

Höhenphysiologie

Franziska Genter, Benjamin Marty, Anja Schönenberger, Sara Spring

Einführung

Die Höhenphysiologie ist ein Teilgebiet der Medizin, das sich mit den Reaktions- und Akklimatisationsmechanismen des menschlichen Körpers bei akuter Höhenexposition beschäftigt.

Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck ab und somit sinkt auch der Sauerstoffpartialdruck – das ist der Anteil des Sauerstoffes am Gesamtdruck der Luft. In extremer Höhe (ab ca. 7'000 m ü. M.) wird der kritische Sauerstoffpartialdruck von 40 bis 47 hPa unterschritten und ein längerer Aufenthalt ist unmöglich. In mittlerer bis grosser Höhe (ab ca. 1'500 m ü. M.) ist ein ausreichender Gasaustausch von der Lunge ins Blut und vom Blut in die Zellen erschwert, woraus eine Unterversorgung des Gewebes mit Sauerstoff resultiert. Aus diesem Grund werden vom Körper einige Anpassungen gemacht, um dieses Problem zu kompensieren und den Organismus ausreichend mit Sauerstoff zu versorgen. Unter anderem werden kurzfristig die Atem- und die Herzfrequenz erhöht und nach einigen Tagen die Bildung von roten Blutkörperchen gesteigert, welche für den Sauerstofftransport zuständig sind.

In der durchgeführten Forschungsstudie wurde insbesondere ein Augenmerk auf die kurz- bis mittelfristigen physiologischen Veränderungen der Blutzusammensetzung, des Säure-Base-Haushalts, der Lungenfunktion und der sportlichen Belastungsfähigkeit in der Höhe gelegt.

Blutparameter

Die Bestimmung der Anzahl Erythrozyten (rote Blutkörperchen, RBK) erfolgte mittels automatisierter Messung der Blutproben von 16 Probanden mit dem Diagnostikgerät Mythic 18 (Orphée SA, Genève).

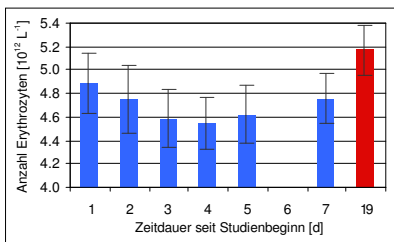


Abb. 1: Mittelwert der Anzahl Erythrozyten von 16 Probanden im Verlauf der Studienwoche in Rona inkl. nachträglicher Vergleichsmessung in Wattwil

Wie in Abb. 1 ersichtlich, nimmt die Anzahl roter Blutkörperchen in den ersten paar Tagen der Studienwoche in Rona (1'232 m ü. M.) leicht ab, was auf den erhöhten „Verbrauch“ von RBK in der Höhe zurückzuführen ist. Die Produktion von (neuen) RBK bleibt zunächst gleich. Erst nach einigen Tagen nimmt dann die Anzahl RBK wieder zu, weil der Körper jetzt vermehrt RBK bildet, was durch

das zunehmend gebildete körpereigene Hormon Erythropoetin ausgelöst wird. Der Höhepunkt der Erythrozytogenese wird erst einige Zeit später erreicht, wie ein Blick auf die Vergleichsmessung aufzeigt, die etwa zehn Tage nach der Rückkehr ins tiefer gelegene Wattwil (610 m ü. M.) durchgeführt wurde.

Lungenfunktion

Mit dem Spirometer, einem Gerät zur Messung des Atem-Volumenstroms, wurden Messungen in Rona und auf dem Piz Corvatsch durchgeführt. Zuerst atmeten die Probanden gleichmässig ein und aus. Nach einigen Sekunden atmeten sie einmal möglichst tief ein und aus. Aus der Volumendifferenz der maximalen Inspiration und Expiration kann so die forcierte Vitalkapazität (FVC) ermittelt werden. Die Messungen wurden je dreimal in Rona und auf dem Piz Corvatsch durchgeführt, wobei in Abb. 3 der Mittelwert für beide Standorte dargestellt ist. Die FVC nimmt mit einer Ausnahme bei allen Probanden in der Höhe ab. Frauen (hier Probanden 1, 4 und 6) haben tendenziell ein kleineres Lungenvolumen als die Männer.



Abb. 2: Probandin mit Spirometer

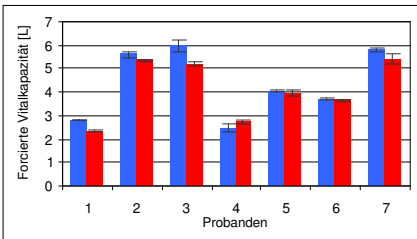


Abb. 3: Forcierte Vitalkapazität von sieben Probanden in Rona (1'232 m ü. M.) und auf Piz Corvatsch (3'303 m ü. M.)

Obschon verschiedene Studien die Abnahme der FVC in der Höhe bestätigen, ist die Ursache noch nicht restlos geklärt. Eine Theorie versucht einen Zusammenhang mit folgendem Phänomen herzustellen: Wenn ein Lungenbläschen verstopft ist, kann kein Gasaustausch mehr mit dem Blut stattfinden. Die Kapillargefässe um dieses Lungenbläschen ziehen sich als Folge zusammen, damit vermehrt Blut zu den anderen Lungenbläschen fliesst. Ein analoger Effekt

kann aber auch bei höhenbedingter Hypoxie auftreten und zu einer Verengung sämtlicher Blutgefässe in der Lunge führen. Dadurch entsteht ein Überdruck und vereinzelt Kapillaren platzen. Das Blut gelangt in die Lungenbläschen, und dadurch kann man nicht mehr gleich viel Luft einatmen. Im Extremfall kann sich so ein Höhenlungenödem (HAPE) entwickeln.

Säure-Base-Mechanismen

Mit einem handelsüblichen pH-Indikatorstreifen wurde während rund 20 Stunden in Rona (1'232 m ü. M.) und einem anschliessenden Höhengaufenthalt von ca. 30 Stunden auf dem Piz Corvatsch (3'303 m ü. M.) die Säurekonzentration im Urin von drei Probanden bestimmt. Wie die Messresultate in Abb. 4 zeigen, ist der pH-Wert bei allen Testpersonen nach dem Transfer in die Bergstation (zumindest kurzfristig) angestiegen.

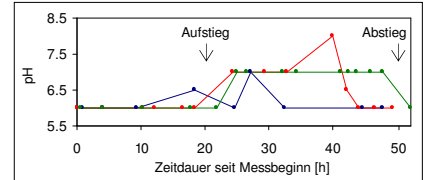
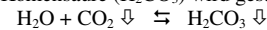


Abb. 4: Veränderung des Urin-pH von drei Probanden bei einem Höhengaufenthalt auf 3'303 m ü. M.

Der Grund für die beobachtete pH-Veränderung ist die höhenbedingte Hyperventilation, welche der Unterversorgung des Gewebes mit Sauerstoff entgegenwirken soll. Dabei wird aber vermehrt Kohlendioxid (CO₂) abgeatmet, was zu komplexen Folgereaktionen im Blut führt. Das chemische Gleichgewicht von Kohlendioxid und Kohlensäure (H₂CO₃) wird gestört:



Es wird weniger Kohlensäure gebildet und so nimmt auch die Konzentration von H₃O⁺ ab, was dazu führt, dass der pH-Wert im Blut zunimmt. Damit das Blut nicht zu alkalisch wird, wird Hydrogencarbonat (HCO₃⁻) über die Nieren ausgeschieden. Der Urin-pH steigt deshalb an, während sich die Säure-Basis-Situation im Blut wieder stabilisiert

Sportliche Belastungsfähigkeit

Bei sportlichen Betätigungen wird in den Muskelzellen Energie benötigt, die im aeroben Ausdauerbereich aus der Verbrennung von Glucose mit Sauerstoff (O₂) umgesetzt wird. Die Versorgung der Muskeln mit Sauerstoff ist dabei über das Herzkreislaufsystem sichergestellt. Werden die Muskeln stärker beansprucht, steigert der Körper den Blutfluss und damit den Sauerstofftransport über eine höhere Herzfrequenz. Unter Umständen kann aber der O₂-Bedarf in der Muskulatur in grosser Höhe aufgrund des erniedrigten Luftdrucks nicht ausreichend gestillt werden. Die Leistungsfähigkeit der Probanden bei gleicher Belastung müsste folglich abnehmen.

Der Step-Ausdauerstest bestand darin, dass die Probanden in gleichmässigem Rhythmus, der durch ein Metronom angegeben wurde, auf einen 24 cm hohen Harass auf- und von diesem wieder absteigen mussten. Das Starttempo (Trittfrequenz) entsprach einer Leistung von 40 Watt. Jeweils nach zwei Minuten wurde die Trittfrequenz erhöht. In Rona wurde im Vorfeld ein Test und auf dem Piz Corvatsch zwei Tests an aufeinander folgenden Tagen durchgeführt. Mit der Pulsuhr (Polar) wurde die Herzfrequenz pro Leistungssteigerung gemessen.

In Abb. 5 zeigen die Pulskurven vom Piz Corvatsch (blau, grün) gegenüber der Kurve von Rona (rot) eine Linksverschiebung. Der Proband hat in der Höhe mit demselben Test deutlich schlechter abgeschnitten. Sein Herzkreislaufsystem musste auf selber Leistungsstufe wie in Rona stärker arbeiten. Seine physische Ausdauerfähigkeit ist alleine durch den Aufenthalt auf grösserer Höhe vermindert worden. Dieser Trend ist bei der Hälfte der sechs getesteten Probanden deutlich erkennbar, die übrigen zeigen nur eine geringfügige Pulsveränderung.

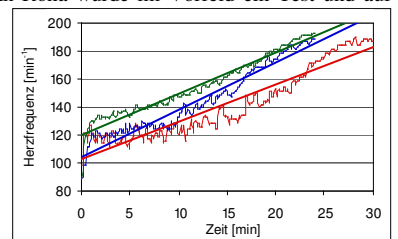


Abb. 5: Pulsentwicklung bei Step-Ausdauerstest in Rona (24.08.09) und Piz Corvatsch (27.08.09 bzw. 28.08.09)

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die vorgestellten Studienresultate einen guten Einblick in die unterschiedlichsten Aspekte der physiologischen Höhenanpassung geben. Es lässt sich erahnen, dass der menschliche Körper schon bei einem Aufenthalt auf etwas über 3'000 Höhenmetern vor eine grosse Herausforderung gestellt wird, die er nur mit einer ausgeklügelten, umfangreichen Reaktionsstrategie bewältigen kann.