
Blutvolumen, Herzgröße und Ausdauerleistungsfähigkeit bei querschnittsgelähmten Sportlern und Nichtsportlern unterschiedlicher Läsionshöhe

Yorck-Olaf Schumacher (Projektleiter) & Hans-Hermann Dickhuth

Medizinische Universitätsklinik Freiburg, Abteilung Rehabilitative & Präventive Sportmedizin

Hintergrund und Fragestellung

Die Ausdauerleistungsfähigkeit des Menschen wird im Allgemeinen durch die maximale Sauerstoffaufnahme des Organismus (VO_{2max}) beschrieben (Bassett & Howley, 2000). Diese Variable beschreibt die Fähigkeit der Zellen über aerobe Stoffwechselprozesse Energie zu gewinnen. Je mehr Sauerstoff die Zelle aufnehmen kann, desto mehr Energie kann durch die aeroben energieliefernden Systeme der Zelle zur Verfügung gestellt werden. Die Ausprägung der maximalen Sauerstoffaufnahme des Organismus ist von verschiedenen Faktoren abhängig: Der Ventilation, entsprechend der äußeren Atmung über die Lunge, dem Gasaustausch von ventiliertem Sauerstoff über die Alveolen der Lunge an das Blut, der damit eng verbundenen Diffusionsstrecke in den Alveolen, der Sauerstofftransportfähigkeit des Blutes abhängig von Herzzeitvolumen und der Menge des zirkulierenden Hämoglobins und der Sauerstoffverarbeitungsfähigkeit des energetischen Systems der Zelle, der so genannten inneren Atmung in den Mitochondrien. Das Zusammenspiel dieser Faktoren bestimmt das Maß der VO_{2max} . In verschiedenen Modellrechnungen konnte nachgewiesen werden, daß bei Belastungen, die große Muskelgruppen involvieren, die VO_{2max} bis zu 75 % durch die Sauerstofftransportfähigkeit des Blutes, zusammengesetzt aus Herzzeitvolumen und Blutvolumen/ Hämoglobinmasse, determiniert wird (Bassett & Howley, 2000; di Prampero & Ferretti, 1990). Die Menge des zirkulierenden Blutes spielt somit eine essentielle Rolle für die Ausdauerleistungsfähigkeit. Diese Menge kann durch Training beeinflusst werden, so daß bei Hochausdauertrainierten Blutvolumina von bis zu 110 ml/kg erreicht werden, wohingegen untrainierte Personen Blutvolumina von 60 - 80 ml/kg besitzen. Es ist bekannt, daß Hämoglobinmasse und Blutvolumen unmittelbar nach Querschnittslähmung deutlich abnehmen. Dies ist wahrscheinlich einerseits durch die sich im Regelfall an einen Unfall anschließende Immobilisierung bedingt, andererseits aber auch durch die geringere Muskelmasse bei Querschnittsgelähmten. Körperbehinderte Menschen trainieren in zunehmendem Maße in Umfängen, die denen im nichtbehinderten Profisport gleichkommen und so einen hohen Anpassungsreiz für alle beteiligten Organsysteme darstellen. In verschiedenen Untersuchungen konnte jedoch nachgewiesen werden, daß die physiologischen Anpassungsmechanismen von querschnittsgelähmten ausdauertrainierten Sportlern sich von nicht-körperbehinderten teilweise unterscheiden: So findet man bei querschnittsgelähmten Ausdauerathleten in Abhängigkeit von der Lähmungshöhe in der Regel nur eine begrenzte Anpassung im Sinne eines Sportherzens (Davis & Shephard, 1988; Davis et al., 1987; Gates

et al., 2002; Huonker et al. 1998; Kessler et al. 1986; Nash et al., 1991; Price et al., 2000). Der Grund liegt mit dem durch die Behinderung kleineren unter Belastung zu versorgenden Stromgebiet und der der Schädigung der sympathischen Bahnen im Rückenmark mit der daraus resultierenden Störung des peripheren sympathischen Nervensystems auf der Hand.

Ungeklärt ist jedoch, ob und welche Anpassung in den Blutvolumina und der Hämoglobinmasse von körperbehinderten Athleten zu beobachten ist. Die Beantwortung dieser Frage ist das Ziel der vorliegenden Untersuchung.

Methodik

Zur Klärung der beschriebenen Fragestellungen wurden in die Untersuchung insgesamt 60 Probanden eingeschlossen:

- 25 ausdauertrainierte querschnittsgelähmte Athleten verschiedener Disziplinen (Selektionskriterium: mehr als 15 h/Woche Ausdauertraining seit mehr als 3 Jahren), (PARA TRAINIERT)
- 10 untrainierte, querschnittsgelähmte Personen (PARA UNTRAINIERT)
- 25 ausdauertrainierte Athleten (ohne Körperbehinderung) (TRAINIERT)

Anthropometrie

Für alle Teilnehmer wurden Körpergröße und Körpergewicht gemessen und der Body Mass Index berechnet.

Gesamthämoglobin

Die Hämoglobinmasse wurde mittels der Kohlenmonoxid (CO)-Rückatmungsmethode bestimmt (Schmidt & Prommer, 2005). Die CO-Rückatmungsmethode ist eine in zahlreichen Studien belegte, sichere und wenig invasive Methode, mit der das Blutvolumen und die Hb-Masse des Organismus mit einer Genauigkeit von 0,7 - 2,1 % bestimmt werden kann (Gore et al., 2005). Alle Probanden tolerierten die Messungen ohne Nebenwirkungen.

Kurzbeschreibung der Methode (siehe () für Details der Methode):

Geschlossenes Atemsystem mit 3 l Sauerstoff und einer auf das Körpergewicht abgestimmten Menge Kohlenmonoxid (CO) (zwischen 30 und 70 ml) als Markersubstanz zur Markierung des Körperhämoglobins.

Prinzip:

Bestimmung der Differenz von mit CO gesättigtem Hämoglobin (CO-Hb) vor und nach Gabe einer definierten Menge an CO, daraus Errechnung der Gesamt-Hb-Menge.

Durchführung:

Zwei kapillare Blutentnahmen am Ohrläppchen für die Bestimmung des Basiswertes von CO-Hb. Im Anschluß zweiminütiges Atemmanöver an einem geschlossenen System, dadurch Einbringung des Markers (CO). Bestimmung der Konzentration von CO im Blut in zwei weiteren kapillären Blutproben nach dem Atemversuch.

Kardiale Größen

Die kardialen Größen wurden echokardiographisch bestimmt (Cheitlin et al., 2003) und die Herzvolumina über die modifizierte Simpson Regel aus linksventriculären Längs- und Querdurchmessern errechnet (Dickhuth et al., 1996).

Ermittlung der Ausdauerleistungsfähigkeit

Standardisierte leistungsphysiologische Untersuchung (Rollstuhl- bzw. Handbikeergometrie) zur Ermittlung der maximalen Sauerstoffaufnahme (VO_{2peak}) als Surrogatmarker bei körperbehinderten Athleten, Fahrradergometrie bzw. Laufband bei nicht körperbehinderten Sportlern. Als Testprotokoll dienten standardisierte, in der täglichen sportmedizinischen Praxis verwendete Ergometertests (Hawley & Noakes, 1992).

Statistische Auswertung

Die Normalverteilung der Messwerte wurde mittels Shapiro-Wilk Verfahren getestet. Für normalverteilte Variablen wurde zur Berechnung von Gruppenunterschieden der Student T Test angewendet, nicht normalverteilte Variablen mittels Kruskal-Wallis Prozedur untersucht. P-Werte unterhalb von 0,01 wurden als Zeichen für statistische Signifikanz betrachtet. Die Analyse erfolgte mit der Software JMP Version 7.0.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind in Tab. 1 und den Abb. 1-3 dargestellt.

Die Verteilung der Lähmungshöhe war in den beiden Gruppen der Körperbehinderten vergleichbar (Tab. 1).

Tab. 1: *Die anthropometrischen Daten der Untersuchungsgruppen sowie die Lähmungshöhen bei den körperbehinderten Probanden (* = signifikanter Unterschied).*

	TRAINIERT	PARA-TRAINIERT	PARA-UNTRAINIERT
n	25	25	10
Größe (cm)	179.30 ± 6.36 *	180.40 ± 9.51 *	169.80 ± 14.95
Gewicht (kg)	71.32 ± 6.73	72.95 ± 9.99	81.04 ± 27.39
Body Mass Index	22.19 ± 1.83 *	22.46 ± 3.19 *	28.08 ± 8.04
Alter (years)	31.16 ± 10.93 *	36.42 ± 11.31	45.71 ± 18.05
VO_{2peak} (ml/min/kg)	61.19 ± 9.45 *	37.09 ± 8.39 * ⁺	18.51 ± 5.17
HFmax (Schläge/min)	185.68 ± 9.91	173.36 ± 34.40	153.0 ± 41.9
Läsionshöhe (n)			
C1-C6		4	2
Th1-Th5		6	3
Th6-S5		15	5

Es fanden sich Unterschiede in verschiedenen anthropometrischen Parametern zwischen den einzelnen Gruppen. Mit dem Körpergewicht als Referenzgröße zeigten querschnittsgelähmte Athleten höhere tHb und VO_{2max} als untrainierte, querschnittsgelähmte Personen, jedoch keine größeren Herzen. Bei den nicht-körperbehinderten Probanden waren HV, tHb und VO_{2peak} höher als in beiden körperbehinderten Gruppen. (Abb. 1 - 3).

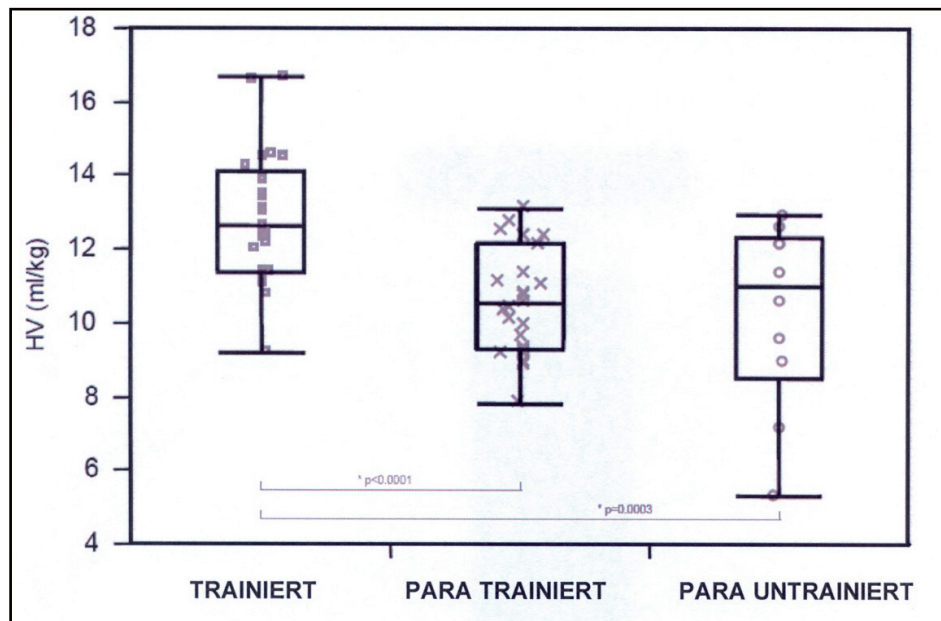


Abb. 1: Herzvolumen (ml/kg) in den drei Untersuchungsgruppen. (Die Kästen stellen den Bereich des 25 - 75 % Konfidenzintervalls dar, die horizontale Linie in der Mitte den Median. Die Signifikanzniveaus der Unterschiede sind mittels Klammern gekennzeichnet.)

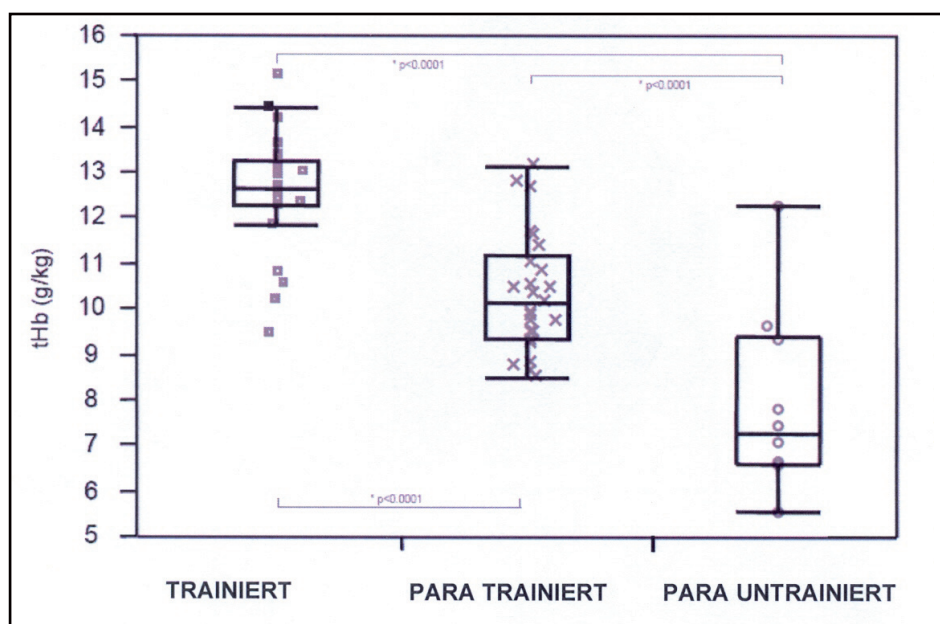


Abb. 2: Analog zu Abb. 1, tHb (g/kg) in den drei Untersuchungsgruppen.

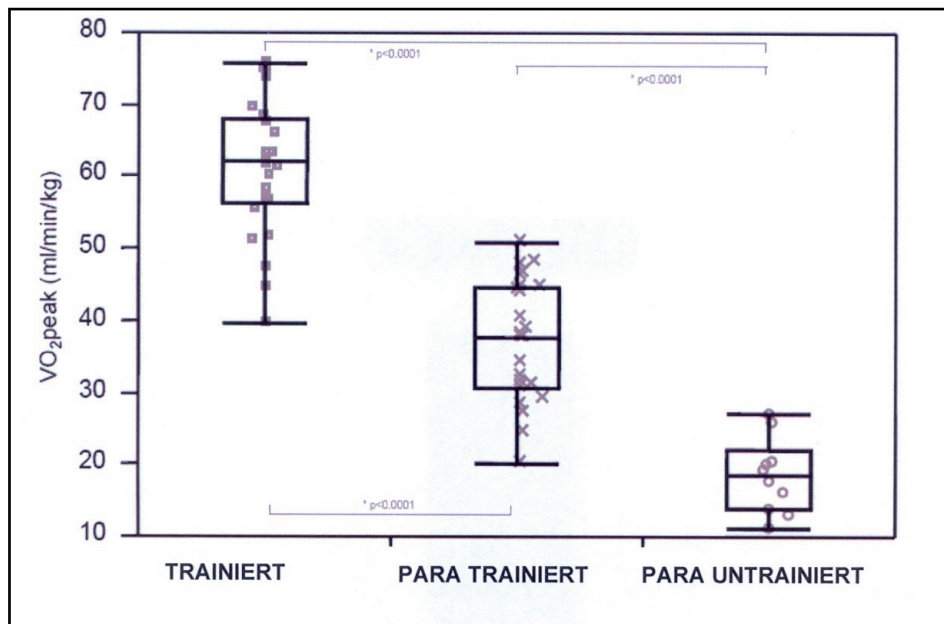


Abb. 3: Analog zu Abb. 1, VO_{2peak} (ml/min/kg) in den drei Untersuchungsgruppen.

Diskussion und Schlussfolgerungen für die Trainingpraxis

Das kardiovaskuläre System spielt eine entscheidende Rolle bei der Begrenzung der Ausdauerleistungsfähigkeit beim nicht-körperbehinderten Athleten (di Prampero & Ferretti, 1990; Scheuer & Tipton, 1977). Seine Bedeutung bei körperbehinderten Sportlern ist noch nicht abschließend geklärt (Hopman et al., 1998). Es ist allerdings bekannt, dass VO_{2peak} als Surrogatmarker der Ausdauerleistungsfähigkeit bei körperbehinderten Athleten reduziert ist. Dieses wird durch die Ergebnisse unserer Studie bestätigt.

Das Hauptergebnis unserer Untersuchung ist jedoch die Tatsache dass tHb, nicht aber HV sich an chronische Ausdauerbelastung bei körperbehinderten Athleten anpassen. Ursprünglich zeigen körperbehinderte Personen reduzierte tHb und Blutvolumina (Houtman et al., 2000). Trotz Training bleiben ausdauertrainierte körperbehinderte Athleten unter den von nicht behinderten Athleten gezeigten tHb Werten, in ungefähr dem gleichen Maße, mit dem sie über denen von untrainierten körperbehinderten Athleten liegen (~2,5 g/kg). Der Hauptgrund für die reduzierte Anpassung mag in dem bei körperbehinderten Personen reduzierten Gefäßvolumen liegen.

Die Anpassung des Herzens bei körperbehinderten Athleten wurde in vielen Untersuchungen erforscht, die Meinungslage deutet eher auf eine fehlende Anpassung an Ausdauerbelastungen hin (Davis & Shephard, 1988; Davis et al., 1987; Gates et al., 2002; Huonker et al., 1998; Kessler et al., 1986; Nash et al., 1991; Price et al., 2000). Zur Interpretation dieses Befundes bestehen zwei Möglichkeiten:

1. Das Herz von körperbehinderten Athleten kann sich nicht an Training anpassen. Dies erscheint eher unwahrscheinlich, da der Trainingsstimulus per se sich nicht zwischen körperbehinderten und nicht-körperbehinderten Athleten unter-

scheidet. Der einzige Unterschied kann in der Intensität des Anpassungsreizes bestehen, da bei körperbehinderten Athleten eine kleinere Gesamtmuskelmasse und Gefäßfläche zu versorgen ist. Dies mag einen niedrigeren Anpassungsreiz darstellen. Auch wäre es möglich, dass bestimmte Denervierungen im Bereich des autonomen Systems im thorakalen Rückenmark, wie sie bei Querschnittsgelähmten auftreten, eine Rolle spielen. Es ist jedoch eher wahrscheinlich, dass dieses bei Tetraplegikern von Bedeutung ist und nicht bei Paraplegikern (Biaggioni, 2007). (Tetraplegiker wurden in unserer Studie nicht untersucht).

2. Das Herz von querschnittsgelähmten Athleten muss sich nicht an Ausdauerbelastungen anpassen. Es ist denkbar, dass das kleinere Stromgebiet und die geringere Muskelmasse bei körperbehinderten Athleten auch durch die Pumpleistung eines nicht angepassten Herzens ausreichend mit Sauerstoff versorgt werden kann. Die erhöhte Hämoglobinmasse allein scheint ausreichend zu sein, den evtl. erhöhten Sauerstoffbedarf zu decken. In diesem Zusammenhang kann spekuliert werden, dass die Herzleistung bei körperbehinderten Athleten nicht leistungsbegrenzend ist.

Unsere Daten zeigen klar, dass tHb sich bei körperbehinderten Athleten an chronisches Ausdauertraining anpasst. Diese Athleten erreichen mit ihrem tHb körpergewichtsbezogen die Werte von untrainierten, nicht körperbehinderten Personen. Eine Anpassung darüber hinaus findet jedoch trotz vergleichbarem Trainingsaufwand nicht statt. Physiologisch kann dies so gedeutet werden, dass die Leistungsbegrenzung bei körperbehinderten Athleten eher in der „Peripherie“ (kleiner aktive Muskelmasse) als „zentral“ (Herz und Lunge) zu suchen ist (Hopman et al., 1998). Unsere Daten mit einem erhöhten tHb, welches die periphere Sauerstoffabladung verbessert, unterstützt diese Theorie.

Zusammenfassend kann bezüglich der in der Einleitung gestellten Frage nun wie folgt geantwortet werden:

Es finden sich Unterschiede zwischen ausdauertrainierten körperbehinderten Athleten und nichtquerschnittsgelähmten Athleten: Beide Gruppen zeigen eine klare Anpassung Ihrer tHb an Ausdauertraining, die bei den nicht-körperbehinderten Athleten stärker ausfällt. Körperbehinderte Athleten zeigen im Gegensatz zu nicht körperbehinderten Sportlern jedoch keine Anpassung im Sinne eines Sportherzens.

Es kann somit spekuliert werden, dass bei ausdauertrainierten, körperbehinderten Athleten die Pumpleistung des Herzens nicht leistungsbegrenzend ist.

Erkenntnistransfer für die Trainingspraxis

Die Hämoglobinmasse und somit die Blutmenge von körperbehinderten Athleten unterliegt im Gegensatz zu den Herzvolumina deutlichen Trainingsadaptationen. Somit sind auch auf Verbesserung dieser Entität zielende Trainingsmaßnahmen (z. B. Hypoxietraining) bei dieser Athletengruppe sinnvoll.

Erkenntnistransfer für die Wissenschaft

Teile der hier dargelegten Ergebnisse wurden zur Veröffentlichung bei einer internationalen Fachzeitschrift (European Journal of Applied Physiology) eingereicht.

Literatur

- Bassett, D.R. Jr & Howley, E.T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 32 (1), 70-84
- Biaggioni, I. (2007). The sympathetic nervous system and blood volume regulation: lessons from autonomic failure patients. *The American journal of the medical sciences*, 334 (1), 61-64
- Cheitlin, M.D., Armstrong, W.F., Aurigemma, G.P. et al. (2003). ACC/AHA/ASE 2003 Guideline Update for the Clinical Application of Echocardiography: summary article. A report of the American College of Cardiology/American Heart Association Task Force on Practice Guidelines (ACC/AHA/ASE Committee to Update the 1997 Guidelines for the Clinical Application of Echocardiography). *Journal of the American Society of Echocardiography*, 16 (10), 1091-1110
- Davis, G.M. & Shephard, R.J. (1988). Cardiorespiratory fitness in highly active versus inactive paraplegics. *Medicine and science in sports and exercise*, 20 (5), 463-468
- Davis, G.M., Shephard, R.J. & Leenen, F.H. (1987). Cardiac effects of short term arm crank training in paraplegics: echocardiographic evidence. *European journal of applied physiology*, 56 (1), 90-96
- di Prampero, P.E. & Ferretti, G. (1990). Factors limiting maximal oxygen consumption in humans. *Respiration Physiology*, 80 (2-3), 113-127
- Dickhuth, H.H., Roecker, K., Niess, A. et al. (1996). The echocardiographic determination of volume and muscle mass of the heart. *International journal of sports medicine*, 17 (3), S132-139
- Gates, P.E., Campbell, I.G. & George, K.P. (2002). Absence of training-specific cardiac adaptation in paraplegic athletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 34 (11), 1699-1704
- Gore, C.J., Hopkins, W.G. & Burge, C.M. (2005). Errors of measurement for blood volume parameters: a meta-analysis. *Journal of applied physiology*, 99 (5), 745-758
- Hawley, J.A. & Noakes, T.D. (1992). Peak power output predicts maximal oxygen uptake and performance time in trained cyclists. *European journal of applied physiology*, 65 (1), 79-83
- Hopman, M.T., Dueck, C., Monroe, M. et al. (1998). Limits to maximal performance in individuals with spinal cord injury. *International journal of sports medicine*, 19 (2), 98-103
- Houtman, S., Oeseburg, B. & Hopman, M.T. (2000). Blood volume and hemoglobin after spinal cord injury. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 79 (3), 260-265
- Huonker, M., Schmid, A., Sorichter, S. et al. (1998). Cardiovascular differences between sedentary and wheelchair-trained subjects with paraplegia. *Medicine and science in sports and exercise*, 30, 609-613

- Kessler, K.M., Pina, I., Green, B. et al. (1986). Cardiovascular findings in quadriplegic and paraplegic patients and in normal subjects. *The American journal of cardiology*, 58 (6), 525-530
- Nash, M.S., Bilsker, S., Marcillo, A.E. et al. (1991). Reversal of adaptive left ventricular atrophy following electrically-stimulated exercise training in human tetraplegics. *Paraplegia*, 29 (9), 590-599
- Price, D.T., Davidoff, R. & Balady, G.J. (2000). Comparison of cardiovascular adaptations to longterm arm and leg exercise in wheelchair athletes versus long-distance runners. *The American journal of cardiology*, 85, 996-1001
- Scheuer, J., Tipton, C.M. (1977). Cardiovascular adaptations to physical training. *Annual review of physiology*, 39, 221-251
- Schmidt, W. & Prommer, N. (2005). The optimised CO-rebreathing method: a new tool to determine total haemoglobin mass routinely. *European journal of applied physiology*, 95 (5-6), 486-495