DIE MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNAHME (VO_2max)

als Bruttokriterium für die Ausdauerleistungsfähigkeit

Erinnern wir uns an das Sportherz [siehe DAS SPORTHERZ], welches durch ein großes *Herzminutenvolumen* (HMV) eine hohe *Sauerstoffaufnahme* (VO_2) und damit eine große *aerobe Kapazität*, sprich Ausdauerleistungsfähigkeit, ermöglicht.

Wie die Erfahrung zeigt, haben viele Sportler und Trainer Schwierigkeiten, sich unter dem Begriff der *maximalen Sauerstoffaufnahme* (*VO_2max)* etwas Konkretes vorstellen zu können - kein Wunder, findet man doch nur selten eine klare und leicht verständliche Definition in der (sport)medizinischen bzw. sportwissenschaftlichen Literatur, und nur zu oft erhalten Trainer und Aktive ungenügende Information von Seiten der Sportärzte. Leider gibt es auch unter Medizinern falsche Vorstellungen über die Sauerstoffaufnahme (Vielfach wird darunter nur die O_2-Aufnahme in der Lunge verstanden, gemeint ist aber die O_2-Aufnahme der inneren Organe, bei körperlicher Belastung ist es die der *Muskulatur*).

Um es vereinfacht und verständlich auszudrücken:

- ***Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_2max) repräsentiert das maximale Transportvermögen von Sauerstoff aus der Atemluft in die Arbeitsmuskulatur*.**

Sie ist das Maß für
1. die **Sauerstoff-Zufuhr** (Atmung)
2. den **Sauerstoff-Transport** (Herz-Kreislauf-System)
3. die **Sauerstoff-Verwertung** (Muskelzelle)

im Ausbelastungszustand des Organismus.

Diese sog. Sauerstoff-Kette besteht also aus drei hintereinandergeschalteten Organsystemen, der Ventilation (Atmung), dem Blutkreislauf und dem aeroben Muskelstoffwechsel, der in den Mitochondrien abläuft.

Entscheidend ist letztlich, wie viel Sauerstoff im Muskelstoffwechsel für die aerobe Energiegewinnung zur Verfügung gestellt wird: Denn je höher die VO_2max, desto höher kann die Intensität einer Ausdauerbelastung bzw. Dauerleistung sein, ohne eine *"Sauerstoffschuld"* eingehen zu müssen (d.h. ohne "sauer" bzw. "blau" zu werden, siehe DIE MUSKULÄRE ENERGIEBEREITSTELLUNG IM SPORT) bzw. umso länger kann eine submaximale Leistung erbracht werden - mit einem Wort, desto größer ist die Ausdauerleistungsfähigkeit, die sog. *aerobe Kapazität*.

Was versteht man eigentlich unter dem Begriff ***"Ausdauer"***?
Diese kann vereinfacht als **Ermüdungs-Widerstandsfähigkeit** definiert werden.
Genauer gesagt, versteht man darunter die Fähigkeit, möglichst lange einer Belastung zu widerstehen, deren Dauer und Intensität letztlich zur Ermüdung und damit zur Leistungseinbuße führt.
Aus biochemischer Sicht ist "Ausdauer" die Fähigkeit der Muskelzellen zur oxydativen ATP-Produktion (siehe DIE MUSKULÄRE ENERGIEBEREITSTELLUNG IM SPORT)

Die ***allgemeine Ausdauer*** kommt zum Tragen, wenn **mindestens ein Sechstel der gesamten Skelettmuskulatur mindestens 3 Minuten lang zyklisch-dynamisch beansprucht** wird. Bei einem geringeren Muskeleinsatz ist die *lokale Muskelausdauer* entscheidend und nicht die VO_2max.

- ***Die VO_2max ist das Bruttokriterium für die allgemeine Ausdauerleistungsfähigkeit.***

Gehen wir nun genauer auf die drei Schritte der Sauerstoffkette

Sauerstoff-Zufuhr → Sauerstoff-Transport → Sauerstoff-Verwertung

ein.

1. Die Sauerstoff-Zufuhr

In der Lunge erfolgt der Übertritt von Sauerstoff (O_2) aus der eingeatmeten Luft ins arterielle Blut und gleichzeitig der Übertritt von Kohlendioxid (CO_2) vom venösen Blut in die Ausatemluft (sog. *Gasaustausch*). Dabei wird dem Blutkreislauf in der Lunge mehr Sauerstoff angeboten, als er ausschöpfen kann. Daraus folgt, dass ein großes Lungenvolumen nicht automatisch eine hohe VO_2max bewirkt - wenn also jemand glaubt, dass ihn seine große Lungenkapazität (*Vitalkapazität*) automatisch zum besseren Ausdauersportler macht, dann irrt er. **Entscheidend ist nämlich, wie viel des Sauerstoffangebotes in der Lunge vom Blutkreislauf aufgenommen, zu den arbeitenden Muskeln transportiert und dann von diesen verwertet werden kann**.
Die Gesamtoberfläche der Alveolen (Lungenbläschen) ist anatomisch vorgegeben und nicht trainierbar, kann also durch Training nicht vergrößert werden. Sie bestimmt die Diffusionskapazität der Lunge für Sauerstoff und damit das Ausmaß des Gasaustausches. Eine gesunde Lunge hat jedoch eine Diffusionskapazität für O_2, die deutlich größer ist als die VO_2max untrainierter Personen (ca. das Doppelte), sie beträgt ca. 6 bis maximal 7 Liter pro Minute. Da, wie gesagt, die Diffusionskapazität für Sauerstoff durch Training nicht gesteigert werden kann, ist es verständlich, dass sie die anatomisch limitierende Größe der maximalen Sauerstoffaufnahme ist. **Daraus folgt, dass die durch Training maximal erreichbare VO_2max mit 6 bis 7 l/min limitiert ist.** Das sind auch die Spitzenwerte von Weltklasse-Ausdauerathleten, die, bezogen auf das Körpergewicht, bei Männern maximal 90 ml/kg und bei Frauen ca. 75 ml/kg betragen (Relative VO_2max, siehe unten).
Es kommt also primär nicht auf eine naturgegebene "Pferdelunge" an, weshalb die Atmung selbst (eine normale Lungenfunktion vorausgesetzt) nicht der primär leistungslimitierende Faktor für die Ausdauerleistungsfähigkeit ist. Wohl aber kann Ausdauertraining auch die Atmung insofern positiv beeinflussen, als das Training der Atemmuskulatur das Atemzugvolumen und damit das maximale Atemminutenvolumen steigern kann und damit das Sauerstoffangebot für den Blutkreislauf zu einem gewissen Grad erhöhen kann.

2. Der Sauerstoff-Transport

Im Anschluss an den Gasaustausch bewerkstelligt der Blutkreislauf den O_2-Transport zu allen Organen, bei körperlicher Belastung somit auch zur beanspruchten Muskulatur ("Arbeitsmuskulatur"), wobei die roten Blutkörperchen (Erythrozyten) als "Sauerstoffträger" fungieren. Aufrechterhalten wird der Blutkreislauf vom Herz als "Pumpe", weshalb man diese funktionelle Einheit als **Herz-Kreislauf-System** bezeichnet.
Dieses hat eine entscheidende Bedeutung für die VO_2max und damit für die aerobe Kapazität: **Je mehr Blut pro Minute vom Herz gefördert wird und durch den Kreislauf fließt, desto mehr O_2 wird in der Lunge aus der Atemluft mittels Gasaustausch ins Blut aufgenommen und zur Arbeitsmuskulatur befördert.** Diese Größe wird *Herzminutenvolumen* (*HMV*) genannt [siehe DAS SPORTHERZ] und ist der limitierende Faktor der Trainierbarkeit der maximalen Sauerstoffaufnahme.

Um bei bereits trainingsbedingt individuell optimalem HMV die Transportkapazität für Sauerstoff weiter zu erhöhen, war früher im Hochleistungssport - und seit wenigen Jahren ist es das wieder - "Blutdoping" gang und gäbe. Dabei führt man in der Vorbereitungsperiode eine Blutspende und vor dem Wettkampf die Eigenbluttransfusion (in der Regel nur die roten Blutkörperchen als Erythrozytenkonzentrat) durch.
Ende der 80er Jahre wurde dieses "blutige" Verfahren durch Doping mit *Erythropoietin* ("EPO") ersetzt - die "elegante", weil unblutige Form des "Blutdoping", spätestens seit der Tour de France 1998 jedem ein Begriff (Buchtipp: "Gedopt" von Willy Voet, Sport Verlag Berlin). [siehe DOPING – EIN ÜBERBLICK…]

Erythropoietin ist ein menschliches Peptidhormon, das die Bildung der roten Blutkörperchen (Erythrozyten) im Knochenmark anregt. Es wird gentechnologisch hergestellt und dient in der modernen Medizin als wirksames Mittel bei verschiedenen Formen der Anämie (Blutarmut). Als körpereigene Substanz konnte sie lange Zeit bei Dopingkontrollen nicht direkt nachgewiesen werden, erst seit 2002 ist der Nachweis im Harn möglich. Einen indirekten Hinweis auf EPO-Doping gibt ein "dickes Blut" (erhöhter Hämatokrit durch vermehrte Erythrozyten). Dieses birgt große Gefahren: Ein Zuviel an roten Blutkörperchen wirkt sich nicht nur negativ auf die Fließeigenschaften des Blutes und damit auch auf den Sauerstofftransport aus, sondern kann in Extremfällen zu Gerinnselbildung oder Herzüberlastung (sog. Rechtsherzversagen) mit akuter Todesfolge führen. Mehrere, nicht publik gemachte akute Todesfälle im Profi-Radrennsport Ende der 80er und Anfang der 90er-Jahre sind auf übertriebenes, schlecht kontrolliertes (deutlich erhöhter Hämatokrit) Erythropoietindoping zurückzuführen. Man muss nämlich auch bedenken, dass aufgrund des durch Schwitzen bedingten Flüssigkeitsverlustes bei ungenügender Flüssigkeitszufuhr das Blut weiter "eindickt" [siehe TRINKEN IM SPORT].
Auch Anabolika bewirken - neben ihrer "Hauptaufgabe" des Aufbaus von Muskelmasse sowie der Beschleunigung der muskulären Regeneration - eine gewisse Vermehrung der roten Blutkörperchen. Soweit ein kurzer Ausflug in die Dopingszene im Ausdauersport.

Höhentraining kann ebenfalls die VO_2max verbessern, wobei die kompensatorische Vermehrung der roten Blutkörperchen als Sauerstoffträger durch die "dünnere" Luft (abnehmende Sauerstoffspannung mit zunehmender Höhe) meist nicht sehr ausgeprägt ist und nicht den entscheidenden Trainingseffekt darstellt. Vielmehr bewirkt Höhentraining neben komplexen Effekten auf den Organismus vor allem eine leichtere Abspaltung des Sauerstoffs vom Erythrozyten und damit eine erleichterte O_2-Abgabe an die Muskelzelle. Weiters stimuliert es die körpereigene Erythropoietinbildung.
Es muss jedoch gesagt werden, dass nicht jeder Ausdauersportler von einem Höhentraining profitiert - am ehesten bringt es Vorteile, wenn auch der Wettkampf in der Höhe ausgetragen wird. Auf diesem Gebiet bedarf es noch weiterer Forschungsarbeit.

Nachtrag Oktober 2007: Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten des Nutzens der Hypoxie zum Zwecke der Steigerung der Ausdauerleistungsfähigkeit:
1. Training in der Höhe - Schlafen in der Höhe
2. Training in der Höhe - Schlafen in Tallage
3. Training in Tallage - Schlafen in der Höhe
Nach heutigem Erkenntnisstand ist nur die dritte Variation zur effektiven Steigerung der Ausdauerleistung geeignet, weil erstens in der Höhe keine so hohe Belastungsintensitäten wie in Tallagen möglich sind und allein schon damit der Trainingsreiz zur Erhaltung des Leistungsniveaus nicht gegeben ist (vor allem bei bereits hochausdauertrainiertem Niveau), und zweitens bei längerem Aufenthalt inkl. Training in der Höhe eine katabole Stoffwechsellage gegeben ist und damit ein gewisser Muskelabbau erfolgt, der - auch wenn er subjektiv nicht als solcher wahrgenommen wird - Faktum ist und damit zwangsläufig einer Leistungssteigerung entgegenwirkt.

3. Die Sauerstoff-Verwertung

Der letzte und für die maximale Sauerstoffaufnahme entscheidende Schritt ist die Aufnahme des vom Erythrozyten freigegebenen O_2 aus dem Blut in die arbeitende Muskulatur, die den Sauerstoff zur aeroben Energiegewinnung in den Mitochondrien benötigt [siehe DIE MUSKULÄRE ENERGIEBEREITSTELLUNG IM SPORT]. Der Übertritt von Sauerstoff erfolgt über direkten Kontakt der Kapillaren (die dünnsten, nur mikroskopisch sichtbaren Blutgefäße, "Haargefäße") mit den Muskelzellen.
Ausdauertraining bewirkt über die belastungsbedingte Blutdruckerhöhung als funktionellen Reiz eine verbesserte Durchblutung der Muskulatur, indem es die bereits vorhandenen Kapillaren erweitert, "Ruhekapillaren" öffnet und sogar neue Kapillaren bildet. Diese Vorgänge, die letztlich das muskuläre "Gefäßbett" und damit die maximale muskuläre Durchblutung vergrößern, werden unter dem Begriff der *Kapillarisierung* zusammengefasst.

Die muskuläre Kapillardichte und das kapilläre Erythrozytenvolumen sind maßgeblich für den peripheren Gasaustausch, also die O_2-Diffusion vom Blut (Kapillaren) in die Muskelzellen. **Ausdauertrainierte haben somit eine bessere Sauerstoffausschöpfung in der Muskulatur.**
Gleichzeitig wird die Kapazität des aeroben Muskelstoffwechsels erhöht (der in den Mitochondrien, den "Kraftwerken der Zelle", abläuft), indem es in den Muskelzellen zur Vergrößerung des Mitochondrienvolumens durch Vermehrung und Vergrößerung der Mitochondrien mit entsprechender Steigerung des Enzymgehalts für die aerobe Energiegewinnung kommt (Verbrennung von Glukose und freien Fettsäuren).
[siehe DIE MUSKULÄRE ENERGIEBEREITSTELLUNG IM SPORT]
Eine Steigerung der VO_2max ist also nur möglich, wenn das mitochondriale Volumen durch Ausdauertraining erhöht wird. Die muskuläre Mitochondriendichte (Quotient aus Mitochondrienvolumen und Muskelvolumen) ist die primäre Größe, die die VO_2max definiert, weil die VO_2max in Bezug auf das Mitochondrienvolumen eine festgelegte Größe ist (4.9 ml/min pro cm^3).
Die Trainierbarkeit der Sauerstoffkette Atmung, Blutkreislauf und oxydativer Muskelstoffwechsel ist auf die Kapazität der muskulären Mitochondrienmasse abgestimmt.

Die VO_2max wird absolut in Liter oder Milliliter Sauerstoff pro Minute (l O_2/min oder ml O_2/min) angegeben. Zur Beurteilung der aeroben Kapazität (der allgemeinen Ausdauerleistungsfähigkeit) eignet sich jedoch die ***relative VO_2max*** besser. Das ist **die auf das Körpergewicht bezogene Größe** und wird somit in **Milliliter Sauerstoff pro kg Körpergewicht und Minute** (ml O_2/kg*min) angegeben. Damit sind die Werte verschiedener Personen untereinander vergleichbar.

Die Aussagekraft der VO_2max bezüglich der spezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit in den einzelnen Disziplinen ist unterschiedlich. In Sportarten, in denen das Körpergewicht nicht voll zu tragen ist (z.B. Rudern, Schwimmen, Radfahren in der Ebene), ist die Größe der absoluten VO_2max für die Leistungsfähigkeit aussagekräftiger als die relative VO_2max. Wenn jedoch Arbeit gegen die Schwerkraft zu leisten ist, wie z.B. in den Laufdisziplinen, verhält es sich umgekehrt. Deshalb streben Mittelstrecken-, Langstrecken- und BergläuferInnen immer ein möglichst geringes Körpergewicht an.

Die VO_2 wird mittels Spiroergometrie gemessen. Sie kann aber auch rechnerisch ziemlich genau ermittelt werden. Wenn man z.B. die Wattleistung kennt, ist folgende einfache Formel zweckmäßig, weil die Sauerstoffaufnahme mit der Wattleistung korreliert.

VO_2 (ml/min) = 3.5 (bei Frauen 3.15) x kg Körpergewicht plus 12 x Watt

3.5 bzw. 3.15 ml/min = VO_2 eines Erwachsenen im Sitzen = 1 MET [siehe DER ENERGIEUMSATZ…]
$Watt_{max}$ → VO_2max

Abschließend noch eine wichtige Botschaft an diejenigen Aktiven und Trainer, die glauben, durch Training alles erreichen zu können:
Du kannst trainieren wie ein Besessener - **ob du im Ausdauersport Weltklasseniveau erreichst, entscheidet die Höhe der maximalen Sauerstoffaufnahme, die dir bereits in die Wiege gelegt wurde.** Die VO_2max ist nämlich zum Großteil genetisch determiniert und ihre Trainierbarkeit begrenzt, sie beträgt 20 bis 50%. Die seltenen Einzelbeobachtungen, die einen größeren trainingsbedingten Anstieg der VO_2max zeigen, bestätigen als Ausnahmen die Regel. **Voraussetzung für eine Spitzen-Ausdauerleistungsfähigkeit ist sozusagen das Talent für eine große aerobe Kapazität, sprich eine hohe VO_2max bereits in untrainiertem Zustand**: Ein Ausgangswert von mindestens 60ml pro kg und Minute ist notwendig, um durch jahrelanges, aufbauendes Training die anatomisch-funktionell vorgegebene O_2-Diffusionskapaziät der Lunge (siehe oben) maximal ausschöpfen zu können und damit die erforderliche Größe der VO_2max erreichen zu können werden kann, die nötig ist, um mit der Weltklasse mithalten zu können - nämlich 85 bis 90ml/kg*min.
Zum Vergleich: Die relative VO_2max von Untrainierten beträgt höchstens 40ml/kg*min, die von guten Hobbysportlern 50 bis 60ml/kg*min.

Die trainierbare Steigerung der VO_2max erfolgt **zentral über das Herz-Kreislauf-System durch Vergrößerung des maximalen Herzminutenvolumens** [siehe DAS SPORTHERZ], Ausnahmeerscheinung Miguel Indurain mit 50l/min!) sowie **peripher über die bessere Sauerstoffausschöpfung und -verwertung der Muskulatur durch Kapillarisierung und Verbesserung des aeroben Muskelstoffwechsels.**

Für die Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit ist jedoch nicht nur die Größe der absoluten oder relativen VO_2max ausschlaggebend, sondern vor allem der **Anteil der individuellen VO_2max, der über einen längeren Zeitraum verfügbar bzw. einsetzbar ist** (Klassisches Beispiel: Einzelzeitfahren im Radrennsport). Dies entspricht der VO_2max an der *Dauerleistungsgrenze*, der sog. *aerob-anaeroben Schwelle* (kurz "anaerobe Schwelle").
Diese Fähigkeit ist viel besser trainierbar als die VO_2max selbst, es besteht eine 50 bis 70%ige Verbesserungsmöglichkeit.

Fazit: Auch wenn die genetische Veranlagung im Ausdauersport letztendlich entscheidend ist, und, statistisch gesehen, nur eine(r) unter Tausenden zum (zur) potentiellen Weltrekordler(in) prädestiniert ist, sollte diese Erkenntnis nicht zur Frustration führen, sondern nur so manch überehrgeizigen Sportler und Trainer, der unrealistischen Erfolg verspricht, auf den Boden der Realität zurückholen.
Die Freude am Sport, nicht der Erfolgszwang und das "Siegen müssen", sollte auch für den leistungsorientierten Athleten immer die stärkste Motivation sein.

Das Wichtigste

- **Ausdauer ist, kurz gesagt, "Ermüdungs-Widerstandsfähigkeit".**
- **Das entscheidende Bruttokriterium für die allgemeine Ausdauerleistungsfähigkeit (aerobe Kapazität) ist die maximale Sauerstoffaufnahme (VO_2max). Sie repräsentiert das maximale Transportvermögen von Sauerstoff aus der Luft in die Muskulatur:**
  1. O_2-Zufuhr (Atmung), 2. O_2-Transport (Herz-Kreislauf), 3. O_2-Verwertung (aerobe Energiebereitstellung in den Mitochondrien der Muskelzellen).
- **Die Diffusionskapazität der Lunge für Sauerstoff ist durch die anatomisch vorgegebene Fläche der Alveolen limitiert und nicht trainierbar.**

- **Die Trainierbarkeit der Sauerstoffkette Atmung, Blutkreislauf und oxydativer Muskelstoffwechsel ist auf die Kapazität der muskulären Mitochondrienmasse abgestimmt. Die trainierbare Steigerung der VO_2max erfolgt zentral über das Herz-Kreislauf-System durch Vergrößerung des maximalen Herzminutenvolumens sowie peripher über die bessere Sauerstoffausschöpfung und -verwertung der Muskulatur durch Kapillarisierung und Verbesserung des aeroben Muskelstoffwechsels.**

- **Die VO_2max ist zum Großteil genetisch festgelegt. Besser trainierbar ist die Fähigkeit, den Anteil der VO_2max zu erhöhen, der längere Zeit eingesetzt werden kann, sprich die VO_2max an der sog. anaeroben Schwelle (Dauerleistungsgrenze). Diese Verbesserung der "Schwellenleistung" ist gleichbedeutend mit einer Steigerung der aeroben Kapazität.**

Dr. Kurt A. Moosburger
www.dr-moosburger.at

September 1994 (veröffentlicht im SPORTMAGAZIN Nov. 1994)
(überarbeitet im Oktober 2012)