogenase (HAD) war bei den Kenianern um 20 % höher (Saltin et al., 1995, S. 222-230). Allein diese Ausprägung ist jedoch nicht der entscheidende Grund für Ihre hohe Ausdauerleistungsfähigkeit.

Über das Sauerstoff-transportierende System liegen bislang noch keine Daten vor. Die von Moore et al. (2007) dargestellten höheren Hämoglobinkonzentrationen [Hb] bei kenianischen Läufern könnten ein Indiz für eine hämatologische Höhenadaptation sein, geben jedoch keine Anhaltspunkte über die Quantität des Sauerstofftransports. Diesen zu charakterisieren setzt voraus, die totale Hämoglobinmenge (tHb-Menge), das Blutvolumen (BV) und die Herzgröße zu kennen, da diese Parameter in engem Zusammenhang mit der  $VO_{2max}$  stehen (Schmidt & Prommer, 2008). Kolumbianische professionellen Strassenradrennfahrer, die in der Höhe leben und trainieren (2600 m), besitzen eine 60 % höhere tHb-Menge bzw. ein 50 % höheres BV als Untrainierte von Meereshöhe und 11 % bzw. 9 % höhere Werte als Radprofis aus dem Flachland (Schmidt et al., 2002). Es kann daher angenommen werden, dass auch bei kenianischen Läufern, die in Höhen von > 2000 m leben und trainieren, das Sauerstoff-transportierende System in ähnlichem Ausmaß verbessert ist. Diese Leistungsverbessernden Adaptationsvorgänge könnten durch Aufenthalte im Flachland, z. B. durch die Teilnahme an europäischen Wettbewerben, jedoch vermindert oder eliminiert werden, da der fehlende hypoxische Reiz eine Verminderung der tHb-Menge mit sich bringt. (Böning et al., 1997). Die Zeitspanne, der es bedarf, bis diese Verschlechterung eintritt, ist bislang noch nicht bekannt.

Das Ziel dieser Studie war es daher (1.) das Sauerstofftransportierende System, d. h. tHb-Menge, BV und Herzvolumen zu charakterisieren um eine mögliche Ursache der Leistungsdominanz von kenianischen Läufern aufzudecken und (2.) die genaue Zeitspanne zu definieren, bis hämatologische Anpassungserscheinungen, die in der Höhe erworben werden, im Flachland wieder verloren gehen.

## Praktisches Vorgehen

Zehn kenianische Läufer nahmen an der 6-wöchigen Studie in Bayreuth teil. Alle waren in der Höhe geboren und lebten und trainierten in der Gegend um Eldoret (2090 m). Acht der Athleten waren Langstreckenläufer mit einer mittleren 10-km-Bestzeit von  $28:29 \pm 00:27$  min, zwei waren 1500-m-Läufer ( $3:41$ ,  $3:38$  min). Als Kontrollgruppe dienten 13 deutsche Langstreckenläufer, von denen 11 in die Auswertung aufgenommen wurden.

Die Kenianischen Läufer wurden über 40 Tage im Laufe ihres normalen Trainings beobachtet. Eine erste Blutprobe wurde unmittelbar vor ihrem Abflug in Nairobi genommen und analysiert; die weiteren Blut-Tests (Blutvolumen, totale Hämoglobinmenge (tHb-Menge), Plasmavolumen, Hämoglobinkonzentration, Hämatokritwert, Retikulozyten) fanden in Bayreuth 26-30 h nach Ankunft im Flachland statt und wurden sechsmal in regelmäßigen Abständen wiederholt. Zu Beginn (Tag 2) und nach 34 Tagen wurde echokardiografisch die Herzgröße bestimmt. Des Weiteren wurden an den Tagen 2, 20 und 34 venöse Blutproben zur Ermittlung von Erythropoietin, des Eisenhaushalts und anderer hämatologischer Größen genommen.

Die  $VO_{2max}$  wurde viermal bestimmt; einmal nach 11 Tagen auf dem Laufband (Stufendauer 3 min, Steigerung der Geschwindigkeit um 2 km/h) sowie an Tag 4, 20 und 34 in einem Feld-Test (Stufendauer 1 min, Steigerung um 1 km/h).

Alle deutschen Läufer absolvierten den identischen Laufbandstufentest. Ebenso wurden alle o. g. Blutvolumina und hämatologischen Größen bei ihnen bestimmt.

## Zentrale Ergebnisse

### Körpergewicht und Körperfettgehalt

Das Körpergewicht der kenianischen Läufer war am Tag der Ankunft in Bayreuth um 9.3 kg geringer als das der deutschen Athleten (siehe Tab. 1), stieg jedoch im Verlauf der 6 Wochen von  $57.2 \pm 7.0$  kg auf  $60.2 \pm 7.9$  kg an. Der Gesamtanstieg von  $3.0 \pm 1.8$  kg kann zu  $2.1 \pm 1.0$  kg der Erhöhung der fettfreien Masse und zu  $0.9 \pm 0.9$  kg dem Anstieg von Körperfett zugeschrieben werden (siehe Abb. 1)

Tab. 1: *Anthropometrische Daten*

	<b>Kenianer (n=10)</b>	<b>Deutsche (n=11)</b>
Alter (Jahren)	25.5 ±4.0	25.2 ±2.4
Größe (cm)	175.7 ±10.0	180.3 ±6.6
Gewicht (kg)	57.2 ±7.0**	66.5 ±6.3
BMI (kg·m <sup>-1</sup> )	18.5 ±0.9**	20.4 ±0.9
Körperoberfläche (kg·m <sup>2</sup> )	1.70 ±0.16*	1.83 ±0.1
Körperfett (%)	9.9 ±2.1	10.5 ±2.5

Dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichung.  
Signifikanzangaben: \*p < 0.05, \*\* p < 0.01.

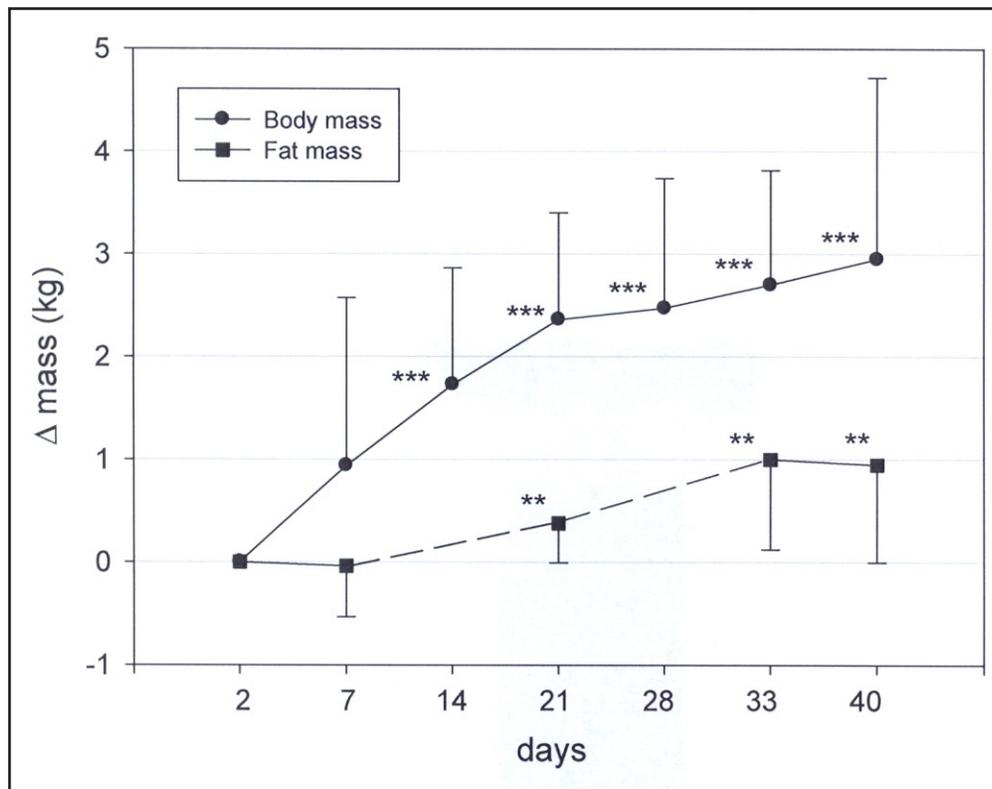


Abb. 1: Körpergewichtsentwicklung und Zunahme des Körperfettgehalts im Verlauf von 6 Wochen in Bayreuth.

## Hämoglobinmenge und Blutvolumina

Die Hämoglobinmenge der Kenianer war 21 h - 26 h nach Ankunft in Deutschland um 13 % geringer als die der Deutschen Läufer. Übereinstimmend war auch das Blut- und Plasmavolumen um 12 % bzw. 14 % reduziert (siehe Tab. 2). Berücksichtigt man jedoch das deutlich geringere Körpergewicht der Kenianer (Angabe pro kg Körpergewicht), so zeigt sich erstaunlicherweise, dass sie keine Vorteile in ihrer hämatologischen Anpassung besitzen. Alle Parameter sind mit denen der Deutschen vergleichbar (siehe Tab. 2).

Tab. 2: *Hämoglobinmenge und Blutvolumina* (\* $p < 0.05$ )

	<b>Kenianer (n=10)</b>	<b>Deutsche (n=11)</b>
tHb-Menge (g)	813 ±89*	935 ±117
Blutvolumen (ml)	5828 ±703*	6642 ±913
Plasmavolumen (ml)	3368 ±479*	3929 ±648
Erythrozytenvolumen (ml)	2460 ±293	2727 ±339
rel. tHb-Menge (g · kg <sup>-1</sup> )	14.2 ±1.0	14.0 ±0.7
rel. Blutvolumen (ml · kg <sup>-1</sup> )	101.9 ±4.5	99.6 ±5.8
rel. Plasamvolumen (ml · kg <sup>-1</sup> )	58.8 ±4.0	59.3 ±5.4
rel. Erythrozytenvol. (ml · kg <sup>-1</sup> )	43.1 ±3.1	40.9 ±2.0

Während des 6-wöchigen Aufenthaltes in Deutschland blieb die tHb-Menge innerhalb der ersten 2 Wochen konstant, fiel jedoch dann bis Tag 33 um 45 g (6 %) auf 767 ± 88 g ab (siehe Abb. 2A). Nach diesem Zeitpunkt schien der Flachlandwert erreicht zu sein, da bis zu Tag 40 keine weitere Reduktion zu sehen war. In diesem Zusammenhang reduzierte sich ebenso die relative tHb-Menge um 1.5 g/kg auf 12.8 ± 0.8 g/kg und war bereits in der 3. Woche signifikant niedriger als die der Deutschen (siehe Abb. 2B).

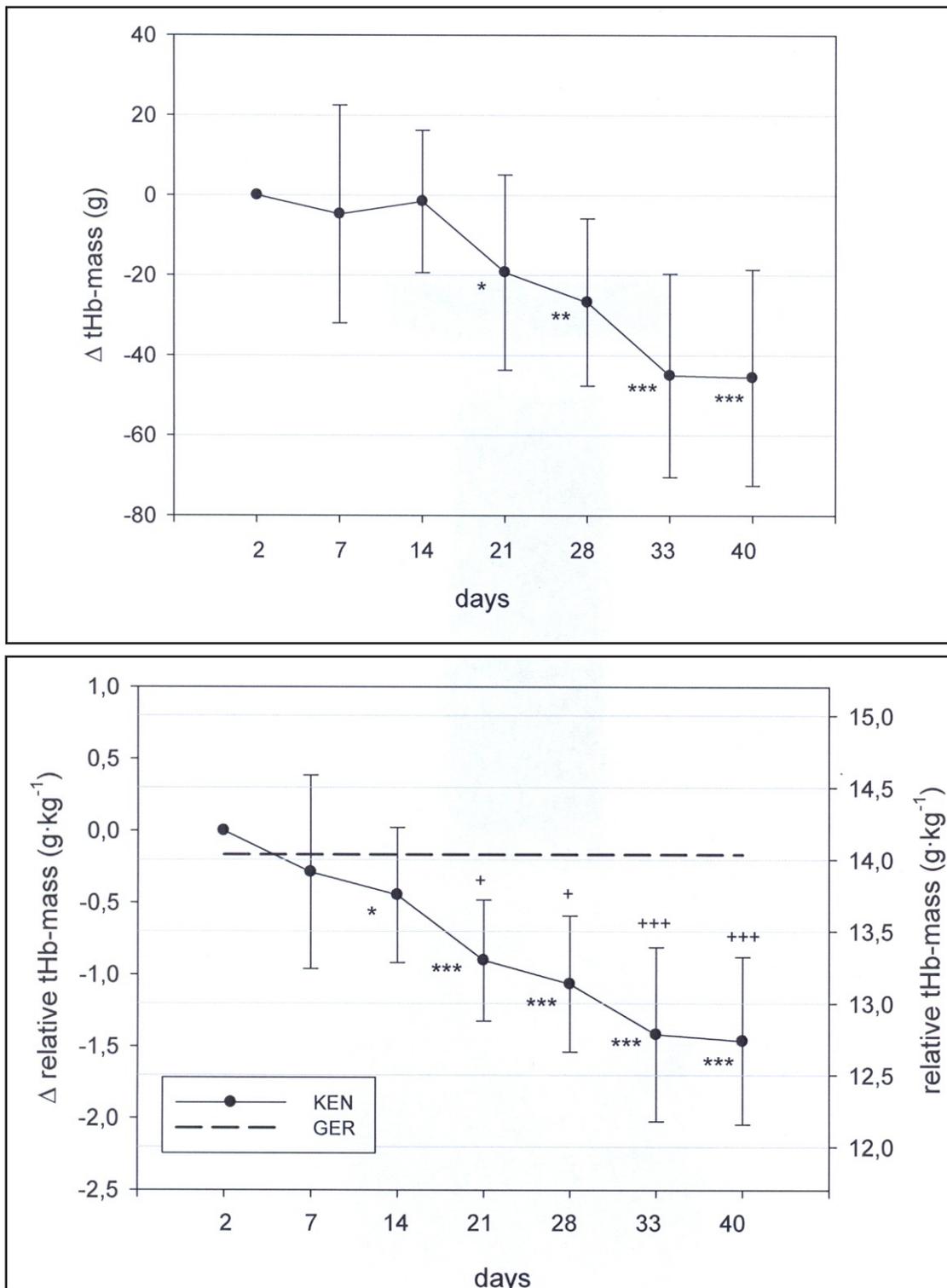


Abb. 2 A + B: Absolute und relative Hämoglobinmenge im Verlauf des 6-wöchigen Trainingslagers in Deutschland. Die gestrichelte Linie repräsentiert den Wert der Deutschen Athleten. Signifikante Unterschiede im Verlauf \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.01$ . Unterschiede zwischen Kenianer und Deutschen + $p < 0.05$ , +++ $p < 0.001$ .

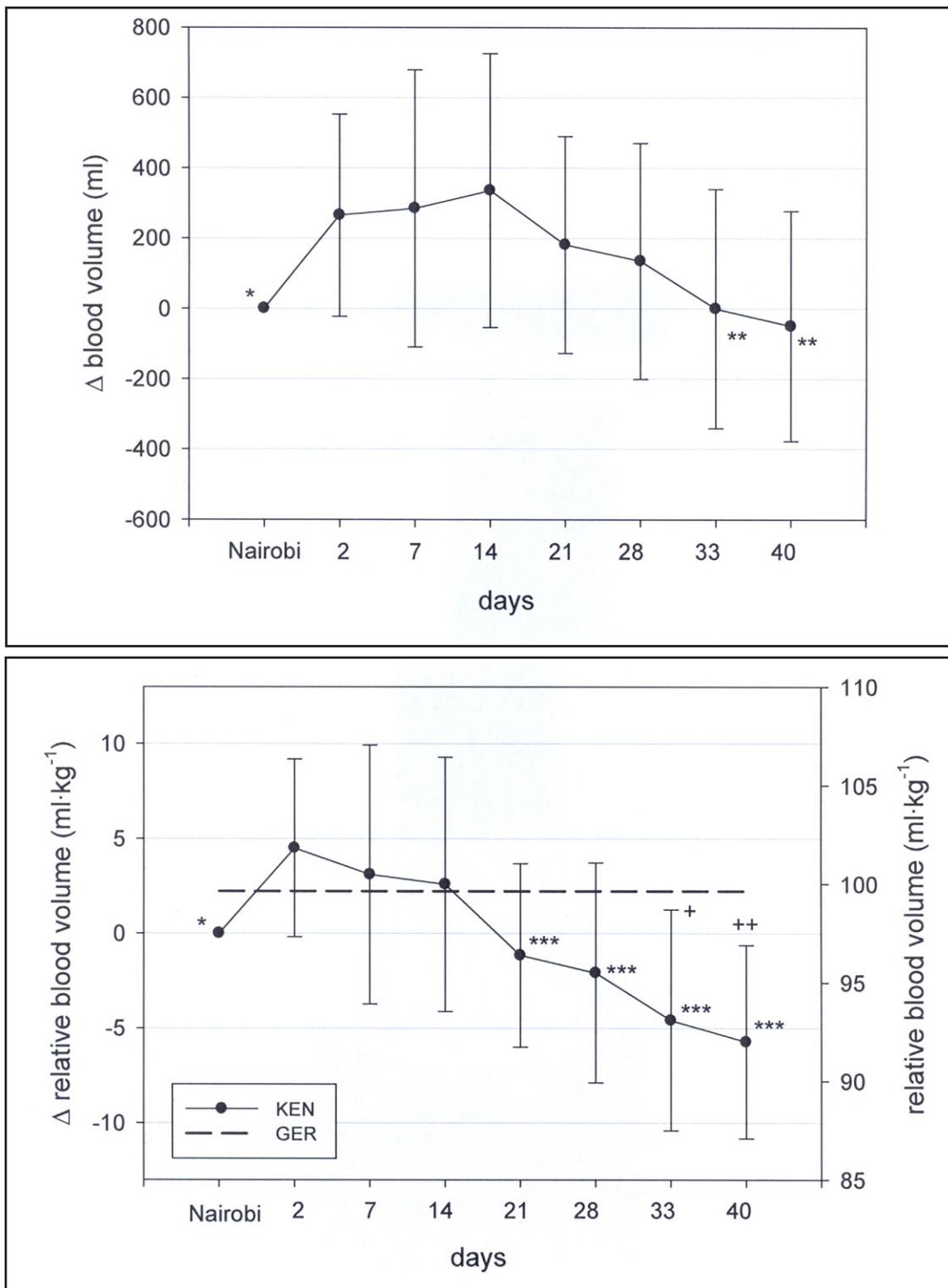


Abb. 2 C + D: Absolutes und relatives BV im Verlauf des 6-wöchigen Trainingslagers in Deutschland. Die gestrichelte Linie repräsentiert den Wert der Deutschen Athleten. Signifikante Unterschiede im Verlauf \* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ , \*\*\* $p < 0.001$ . Unterschiede zwischen Kenianer und Deutschen + $p < 0.05$ , ++ $p < 0.001$ .

Das BV war 26 - 30 h nach Ankunft im Flachland bereits um 4.8 % höher als in Nairobi und erreichte den höchsten Wert innerhalb von 2 Wochen (+6 %). Nach diesem Zeitpunkt kam es zu einer stetigen Abnahme bis der Ausgangswert aus Nairobi in der 5. Woche wieder erreicht war (siehe Abb. 2C). Das relative BV fiel ebenso wie die tHb-Menge nach Ankunft kontinuierlich bis Woche 6 ab (siehe Abb. 2D).

Das Plasmavolumen zeigte ein ähnliches Verhalten wie das Blutvolumen, war jedoch im Flachland stets höher als in Nairobi.

### Weitere hämatologische Daten

Die [Hb] fiel aufgrund der Plasmavolumenexpansion um 0.7 g/dl nach Ankunft im Flachland ab und erreichte somit ähnliche Werte wie die Deutschen Läufer (siehe Tab. 3). Der Hämatokrit zeigte ein gleiches Verhalten und war im Flachland um ~2.0 % geringer als in der Höhe. Die Retikulozytenzahl war bei den Kenianern ebenso hoch wie bei den Deutschen und war nur an Tag 7 vorübergehend etwas geringer.

Tab. 3: *Hämatologische Daten und Blutvolumina während des 6-wöchigen Aufenthaltes in Deutschland*

<b>Kenianer (n = 10)</b>	Nairobi	Tag 2	Tag 7	Tag 14	Tag 21	Tag 28	Tag 33	Tag 40	<b>Deutsche (n = 11)</b>
[Hb] (g · dl <sup>-1</sup> )	16.1* ±0.7	15.4 ±1.0	15.3 ±1.0	15.2 ±0.9	15.2 ±0.8	15.2 ±0.8	15.2 ±0.6	15.3 ±0.9	15.5 ±1.2
Hämatokrit (%)	+48.6* ±2.4 <sup>#</sup>	46.5 ±2.9	46.8 ±2.6	46.5 ±1.6	46.7 ±1.4	46.6 ±1.4	46.1 ±1.3	46.1 ±2.1	45.4 ±3.1
Retikulozyten (%)		1.3 ±0.4	1.1* ±0.3	1.3 ±0.4	1.2 ±0.3	1.4 ±0.3	1.3 ±0.2	1.4 ±0.4	1.1 <sup>a</sup> ±0.4
Erythrozytenvolumen (ml)		2460 ±293	2482 ±302	2489 ±307	2440 ±324	2411 ±317 <sup>#</sup>	2327** ±268 <sup>##</sup>	2294*** ±291 <sup>##</sup>	2727 ±339
Plasmavolumen (ml)	+3103* ±352 <sup>##</sup>	3368 ±479 <sup>#</sup>	3366 ±569 <sup>#</sup>	3410 ±521	3304 ±490 <sup>#</sup>	3287 ±494 <sup>#</sup>	3235 ±444 <sup>#</sup>	3219* ±441 <sup>#</sup>	3929 ±648

Signifikante Unterschiede innerhalb der kenianischen Gruppe gegen Tag 2: \* p < 0.05, \*\* p < 0.01. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen: <sup>#</sup>p < 0.05, <sup>##</sup>p < 0.01

<sup>a</sup>Berechnet aus der [Hb], die in Nairobi bestimmt wurde und dem MCHC von Tag 2.

<sup>a</sup>n = 6

## Herzgrößen

Das absolute Herzvolumen war bei den Kenianern um 21 % niedriger als das der Deutschen und blieb bis Tag 34 unverändert. Das relative Herzvolumen unterschied sich jedoch nicht signifikant von den Deutschen, war aber zum Ende der Studie aufgrund des Anstiegs des Körpergewichts um  $0.4 \pm 0.5$  ml/kg niedriger. Auch das linksventrikuläre Volumen war 16 % niedriger und blieb ebenso unverändert über den Beobachtungszeitraum (siehe Tab. 4).

Tab. 4: *Herzvolumina*

		Kenianer	Deutsche	Signifikanz
Herzvolumen	(ml)	$797 \pm 105$	$1013 \pm 161$	<0,01
rel. Herzvolumen	(ml·kg <sup>-1</sup> )	$14,0 \pm 1,5$	$15,2 \pm 2,0$	n.s.
LVM(Teichholz 1976)	(g)	$143 \pm 21$	$169 \pm 25$	<0,05
LVM(Devereux 1986)	(g)	$178 \pm 33$	$230 \pm 51$	<0,05

Daten der Kenianer stammen aus der ersten Messung am 2. Tag.

LVM: Linksventrikuläres Volumen

## Leistungstests (VO<sub>2max</sub> Tests)

Die relative VO<sub>2max</sub>, die nach einer Eingewöhnungsphase der Kenianer auf dem Laufband erhoben wurde, war mit derjenigen der Deutschen Läufer vergleichbar (siehe Tab. 5). Der Feldtest an Tag 4 nach Ankunft erzielte die gleichen Werte ( $3.95 \pm 0.55$  ml/min) wie auf dem Laufband 8 Tage später. Die absolute VO<sub>2max</sub> veränderte sich im Verlauf des Aufenthaltes nicht signifikant ( $3.83 \pm 0.14$  ml/min, Tag 20;  $3.87 \pm 0.24$  ml/min, Tag 34), wohingegen die relative VO<sub>2max</sub> aufgrund der Gewichtszunahme kontinuierlich absank.

Tab. 5: Leistungsdaten (\* $p < 0.01$ )

	<b>Kenianer (n=10)</b>	<b>Deutsche (n=11)</b>
VO <sub>2max</sub> (l · min <sup>-1</sup> )	4,09 ± 0,56*	4,71 ± 0,47
rel. VO <sub>2max</sub> (l · kg <sup>-1</sup> · min <sup>-1</sup> )	71,5 ± 5,0	70,7 ± 3,7
rel. VO <sub>2max</sub> (l · kg <sup>-0.75</sup> · min <sup>-1</sup> )	196,5 ± 14,6	201,5 ± 10,2
10km Bestzeit (min)	28:29 ± 00:27	30:39 ± 00:24

### Beinlängen und Umfänge

Die Gesamtbeinlänge der Kenianer unterscheidet sich nicht von denen der Deutschen, wohingegen der Unterschenkel deutlich länger, die Fußhöhe (von der Fußunterkante bis Knöchel) jedoch deutlich geringer ausfällt. Ebenso ist der maximale Oberschenkel- wie auch Unterschenkelumfang signifikant kleiner. Bezieht man die Beinlänge auf die Gesamtkörpergröße so ergibt sich für die Kenianer einer höherer Quotient, welcher aussagt, dass die Beine bezogen auf die Körpergröße länger sind als die der Deutschen.

Tab. 6: Beinlängen und Umfänge

	Kenianische Läufer	Deutsche Läufer	Signifikanzniveau
Beinlänge (cm)	104,9 ± 6,4	104,4 ± 3,3	k.S.
OS-Länge (cm)	55,2 ± 4,2	55,6 ± 2,0	k.S.
US-Länge (cm)	41,8 ± 2,3	39,8 ± 1,8	<0,05
Fußhöhe (cm)	8 ± 0,4	8,8 ± 0,4	<0,001
Max. OS-Umfang (cm)	48,2 ± 2,7	52,2 ± 3,1	<0,01
Max. US-Umfang (cm)	33,2 ± 1,7	37,2 ± 2,1	<0,001
Verhältnis Beinlänge/Körpergröße	0,597 ± 0,008	0,578 ± 0,010	<0,001
Verhältnis US-Länge/OS-Länge	0,757 ± 0,029	0,715 ± 0,035	<0,01
Verhältnis US-Umfang/OS-Umfang	0,688 ± 0,027	0,712 ± 0,024	<0,05

## Interpretation und Diskussion der Ergebnisse

Lange wurde vermutet, dass kenianische Läufer in Langstreckendisziplinen deshalb dominieren, weil sie aufgrund Ihrer Höhenadaptation, dem umfangreichen Training und der genetischen Selektion den Sauerstofftransport zu den Muskeln optimiert hätten.

Wie die Ergebnisse zeigen, sind die den Sauerstofftransport hauptsächlich determinierenden Parameter, d. h. die tHb-Menge, das Blutvolumen sowie das Herzvolumen bei den Kenianern nicht besser ausgebildet als bei den deutschen Läufern.

Dies ist erstaunlich, da aus verschiedenen Studien bekannt ist, dass die tHb-Menge, aber auch das BV durch das Leben und Trainieren in Höhen über 2000 m erheblich erhöht werden können. So zeigen kolumbianischen Radprofis von 2600 m Höhe 11 % höhere tHb-Mengen und 9 % höhere Blutvolumina als vergleichbare Radprofis aus dem Flachland (Böning et al., 2001; Schmidt et al., 2002). Auch Höhentrainingsstudien von 3-4-wöchiger Dauer oberhalb von 2000 m für mindestens 14 h/Tag berichten von 6.5 - 8.0%-igen Anstiegen der tHb-Menge (Schmidt & Prommer, 2008). Eine Erklärung für diese fehlende hämatologische Anpassung der kenianischen Läufer könnte in der evolutionsbedingten Höhenanpassung der Afrikaner liegen, die bereits seit > 100.000 Jahren hypoxischen Umgebungsbedingungen ausgesetzt sind. Im Vergleich hierzu befinden sich die Andenbewohner, zu denen die kolumbianischen Radrennfahrer gehören, noch in einer Akutanpassung, da sie erst seit maximal 11.000 Jahren in der Höhe leben.

Die Hypothese einer evolutionsbedingten unterschiedlichen Anpassung ist auf Studien von Beall et al. (2002) zurückzuführen, die bei Andenbewohnern gegenüber Ost-afrikanischen Höhenbewohnern deutlich erhöhte Hämoglobinkonzentrationen (3500 m: ~18 g/dl vs. 15.9 g/dl) (Beall et al., 1990; Beall et al., 2002) aufzeigen konnten. Auch die [Hb] aus unserer Studie und die von Moore et al. (2007) für kenianische Läufer aus 2100 - 2350 m Höhe aufgezeigten Werte um 16.4 g/dl liegen in einem geringeren Bereich als dies für Andenverhältnisse dokumentiert ist (Schmidt et al., 2002).

Die kontinuierliche Reduktion der tHb-Menge bei den Kenianern ab der 3. Woche bis Tag 33 (siehe Abb. 2B) beweist deutlich, dass eine Anpassung an Normoxie vorliegt und der durch Leben und Trainieren in der Höhe erzielte Zuwachs an Hämoglobin ca. 6 % beträgt. Diese Größenordnung stimmt sehr gut mit dem mittleren Anstieg von 7 % überein, von dem in einer Metaanalyse über Höhentrainingseffekte bei Athleten aus dem Flachland berichtet wird (Schmidt & Prommer, 2008). Die Reduktion der relativen Hämoglobinmenge auf 12.8 g/dl (siehe Abb. 2B) am Ende des 6-wöchigen Aufenthaltes liegt deutlich unterhalb des Wertes der deutschen Vergleichsgruppe und entspricht Werten, die bei moderat trainierten Athleten vorzufinden sind (Schmidt & Prommer, 2008). Dies macht deutlich, dass die herausragende Ausdauerleistungsfähigkeit der kenianischen Läufer nicht von der vorliegenden tHb-Menge abhängig sein kann.

Wie die relative tHb-Menge, so spricht auch das relative Blutvolumen zu Beginn des Flachlandsaufenthaltes für sehr gut ausdauertrainierte Athleten (Heinicke et al., 2001). Das Verhalten des Blutvolumens mit einem schnellen Anstieg zu Beginn

des Flachlandaufenthaltes ( $+265, \pm 288\text{ml}$ , siehe Abb. 2C), einer ca. 2-wöchigen Plateauphase und dem anschließenden kontinuierlichen Abfall bis auf die in der Höhe gemessenen Ausgangswerte ist eine typische Reaktion auf normoxische Bedingungen (Robach et al., 2002). Neben einer akuten Flüssigkeitsverschiebung aus dem extravasalen in den intravasalen Raum kommt es zusätzlich zu einer Wasserretention, die sich in der Erhöhung des Plasmavolumens um  $307 \pm 343\text{ ml}$  widerspiegelt und den Abfall der  $[\text{Hb}]$  um  $0.7 \pm 0.7\text{g/dl}$  sowie des Hämatokrits um  $1.9 \pm 2.1\%$  erklärt (siehe Tab. 3). Der Anstieg des Gesamtkörperwassers erklärt ebenso die rasche Zunahme des Körpergewichts und der fettfreien Masse um insgesamt  $2.1 \pm 1.0\text{ kg}$ .

Die Zunahme von  $\sim 1\text{ kg}$  Fettmasse ist jedoch auf die für Afrikaner ungewohnte deutsche Nahrung zurückzuführen, an die sie sich während Ihres Aufenthaltes gemäß der Angaben des Managers und Trainers gewöhnen sollten.

Es stellt sich nun die Frage, warum die Leistungsfähigkeit der kenianischen Läufer über bspw.  $10\text{ km}$  (siehe Tab. 5) dennoch deutlich besser ist, als die der deutschen Läufer, obwohl die Sauerstofftransportierenden Systeme sowie die  $\text{VO}_{2\text{max}}$  keine Unterschiede zeigen. Vergleicht man den relativen Sauerstoffverbrauch, der in Laufökonomiestudien üblicherweise mit dem Exponenten  $0.75$  berechnet wird, so fällt auf, dass die Kenianer ab einer Geschwindigkeit von  $18\text{ km/h}$  auf dem Laufband signifikant weniger Sauerstoff verbrauchen ( $5.8\%$  bei  $20\text{ km/h}$ ) als die deutschen Läufer (siehe Abb. 3)

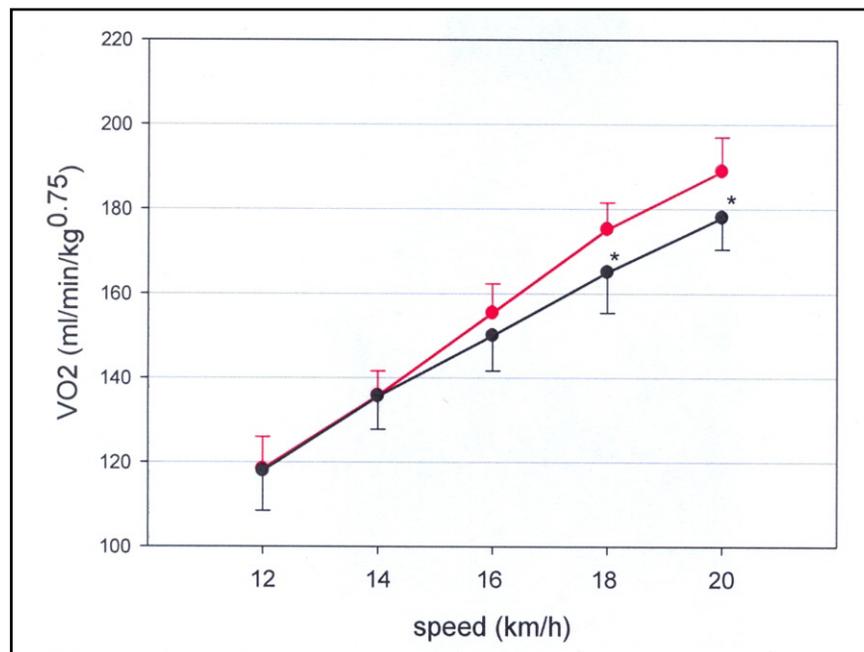


Abb. 3: Laufökonomie der Kenianer dargestellt anhand des Stufentests auf dem Laufband im Vergleich zu den deutschen Läufern. Signifikanz der Unterschiede zwischen deutschen und kenianischen Läufern:  $*p \leq 0.05$ .

Diese Größenordnung der verbesserten Laufökonomie stimmt mit den Studien von Weston et al. (2000) und Lucia et al. (2006) überein, die den Unterschied zwischen afrikanischen und europäischen Läufern mit 5 - 7 % beziffern. Die Ursache für diese optimierte Laufökonomie ist wohl hauptsächlich auf die anthropometrischen Verhältnisse zurückzuführen. So zeigt sich eine hohe Korrelation zwischen der relativen Sauerstoffaufnahme und dem BMI sowie dem Wadenumfang (Lucia et al., 2006). Diese Zusammenhänge spiegeln sich auch deutlich in unserer Studie wieder (siehe Abb. 4 A + B) und sind offensichtlich ein entscheidender Vorteil der kenianischen Läufer.

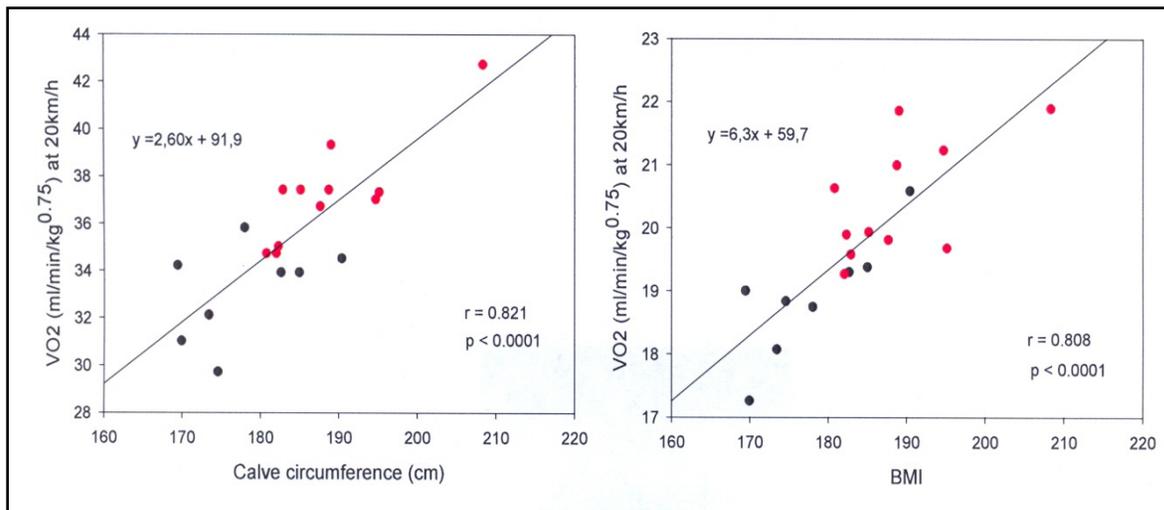


Abb. 4 A + B: Zusammenhang zwischen Laufökonomie (VO<sub>2</sub> bei 20km/h), Wadenumfang und BMI.

## Schlussfolgerung

Entgegen der weit verbreiteten Meinung ist der Sauerstofftransport der kenianischen Läufer gegenüber deutschen Läufern nicht verbessert. Die totale Hämoglobinmenge, das Blutvolumen sowie die Herzgröße, die den Sauerstofftransport hauptsächlich determinieren, entsprechen den Werten der Deutschen. Eine Anpassung kenianischer Läufer an Flachlandbedingungen verschlechtert den Sauerstofftransport ab der 3. Woche jedoch deutlich. Die dennoch überlegene Leistungsdominanz ist auf eine verbesserte Laufökonomie zurückzuführen, die sich in einem geringeren Sauerstoffverbrauch bei höheren Geschwindigkeiten äußert. Ursächlich hierfür sind u. a. der geringere BMI sowie der geringere Wadenumfang.

Für deutsche Athleten ist aus diesen Ergebnissen abzuleiten, dass Höhentraining zur Steigerung der Hämoglobinmenge zeitlich so geplant werden sollte, dass die positiven Effekte eines verbesserten Sauerstofftransportes auch genutzt werden können, d. h. die Rückkehr ins Flachland sollte nicht länger als 3 Wochen vor dem Wettkampf liegen. Darüber hinaus sollte ein optimales Verhältnis zwischen Körpergewicht und Laufleistung gefunden werden.

## Literatur

- Beall, C.M., Brittenham, G.M., Macuaga, F., & Barragan, M. (1990). Variation in Hemoglobin Concentration Among Samples of High-Altitude Natives in the Andes and the Himalayas. *American journal of human biology*, 2, 639-651.
- Beall, C.M., Decker, M.J., Brittenham, G.M., Kushner, I., Gebremedhin, A. & Strohl, K.P. (2002). An Ethiopian pattern of human adaptation to high-altitude hypoxia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 99, 17215-17218.
- Böning, D., Maassen, N., Jochum, F., Steinacker, J., Halder, A., Thomas, A., Schmidt, W., Noe, G. & Kubanek, B. (1997). After-Effects of a High Altitude Expedition on Blood. *Physiology and biochemistry*, 18, 179-185.
- Böning, D., Rojas, J., Serrato, M., Ulloa, C., Coy, L., Mora, M. & Hütler, M. (2001). Hemoglobin mass and peak oxygen uptake in untrained and trained residents of moderate altitude. *International journal of sports medicine*, 22, 1-7.
- Bosch, A.N., Goslin, B.R., Noakes, T.D. & Dennis, S.C. (1990). Physiological Differences Between Black-And-White Runners During A Treadmill Marathon. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 61, 68-72.
- Heinicke, K., Wolfahrt, B., Winchenbach, P., Biermann, B., Schmid, A., Huber, G., Friedmann, B. & Schmidt, W. (2001). Blood volume and hemoglobin mass in elite athletes of different disciplines. *International journal of sports medicine*, 22, 504-512.
- Lucia, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gómez-Gallego, F., San Juan, A. F., Santiago, C., Pérez, M., Chamorro-Vina, C. & Foster, C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied physiology, nutrition and metabolism*, 31, 530-540.
- Moore, B., Parisotto, R., Sharp, C., Pitsiladis, Y., & Kayser, B. (2007). Erythropoietic indices in elite Kenyan runners training at altitude. In Y. Pitsiladis, J. Bale, C. Sharp & T. Noakes (Eds.), *East African Running*, (S. 199-214). London: Routledge.
- Robach, P., Lafforgue, E., Olsen, N. V., Dechaux, M., Fouqueray, B., Westerterp-Plantenga, M., Westerterp, K. & Richalet, J. P. (2002). Recovery of plasma volume after 1 week of exposure at 4,350 m. *Pflugers archiv-european journal of physiology*, 444, 821-828.
- Saltin, B., Kim, C. K., Terrados, N., Larsen, H., Svedenhag, J. & Rolf, C. J. (1995). Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 5, 222-230.
- Saltin, B., Larsen, H., Terrados, N., Bangsbo, J., Bak, T., Kim, C. K., Svedenda, J. & Rolf, C. J. (1995). Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 5, 209-221.

Schmidt, W., Heinicke, K., Rojas, J., Gomez, J. M., Serrato, M., Mora, M., Wolfarth, B., Schmid, A. & Keul, J. (2002). Blood volume and hemoglobin mass in endurance athletes from moderate altitude. *Medicine and science in sports and exercise*, 34, 1934-1940.

Schmidt, W. & Prommer, N. (2008). Effects of various training modalities on blood volume. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 18, 59-71

Weston, A. R., Mbambo, Z. & Myburgh, K. H. (2000). Running economy of African and Caucasian distance runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 32, 1130-1134.

