

DIE MAXIMALE SAUERSTOFFAUFNAHME (VO₂max) **als Bruttokriterium für die Ausdauerleistungsfähigkeit**

Erinnern wir uns an das Sporthertz [siehe [DAS SPORTHERZ](#)], welches durch ein großes Herzminutenvolumen (HMV) eine hohe Sauerstoffaufnahme (VO₂) 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* (VO₂max) 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 O₂-Aufnahme in der Lunge verstanden, gemeint ist aber die O₂-Aufnahme der inneren Organe, bei körperlicher Belastung in erster Linie der Muskulatur).

Um es vereinfacht und verständlich auszudrücken:

- **Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO₂max) 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) sowie
3. die Sauerstoff-Verwertung (Muskelzelle)

im Ausbelastungszustand des Organismus.

Entscheidend ist, wie viel Sauerstoff im Muskelstoffwechsel für die aerobe Energiegewinnung zur Verfügung gestellt wird: Denn je höher die VO₂max, 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.

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 VO₂max.

- **Die VO₂max ist somit das Bruttokriterium für die allgemeine Ausdauerleistungsfähigkeit.**

Gehen wir nun genauer auf die drei Faktoren

- Sauerstoff-Zufuhr
- Sauerstoff-Transport
- Sauerstoff-Verwertung

ein :

1. Die Sauerstoff-Zufuhr :

In der Lunge erfolgt der Übertritt von Sauerstoff (O₂) aus der eingeatmeten Luft ins arterielle Blut und gleichzeitig der Übertritt von Kohlendioxid (CO₂) vom venösen Blut in die Ausatemluft (sog. Gasaustausch). Dabei wird dem Blutkreislauf in der Lunge immer ein Mehrfaches an O₂ angeboten, als er ausschöpfen kann. Daraus folgt, dass ein großes Lungenvolumen nicht automatisch eine hohe VO₂max bewirkt - wenn also jemand glaubt, dass ihn seine große Lungenkapazität (*Vitalkapazität*) von vornherein zum besseren Ausdauersportler macht, dann irrt er! Entscheidend ist nämlich, wie viel des Sauerstoffangebotes in der Lunge vom Blutkreislauf aufgenommen und zu den arbeitenden Muskeln transportiert werden kann (siehe unten).

Es kommt also primär nicht auf eine "Pferdelunge" an, weshalb die Atmung (eine normale Lungenfunktion vorausgesetzt) nicht der leistungslimitierende Faktor für die Ausdauerleistungsfähigkeit ist.

Wohl aber führt Ausdauertraining unter anderem auch zu einer größeren Vitalkapazität und erhöht so das Sauerstoffangebot für den Blutkreislauf.

2. Der Sauerstoff-Transport :

Im Anschluss an den Gasaustausch bewerkstelligt der Blutkreislauf den O₂-Transport zu allen Organen, somit auch zur 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 - im Gegensatz zur Atmung - eine entscheidende Bedeutung für die VO₂max und damit für die aerobe Kapazität : Je mehr Blut pro Minute vom Herz gefördert wird und durch den Kreislauf fließt, desto mehr O₂ wird aus der Atemluft mittels Gasaustausch ins Blut aufgenommen und zur Arbeitsmuskulatur befördert. Diese Größe wird *Herzminutenvolumen (HMV)* genannt [siehe [DAS SPOROTHERZ](#)] und ist der limitierende Faktor für die VO₂max.

Um bei bereits trainingsbedingt individuell optimalem HMV die Transportkapazität für Sauerstoff weiter zu erhöhen, war früher im Hochleistungssport - und seit wenigen Jahren 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 [siehe [DOPING – EIN ÜBERBLICK...](#)].

Seit Ende der 80er Jahre wird dieses "blutige" Verfahren durch Doping mit *Erythropoietin* ("EPO") ersetzt - die heutige, "elegante" Form des "Blutdoping", spätestens seit der Tour de France 1998 jedem ein Begriff (Buchtip: "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 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 (stark erhöhter Hämatokrit!) Erythropoietindoping zurückzuführen. Man muss nämlich auch bedenken, dass aufgrund des durch Schweiß bedingten Flüssigkeitsverlustes bei ungenügender Flüssigkeitszufuhr das Blut weiter "eindickt" [siehe [TRINKEN IM SPORT](#)].

Auch Anabolika bewirken - neben ihrer Haupt“aufgabe“ des Muskelaufbaus 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 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 in der Höhe ein gewisser Muskelabbau erfolgt, der - auch wenn er subjektiv nicht als solcher wahrgenommen wird - doch gegeben ist und ebenfalls einer Leistungssteigerung entgegenwirkt.

3. Die Sauerstoff-Verwertung :

Der letzte und für die maximale Sauerstoffaufnahme mitentscheidende Schritt ist die Aufnahme des vom Erythrozyten freigegebenen O_2 aus dem Blut in die arbeitende Muskulatur, die den Sauerstoff zur aeroben Energiegewinnung 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 “Gefäßbett“ vergrößern, werden unter dem Begriff der Kapillarisierung zusammengefasst.

Ausdauertrainierte haben somit eine bessere Sauerstoffausschöpfung in der Muskulatur.

Gleichzeitig wird die Kapazität des aeroben Muskelstoffwechsels erhöht, indem es in den Muskelzellen zur Vermehrung der Mitochondrien (“Kraftwerke der Zelle“) mit entsprechender Erhöhung des Enzymgehalts für die aerobe Energiegewinnung kommt (Verbrennung von Glukose=Traubenzucker und freier Fettsäuren) [siehe [DIE MUSKULÄRE ENERGIEBEREITSTELLUNG IM SPORT](#)]

Die VO_2max wird absolut in Milliliter Sauerstoff pro Minute ($ml O_2/min$) 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 $VO_2\text{max}$ 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 $VO_2\text{max}$ für die Leistungsfähigkeit aussagekräftiger als die relative $VO_2\text{max}$. 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:

VO_2 (ml/min) = 3.5 (bei Frauen 3.2) x kg Körpergewicht plus 12 x Watt

($Watt_{\text{max}} \rightarrow VO_2\text{max}$) [Stichwort MET, siehe [DER ENERGIEUMSATZ...](#)]

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 Weltklassenniveau erreichst, entscheidet die Höhe der maximalen Sauerstoffaufnahme, die dir bereits in die Wiege gelegt wurde. Die $VO_2\text{max}$ ist nämlich zum Großteil genetisch determiniert und ihre Trainierbarkeit begrenzt, sie beträgt 20 bis 50%. Die seltenen Einzelbeobachtungen, die einen größeren trainingsbedingten Anstieg der $VO_2\text{max}$ zeigen, bestätigen als Ausnahmen die Regel. Voraussetzung für eine Spitzen-Ausdauerleistungsfähigkeit ist sozusagen das Talent für eine große aerobe Kapazität, sprich eine hohe $VO_2\text{max}$ bereits in untrainiertem Zustand: Ein Ausgangswert von mindestens 60ml pro kg und Minute ist notwendig, damit durch jahrelanges, aufbauendes Training die erforderliche Größe der relativen $VO_2\text{max}$ erreicht werden kann, um mit der Weltklasse mithalten zu können - nämlich 85 bis 90ml/kg*min. Zum Vergleich: Die relative $VO_2\text{max}$ von Untrainierten beträgt höchstens 40ml/kg*min, die von guten Hobbysportlern 50 bis 60ml/kg*min.

Die trainierbare Steigerung der $VO_2\text{max}$ erfolgt zentral über das Herz-Kreislauf-System durch Vergrößerung des maximalen Herzminutenvolumens [siehe [DAS SPOROTHERZ](#)], Ausnahmeerscheinung Miguel Indurain mit 50l/min!) sowie peripher über die bessere Sauerstoffausschöpfung und -verwertung der Muskulatur durch Kapillarisation und Verbesserung des aeroben Muskelstoffwechsels.

Für die Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit ist jedoch nicht nur die Größe der absoluten oder relativen $VO_2\text{max}$ ausschlaggebend, sondern vor allem der Anteil der individuellen $VO_2\text{max}$, der über einen längeren Zeitraum verfügbar bzw. einsetzbar ist (Klassisches Beispiel: Einzelzeitfahren im Radrennsport). Dies entspricht der $VO_2\text{max}$ an der Dauerleistungsgrenze, der sog. aerob-anaeroben Schwelle (kurz "anaerobe Schwelle"). Diese Fähigkeit ist viel besser trainierbar als die $VO_2\text{max}$ 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-Kreislaufsystem), 3. O_2 -Verwertung (aerobe Energiebereitstellung in der Muskelzelle).**
- **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

Innsbruck, im September 1994 (veröffentlicht im SPORTMAGAZIN Nov. 1994)
(überarbeitet im Oktober 2007)