

DIPLOMARBEIT

**Grundlagen für eine optimale Leistungsfähigkeit im
Ausdauersport**

eingereicht von

Meinhard Vintler

Mat.Nr.: 0114233

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der gesamten Heilkunde

(Dr. med. univ.)

an der

Medizinischen Universität Graz

ausgeführt am

Institut für Physiologie

unter der Anleitung von Betreuer

Univ.-Prof. Dr. med. univ. Günther Schwabegger

Ort, Datum

.....(Unterschrift)

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, März 2011

Unterschrift
(Meinhard Vintler)

ZUSAMMENFASSUNG/ABSTRACT

Grundlagen für eine optimale Leistungsfähigkeit im Ausdauersport

Leistungssportler erbringen heutzutage in Ausdauersportarten immer bessere Leistungen. Auch im Breitensport werden sehr oft Leistungen erbracht, die einem Leistungssportniveau sehr nahe kommen. Es wird aufgezeigt, von welchen komplexen Faktoren die Leistungsfähigkeit eines Athleten abhängt und wie diese Faktoren zu einander stehen. Vielfach besteht ein falsches Bild vom sogenannten „typischen Ausdauertraining“. Der optimale Ausdauerathlet ist mehr als ein stundenlang trainierender und einseitig belasteter Athlet.

Die ineinander wirkenden Systeme von Atmung, Kreislauf und Muskulatur spielen perfekt zusammen, um Höchstleistungen zu vollbringen. Flüssigkeitshaushalt und Energiezufuhr sind entscheidend. In einer Zusammenschau wichtiger Kapitel der Leistungsphysiologie werden theoretisch und praktisch relevante Themen näher beleuchtet. Ein besseres Verständnis soll dazu beitragen, dass im Zuge von beratenden Tätigkeiten kein Irrweg eingeschlagen wird, um die Betreuung von Ausdauerathleten zu verbessern.

Basic requirements for optimal endurance performance

Professional endurance athletes are competing at higher levels than ever. Age groups are improving too and the performance in their categories often reaches the border to the professionals. This thesis shows the complex factors of excellent performance and their fitting together by summarizing actual knowledge in exercise physiology. The imagination of typical endurance training is sometimes wrong – optimized endurance training is much more than monotone repetitions.

To reach the limits, the systems of ventilation, circulation and muscle metabolism are working together perfectly. Drinking and energy intake is very important. An overview of these chapters in exercise physiology should explain theoretical and practical knowledge. A better understanding prevents false advice in consultations and makes better cooperation with endurance athletes.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Motorische Grundeigenschaften
 - 2.1. Einleitung
 - 2.1.1. Ausdauer
 - 2.1.1.1. Definition von Ausdauer
 - 2.1.1.2. Formen der Ausdauer
 - 2.1.1.2.1. Aerobe Ausdauer
 - 2.1.1.2.1.1. Extensiv-Aerobe Ausdauer
 - 2.1.1.2.1.2. Intensiv-Aerobe Ausdauer
 - 2.1.1.2.2. Anaerobe Ausdauer
 - 2.1.1.2.2.1. Laktazid-anaerobe Ausdauer
 - 2.1.1.2.2.2. Alaktazid-anaerobe Ausdauer
 - 2.1.2. Kraft
 - 2.1.2.1. Kraftausdauer
 - 2.1.3. Koordination
 - 2.1.4. Schnelligkeit
 - 2.1.5. Flexibilität
 - 2.1.5.1. Dehnen und Ausdauersport
 - 2.2. Wertigkeit der motorischen Grundeigenschaften für Spitzen-, Breiten- und Gesundheitssport
3. Physiologische Voraussetzungen
 - 3.1. Einleitung
 - 3.2. Sauerstofftransport
 - 3.2.1. Atmung
 - 3.2.1.1. Allgemeine Atmungsphysiologie
 - 3.2.1.1.1. Respiratorischer Quotient
 - 3.2.1.1.2. Maximale Sauerstoffaufnahme
 - 3.2.1.1.3. Atemäquivalent
 - 3.2.1.1.4. Lungenvolumina
 - 3.2.1.1.5. Anpassung der Atemparameter durch Training
 - 3.2.1.2. Atemmuskulatur
 - 3.2.1.2.1. Muskeln der Inspiration
 - 3.2.1.2.2. Muskeln der Expiration
 - 3.2.1.2.3. Atemmuskeltraining und Trainierbarkeit der Atmung
 - 3.2.1.3. Höhentraining
 - 3.2.2. Kreislauf
 - 3.2.2.1. Einleitung
 - 3.2.2.2. Kreislauf unter Belastung
 - 3.2.2.3. Hämatokrit
 - 3.2.2.3.1. Hämatokrit-Paradoxon
 - 3.2.2.3.2. Hämatokrit und Leistungsfähigkeit
 - 3.2.2.4. Thermoregulation
 - 3.2.2.4.1. Wärmeabgabe

- 3.2.2.4.2. Beeinflussung der Thermoregulation
 - 3.2.2.4.3. Gesundheitliche Probleme bei Belastung in der Hitze
 - 3.2.3. Muskulatur
 - 3.2.3.1. Aufbau und Funktion der quergestreiften Muskulatur (Skelettmuskulatur)
 - 3.2.3.2. Muskelfasertypen
 - 3.2.3.2.1. Typ-I-Fasern
 - 3.2.3.2.2. Typ-II-Fasern
 - 3.2.3.3. Energiebereitstellung im Muskel
 - 3.2.3.3.1. Cori-Zyklus und Alanin-Zyklus: „Recycling“ von Abfallprodukten des Stoffwechsels
- 4. Ergogene Faktoren: Flüssigkeitshaushalt und Ernährung bei körperlicher Aktivität
 - 4.1. Flüssigkeitzufuhr
 - 4.1.1. Schweißproduktion und Flüssigkeitsverlust
 - 4.1.2. Flüssigkeitsbilanz
 - 4.1.3. Praktische Empfehlungen für Trinkmengen bei Belastung
 - 4.1.4. Trinkverhalten bei extremen Umweltbedingungen
 - 4.2. Energiezufuhr
- 5. Diskussion
- 6. Literaturverzeichnis
- 7. Tabellen und Abbildungsverzeichnis

1. Einleitung

Ausdauersportarten wie Radfahren, Laufen oder Triathlon werden immer mehr zu Trendsportarten. Der Bereich des Breitensports umfasst zunehmend auch Leistungen, die dem Leistungssportniveau sehr nahe kommen. Daher kommt es auch häufig vor, dass Sportler auf mitunter sehr hohem Niveau trainieren. Dies setzt wiederum ein gewisses Know-how der allgemeinen Trainingslehre voraus, um Übertraining zu vermeiden, damit Verletzungen vorzubeugen und die Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten.

Da ich als praktizierender Ausdauersportler sehr oft erlebe, dass auch in Fachkreisen vielfach ein falsches Bild vom sogenannten „typischen Ausdauerathleten“ herrscht, möchte ich hier Grundlegendes über die Physiologie der Leistungsfähigkeit im Zusammenhang mit Ausdauersport zusammenfassen. Dabei sollen die vielfältigen Erfordernisse an die Leistungsfähigkeit im Ausdauersport so dargestellt werden, dass das Verständnis für den Athleten verbessert wird und auch im Zuge von beratenden Tätigkeiten als Trainer, Sportwissenschaftler oder Sportmediziner kein Irrweg eingeschlagen wird.

Um sich die Leistungsfähigkeit des Menschen im Ausdauersport – genauer gesagt im Leistungs- bis Hochleistungsausdauersport – bewusst zu machen, sollte man sich überlegen, welche Leistungsniveaus in den verschiedenen Sportarten und unterschiedlichen Distanzen derzeit erreicht werden können.

In *Tabelle 1* sind einige Beispiele von Weltrekorden über verschiedene Langdistanzen aufgelistet. Diese sollen veranschaulichen, welche Zielzeiten im Leistungssport heute angestrebt werden müssen. Tagesrennen wie Marathon und Ironman-Triathlon stellen nicht nur Profiathleten, sondern auch zunehmend Breitensportler vor spezifische Herausforderungen und verlangen neben guter Vorbereitung auch eine gute Organisation bezüglich Renntaktik und Einteilung der Energie- und Flüssigkeitszufuhr.

Noch längere Belastungen als bei diesen Distanzen gibt es zum Beispiel beim Radfahren. Im Jahre 2005 beispielsweise fuhr Lance Armstrong bei der Tour de France eine

Durchschnittsgeschwindigkeit von 41,65 km/h bei einer Gesamtfahrzeit von 86 Stunden, 15 Minuten und 2 Sekunden. Beim Race-Across-America wurde der noch gültige Weltrekord bereits im Jahr 1986 aufgestellt. Die durchschnittliche Geschwindigkeit betrug 24,78 km pro Stunde. Viele dieser Rekorde sind zwar schon einige Jahre alt, aber die Topleistungen sind immer noch konstant um diese Niveaus zu finden.

Tab. 1: Weltrekorde über verschiedene Langdistanzen

DISZIPLIN	ORT/JAHR	ATHLET	ZEIT [h:min:s]
Marathon	Berlin 2008	Haile Gebrselassie	02:03:59
Ironman Triathlon	Roth 1997	Luc van Lierde	07:50:27
100 km Lauf	Tokoro 1998	Takahiro Sunada	06:13:33
Tour de France	Frankreich 2005	Lance Armstrong	86:15:02
Race-Across-America	USA 1986	Pete Penseyres	201:47

Je nach Anforderung der Sportart und der Distanz siegen unterschiedliche Athleten, die sportartspezifisch grenzwertige Leistungen vollbringen. Denkt man an Ausdauersport, wird sehr vielen die Assoziation zu endlosen langen Trainingseinheiten und monotonen Wiederholungen kommen. Das Bild des klassischen Ausdauerathleten stellt meist einen ausgezehrten und abgemagerten Körper dar. Dabei ist der optimale Ausdauerathlet viel mehr als ein stundenlang trainierender und einseitig belasteter Athlet. Im Gegenteil – gerade die sportliche Vielseitigkeit macht den Ausdauerathleten stark in seiner Disziplin und hält ihn verletzungsfrei und leistungsfähig.

Abgesehen von den spezifischen, sportartabhängigen Anforderungen und Eigenheiten sind es zum Großteil doch ähnliche Probleme, welche die Athleten bei ihren Leistungen an die Grenzen bringen. Die Physiologie des menschlichen Körpers ist die zentrale Grundlage dafür. Sauerstoff und Substrate, welche Energie liefern, und Wasser sind die Bausteine der Leistung. Die ineinander wirkenden Systeme von Atmung, Kreislauf und Muskulatur spielen perfekt zusammen, um Höchstleistungen zu vollbringen. Die einzelnen Komponenten einer optimalen Leistungsfähigkeit sollen hier deutlich gemacht werden. Dabei soll auch von der Ansicht Abstand genommen wer-

den, dass Ausdauersport eine eintönige Betätigung ist. Dies gilt sowohl für den Leistungssport, ebenso aber auch für den Gesundheits- und Breitensport.

2. Motorische Grundeigenschaften

2.1. Einleitung

Die körperliche Leistungsfähigkeit im Rahmen einer Sportart wird aus sportphysiologischer, aber auch rein trainingstechnischer Sicht durch fünf motorische Grundeigenschaften bestimmt. Die Niveaus der einzelnen Komponenten limitieren die Leistungsfähigkeit und können je nach Anforderung durch Trainieren oder Üben verbessert werden. Je nach Sportart sind die Schwerpunkte der Fähigkeiten in anderen Bereichen dieser Grundeigenschaften zu finden und bestimmen somit den Erfolg [1].

Die fünf motorischen Grundeigenschaften sind [1]:

- Ausdauer
- Kraft
- Koordination
- Schnelligkeit
- Flexibilität

Wenn man nun annehmen würde, dass ein idealer Ausdauerathlet ausschließlich über eine gut ausgeprägte Ausdauerkomponente verfügt, liegt man falsch. Wenn diese Meinung womöglich noch von einer den Athleten betreuenden Person (z.B. Arzt oder Trainer) vertreten wird, könnte dies in Bezug auf die Entwicklung des Athleten sogar kontraproduktiv sein. So sind Weltklasse-Ausdauerathleten sehr wohl auch in ihrer allgemeinen Fitness gut ausgebildet. Vielfach sind Athleten durch jahrelanges Training und gute genetische Anlagen dazu imstande, Leistungen ohne komplexen Trainingsaufbau zu verbringen; ob damit aber ihr Potential ausgeschöpft ist, kann man nicht mit Sicherheit sagen.

2.1.1. Ausdauer

2.1.1.1. Definition von Ausdauer

Laut *Haber* ist Ausdauer ihrer physiologischen Definition nach, die Fähigkeit, bei Muskeltätigkeit verbrauchtes ATP durch Steigerung der Produktion zu resynthetisieren, und damit eine neue Leistungshomöostase für ATP einzustellen [2]. Der wohl geläufigste Wert der aeroben Leistungsfähigkeit ist die maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\max}$); diese wird auch als Determinante für den Erfolg im Ausdauersport herangezogen [3].

Die erwähnte physiologische Fähigkeit der Leistungshomöostase ist ein optimales Zusammenspiel von Atmung, Kreislauf und Energiestoffwechsel der Muskulatur.

Die *Abbildung 1* zeigt hier in einfacher Weise und symbolisch das Ineinandergreifen der Systeme. Der über die Atmung aufgenommene Sauerstoff muss bis in die Mitochondrien der Muskeln transportiert und das beim oxidativen Abbau der Nährstoffe entstehende Kohlendioxid und Wasser in umgekehrter Richtung wieder abtransportiert werden.



Abb. 1: Schematische Darstellung des Ineinandergreifens der Systeme Atmung, Kreislauf und Muskulatur

2.1.1.2. Formen der Ausdauer

Die physiologische Unterscheidung der verschiedenen Ausdauerformen erfolgt nach den biochemischen Eigenschaften der ATP-Resynthese. Die ATP-Synthese kann auf vier verschiedene Arten geschehen (siehe *Tabelle 2*). Prinzipiell unterscheidet man die *aerobe* Ausdauer von der *anaeroben* Ausdauer. Beide Ausdauerformen können

wiederum jeweils in *extensive* und *intensive* Ausdauer unterteilt werden. Die Unterschiede liegen in der jeweiligen Substratverwertung und werden nachfolgend kurz erklärt. Für genauere biochemische Abläufe sei auf die entsprechenden Lehrbücher oder Fachliteratur verwiesen.

Tab. 2: Übersicht über die Formen der Ausdauer; FFA free fatty acids, CHO carbohydrates

O₂-BEDARF	INTENSITÄT	SUBSTRAT	DAUER
aerob	extensiv	FFA/CHO	> mehrere Stunden
aerob	intensiv	CHO/FFA	~ 1 Stunde
anaerob	extensiv	CHO	~ 2 min
anaerob	intensiv	Kreatinphosphat	< 10 sec

2.1.1.2.1. Aerobe Ausdauer

Bei der *aeroben Ausdauer* erfolgt die ATP-Resynthese durch den oxidativen Abbau von energiereichen Substraten [4]. Je nach Anteil der zur Verfügung gestellten Substrate an der Energiegewinnung unterscheidet man weiter die *extensive* von der *intensiven* aeroben Ausdauer.

Wird aus Glykolyse und β -Oxidation das Acetyl-CoA erzeugt, welches anschließend über den Zitratzyklus verwertet wird, spricht man von *extensiver* Ausdauer; bei überwiegender Glykolyse von *intensiver* Ausdauer.

Die Anteile von Fett- bzw. Kohlenhydratoxidation können anhand des Respiratorischen Quotienten (RQ) ermittelt werden. In Ruhe und bei geringer Belastung ist der Anteil der Fettoxidation am Energieumsatz in der Muskulatur etwa 2/3. Dies zeigt sich durch einen RQ von 0,82 - 0,85. Eine Auflistung der Energieanteile aus den Substraten Fett und Kohlenhydrate ist in *Tabelle 3* zu sehen. Mit zunehmender Intensität nimmt der Anteil der Fettverbrennung zugunsten der Glukoseoxidation fließend ab, was auch am Anstieg des RQ bei ansteigender Belastung erkennbar ist [5].

Tab. 3: Zusammenhang zwischen respiratorischem Quotienten (RQ) und Energieausbeute aus Kohlenhydraten und Fetten. Bei dieser Berechnung wird der Proteinstoffwechsel vernachlässigt.

RQ	KJ/L O ₂	% ENERGIE AUS KOHLENHYDRATEN	% ENERGIE AUS FETT
0,70	19,68	0	100
0,80	20,16	1/3	2/3
0,85	20,42	50	50
0,95	20,68	2/3	1/3
1,00	21,20	100	0

2.1.1.2.1.1. Extensiv-Aerobe Ausdauer

Physiologische Definition der *extensiv-aeroben* Ausdauer laut Haber [5]:

Die ATP-Synthese während der Belastung erfolgt durch oxidativen Glukose- und Fettsäurenabbau, also immer mit einem Mischstoffwechsel. Der Anteil der Einzelkomponenten wird vor allem über die Intensität gesteuert. Die entscheidende Determinante, ob mehr oder weniger Fett abgebaut wird, ist der Grad der Auslastung der $\dot{V}O_{2max}$, also die Intensität der Belastung.

2.1.1.2.1.2. Intensiv-Aerobe Ausdauer

Physiologische Definition: Die ATP-Synthese erfolgt auf Basis ausschließlicher Glukoseoxidation [5]. Bei Leistungsüberprüfung mittels Spiroergometrie kann dies durch einen RQ >1 angezeigt werden. Die Glukose kommt aus dem in Muskel und Leber gespeicherten Glykogen und kann aus dem Skelettmuskel nicht wieder ins Blut abgegeben werden und für andere Muskelgruppen verwendet werden. Grund hierfür ist die Umwandlung in Glukose-6-Phosphat [6]. Die gut gefüllten Speicher in der laufspezifischen Muskulatur nützen einem beim Triathlon z.B. nicht für die Schwimmleistung. Die Speicherkapazität beträgt bei Untrainierten ca. 15g Glykogen pro kg Muskel.

2.1.1.2.2. Anaerobe Ausdauer

Hier erfolgt die ATP-Resynthese ohne O₂. Es werden energiereiche Moleküle abgebaut bzw. gespalten und höhere Umsatzraten der Energie erreicht, was eine höhere Leistung ermöglicht. Diese Form der Energiebereitstellung wird daher genutzt, wenn die oxidative Synthese dem Bedarf nicht mehr nachkommen kann, also bei Leistungen über der anaeroben Schwelle.

2.1.1.2.2.1. Laktazid-anaerobe Ausdauer

Hier erfolgt die ATP-Synthese auf Basis der Glykolyse [4]. Sie spielt per definitionem für Wettkämpfe mit einer Belastungsdauer von 6 – 8 Minuten eine Rolle. Je kürzer die Wettkampfdauer, desto größer ist die Rolle der Glykolyse als energieliefernder Prozess. Bei einem Intervalltraining z.B. kommt es auch zu derartigen kurzen Belastungen. Es sei hier nur soviel erwähnt, dass dieses spezifische Training eine gute Grundlagenfitness voraussetzt, damit die gesetzten Trainingsreize auch adäquat verarbeitet werden können. Somit ist Training in diesem Bereich auf jeden Fall notwendig, setzt aber ein fortgeschrittenes Leistungsniveau voraus.

2.1.1.2.2.2. Alaktazid-anaerobe Ausdauer

Sie ist die energetische Basis des 100-m-Sprints; die ATP-Resynthese erfolgt auf Grund der Kreatinphosphatpaltung [4].

Die Belastungsdauer für derartige Leistungen beträgt bis 10 Sekunden. Sprints und Schnellkraftbelastungen fallen in diese Rubrik. Diese sind wie die laktazid-anaerobe Ausdauer spezielle Trainingsbelastungen, die zur Entwicklung bestimmter Leistungskomponenten beitragen, jedoch fortgeschrittenes Niveau voraussetzen.

2.1.2. Kraft

Die physiologische Definition der Kraft ist die Fähigkeit des Muskels, Spannung zu entwickeln [7]. Kraft wird in der sportwissenschaftlichen Literatur je nach Autor in verschiedenste Unterarten eingeteilt. Unter ATP-Spaltung bzw. Kreatinphosphat-spaltung kommt es zur Kontraktion der Myofibrillen. Durch den gleichen Aufbau aller Muskelfibrillen (die Anzahl pro cm^2 Muskelquerschnitt ist immer gleich) ist grundsätzlich die maximal erzielbare Kraft direkt proportional dem funktionellen Querschnitt des Muskels.

Die Kraft, die aber tatsächlich erreicht werden kann, hängt nicht nur vom Muskelquerschnitt als organische Grundlage, sondern auch von der intramuskulären Koordination bzw. Synchronisation ab [7].

Für die Praxis heisst dies, dass mit Hypertrophietraining der Querschnitt als Grundlage der Muskelkraft trainiert wird. Die Koordination bzw. Synchronisation dieser aufgebauten Muskelmasse erfolgt zu einem großen Teil während des Krafttrainings selbst, darüber hinaus aber auch in der spezifischen Sportart, die trainiert wird.

2.1.2.1. Kraftausdauer

Als allgemeine Definition der Kraftausdauer bezeichnet *Haber* [8] die Fähigkeit, eine bestimmte Übung mit einem bestimmten Gewicht und einer fixen Bewegungsfrequenz möglichst oft zu wiederholen.

Im Ausdauersport sind diese Übungen von enormer Bedeutung, wenn sie sportart-spezifisch durchgeführt werden. Um die Kraftausdauer zu steigern, muss zunächst die Maximalkraft trainiert werden. In den ersten zwei bis drei Entwicklungsjahren im Ausdauersport sollte grundsätzlich auch das Maximalkrafttraining als Basis der Kraftentwicklung herangezogen werden [9].

2.1.3. Koordination

Die intermuskuläre Koordination ist das Zusammenspiel vieler Muskeln zu einer bestimmten zweckmäßigen Bewegung [4]. Die intramuskuläre Koordination bzw. Synchronisation ist ebenfalls eine Leistung des zentralen Nervensystems, es handelt sich also primär auch um eine neuromuskuläre Koordination. Die intramuskuläre Koordination bzw. Synchronisation ist Grundlage aller sportlicher Techniken und Bewegungsabläufe und ihr Ausmaß wird in Prozent angegeben. Werden mehr motorische Einheiten des vorhandenen Muskelquerschnitts aktiviert, entsteht auch eine größere Kraftentwicklung. Es ist in der Praxis bedeutend, dass diese Synchronisation bei Untrainierten bei ca. 35 – 40% liegt und bei hoch Krafttrainierten auf bis zu 90% gesteigert werden kann [10].

Diese Tatsache macht klar, wieso nach Beginn eines Krafttrainings die Kraftzunahme in den ersten Wochen primär durch die Verbesserung der intramuskulären Koordination bzw. Synchronisation und nicht durch eine Hypertrophie bedingt ist. Der Muskel lernt sozusagen, seine vorhandenen Fasern bzw. motorische Einheiten zu koordinieren und damit sinnvoll einzusetzen. Die maximale Kraft hängt neben dem Muskelquerschnitt auch zu einem großen Teil von dieser Synchronisation ab.

Intramuskuläre Koordination nennt man die Fähigkeit, rasch Muskelfasern zu rekrutieren und eine maximale Synchronisation in möglichst kurzer Zeit zu erreichen. Auch dies ist eine Leistung des ZNS. Nach einem Krafttraining verbessert sich aber auch das intermuskuläre Zusammenspiel einzelner Muskeln zu sinnvollen Bewegungen. Es wird so nicht nur mehr Kraft entwickelt, sondern auch auf mehrere Muskeln verteilt, so dass die einzelne Muskelfaser weniger leisten muss, um dasselbe Kraftniveau aufrecht zu erhalten.

Auf diese Weise ermüden die einzelnen Muskelfasern weniger schnell, da weniger Arbeitsleistung pro muskulärer Einheit zu vollbringen ist. Anders wäre es nicht möglich, einen Marathon in 2:04 Stunden zu laufen. Durch die verringerte Arbeit für die einzelne Muskelfaser, kann bei guter intramuskulärer Koordination, dieselbe Leistung länger aufrechterhalten werden. Die Entwicklung dieser Fähigkeiten dauert mindestens 5 Jahre, weshalb begleitendes Krafttraining im Ausdauersport von großer Bedeutung ist [4].

2.1.4. Schnelligkeit

Schnelligkeit im physiologischen Sinn beruht einerseits auf der Morphologie und Funktion der Muskulatur, andererseits auf der Qualität der neuromuskulären Koordination. Sie muss im Leistungssport ganzjährig trainiert werden, um optimale Resultate zu erhalten. Durch Hypertrophietraining werden durch Vergrößerung der Muskelmasse die organischen Grundlagen der Schnelligkeit gebildet, weshalb hier wiederum darauf hingewiesen wird, was für eine zentrale Bedeutung das Krafttraining im Ausdauersport hat.

2.1.5. Flexibilität

Wird ein Muskel gedehnt, so reizt dies die Muskelspindel, die als Sinnesorgan im Muskel eingebettet ist. Die Impulse werden über sensible Nervenfasern ins Rückenmark weitergeleitet und von dort direkt auf Nervenzellen übertragen. Dies ist der sogenannte Dehnungsreflex oder Muskeleigenreflex. Die Funktion von Reflexen ist es, überschießende Bewegungen zu verhindern, flüssige Bewegungen zu fördern und die Körperhaltung aufrecht zu erhalten. Auch in den Sehnen sind derartige Spindeln enthalten die eine zu starke muskuläre Überdehnung und damit Verletzungen verhindern sollen.

Dehnen im Rahmen des Sports hat mit diesen Dehnungsreflexen im eigentlichen Sinn nicht viel zu tun. Es sollen beim klassischen Dehnen die Muskeln verlängert werden und damit ein größerer Bewegungsspielraum ermöglicht werden.

Ein gewisser Umfang an Bewegungsspielraum ist jedenfalls notwendig, um sämtliche Hebelwirkungen des Körpers auszunützen und damit eine optimale Leistung zu erbringen. Auch bei Sportarten, bei denen es häufig zu unkontrollierten Bewegungen kommen kann (Eishockey, Handball, Tennis...), kann ein größerer Bewegungsumfang die Verletzungsgefahr reduzieren. Bei Sportarten, wo derartige Ansprüche nicht zwangsläufig gestellt werden, ist Dehnen meist nicht notwendig, weil es die körperliche Leistungsfähigkeit an sich nicht beeinflusst [10].

Laut *Haber* ist eine nennenswerte Wirkung des Dehnens allerdings nur bei annähernd täglicher und richtiger Anwendung zu erwarten. Für den Ausdauersport gibt es die Empfehlung, die ischiocrurale Muskulatur zu dehnen, um so der Entstehung von Lendenwirbelsäulenproblemen und Knieproblemen vorzubeugen. Auch ein Muskelkater kann durch Dehnen nicht verhindert oder gar vermindert werden. Hier hilft nur ein guter Trainingszustand und sorgfältiges Aufwärmen [10].

Hingegen ist in der Rehabilitation von Sportverletzungen Dehnen sehr hilfreich. Gegen die verkürzte Muskulatur nach längerer Ruhigstellung ist Dehnen die Methode der Wahl, um die Beweglichkeit wieder herzustellen.

2.1.5.1. Dehnen und Ausdauersport

Wie oben angeführt, ist Dehnen nur dann sinnvoll, wenn es täglich und langfristig geübt wird. Ein zweimaliges Dehnen pro Woche nach dem Laufen beispielsweise zeigt keine Wirkung und kann daher als überflüssig betrachtet werden [10].

Dehnung sollte bei völlig entspannter Muskulatur erfolgen. Eine entspannte Körperhaltung ist Grundvoraussetzung für Dehnungsübungen, daher ist es beispielsweise nicht zielführend, die Beine im Stehen zu dehnen – die Entspannung bei gespanntem, zweitem Bein ist kaum möglich. Besser ist es also, die Dehnungsübungen für die Beine im Sitzen oder Liegen durchzuführen.

Unter sanftem Zug und bei „totaler“ Entspannung wird die zu dehnende Muskelgruppe bis kurz vor die Schmerzgrenze gedehnt und diese Position für 30 – 60 Sekunden gehalten. Schmerzen sind ein wichtiges Warnsymptom und als solches auf jeden Fall zu beachten. Wippen und federnde Bewegungen sind für die Verbesserung des Dehnungszustandes wirkungslos und können mitunter zu kleinsten Einrissen in den Z-Scheiben der Myofibrillen und des umliegenden Bindegewebes führen.

Bei den möglichen Vorteilen des Dehnens muss aber berücksichtigt werden, dass man den Kapsel-Band-Apparat auch überdehnen und damit instabil machen kann; genau-

so wie eine zu schwache Muskelmanschette zuwenig Halt gibt und zu verminderter Gelenkstabilität führt. Hieraus können Knorpelschäden und degenerative Gelenkveränderungen entstehen. Dieses Zusammenspiel muss respektiert werden, um eine schädigungsfreie Gelenkbeweglichkeit zu erhalten. Es gilt der Grundsatz: „Stabilität geht vor Mobilität“ [4].

2.2. Wertigkeit der motorischen Grundeigenschaften für Spitzen-, Breiten- und Gesundheitssport

Man stelle sich klischeehaft eine Seifenkiste vor, die von einem Kind gebaut wurde. Meiner Annahme nach denkt jetzt niemand an die perfekte Rennmaschine. Je nach Vorstellung wird diese verschiedene Mängel aufweisen: eine Karosserie mit Löchern, instabile oder gar wackelige Räder und Radachsen, eine klapprige Lenkung usw... Auch wenn man diese Kiste jahrelang fahren lassen würde, wird sie dadurch nicht zum Formel 1 Auto. Ich möchte hier meinen Freund und Trainer *Mario Huys* zitieren: „Aus einem Esel kannst du kein Rennpferd machen.“

Symbolisch gesprochen müsste man sich jetzt ans Werk machen, um diese Seifenkiste zu „tunen“. Man verändert ihre Stabilität, gibt ihr Präzision und ändert eventuell die Reifendurchmesser. Man kann zwar keinen modernen Rennwagen daraus machen, aber es fährt sich um einiges besser. Viele Menschen, die mit Ausdauersport beginnen möchten, ja sogar viele Leistungssportler, die jahrelang monoton trainiert haben, weisen Defizite an ihrem Bewegungsapparat in allen erdenklichen Hinsichten auf. Koordinative Schwierigkeiten, Defizite der Muskulatur und damit an Kraft, fehlende Stabilität usw. machen es unmöglich, Ausdauerheiten im Sinne eines adäquaten Trainingsreizes zu absolvieren. Ein gesunder Muskelapparat stützt nicht nur den ganzen Körper, sondern ist zusätzlich die beste Prävention gegen Verletzungen, Osteoporose und letztlich auch gegen den körperlichen Verfall im Alter.

Um systematisch Erfolg mit dem Training zu haben, sei es im Leistungs- wie auch im Gesundheitssport, müssen die Grundlagen der Trainingslehre berücksichtigt werden. Vor allem als Arzt sollte man vorsichtig damit sein, aus Unwissenheit oder Verlegenheit falsche Ratschläge zu geben.

Die optimale Reihenfolge des Erlernens einer Sportart – die Aufnahme eines Ausdauertrainings gilt als Erlernen – setzt sich folgendermaßen zusammen:

1. Erlernen von Technik und Bewegungsablauf (Koordination)
2. Entwicklung von Kraft
3. Entwicklung von Schnelligkeit und Flexibilität
4. Stabilisierung der erlernten Fähigkeiten (Ausdauer)

Diese Entwicklungsstufen gehen fließend ineinander über. Ein Trainer kennt die Belastungen einzelner Trainingseinheiten und weiß durch Überprüfung und Feedback seines Athleten, die Belastungreize adäquat zu setzen.

Für die Grundlagen einer medizinischen Trainingslehre sei hier auf Fachliteratur verwiesen, wie zum Beispiel den „Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung“ von *Haber*.

Werden die Ausdauerathleten richtig betreut und angeleitet, kann sich das Leistungspotential besser entwickeln und bis zu den individuellen Grenzen ausgeschöpft werden. „Aus einem Esel kannst man zwar kein Rennpferd machen, aber einen schnellen Esel auf jeden Fall“, so *Huys*.

3. Physiologische Voraussetzungen

3.1. Einleitung

Durch regelmäßiges körperliches Training passt sich der Körper den Belastungen an. Es gibt beinahe in allen Organsystemen mehr oder minder schnelle Adaptationserscheinungen. Für die Leistungsfähigkeit im Spitzensport sind sehr viele Komponenten maßgebend. Die Genetik – also die angeborenen körperlichen Grundvoraussetzungen des einzelnen Athleten – ist mit Sicherheit von herausragender Bedeutung. Zusätzlich entscheidend für die Entwicklung sind die Jahre des Trainingsaufbaus, der Lebensstil und gesundheitliche Aspekte. Die Anpassungen, welche körperliche Aktivität mit sich bringt, sind vor allem auch für den Gesundheitssport die beste präventive Unterstützung auf allen Ebenen.

3.2. Sauerstofftransport

3.2.1. Atmung

3.2.1.1. Allgemeine Atmungsphysiologie

Der eigentliche Mittelpunkt der Leistungsfähigkeit des menschlichen Körpers ist das ATP (Adenosintriphosphat). Es muss fortwährend gebildet bzw. regeneriert werden, da die Muskeln nur geringe Mengen davon speichern können. Der wichtigste Stoff um aus gespeicherten Nährstoffen Energie zu gewinnen (ATP zu bilden), ist der Sauerstoff. Die ATP-Produktion aus Glukose im Rahmen der aeroben Glykolyse des Citratzyklus und der Atmungskette liegt bei ca. 30 ATP-Molekülen [11]. Die Regeneration bzw. Bildung erfolgt vorwiegend aerob, da die Ausbeute gegenüber der anaeroben Glykolyse (liefert nur 2 ATP-Moleküle) um vieles effektiver ist. Um den Sauerstoff aber in die Zelle zu bringen, müssen einige Hindernisse überwunden werden. Die langen Wege im vielzelligen Organismus des Menschen werden durch Konvektion überwunden, die kurzen Wege durch Diffusion. Als Konvektion wird das „Mitreissen“ von Teilchen über weite Strecken bezeichnet. So wird O₂ schließlich über die äußeren Atemwege und das Blutkreislaufsystem in Richtung Körperzellen transportiert.

Durch Diffusion werden dabei Konzentrationsgradienten passiv überwunden, wie zum Beispiel beim Eintritt von O_2 in den Körper durch die Alveolen. Im Rahmen der Atmungskette, wo das aufgenommene O_2 schließlich verbraucht wird, werden die ATP-Moleküle produziert, die für jegliche aktive Bewegung des menschlichen Körpers verantwortlich sind (oxidative Phosphorylierung oder Atmungskettenphosphorylierung). Gleichzeitig muss das bei der oxidativen Erzeugung von ATP entstehende CO_2 den Körper wieder verlassen, ansonsten würde es – zur Kohlensäure hydratisiert – eine Übersäuerung herbeiführen. Für die Aufnahme von O_2 und die Abgabe von CO_2 (äußere Atmung) ist das zentrale Organ die Lunge, welche ihre Funktion nur in enger Zusammenarbeit mit den anderen Organsystemen erfüllen kann. Der vom Herzen angetriebene Blutkreislauf dient als Transportsystem zwischen Lunge und Gewebe. Die quergestreifte Atmungsmuskulatur hilft, die nötigen Druckdifferenzen zu erzeugen.

3.2.1.1.1. Respiratorischer Quotient

Der respiratorische Quotient (RQ) ist das Verhältnis der bei der „Verbrennung“ bzw. beim oxidativen Abbau von Nährstoffen in der Zeiteinheit freigesetzten Menge an Kohlendioxid (CO_2) zum verbrauchten Sauerstoff (O_2) [4].

Somit zeigt der RQ einen bestimmten Stoffwechszustand an und spiegelt die Relation der Fett- zur Kohlenhydratoxidation wieder. Dieser Zustand variiert je nach Kapillardichte und Mitochondrienzahl und kann gleiche Relationen bei unterschiedlichen Leistungsniveaus haben. Ob nun mehr Fett- oder mehr Kohlenhydratverbrennung stattfindet, hängt von der oxidativen Kapazität des Individuums ab. Ein Wert von 0,7 würde eine reine „Fettverbrennung“ bedeuten, was aber nur theoretisch ist, da eine reine Fettverbrennung ohne Glykolyse nicht möglich ist. Der bekannte Merkspruch „Fette verbrennen nur im Feuer der Kohlenhydrate“ kommt daher, dass das bei der β -Oxidation entstehende Acetyl-CoA im Zitratzyklus weiterverarbeitet werden muss. Hierfür ist Oxalacetat notwendig, das ausschließlich aus der Glykolyse bzw. aus Pyruvat stammt. Somit ist ein basaler Glukoseabbau notwendig, der auch stattfindet. Bei der indirekten Kalorimetrie dient der RQ zur Bestimmung des kalorischen Äquiva-

lents; damit kann nach Messung der O₂-Aufnahme der Energieumsatz berechnet werden [10].

$$\text{Energieumsatz} = \dot{V}O_2 \times \text{kalorisches \u00c4quivalent}$$

Zwischen reiner Fettverbrennung (RQ=0,7) und reiner Kohlenhydratverbrennung (RQ=1,0) sind die Mischverh\u00e4ltnisse der Anteile der Energiebereitstellung zum Beispiel bei einem RQ von 0,85 dann jeweils 50/50.

3.2.1.1.2. Maximale Sauerstoffaufnahme

Die maximale Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\max}$) stellt das maximale Transportverm\u00f6gen von Sauerstoff, der \u00fcber die Lungen aufgenommen wird, zur arbeitenden Muskulatur dar. Die $\dot{V}O_{2\max}$ ist identisch mit der h\u00f6chstm\u00f6glichen Pumpleistung des Herzens. Sie ist von Faktoren wie Alter, Geschlecht und Genetik abh\u00e4ngig und kann durch Training gesteigert werden.

Bei Hochleistungsathleten liegt sie bei bis zu ~ 80 ml/kg·min; man kann daraus genaue R\u00fcckschl\u00fc\u00dfe auf die H\u00f6chstleistungsf\u00e4higkeit eines Athleten ziehen. Sie wird durch viele Faktoren begrenzt [92]:

- Atemminutenvolumen bzw. Ventilation
- Diffusionskapazit\u00e4t
- Herzminutenvolumen
- arterioven\u00f6se O₂-Differenz
- gesamtes Blutvolumen
- totalen H\u00e4moglobingehalt

Bei einer intensiven sportlichen Belastung d\u00fcrfte der leistungsbegrenzende Faktor die H\u00f6he des Herzminutenvolumens und die M\u00f6glichkeit der O₂-Aussch\u00f6pfung der arbeitenden Muskelzelle sein [92].

Die hohe $\dot{V}O_{2\max}$ bei diversen Ausdauerbelastungen wird ermöglicht durch eine je nach Trainingszustand auf das bis zu 6 – 8-fache Zunahme des Herzminutenvolumens, die maximale O_2 -Ausschöpfung ($avDO_2$) in der Peripherie und die hohe Diffusionskapazität der Alveolen.

In *Tabelle 4* sind in einer Übersicht die internen und externen Faktoren aufgelistet, welche die Sauerstoffaufnahme limitieren.

Tab. 4: Limitierung der maximalen Sauerstoffaufnahme

INTERNE FAKTOREN	EXTERNE FAKTOREN
Lungenventilation	Belastungsmodus
Diffusionskapazität der Lunge	Größe der eingesetzten Muskelmasse
Herzminutenvolumen	Körperposition
O_2 -Transportkapazität des Blutes	Sauerstoffpartialdruck
Periphere O_2 -Verwertung	Klima (z.B.: -10%/1.000 m ab 1.500 m ü.d.M.)
Muskelfaserzusammensetzung	

Eine Zunahme der $\dot{V}O_{2\max}$ kann über den Verlauf von mehreren Jahren bei Jugendlichen bis zu 100% betragen, vorausgesetzt die Reize durch das Training sind entsprechend. Mitochondrienmasse, Kapillardichte, Gefäßquerschnitt und Herzgröße sind die organischen Grundlagen für diese Steigerung. Der begrenzende Faktor ist hier die nicht trainierbare Diffusionsfläche der Lunge. Für die Verbesserung der $\dot{V}O_{2\max}$ ist primär die Erhöhung der Intensität maßgeblich und weniger die Erhöhung des Trainingsumfanges. Intensität im Training erhöht die anaerobe Schwelle und verbessert damit die Effizienz der $\dot{V}O_{2\max}$ -Ausnützung [10].

3.2.1.1.3. Das Atemäquivalent

Das Atemäquivalent gibt an, wie viel Liter Luft ventiliert werden müssen, um 1 Liter Sauerstoff aufzunehmen und ist somit ein Ausdruck der Atemökonomie.

Die Ruhewerte betragen ca. 30, bei zunehmender Belastung sinken die Werte anfangs

auf 20 – 25, um dann wieder anzusteigen und bei Ausbelastung Werte über 30 zu erreichen. Unter körperlicher Aktivität gibt der niedrigste Wert den „Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung“ an. Er entspricht der respiratorischen anaeroben Schwelle [10]. Das maximale Atemäquivalent zeigt eine Ausbelastung der Ventilation an. Das Atemminutenvolumen steigt aber nicht parallel zur $\dot{V}O_{2\max}$ an, sondern parallel zur $\dot{V}CO_2$, daher der überproportionale Anstieg bei Belastung über der anaeroben Schwelle [7].

3.2.1.1.4. Lungenvolumina

Die sogenannte Atemruhelage tritt dann ein, wenn sich Lunge und Thorax in einer entspannten Mittelstellung befinden, was nach einer normalen Ausatmung der Fall ist. Das Atemzugvolumen V_t beträgt in Ruhe ca. 500 ml; bei forcierter Einatmung mit maximaler Anstrengung können zusätzlich bis zu ca. 3 l eingeatmet werden. Dies bezeichnet man dann als *inspiratorisches Reservevolumen (IRV)*. Das *expiratorische Reservevolumen (ERV)* beträgt ca. 1,5 l, welches mit verstärkter Ausatmung noch mobilisiert werden kann. Atemzugvolumen und inspiratorisches Reservevolumen ergeben zusammen die *Inspirationskapazität*. Der verbleibende Rest an Luft in der Lunge – nach maximaler Expiration – ist das *Residualvolumen* und beträgt ca. 1,3 l. Dieses Residualvolumen kann nicht ausgeatmet werden. Die *funktionelle Reservekapazität (FRC)* ergibt sich aus dem expiratorischen Reservevolumen und dem Residualvolumen [7].

Die Summe aus Atemzugvolumen und den in- und expiratorischen Reservevolumina wird als *Vitalkapazität (VK)* bezeichnet. Sie ist das Volumen, das nach maximaler Inspiration maximal ausgeatmet werden kann, und ist von diversen Faktoren abhängig: Körpergröße, Geschlecht, Alter und Trainingszustand. Das heißt, dass die Vitalkapazität mit zunehmender Körpergröße zunimmt, im Alter abnimmt und neben den geschlechtsspezifischen Unterschieden auch in begrenzten Umfang durch Training vergrößert werden kann. Vitalkapazität und Residualvolumen ergeben die *Totalkapazität* der Lunge.

3.2.1.1.5. Anpassung der Atemparameter durch Training

Welche Einflüsse hat nun ein regelmäßiges Training auf die Atmung? Die wichtigste Anpassung ist die verbesserte Atemregulation, d.h. es kommt zu einer Ökonomisierung des gesamten Atmungsvorganges. Zu sehen ist dies bei Untrainierten, welche bei definierter submaximaler Belastung leicht beobachtbar eine höhere Atemfrequenz und ein höheres Atemminutenvolumen aufweisen. Bei Trainierten findet sich der Vorteil, dass bereits zu Beginn einer Belastung ein höheres Atemzugvolumen zur Verfügung steht. Vorteile daraus sind ein kleinerer Einfluss der Totraumventilation auf die Atemarbeit und eine bessere alveoläre Ventilation. So benötigen bei gleichen submaximalen Belastungen Athleten ein geringeres Atemminutenvolumen. Gleichzeitig ist das maximal erreichbare Atemminutenvolumen beim Trainierten bis zum 2-fachen erhöht (Untrainiert $\sim 130\text{L}/\text{min}$, Trainiert $\sim 200\text{L}/\text{min}$).

Als Atemgrenzwert bezeichnet man die ventilatorische Leistungsfähigkeit des Atmungssystems. Der Wert setzt sich aus Atemfrequenz und Atemvolumen zusammen und gibt an, wie viel l/min so tief und schnell wie möglich ein- und ausgeatmet werden können. Bei gesunden Männern im mittleren Alter beträgt dieser Wert ca. $160\text{ l}/\text{min}$ und kann bei Ausdauersportlern bis zu $400\text{ l}/\text{min}$ betragen [93].

Selbst bei extremen körperlichen Belastungen ist aber der Atemgrenzwert kein limitierender Faktor, da hierbei nur maximal 65 – 75% dieses Wertes erreicht werden [93]. Ein wichtiger Begrenzungsfaktor ist jedoch die Atemarbeit (*siehe Kapitel 3.2.1.2*). Der O_2 -Bedarf der Atemarbeit ist in *Abbildung 2* dargestellt. So hat ein Trainierter bei submaximaler Belastung für die Ventilationsleistung einen geringeren O_2 -Bedarf als ein Untrainierter. Dies kann auch durch isoliertes Atemtraining erreicht werden [15]. Die Atemmuskelperfusion wird zunehmend ökonomisiert. Die Ermüdung der Atemmuskulatur ist ein nicht zu unterschätzender leistungsbegrenzender Faktor. Daher sind lange Trainingseinheiten für das Training der Atemmuskeln durchaus sinnvoll, werden wegen der geringeren muskulären Belastung aber besser am Rad durchgeführt.

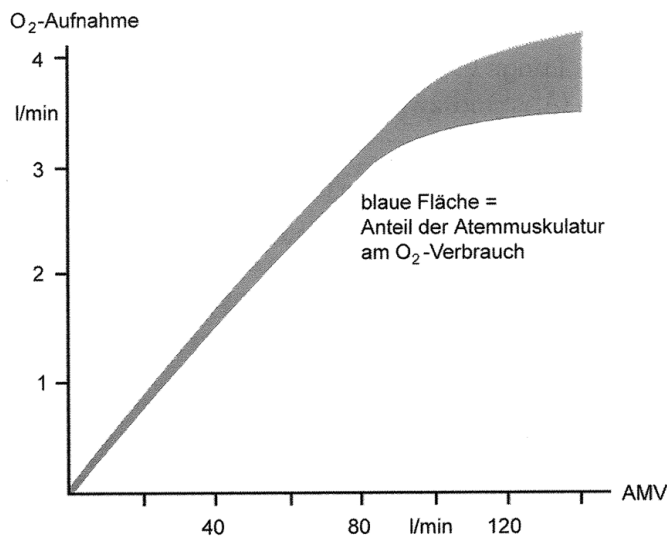


Abb. 2: O₂-Bedarf der Atemarbeit: bei erhöhter Leistung erhöht sich der O₂-Verbrauch in der Atemmuskulatur auf maximal rund 15% der gesamten O₂-Aufnahme. Der O₂-Bedarf des Zwerchfells kann auf das 20 – 30-Fache steigen, in der Zwischenrippenmuskulatur auf das bis zu 10-Fache.

3.2.1.2. Atemmuskulatur

3.2.1.2.1. Muskeln der Inspiration

Die Einatmung ist ein aktiver Prozess, verursacht durch Kontraktion der Einatemsmuskeln. Bei deren Kontraktion hebt sich der Brustkorb und der Pleuradruck nimmt ab. So wird auch der Alveolardruck vermindert, was den Einstrom der Atemluft ermöglicht. Der Hauptmuskel der Einatmung ist das Zwerchfell. Es stellt sich als kuppelartiges, muskuläres Gebilde dar, welches die Bauchhöhle von der Thoraxhöhle trennt. Wichtige Muskeln der Inspiration sind auch die Mm. intercostales externi, welche bei Kontraktion ebenfalls dazu beitragen, das Lungenvolumen zu vergrößern. Mm. sternocleidomastoideus und die Mm. scaleni setzen an den ersten beiden Rippen an und heben den Brustkorb zur Unterstützung der Atmung. Bei normaler Atmung in Ruhe werden ca. 50% des Inspirationsvolumens durch das Zwerchfell herbeigeführt [12]. Indirekte Techniken wie z.B. die Messung des transdiaphragmatischen Drucks und Oberflächenmyografie ermöglichen die Beobachtung dieser Gegebenheiten unter körperlicher Aktivität. Die Aktivität des Zwerchfells nimmt mit steigender Belastung

annähernd proportional zu [13]. Es gibt auch Studien, die davon ausgehen, dass es bis zu einem gewissen Punkt die Arbeit erhöht und dann die zusätzliche Ventilation durch andere Atemhilfsmuskeln erreicht wird [14]. Wie auch immer, der entscheidende Punkt ist, dass das Zwerchfell bei Belastung deutlich mehr zur Atmung beiträgt als in Ruhe und daher auch einen höheren Anteil des Herzminutenvolumens benötigt [15].

3.2.1.2.2. Muskeln der Expiration

Beim Atmen in Ruhe wird die Ausatmung durch die Elastizität der Brustwand und der Lunge erreicht. Während körperlicher Aktivität sind es die Expirationsmuskeln, welche forciert die Luft aus dem Körper pressen, um das Lungenvolumen wieder auf Ruhewerte zu bringen. Die wichtigsten Muskeln hierfür sind der M. rectus abdominalis, M. obliquus internus sowie externus und der M. transversus abdominalis.

Die genauen Abläufe der Expiration unter körperlicher Belastung sind schwierig zu ermitteln [16].

3.2.1.2.3. Atemmuskeltraining und Trainierbarkeit der Atmung

Bei der körperlichen Aktivität im Rahmen des Ausdauersports werden vielfältige Aufgaben an das Atmungssystem gestellt. Das Atmungssystem, welches den O₂- und CO₂-Austausch bewerkstelligt, unterliegt bei einem gesunden Körper unter körperlicher Arbeit einigen Herausforderungen:

Durch den erhöhten Muskelstoffwechsel bei hohen Belastungen fällt der O₂-Gehalt venös auf unter 20% der Ruhewerte und hebt den venösen PCO₂ auf über 80 mmHg an. Folglich sind die Anforderungen an den alveolar-arteriellen Gasaustausch bedeutend, da die Erhöhung des Herzminutenvolumens gleichzeitig auch eine verkürzte Kontaktzeit für den Gasaustausch in den Lungenkapillaren bedeutet.

Die genaue Regulation von Sauerstoffpartialdruck (P_AO₂) und Kohlendioxidpartialdruck (P_ACO₂) in den Alveolen verlangt, dass die alveoläre Ventilation bei Belastung schon bei Untrainierten auf über das 20-Fache der Ruhewerte erhöht werden muss;

bei Trainierten auf das 40-Fache.

Um diesen enormen Anforderungen gerecht zu werden, ist die Fähigkeit zur Kraftentwicklung der Atemmuskulatur im gesunden Organismus ausreichend. Wenn es um die optimale Leistungsfähigkeit geht, ist es aber auch von Bedeutung, dass dieser physiologische Aufwand nicht zuviel Kapazität in Anspruch nimmt.

Zu diesem Zweck hat das Atemzentrum in der Medulla oblongata die Aufgabe, die Atemmuskulatur durch Neuronenpopulationen anzusteuern und damit die Atemfrequenz, Dauer der Inspirations- und Expirationsphase und der Atemtiefe (Kontraktionskraft der Atemmuskulatur) zu regeln. Dabei erfassen spezielle Sensoren die mechanischen Eigenschaften von Lunge und Thorax, den Zustand der zuführenden Atemwege, potenzielle Noxen der Einatemluft, sowie den PO_2 , PCO_2 und pH des Blutes. Diese Informationen erlauben eine bedarfsgerechte Adaptation der Atmung an die jeweiligen metabolischen Erfordernisse [17]. So kommt der Atemmuskulatur für den Gasaustausch unter Belastung eine entscheidende Rolle zu.

Genauso wie die Skelettmuskulatur auf entsprechende Trainingsreize reagiert und sich adaptiert, erfährt auch die Atemmuskulatur derartige Anpassungen auf struktureller, enzymatischer, neuraler und funktioneller Ebene [15].

Studien haben gezeigt, dass durch spezielles Atemmuskeltraining die Ausdauer und die Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur bei gesunden Menschen verbessert werden kann [15]. Die Effekte auf die sportliche Leistung zeigen sich aber dennoch kontrovers.

Jedenfalls können die Atemmuskeln gleich wie Skelettmuskeln mit Anpassung auf adäquate Trainingsreize reagieren. Für ein spezifisches Atemmuskeltraining konnte gezeigt werden, dass signifikante Änderungen beim maximalen Einatemungsdruck und beim Aufrechterhalten der ventilatorischen Fähigkeiten auftreten und auch die Leistung verbessert wird [15]. Bei submaximalen Belastungen kam es zu deutlichen Verbesserungen. Bei Testbedingungen mit Ausbelastung konnten Verbesserungen jedoch weniger deutlich gezeigt werden [15, 18, 19].

Die Atmung selbst ist im Grunde genommen eine hoch koordinierte Leistung aus dem Zusammenspiel der Atemmuskeln, welche den adäquaten Gasaustausch im eigentlichen Sinne erst ermöglichen. Bei Belastungen werden sämtliche Parameter dem Bedarf angepasst und so kommt es zu Änderungen in Atemzugvolumen, endinspiratori-

schen und endexpiratorischen Lungenvolumina, Atemminutenvolumen (AMV) und der zeitlichen Abfolge. Das AMV erhöht sich sowohl durch den Anstieg des Atemzugvolumens als auch durch Erhöhung der Atemfrequenz.

Das AMV beträgt in Ruhe ca. 6 bis 8 L/min und kann bei untrainierten jungen Männern bei Belastung Werte bis zu 130 L/min erreichen. Bei hoch trainierten Ausdauerathleten können diese Werte bis zu 200 L/min betragen. Auch die Art der Belastung spielt für die Aufteilung von Frequenz und Atemtiefe eine Rolle; so konnte gezeigt werden, dass beim selben Sauerstoffverbrauch die Atemfrequenz beim Laufen höher als beim Fahrradfahren ist [20]. So besteht ein Zusammenhang zwischen Bewegungsmuster und der Form der Atmung [21]. Dies hat wiederum Einfluss auf die Belastung der Atemmuskulatur und damit auch auf die Ermüdung.

Wichtig ist es hier noch einmal festzuhalten, dass sich die Atmung unter Belastung physiologisch anders verhält als unter Ruhebedingungen. Bei der Inspiration in Ruhe werden die inspiratorischen Atemhilfsmuskeln gar nicht oder nur zu einem geringen Teil benötigt. Dies ändert sich unter Belastung. Dabei wird auch die Ausatmung zu einem aktiven Prozess, der mit einem erhöhten Energieverbrauch einhergeht.

So liegt der Sauerstoffbedarf bei Ruheatmung näherungsweise bei 2% der totalen Sauerstoffaufnahme und erhöht sich bei mittleren Belastungsintensitäten auf ca. 3 – 5% [22]. Bei hohen Intensitäten steigt der Anteil am Sauerstoffverbrauch und am Stoffwechsel überproportional an: bis zu 10% bei untrainierten Personen und ca. 15 – 16% der $\dot{V}O_{2max}$ und HMV bei Hochtrainierten [23]. Die Blutumverteilung für den Bedarf der Atemmuskulatur wurde in Studien noch nicht direkt erfasst, man weiß aber aus Tiermodellen, dass es zu Anstiegen der Blutversorgung in Diaphragma, inspiratorischen und expiratorischen Muskeln kommt [24, 25, 26]. Bei Maximalbelastung kann dies bis zu 16% des HMV ausmachen [24]. Alles in allem zeigten diese Studien deutlich, wie groß der O_2 -Bedarf der Atemmuskulatur unter Belastung ist und dass dieser Anteil am HMV jedenfalls nicht zu vernachlässigen ist.

So stellt die menschliche Lunge im physiologischen Sinne keine Limitierung der Leistungsfähigkeit dar, im Gegenteil, man könnte sie sogar überfunktionell beschreiben. Es sei aber dennoch angemerkt, dass über die Ermüdung dieser Atemmuskulatur eine mögliche Limitierung vorliegt. Belastungen dauern oft stundenlang und gewisse

Bewerbe können in ihrer Intensität im Training auch nicht simuliert werden. Studien zur Ermüdbarkeit des Diaphragmas zeigen diesen Effekt womöglich nervlich getriggert (N. phrenicus), vor allem bei Intensitäten über 80% der $\dot{V}O_{2\max}$ [27]. Daten für Langzeitausdauerbelastungen gibt es keine. Die Vermutung liegt jedoch nahe, dass wie bei jedem Muskel trotz niedriger Intensität die Dauer der Belastung dennoch zur Ermüdung führt. Ob diese Ermüdung durch spezifisches Atemmuskeltraining hinausgezögert werden kann, ist nicht genau erwiesen.

Spezifisches Atemmuskeltraining, ergab je nach Trainingsform, Verbesserungen im unterschiedlichen Ausmaß bei der Ausdauerleistung und der Kraftleistung der Atemmuskulatur sowie bei der Verbesserung bei der Atemregulation, Verzögerung der Zwerchfellermüdung, Ventilationseffizienz und Blutversorgung.

Trotz mitunter starker Schwankungen der Ergebnisse konnten jedoch die meisten der Studien Verbesserungen in der Ausdauer der Atmung feststellen [28, 29]. Die zugrundeliegenden Mechanismen der gemessenen Verbesserungen sind weitgehend unbekannt, am wahrscheinlichsten ist eine Art Adaptation. Die Effekte auf die Verbesserung der Leistungsfähigkeit im Sport selbst durch das Atemmuskeltraining sind nicht eindeutig belegt. Wahrscheinlich auch deshalb, weil die Leistungsfähigkeit von vielen Faktoren abhängt und so breiten Schwankungen unterliegt.

3.2.1.3. Höhenttraining

Eine sehr populäre Form des Trainings ist das sogenannte „Höhentraining“. Vor allem auch seit die olympischen Spiele im Jahre 1968 in Mexico City ausgetragen wurden, welches auf einer Seehöhe von 2300 m liegt.

Das Ziel hierbei war, sich für Wettkämpfe oder sportliche Aktivitäten in großer Höhe vorzubereiten; dadurch erkannte man, dass die Leistung auf niedrigen Seehöhen auch verbessert werden konnte. Die Leistungsfähigkeit kann auch schon bei geringen Höhen eingeschränkt sein. Für Ausdauerathleten sowie auch für untrainierte Personen konnte eine Abnahme der maximalen Sauerstoffaufnahme bereits bei relativ geringen Höhen bis 800 m über dem Meeresspiegel beobachtet werden [30].

Es kommt beim Höhengaufenthalt zu einer Adaptation. Die größte treibende Kraft ist dabei der Sauerstoffmangel. Als Reaktion darauf passt sich der Körper an und kann so unter normalen Umgebungsbedingungen eine erhöhte Leistungsfähigkeit erbringen. Es gibt viele Strategien zur Durchführung eines solchen Trainings und der Erfolg dieser Methode ist sicher nicht auf ein Universalrezept zurückzuführen. Höhenttraining verlangt individuelle Planung und Durchführung.

Allerdings ist der zusätzliche Trainingsstimulus durch einen Sauerstoffmangel für die Leistung auf Seehöhe nicht immer von Vorteil. Stärkere Hinweise für die positive Wirkung von Hypoxietraining findet man für die Leistungsfähigkeit in der Höhe. Dementsprechend sollte die „live low – train high“ – Möglichkeit in Betracht gezogen werden, wenn eine Höhenakklimatisation nicht möglich ist [31].

Muskuläre Faktoren (Mitochondriendichte, intrazellulärer Lipidgehalt) haben Einfluss auf die Hypoxiesensitivität. Für Männer konnten größere Abfälle der Leistungsfähigkeit als für Frauen in bestimmten Höhen festgestellt werden [32].

Ein Aufenthalt in moderaten Höhen (2000 – 3000 m) für einen Zeitraum von einigen Wochen bewirkt eine Zunahme der Hämoglobinmasse und folglich der Sauerstofftransportkapazität, wodurch die Verbesserung der Leistungsfähigkeit auf Meereshöhe erklärbar wird [33].

3.2.2. Kreislauf

3.2.2.1. Einleitung

Das Herzkreislaufsystem versorgt die Zellen des Körpers mit O₂ und Substraten, beseitigt Abfallprodukte des Zellstoffwechsels, steuert über den Transport von Hormonen wichtige Vorgänge und ist entscheidend für die Thermoregulation des Körpers [34]. Körperliches Training führt zur Anpassung des Kreislaufsystems. Dies geschieht im Sinne von Änderungen der Blutzusammensetzung, welche die Transportkapazität erhöhen und die Fließeigenschaften verbessern. Hervorzuheben ist, dass man bei hoch trainierten Ausdauerathleten ein bis zu 25% vergrößertes Blutvolumen findet. Da Plasmavolumen (ca. + 30%) und Erythrozytenmasse (ca. +20%) nicht im selben

Verhältnis ansteigen, sinkt der *Hämatokrit (Hkt)* ab. Dies wird als Sportanämie bezeichnet. Ein zu stark erhöhter Hkt kann durch Dehydratation oder Doping herbeigeführt worden sein.

Im Rahmen einer akuten Belastung erhöht sich der systolische Blutdruck und es kommt zur verstärkten Filtration von Flüssigkeit aus den Kapillaren. Das verringerte Plasmavolumen wird zusätzlich durch osmotische wirksame Metaboliten der Muskelzellen und des Interstitiums verringert. Dehydratation verstärkt dies bei Ausdauerbelastungen, wobei das Plasmavolumen um bis zu 20% abnehmen kann. Der so verminderte venöse Rückstrom führt zur verminderten Vorhofdehnung. Dies hat zur Folge, dass das *atriale natriuretische Peptid (ANP)* nicht mehr freigesetzt wird. Das über die verminderte Nierendurchblutung aktivierte Renin-Angiotensin-Aldosteron-System (RAAS) führt zur Steigerung der Aldosteronsekretion. Die verstärkte Flüssigkeitsretention kann auch nach Belastung anhalten und führt durch wiederholtes Training zur Erhöhung des Plasmavolumens [12].

Die Erhöhung der Erythrozytenmasse wird durch die Stimulation der Erythropoese durch das Training bewirkt. Intravasale Hämolyse bewirkt, dass sich der Anteil der „jungen“ Erythrozyten erhöht, da die „alten“ Erythrozyten den mechanischen Belastungen nicht mehr standhalten können [35].

3.2.2.2. Kreislauf unter Belastung

Der gesteigerte O₂-Verbrauch bei Wettkampf oder Training lässt das Herzzeitvolumen auf das 4- bis 5-Fache ansteigen. Parallel dazu kommt es zu einem Abfall des totalen peripheren Widerstandes, welcher durch lokale metabolische Vasodilatation in der arbeitenden Muskulatur verursacht wird. Diese Veränderungen sind das Resultat von lokalen Regulationsvorgängen in der arbeitenden Muskulatur und einer differenzierten, neurogenen Steuerung durch das vegetative Nervensystem [12].

Im Rahmen der sogenannten „Startreaktion“ wird bereits der Parasympathikotonus gehemmt und der Sympathikotonus erhöht. Es kommt durch die motorische Aktivierung zu einer zentralen Mitinnervation, was die Sympathikusaktivität weiter zunehmen lässt.

Dieses führt in allen Organen außer im Gehirn und in der arbeitenden Muskulatur zu einer kollateralen (neurogenen) Vasokonstriktion. So kann ein Abfall des arteriellen Mitteldrucks verhindert werden, obwohl es in der arbeitenden Muskulatur eine starke Vasodilatation gibt. Weiters verhindert ein Resetting des Pressorezeptorenreflexes eine Hemmung der Sympathikusaktivität.

Der limitierende Faktor für die Steigerung der Kreislaufaktivität ist das venöse Angebot. Es wird durch die Größe des Blutvolumens, durch Flüssigkeitsverluste und Verlagerungen des Blutvolumens infolge peripherer Vasodilatation im Rahmen der Thermoregulation bestimmt.

3.2.2.3. Hämatokrit

3.2.2.3.1. Hämatokrit-Paradoxon

Es wird vielfach angenommen, dass die resultierende höhere Sauerstoffaufnahme beim Blutdoping nur durch die Erhöhung der Transportkapazität zustande kommt, die durch Anstieg der Hämoglobinkonzentration und einer Erhöhung des Hämatokrits bewirkt wird [36, 37]. Verschiedenste Studien über die Effekte von Blutdoping (z.B. bei Eigenbluttransfusion oder Erythropoetingabe) stärken diese Annahme. Diese Studien zeigen eine Verbesserung der $\dot{V}O_{2\max}$ ohne nennenswerte Zunahme des Plasmavolumen [37, 38, 39, 40].

Diese Aussagen stehen aber im Widerspruch zu anderen Beobachtungen, welche zu dem Begriff „Hämatokrit-Paradoxon“ geführt haben [41].

Dieses besagt, das Ausdauertraining welches die $\dot{V}O_{2\max}$ erhöht, zu einer Abnahme der relativen Hb-Konzentration führt. Und zwar weil die Erythrozyten tatsächlich mehr werden, aber eine nicht so starke Zunahme erfahren wie das Plasmavolumen. Dies wird auch als *Trainings-Hämodilution* bezeichnet [42, 43].

Selbst für Belastungen, die Stunden oder sogar Tage dauern, konnte gezeigt werden, dass die Hämoglobinkonzentration und der Hämatokrit abnehmen. Zu einer Zunahme der Hämoglobinkonzentration kommt es hingegen beim Übertraining [44, 45].

Es wirft sich die Frage auf, wieso die Hämoglobinkonzentration als Konsequenz der körperlichen Aktivität nicht ansteigt.

Ein genereller Zusammenhang zwischen relativen Hb-Wert und $\dot{V}O_{2\max}$ ist weder bei Untrainierten noch bei Hochleistungssportlern zu finden [45, 46].

Verbesserungen der $\dot{V}O_{2\max}$ sind unter dem Einfluss eines erhöhten Hb nur gering. Eine theoretische Berechnung zeigt, dass eine 20%ige Erhöhung des relativen Hb-Wertes nur zu einer 2,9%igen Erhöhung der $\dot{V}O_{2\max}$ führt [47]. Der Erfolg im Ausdauersport ist also nicht prinzipiell an die Hb-Konzentrationen gebunden [48].

Hingegen ist der Zusammenhang zwischen der gesamten Hb-Masse und dem absoluten Blutvolumen signifikant: Eine 1%ige Erhöhung dieser Parameter führt bereits zu einer 1%igen Steigerung der $\dot{V}O_{2\max}$ [49].

Ein rascher Abfall der Hb-Konzentration wird nach der Rückkehr von einem Höhentrainingslagers auf Meeresspiegel beobachtet. Auch bei kenianischen Läufern fällt nach einem Höhentrainingslager die Hb-Konzentration auf typische Werte von auf Meeresebene lebenden Personen ab. Der Hauptgrund hierfür ist wiederum die Hämodilution durch die Zunahme des Plasmas. Also können die Vorteile eines Höhentrainingslagers nicht von der erhöhten Hb-Konzentration kommen [50, 51, 52].

3.2.2.3.2. Hämatokrit und Leistungsfähigkeit

Eine interessante Tatsache ist, dass bei den guten Läufern unter den Tieren, wie z.B. bei Pferden oder Hunden, die Hämatokritwerte in Ruhe deutlich unter den Werten des Menschen liegen. Das wären für die hier genannten Beispiele rund 33% bei Pferden und ca. 40% bei vielen Hunderassen. Das Außergewöhnliche ist aber, dass sich dieser niedrige Ruhehämatokrit bei Belastung durch Freisetzung von in der Milz gespeicherten Erythrozyten auf über 60% erhöhen kann. Diese reversible autologe Bluttransfusion erhöht die $\dot{V}O_{2\max}$ kurzzeitig um bis zu 30% bei diesen Tieren.

Beim Menschen gibt es solche Möglichkeiten nicht. Es kommt zwar auch zu einer minimalen Erhöhung des Hkt, diese wird aber durch den Shift des Wassers in Richtung arbeitende Muskulatur verursacht. Aus der Milz werden durch Kontraktion des Or-

gans nur maximal 50 ml Erythrozyten freigesetzt. Dies entspricht nur 2 – 3% des gesamten Volumens [53 – 56].

Durch die größeren Erythrozyten liegt der optimale Hämatokrit beim Menschen niedriger als bei diesen Tieren. Messungen aus Retransfusionsexperimenten haben gezeigt, dass dieser „optimale“ Hämatokrit ungefähr bei 43,4 bis 54,8% für Männer und 38 bis 45% bei Frauen liegt. Die von einigen Sportorganisationen auferlegte Grenze von 50% hat so eventuell nur den Effekt, dass beim Doping möglicherweise sogar unwissentlich der bessere Wert erreicht wird. Dass der Hämatokrit beim Menschen für eine Ausdauerleistung denkbar niedrig ist, mag sicherlich eine spezielle Ursache haben. Möglicherweise waren die Gefahren eines zu hohen Hämatokrit (Thrombose, Hypertonie) zu groß und durch die natürliche Selektion kam es zur genetischen Adaptation [57].

Unabhängig von den genauen Werten des vermeintlich optimalen Hämatokrits soll bedacht werden, dass dieser auch von den Veränderungen des Blutvolumens und der Auswurfleistung abhängig ist und nicht nur als isolierter Wert allein betrachtet werden darf.

Die isolierte Betrachtung einer besseren Leistungsfähigkeit durch eine Steigerung des Hämatokrits mit Erythropoetin ist auch deshalb schwierig, weil beobachtet wurde, dass die mechanische Herzleistung nach Erythropoetingabe auch zunimmt [39, 58]. Im Gegensatz dazu konnte bei Gabe von Erythrozytenkonzentraten beobachtet werden, dass hier nur die aerobe Leistungsfähigkeit ansteigt, nicht aber die mechanische Herzkraft, was die Komplexität einer Leistungssteigerung durch Erythropoetin verstärkt.

Wichtig für den optimalen Hämatokrit scheint auch die Zusammensetzung der zellulären Bestandteile zu sein. Ein höherer Anteil an Retikulozyten scheint sich positiv auszuwirken [59]. Da die Blutzellen kontinuierlich altern, ist eine autologe Transfusion fragwürdig. Besser ist es, durch Stimulation und Regeneration (Training, Höhentraining) den Anteil der Retikulozyten auf natürlichem Wege anzuheben und so dem Körper seinen natürlichen Ablauf zu lassen.

Zusammengefasst ergeben die meisten Studien zum Thema Blutdoping eine Verbesserung der $\dot{V}O_{2\max}$ um 5 – 10%. Dies kann aber nicht einem Einzelfaktor wie dem Hkt alleine zugeordnet werden. So konnte nirgends festgestellt werden, dass die vermehrte Transportkapazität für O_2 der einzige ergogene Effekt von Transfusionen oder Erythropoetingabe gewesen wäre. Diffusionskapazitäten, Eigenschaften der Erythrozyten und Pufferkapazitäten können nicht ausgeblendet werden. Auch die Kreislaufsituation selbst hat entscheidenden Einfluss auf den optimalen Sauerstofftransport. Der Grund für den relativ niedrigen Hämatokrit beim Menschen im Bezug zu seiner Leistungsfähigkeit dürfte daher ein evolutionärer sein: Niedrige Werte sicherten anscheinend ein Langzeitüberleben besser, wohingegen kurzzeitige Leistungssteigerung anscheinend entwicklungsgeschichtlich von Nachteil war [60].

3.2.2.4. Thermoregulation

Ein großer Teil der in den Muskeln hergestellten Energie wird über Wärmeentwicklung freigesetzt. Unter Ruhebedingungen wird die im Körperinneren entstehende Wärme nach außen transportiert und über die Hautoberfläche abgegeben. Dies erfolgt durch Strahlung, Leitung und Konvektion. Bei körperlicher Belastung wird die in der arbeitenden Muskulatur entstehende Wärme auch umgekehrt zum Körperkern transportiert und kann damit zur Hyperthermie führen.

Die Temperaturen bei sportlicher Leistung können mitunter auf beachtliche Werte steigen, was aber nicht als pathologisch anzusehen ist. Wenn die Temperaturen aber zu stark ansteigen, zumeist zusätzlich durch Hitze, hohe Luftfeuchtigkeit oder Dehydratation, steigt natürlich das Risiko für die Entwicklung eines Hitzschlags.

Um diese sich entwickelnde Hitze wieder loszuwerden und einer zu starken Körperkerntemperaturerhöhung vorzubeugen, hat der menschliche Körper einige gut entwickelte Systeme für die Kühlung im Form der Wärmeabgabe zur Verfügung.

Autonome Mechanismen müssen den Körperkern thermostatisieren, das heißt auf einem stabilen Temperaturniveau halten. Dafür liefern zentrale und periphere Thermosensoren Informationen über die Körper- und Umgebungstemperatur an das Regula-

tionszentrum im Hypothalamus. Die Steuerung erfolgt vom Hypothalamus aus. Hier werden die Informationen mit den Sollwerten verglichen und bei Notwendigkeit über Effektoren gegengesteuert. So erfolgt die Thermoregulation durch eine negative Rückkoppelung. Es kommt zur Verminderung der Hautdurchblutung mit gleichzeitiger Erhöhung der Wärmeproduktion bei Abkühlung und zur Zunahme der Hautdurchblutung und Schweißsekretion bei Erwärmung.

3.2.2.4.1. Wärmeabgabe

Der wichtigste Schritt zur Wärmeabgabe ist der Transport an die Körperoberfläche, wo der eigentliche Temperatureaustausch stattfindet [7]. Die Temperatur im Skelettmuskel beträgt bei Ruhebedingungen zwischen 33°C und 35°C. Hier geht der Wärmefluss vom Körperinneren in Richtung des Muskelgewebes. Beginnen die Muskeln durch Arbeit (Training, Wettkampf) Wärme zu produzieren, ändern sich die Wärmeverhältnisse und der Wärmefluss wird umgedreht. Die Wärmeabgabe vom Körperinneren an die Haut wird über den Gradienten zwischen diesen zwei Komponenten und der Wärmeleitfähigkeit der Haut bestimmt. Diese setzt sich aus der passiven Leitfähigkeit (über das subkutane Fettgewebe) und der Konvektion (durch die Hautdurchblutung) zusammen [61]. Die erhöhte Hautdurchblutung ist auch einer der größten Gegenspieler einer möglichen Hyperthermie.

Die Wärme die zur Hautoberfläche geleitet wird, kann über die Möglichkeiten der Radiation, Konduktion, Konvektion und Evaporation abgegeben werden. Hierfür sei auf Lehrbücher der Physiologie verwiesen.

Wichtig ist zu wissen, dass beinahe die gesamte Wärmeabgabe unter sportlicher Belastung über die Evaporation erfolgt. Die Verdunstung von 1 g Wasser verbraucht dabei 2,5 kJ an Wärmeenergie [62]. Die Schweißproduktion bei Athleten kann im Extremfall auf bis 3,5 L/h ansteigen [63].

Die Evaporation hängt anders als die übrigen Mechanismen aber nicht von der Temperatur ab, sondern von der Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Körperoberfläche und Umgebung [62]. Diese wird von der Umgebungstemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit bestimmt.

So funktioniert diese Wärmeabgabe auch dann noch, wenn die Umgebungstemperatur die Körpertemperatur übersteigt. Sie stößt aber an ihre Grenzen, wenn der Wasserdampfdruck – trotz Umgebungstemperatur unter Körpertemperatur – hoch ist. Mit dem Wissen um die Physiologie kann man leicht herleiten, worauf es in welcher Umgebung der sportlichen Tätigkeit ankommt.

Unter heißen und feuchten Bedingungen ist diese Kühlung zusätzlich erschwert, was die Wärmeabgabe erheblich behindern kann. Starke Leistungseinbußen und sogar die Gefahr eines Hitzeschocks bzw. Hitzschlages können die Folge sein.

Wichtig sind gute Strategien gegen die Hitze. Vor allem Flüssigkeitszufuhr und Akklimatisation sind vorrangig für eine optimale Leistungsfähigkeit unter erschwerten klimatischen Bedingungen [63]. Bei zu hoher Belastung dieses Systems, kann die Kerntemperatur nicht stabilisiert werden, und es resultieren Störungen im Sinne von Hypothermie oder Hyperthermie. Dies kann in extremen Fällen bis zum Tod führen. Wärmeakklimatisation kann die Toleranz gegenüber Hitze vergrößern und führt dann erst bei größerer Belastung zu Hyperthermie [7].

3.2.2.4.2. Beeinflussung der Thermoregulation

Bei Umgebungstemperaturen über 36°C nimmt der Körper die Wärme von außen durch Radiation und Konvektion auf, anstatt sie über diese Mechanismen abzugeben. Die Wärmeabgabe über Verdunstung ist hier der wichtigste Mechanismus zur Kühlung [63].

Da die Verdunstung des Schweißes die Kühlung verursacht, ergibt sich wieder die Wichtigkeit der Hydratation – der Flüssigkeitsverlust sollte ausgeglichen werden. Anzeichen für Durst treten oft erst nach einem Flüssigkeitsdefizit von 2% des Körpergewichtes auf [64]. Daher ist die Flüssigkeitsaufnahme nach Bedarf wahrscheinlich nicht immer die beste Lösung, weil zwangsläufig Defizite eingegangen werden. So sinkt auch die körperliche Leistungsfähigkeit bereits ab Verlusten von 1 – 2% des Gesamtkörperwasseranteils. Es scheint, als ob das Thermoregulationssystem auf die Leistung einen sehr starken Einfluss hat. So konnte gezeigt werden, dass Dehydrata-

tion die Hautdurchblutung und Schweißproduktion bei Belastung reduziert [65].

Schweißverlust führt zu hyperosmotischen und hypovolämen Kreislaufbedingungen. Für diese Bedingungen wurden sowohl in Kombination als auch einzeln auftretend ein vermindertes Ansprechen der Wärmeabgabemechanismen beobachtet [65].

3.2.2.4.3. Gesundheitliche Probleme bei Belastungen in der Hitze

Studien zufolge ist die Verwendung der Begriffe wie Hitzeerschöpfung und Hitzekollaps – bei Vorfällen unter heißen Wettkampf- oder Trainingsbedingungen – nicht zwangsläufig mit einer erhöhten Körperkerntemperatur vergesellschaftet [63].

Ein Hitzschlag hingegen ist das direkte Ergebnis einer erhöhten Körperkerntemperatur, wobei hier zumeist ein Flüssigkeitsmangel als Ursache gilt. Dieser Mangel beeinträchtigt nicht nur die Evaporation, sondern auch die gesamte Kreislaufsituation. Ein Hitzschlag ist ein lebensbedrohlicher Zustand, der ab einer Kerntemperatur von 41°C auftritt: Heiße trockene Haut, Verwirrtheit und Bewusstseinsstörungen bis zur thermischen Schädigung von Organen (z.B. Nieren, Gehirn) können die Folge sein [7].

Für die Hitzeakklimatisation und die Rehydratation wurde zumindest teilweise belegt, dass sie gesundheitliche Folgen und einen Leistungsabfall bei großer Hitze mindern können. Hitzeakklimatisation verringert die Körpertemperatur und Herzfrequenz in Ruhe und bei Belastung. Sie erhöht das Plasmavolumen, führt zu erhöhter Schweißproduktion und Schwitzsensitivität und verringert die Na⁺-Verluste [66]. Die Anpassung beginnt nach kurzer Zeit und ist individuell nach 7 – 10 Tagen zum großen Teil abgeschlossen (siehe *Tabelle 5*).

Tab. 5: Anpassungserscheinungen der Hitzeakklimatisation

Physiologische Anpassung	Tage bis zur Hitzeakklimatisation
Abnahme der Herzfrequenz bei Belastung	3 – 6
Zunahme des Plasmavolumens	3 – 6
Abnahme der Na ⁺ - und Cl ⁻ -Konzentration im Schweiß	5 – 10
Erhöhung der Schweißproduktion und der Schwitzsensitivität	7 – 14
Erhöhung der Hautdurchblutung durch Vasodilatation	7 – 14

Tabelle 5 zeigt, dass die rascheren Anpassungserscheinungen der Hitzeakklimatisation vor allem auf eine Verbesserung der kardiovaskulären Situation abzielen. Die Änderungen im Bereich des Schwitzens selbst brauchen etwas länger.

Obwohl Ausdauerathleten die Voraussetzungen für eine kardiovaskuläre Adaption mitbringen, konnte eine volle Adaptation erst nach zumindest einer Woche Training in Hitze gezeigt werden [67].

In unseren Breiten ist anzunehmen, dass meist der Anstieg der Körpertemperatur als Ursache für die Ermüdung steht; umgekehrt ist aber zu bedenken, dass auch ein zu starkes Absinken der Körpertemperatur (Schwimmen im kalten Wasser, ohne Neopren, kalter Wind usw.) genauso zur Ermüdung führt. Der Grund dafür ist erstens, dass dabei die Muskeldurchblutung schlechter funktioniert und zweitens, dass durch den Anstieg der muskulären Viskosität auch der Arbeitsaufwand für die Bewegung größer wird.

3.2.3. Muskulatur

Man kann Muskelgewebe aufgrund funktionell-struktureller Merkmale in folgende zwei Haupttypen unterscheiden: quergestreifte und glatte Muskulatur. Die quergestreifte Muskulatur zeigt im Lichtmikroskop als Charakteristikum eine aus hellen und dunklen Banden bestehende Streifung. Zur quergestreiften Muskulatur zählen die Skelettmuskulatur und die Herzmuskulatur. Glatte Muskulatur findet man in fast allen Organsystemen wie Atemwege, Verdauungstrakt und Gefäßsystem. Hieraus ist abzuleiten, dass im Grunde genommen alle 3 Arten der Muskulatur – wenn man die Herzmuskulatur, die eine Sonderform der quergestreiften Muskulatur ist, als eigene Art zählen möchte – einen mehr oder weniger großen Anteil an der Ausdauerleistungsfähigkeit haben [7]. Die Leistungsfähigkeit der Muskulatur wird durch den unterschiedlichen Anteil an Muskelfasertypen bestimmt. Die unterschiedlichen physiologischen Eigenschaften der verschiedenen Muskelfasern sind in *Tabelle 6* aufgelistet.

Tab. 6: Charakteristika der Muskelfasertypen

	Typ I (langsam)	Typ IIA (schnell)	Typ IIB (schnell)
Funktion	Ausdauer	Schnellkraft	Schnellkraft
Ausdauer	hoch	relativ niedrig	niedrig
Kraft	niedrig	hoch	hoch
Schnelligkeit	niedrig	hoch	hoch
Ermüdbarkeit	gering	relativ gering	hoch
Myosin-ATPase	niedrig	hoch	hoch
Stoffwechsel	aerob	anaerob + aerob	anaerob
Kapillarisierung	hoch	intermediär	gering
Mitochondrien	viele	intermediär	wenige
Myoglobin	viel	viel	wenig
Färbung	dunkelrot	rot	weiß
Fettgehalt	hoch	niedrig	niedrig
Kreatinphosphat	niedrig	hoch	hoch
Glykogen	Kein Unterschied		

3.2.3.1. Aufbau und Funktion der quergestreiften Muskulatur (Skelettmuskulatur)

Morphologisch ist ein Skelettmuskel aus vielkernigen Muskelfasern (Durchmesser 10 – 100 μm , Länge bis zu mehreren cm) aufgebaut. Bei der Entwicklung ordnen sich einkernige Myoblasten in Ketten an und diese fusionieren dann zu vielkernigen Myotuben. Dann folgt die Ausdifferenzierung zu Muskelfasern. Es bleiben sogenannte einkernige Satellitenzellen erhalten, welche in weiterer Folge die Neubildung von Muskelfasern bei Verletzungen oder Schädigungen der Muskulatur ermöglichen.

Die einzelne Muskelfaser besteht über ihre gesamte Länge aus einem Bündel dichtgepackter Myofibrillen (Durchmesser ca. 1 μm). Dazwischen findet sich das Zytoplasma der Muskelfasern (Sarkoplasma); ihre Zellmembran heißt Sarkolemm [7].

3.2.3.2. Muskelfasertypen

Durch histochemische Färbemethoden kann man in Muskelbiopsien verschiedene Arten von Muskelfasertypen erkennen. Die wichtigsten Fasern sind die Typ-I- und die Typ-II-Fasern. Daneben findet man noch weniger differenzierte Zwischenformen und Satellitenzellen.

3.2.3.2.1. Typ-I-Fasern

Diese Fasern werden auch langsame Fasern oder ST-Fasern (slow-twitch) genannt. Man findet diese vor allem in Stützmuskulatur und in Muskeln, welche an langsamen, zyklischen Dauerbewegungen beteiligt sind.

Diese Typ-I-Muskelfasern werden von einem ausgeprägten Kapillarnetz versorgt, was die Sauerstoff- und Substratversorgung ermöglicht. Als intrazellulärer Sauerstoffspeicher dient der rote Muskelfarbstoff Myoglobin, der dieser Muskelfaser die rote Farbe verleiht. Ein hoher Gehalt an Mitochondrien und eine hohe Aktivität von Enzymen des oxidativen Stoffwechsels geben einen Anhalt darauf, dass hier die Energiebereit-

stellung vorwiegend aerob stattfindet, vorausgesetzt, es ist ausreichend Sauerstoff vorhanden. Die Kapazität für die anaerobe Energiegewinnung ist gering.

Der Schaftbereich der Myosinmoleküle wird aus langsamen S-Untereinheiten gebildet (schwere Ketten). Im Kopfbereich, in dem die Myosin-ATPase lokalisiert ist, findet man s1- und s2-Ketten (leichte Ketten) mit langsamer Reaktionskinetik. Die Versorgung der Typ-I-Fasern erfolgt durch Alpha-Motoneurone mit dünnen Axonen, wobei die Erregung mit relativ langsamer und konstanter Frequenz von 10 – 20 Aktionspotentialen pro Sekunde stattfindet. Ein Motoneuron versorgt unterschiedlich große motorische Einheiten (ca. 200 – 2000 Muskelfasern) [91].

3.2.3.2.2. Typ-II-Fasern

Diese Fasern werden auch FT-Fasern (fast-twitch) genannt. Man unterscheidet hier zwischen verschiedenen Typen: Typ-II-A-, Typ-II-B- und Typ-II-C-Fasern.

Typ-II-Fasern sind hauptsächlich an der schnellen Zielmotorik beteiligt. Die Versorgung erfolgt durch schnell leitende Axone der Alpha-Motoneurone mit einer intermittierenden Reizfrequenz von bis zu 40/sec. Ein Motoneuron versorgt ca. 10 – 200 Muskelfasern.

Im Unterschied zu den Typ-I-Fasern sind die Typ-II-Fasern dicker und haben eine schlechtere Versorgung durch Kapillargefäße. Der geringe Myoglobingehalt lässt diese Fasern weiß erscheinen und durch die geringe Mitochondriendichte ist auch die aerobe Kapazität begrenzt. Dafür findet man hier viele Enzyme der anaeroben Energiegewinnung [91].

Obwohl die Typ-II-C-Fasern zu den Typ-II-Fasern gezählt werden, stellen sie, was ihre Funktion, ihren Aufbau und ihren Molekülbesatz angeht, eine Zwischenform beider Grundtypen dar.

Der Schaftbereich wird hauptsächlich aus den schweren F_A - und F_B -Ketten gebildet. Im Kopfbereich dagegen findet man f1-, f2- und f3-Ketten mit hoher Reaktionsgeschwindigkeit. Die Typ-II-C-Fasern stellen einen seltenen Übergangstyp dar (2 – 5% aller Muskelfasern), welche schnelle und langsame, sowie schwere und leichte Ketten enthalten [91].

3.2.3.3. Energiebereitstellung im Muskel

Das wichtigste Molekül für die Muskelkontraktion stellt das ATP dar. Es wird durch die Myosin-ATPase gespalten und liefert dabei Energie. Auch für die Ca²⁺-ATPase, welche für den Transport von Ca²⁺ in das sarkoplasmatische Retikulum notwendig ist, und für die Na⁺/K⁺-ATPase zum Ausschleusen von Na⁺ und die Wiederaufnahme von K⁺ in die Muskelzellen, liefert das ATP die benötigte Energie. Alle diese Vorgänge verbrauchen bei Belastung mehr Energie und sind daher auf die Neubildung von ATP angewiesen.

Als Energiequellen dienen hauptsächlich Kohlenhydrate und Fette, aber auch über einen gewissen Anteil der Proteine, der bei Ausdauerbelastungen unter Kohlenhydratmangel mitunter auf bis zu 15% ansteigen kann, wird diskutiert.

Wenn in der Muskulatur die Versorgung mit Energieträgern nachlässt, gibt es mehrere Möglichkeiten, um wieder an Substrate und damit Energie zu kommen. Ein abfallender Blutzuckerspiegel bei Belastung aktiviert die Glykolyse bzw. die Glukoneogenese in der Leber. Kohlenhydrate können in der Muskulatur und in der Leber gespeichert werden, jedoch auch wie erwähnt, über die Glukoneogenese gebildet werden (*siehe Cori-Zyklus und Alanin-Zyklus*).

Fette werden als Triglyceride gespeichert und stehen beinahe unbegrenzt zur Verfügung. Für das Einschleusen in den Citratzyklus ist allerdings Oxalacetat notwendig, was nur durch eine zumindest basale Glykolyse entstehen kann. Dieser Schritt wird in *Abbildung 3* noch einmal schematisch dargestellt – das Oxalacetat entsteht durch die Pyruvat-Carboxylase aus Pyruvat aus der Glykolyse oder aus dem Abbau glukogener (glukoplastischer) Aminosäuren (durch Proteinspaltung).

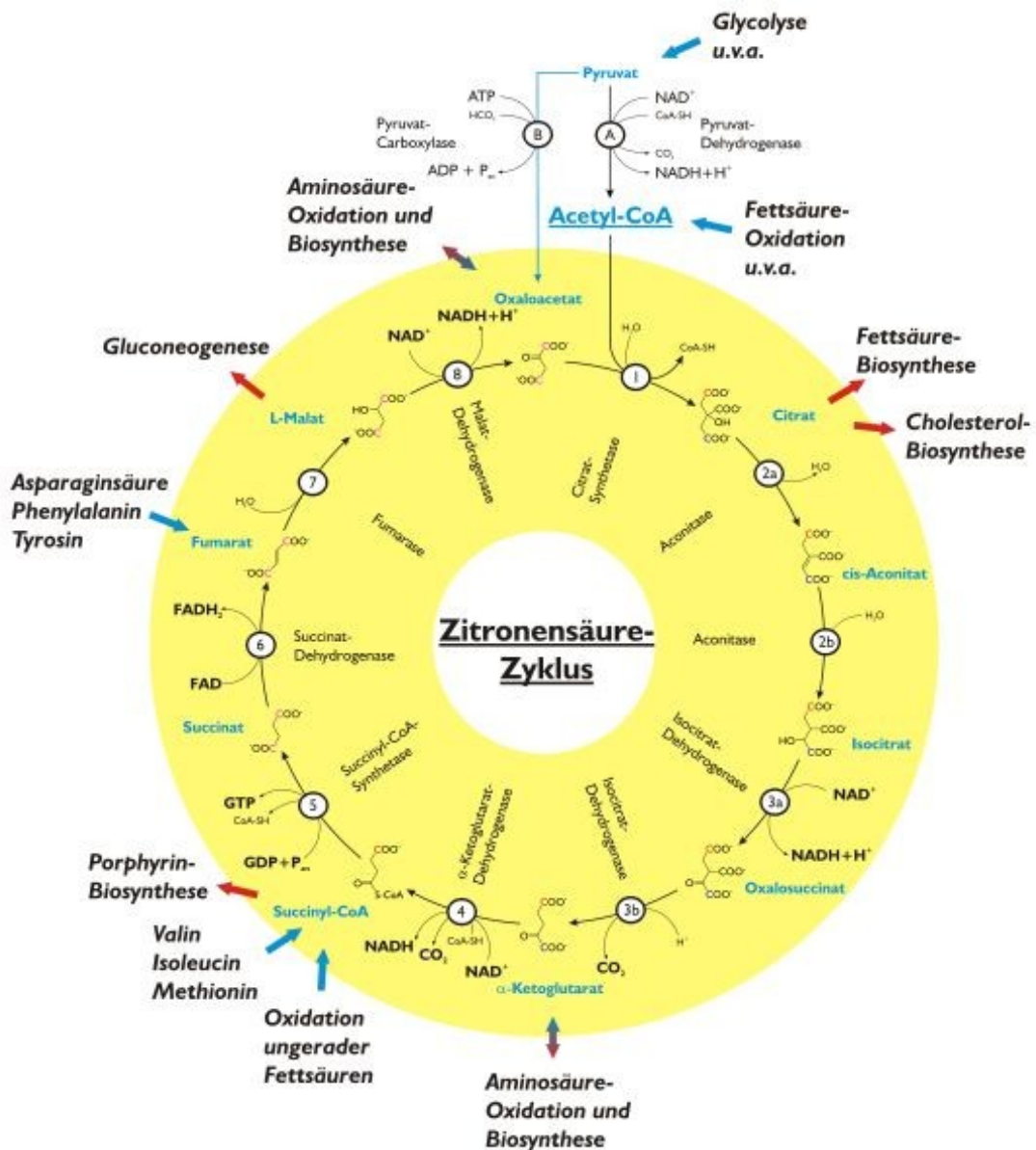


Abb. 3: Citratzyklus. „Fette verbrennen im Feuer der Kohlenhydrate“ – Erklärung im Text.

3.2.3.3.1. Cori-Zyklus und Alanin-Zyklus: „Recycling“ von Abfallprodukten

Beim Cori-Zyklus gelangt das im Muskel entstehende Laktat über das Blut zur Leber. Dort kann das Laktat über die Glukoneogenese wieder zu Glukose aufgebaut werden und wird über den Blutkreislauf wieder der Muskulatur zur Verfügung gestellt.

Abbildung 4 zeigt vereinfacht dieses Schema.

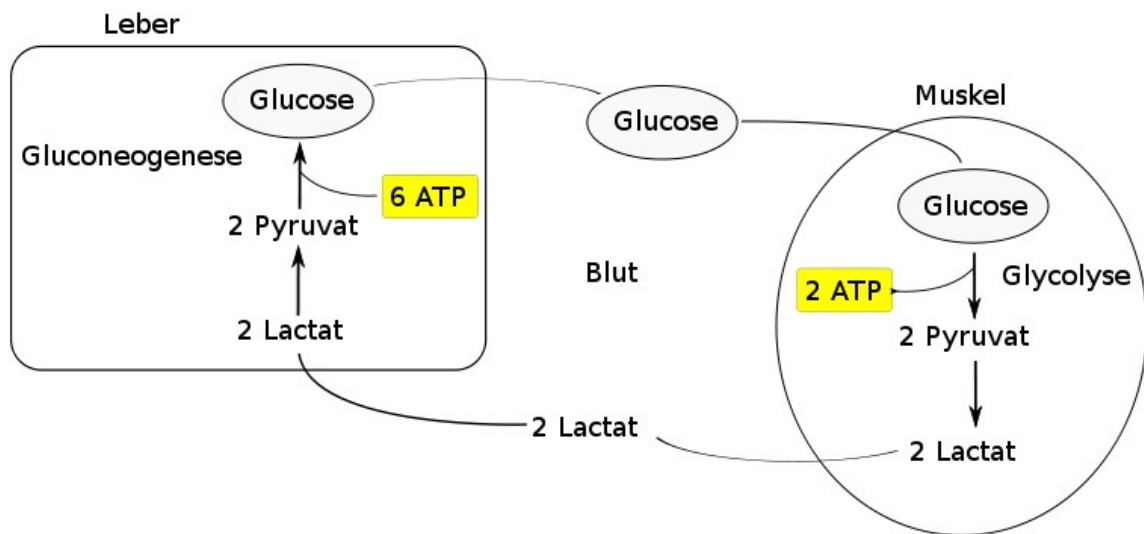


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung des Cori-Zyklus. Erklärung im Text.

In den arbeitenden Muskeln kommt es auch zur Freisetzung von Alanin. Alanin entsteht vorwiegend aus dem anaeroben Abbau der Glucose. Pyruvat kann unter anaeroben Bedingungen nicht weiter abgebaut werden, sondern wird entweder zu Laktat reduziert oder zu Alanin transaminiert. Sowohl Laktat als auch Alanin gelangen über das Blut in die Leber, wo beide Moleküle wieder zu Glucose aufgebaut werden (Cori-Zyklus), die nach Abgabe ins Blut erneut der arbeitenden Muskulatur zur Verfügung steht.

Auch bei der Proteolyse häufen sich im Muskel Aminosäuren an. Ein vermehrter Anteil von Aminosäuren im Energiestoffwechsel von Langzeitausdauerbelastungen könnte damit erklärt werden. Die Aminosäuren werden durch Transaminierung in Glutamat und 2-Oxosäuren umgewandelt. Aus Glutamat und Pyruvat entsteht wiederum Alanin. Alanin ist neben dem Glutamin die zweite wichtige Transportform für Aminostickstoff im Blut [6, 90].

4. Ergogene Faktoren: Flüssigkeitshaushalt und Ernährung bei körperlicher Aktivität

4.1. Flüssigkeitszufuhr

Jeder, der in irgendeiner Form sportlich aktiv ist, kennt das individuell unterschiedlich ausgeprägte Gefühl des Dursts. Bei körperlicher Aktivität können bis zu 1,5 l/h Flüssigkeit über die Schweißproduktion verloren werden. Dieser Vorgang dient vor allem der Kühlung des Körpers durch die Verdunstung (Evaporation). Beim Ausdauersport werden über lange Zeiten hohe körperliche Leistungen aufrechterhalten und es können mitunter hohe Körpertemperaturen auftreten. Kühlung, Aufrechterhaltung des Elektrolythaushaltes und der Betriebstemperatur sowie Ausscheidung sind grundlegend für optimale Leistungsfähigkeit.

Das praktische Problem liegt darin, was, wie viel und wann getrunken werden soll. Hierbei gilt es noch zu beachten, welche Sportart durchgeführt wird, da z.B. beim Radfahren die Flüssigkeitsaufnahme unproblematischer als beim Laufen ist. Auch die Intensität der Belastung spielt eine Rolle.

Durch eine höhere Intensität wird der Parasympathikus mehr unterdrückt als bei moderateren Belastungen und die Verdauungstätigkeit wird mehr oder weniger eingestellt. Wird hier das System überlastet, kommt es zu unangenehmen Beschwerden im Gastrointestinaltrakt. Trinken sollte zumindest im Training erprobt werden und taktisch klug eingesetzt werden. Flüssigkeitsverluste sind mitunter die häufigste Ursache einer Leistungseinbuße im Sport. Störungen im Elektrolythaushalt wirken sich teilweise auch dramatisch aus. Daher sollte auch jedem Hobbysportler ausreichende Hydratation empfohlen werden und im Leistungssport nach dem Prinzip „je länger, desto genauer“ geplant werden. Die richtige Taktik entscheidet hier über Erfolg oder Misserfolg.

4.1.1. Schweißproduktion und Flüssigkeitsverlust

Die mehr als 10^6 Schweißdrüsen, die beinahe den ganzen Körper bedecken, werden sympathisch-cholinerg innerviert und in Endstücke und Ausführungsgänge unterteilt. Sogenannter Primärschweiß wird plasma-isoton in den Endstücken gebildet und durch Rückresorption von Elektrolyten (NaCl) in den Ausführungsgängen entsteht hypotoner Schweiß. Bei Hypovolämie infolge von Dehydratation wird die Haut geringer durchblutet und die Schweißproduktion nimmt ab. Folglich verringert sich auch die Kühlungsleistung durch Evaporation [63].

Muskarinerge Cholinozeptoren – stimuliert durch Acetylcholin – erhöhen die Ca^{2+} -Konzentration im Zytosol und bewirken so eine Sekretion von Cl^- . Eine Rückresorption erfolgt in den Ausführungsgängen durch apikale Na^+ - und Cl^- -Kanäle. Die NaCl-Konzentration von ca. 20 – 100 mmol/l wird durch Aldosteron auf ca. 10 mmol/l reduziert. Na^+ Werte variieren individuell von ca. 10 – 70 mmol/l, Cl^- von 5 – 60 mmol/l. Diese Werte hängen von Ernährung, Schweißproduktion und Anpassung an die Umgebung ab [68]. NaCl ist also der Hauptbestandteil des Schweißes, gefolgt von Kalium, Kalzium und Magnesium. Hitzeakklimatisation bewirkt auch eine verminderte NaCl-Ausscheidung, aber nicht der anderen Elektrolyte. Die Schweißproduktion bewegt sich auch bei starker Hitze im Bereich von 1,0 bis 2,5 L/h [7, 69, 70].

4.1.2. Flüssigkeitsbilanz

Ein ca. 70 kg schwerer Mensch hat einen Wasserbedarf von ca. 2,5 bis 3 Liter pro Tag, anders ausgedrückt 1,5 l/m Körperlänge. Dieser Bedarf erhöht sich bei körperlicher Aktivität dementsprechend. Wird dadurch die Flüssigkeitsbilanz negativ, kann dies die Leistungsfähigkeit mitunter stark beeinträchtigen. Sport bedeutet immer auch Wasserverlust durch Schweißproduktion. Die Relationen und Auswirkungen dieser Verluste sind folgende [10]:

- 2,5% des Körpergewichts: Müdigkeit und Leistungsminderung
- 5% des Körpergewichtes: Schwindel, Kollaps, Krämpfe
- ab 10% des Körpergewichtes drohen Kreislauf und Nierenversagen

Bei einem 70 kg schweren Athleten wären 2,5% des Körpergewichtes umgerechnet 1,75 Liter Wasserverlust.

4.1.3. Praktische Empfehlungen für Trinkmengen bei Belastung

Um eine ausreichende Versorgung mit Flüssigkeit sicherzustellen, kann generell empfohlen werden, soviel zuzuführen wie durch Ausscheidung über Schweiß und Urin verloren wird. Die empfohlene Menge dafür liegt bei ca. 200 – 300 ml alle 20 – 30 min [71]. Individuelle Schwankungen müssen im Leistungssport selbstverständlich berücksichtigt werden. Da die Aufnahme je nach Hydratationszustand und zugeführtem Getränk (Temperatur, KH-Gehalt, Elektrolytgehalt, Magenentleerungsgeschwindigkeit) eine gewisse Zeit dauern kann [72], macht eine Flüssigkeitszufuhr im Ausdauertraining meist erst ab einer Dauer über 30 min Sinn. Bei moderaten Ausdauerleistungen hält sich der Schweißverlust in Grenzen und soll daher individuell ermittelt werden. Hierfür empfiehlt sich das Wiegen der Athleten vor und nach unterschiedlichen Trainingseinheiten, um die durchschnittlichen Mengen zu ermitteln. Eine zu hohe Menge an zugeführter Flüssigkeit kann die Magenentleerung stören und zu gastrointestinalen Beschwerden führen. Daher wird empfohlen, kontinuierlich zu trinken, um keine Überforderung des Gastrointestinalsystems hervorzurufen.

Für eine optimale Wettkampfleistung mag es Sinn machen, ein leichtes Flüssigkeitsdefizit von bis zu 2% am Ende der Belastung einzugehen, um einen eventuellen Nachteil (z.B. in Form eines Zeitverlustes beim Trinken, eines Rhythmuswechsels an den Labestationen, usw.) zu entgehen. Hier steht der Leistungsgewinn durch adäquate Zufuhr, einem Verlust von Zeit sehr oft gegenüber. Um aber sicherzugehen, die Leistung auf einem optimalen Level zu halten, ist es sinnvoller, Verluste relativ genau auszugleichen [73].

Sicher ist, dass ein Kohlenhydratanteil im Getränk die intestinale Aufnahme verbessert. Übersteigt aber der Anteil an Kohlenhydraten jedoch einen gewissen Grenzwert (dieser liegt je nach Literatur um die 7%), kommt es zu einer verzögerten Magenentleerung, verringerter Resorption und den damit verbundenen Problemen. Grund ist die erhöhte osmotische Wirksamkeit einer solchen Lösung. Daher sollte der Anteil der Kohlenhydrate in einem Sportgetränk unter 6 – 7 % liegen. Wird zusätzlich mit Gels und Riegel Energie zugeführt, sollte ausreichend Wasser substituiert werden. Weiters entscheidend ist die Zusammensetzung der Kohlenhydrate. Da über verschiedene Transportmechanismen aufgenommen, ist eine Mischung aus Fructose und Glucose zu bevorzugen. Es kann somit eine größere Menge an Energie zugeführt werden als bei nur einer Art von Kohlenhydraten.

Der durch die Schweißverluste entstehende Natriumverlust ist zwar gering, sollte aber dennoch ausgeglichen werden, da bei der Zufuhr von z.B. reinem Wasser oder anderen elektrolytfreien Getränken die Plasmakonzentration von Na^+ sinkt. Die verringerte Osmolalität führt dazu, dass vermehrt Wasser über die Niere ausgeschieden wird [74]. Reines Wasser soll daher in Kombination mit Gels, Riegeln oder anderen Nahrungsmitteln verwendet werden, welche den Elektrolytverlust zumindest teilweise ausgleichen können. Der Natriumgehalt selbst sollte bei zumindest 50 mmol/L liegen, wenn nur Flüssigkeit konsumiert wird [75].

4.1.4. Trinkverhalten bei extremen Umweltbedingungen

Training und Wettkampf im Ausdauersport finden auch vielfach unter extremen Umweltbedingungen statt. Viele Athleten bevorzugen wärmere Breiten, um im Winter ihr Training besser absolvieren zu können, und reisen dazu in mitunter sehr warme Gebiete. Auch Wettkämpfe werden oft bei hohen Temperaturen und enormer Luftfeuchtigkeit ausgetragen, so dass dem Flüssigkeitshaushalt noch gravierender Bedeutung zukommt, da die Leistungsfähigkeit auch vom Hydratationszustand des Athleten abhängt.

Im Ausdauersport werden die Trainingsziele vorwiegend über die Herzfrequenz angegeben, weil die Herzfrequenz ein guter Indikator für die Trainingsintensität bis hin zur Stufe der maximalen Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_{2\max}$) darstellt. Die Herzfrequenzzonen werden zumeist durch Labortests ermittelt, welche viele verschiedene Parameter zur Leistungsbeurteilung liefern.

Radfahren in heißer und feuchter Umgebung beeinflusst die Leistung von bereits akklimatisierten Athleten unter Laborbedingungen, weniger aber bei Langzeitausdauerbewerben im Freien, was auf die Effekte der unterschiedlichen Luftzirkulationsgeschwindigkeiten auf die Hitzespeicherung zurückgeführt wird [76].

Dabei wurde die maximale Sauerstoffaufnahme untersucht und es kam zu widersprüchlichen Ergebnissen: unabhängig vom Dehydratationszustand konnten verminderte, gleich bleibende und erhöhte Werte gemessen werden.

Rasch auftretende Hyperthermie und Dehydratation beeinflussen im tropischen Klima das Herzkreislaufsystem. Außerdem führt der durch das Schwitzen verursachte Flüssigkeitsverlust zu einer Abweichung der Herzfrequenz, was möglicherweise die Verhältnisse der Schwellen-Herzfrequenz-Relation beeinflusst [77].

Zusätzlich hat die Hitze auch durch Stimulation der Thermorezeptoren Einfluss auf die Atemtätigkeit. Ein direkter Effekt einer erhöhten Körperkerntemperatur auf die CO_2 -Pufferkapazität in den Körperflüssigkeiten wird auch beschrieben [78].

Unter tropischen Bedingungen ist die maximale Leistungsfähigkeit (und die Zeit bis zum Erreichen der $\dot{V}O_{2\max}$) deutlich geringer als unter normalen Bedingungen. Dies steht vermutlich in Beziehung zur Hyperthermie.

Einige Autoren beschreiben, dass akklimatisierte Personen (z.B. Einheimische in den Tropen oder bei einem zumindest 2-jährigen Aufenthalt) eine gewisse Hitzetoleranz entwickeln. Dies zeigt sich durch verminderte Schweißproduktion und höhere Hauttemperatur der Probanden. Verminderte Schweißbildung hat den Vorteil, Flüssigkeit im Körper zurückzuhalten, und es kommt damit zu einer besseren Thermo- und Osmoregulation. Die höhere Hauttemperatur wirkt sich günstig auf den Dampfdruck auf der Hautoberfläche aus und folglich auch auf die Verdunstung [79].

Im tropischen Klima kommt es zu signifikanten Anstiegen der Herzfrequenz. Vor allem bei Leistungen über der aeroben Schwelle wurde dies bei Triathleten, die bereits eine Akklimatisationszeit von 14 Tagen hatten, festgestellt. Ergebnisse dieser Studien weisen auf die kumulierenden Effekte von Belastungsintensität und Umgebungsbedingungen hin [80]. Im Großen und Ganzen können aber die üblichen Parameter der Leistungsdiagnostik (Schwellen, Herzfrequenz, $\dot{V}O_{2\max}$ usw.) unter normalen Bedingungen für Training oder Wettkampf in moderaten tropischen Verhältnissen übernommen werden [76].

4.2. Energiezufuhr

Zur Aufrechterhaltung einer hohen Leistungsfähigkeit im Ausdauerbereich gehört neben der Aufnahme von Flüssigkeit, die unter anderen wichtig für funktionierenden Kreislauf, Kühlung und Stofftransport ist, auch die Aufnahme von Energie.

Der *steady state* einer Dauerleistung setzt die Zufuhr von energiereichen Substraten voraus [81]. Je nach Sportart werden enorme Energiemengen verbraucht. Dies variiert logischerweise nach Intensität und Anteil der eingesetzten Muskelmasse.

Dauerleistungen von über 60% der $\dot{V}O_{2\max}$ verlangen nach geeigneter Substitution von Kohlenhydraten, damit sie über längere Zeit ausgeübt werden können [82].

Es gibt zahlreiche Studien, die belegen, dass Kohlenhydrate das wichtigste Substrat für Dauerleistungen sind und viele Autoren empfehlen nicht nur während, sondern auch unmittelbar vor Dauerleistungen Kohlenhydrate zuzuführen, um die Leistungsfähigkeit während des Trainings oder Wettkampfs zu verbessern [83, 84].

Da der Zusatz von Kohlenhydraten in Getränken die Resorption verbessert (*siehe Kapitel Flüssigkeitszufuhr 4.1.*), ist es sinnvoll, dass ein großer Teil von Kohlenhydraten über Getränke aufgenommen wird. Es empfiehlt sich die Aufnahme von ca. 30 bis 70 g Kohlenhydrate pro Stunde (0,2 bis 0,6 g CHO/kg KG/h), am besten in Form von 5 – 10%igen Kohlenhydratlösungen um die Leistungsfähigkeit aufrecht zu erhalten [85]. Dies macht auch deshalb Sinn, da es bei gewissen Sportarten einfach schwierig und

sogar kontraproduktiv ist, unter Belastung feste Nahrung zu sich zu nehmen. Feste Nahrung, die Verdauungsarbeit fordert, liegt auch länger im Magen (Blutumverteilung unter Belastung) und kann zu gastrointestinalen Beschwerden führen. Die Magenentleerung generell obliegt vielen Faktoren wie Nahrungsbestandteile, Größe der Nahrungsbrocken, aufgenommener Menge, Temperatur, Osmolalität und vielen mehr [86]. Konzentrate wie Gels oder Riegel versuchen, die Verdauungsarbeit so weit wie möglich auszuschalten, um den Körper nicht zusätzlich Verdauungsarbeit zuzumuten. Flüssignahrungen, welche diese Eigenschaften von Homogenität in Größe und Zusammensetzung aufweisen, verlassen den Magen entscheidend schneller als feste Nahrungsmittel [87]. Zusätzlich könnten gekühlte Nahrungsmittel (kühl in Relation zur Körpertemperatur) die Darmmotilität unter Belastung noch verbessern [88].

Die Zusammensetzung der zugeführten Kohlenhydrate ist zusätzlich von Bedeutung. In den meisten Sportgetränken ist Maltodextrin der Hauptkohlenhydratanteil, Fructose wird sehr oft auch zugesetzt, was die Gesamtmenge der aufgenommenen Kohlenhydrate erhöht, da unterschiedliche Transportsysteme diese Vorgänge regeln [89].

5. Diskussion

Heutzutage wird vielfach der Blick durch das „Mikroskop“ zu wichtig genommen und auf Details Wert gelegt, die zwar vielleicht im gesamten sehr bedeutend sind, aber nur zur Geltung kommen können wenn andere Grundvoraussetzungen erfüllt sind. Es empfiehlt sich, um eine effektive Grundlage einer Leistungsverbesserung herzustellen, die Grundprinzipien des systematischen Trainingsaufbaues einzuhalten und die natürliche Entwicklung der Leistungsfähigkeit zu fördern. Gerade in der Nachwuchsarbeit oder bei Einsteigern in Ausdauersportarten sollte ein besonderes Augenmerk auf diese Bereiche des Trainingsaufbaus gelegt werden. In der Praxis trifft man auf viele Athleten mit unzureichenden Kraftniveaus, schlechter Koordination und fehlerhafter Technik. Zumeist reichen für die ersten Monate allgemeines Kraft- und Ausdauertraining aus, ohne spezifische Inhalte für die angestrebte Sportart. Das Erlernen dieses Grundgerüsts sollte zur Basis jeden Aufbaus gehören. Sind diese Defizite ausgeglichen und kann die Leistungsfähigkeit gezielter trainiert werden, spielen sportartspezifische Trainingseinheiten eine bedeutendere Rolle.

Da der menschliche Körper an sich in seiner Entwicklung ein extrem ausgereiftes und komplexes System ist, sind von der physiologischen Seite her die Limits sehr hoch angesetzt. Wenn ein Athlet sich nicht auf einem Weltklassenniveau seiner Leistungsfähigkeit befindet, macht es keinen Sinn, über die Grenzen einer physiologischen Komponente nachzudenken – außer es sind Pathologien vorhanden. Die Kapazität des Atmungssystems ist bei vielen Athleten weit unter dem Limit ausgeschöpft. Leistungseinbußen entstehen vermutlich am ehesten durch Ermüdung der Atemmuskulatur. Das heisst für Langdistanzbewerbe könnte es Sinn machen, sich bewusst auf das Training der Atmung zu konzentrieren.

Die Sauerstoffaufnahme im Blut ist jedoch schon an Grenzen gebunden, was für viele Athleten die Möglichkeiten des Dopings als sehr verlockend erscheinen lässt. Bei Überlegung der genauen Physiologie und Rheologie sowie der Möglichkeiten einer entstehenden Pathologie durch zugeführte Substanzen sind derartige Schritte auf jeden Fall anzuzweifeln.

Im Muskelstoffwechsel spielen sehr viele Komponenten eine Rolle und sind mit Sicherheit auch nicht ausreichend erforscht. Ob hier tatsächlich Limits zu finden sind (wieder abgesehen von vorhandenen Pathologien) sei dahingestellt. Ergogene Substanzen mögen hilfreich sein, hier sollte aber an vorbestehende Defizite und deren Ursachen gedacht werden.

Sehr wichtig hingegen scheint die Umsetzung der Hitzekontrolle, des Flüssigkeitshaushaltes und der Energieversorgung zu sein. Diese Parameter können sehr gut vom Athleten gesteuert werden und sind erlernbar. Eine gute Renntaktik mit entsprechender Zufuhr von Flüssigkeit und Energie ist für die Aufrechterhaltung einer Dauerleistung einer der größten Erfolgsfaktoren. Trinken, Kühlen und Kohlenhydrataufnahme muss geübt und automatisiert werden, um Defizite weitgehend auszuschließen. Da sehr viele individuelle Unterschiede der Athleten vorherrschen, sollten im Einzelfall die individuellen Bedürfnisse genau ermittelt werden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Haber P. Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung. Springer Verlag 2001; 112ff
- [2] Haber P. Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung. Springer Verlag 2001; 113ff
- [3] Coyle EF. Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exerc Sport Sci Rev* 1995; 23: 25-63
- [4] Haber P. Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung. Springer Verlag 2001
- [5] Haber P. Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung. Springer Verlag 2001; 114ff
- [6] Horn F. Biochemie des Menschen. Thieme Stuttgart 2003; 77ff
- [7] Klinke R, Silbernagl S. Physiologie. Thieme Verlag 2010; S97ff
- [8] Haber P. Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung. Springer Verlag 2001; 122ff
- [9] Haber P. Leitfaden zur medizinischen Trainingsberatung. Springer Verlag 2001; 123ff
- [10] Tomasits J, Haber P. Leistungsphysiologie. Springer Verlag Wien 2008
- [11] Horn F. Biochemie des Menschen. Thieme, Stuttgart 2003; 226ff
- [12] Klinke R, Silbernagl S. Physiologie. Thieme Verlag 2010; 258ff
- [13] Bye PTP, Esau SA, Walley KR, et al. Ventilatory muscles during exercise in air and oxygen in normal men. *J Appl Physiol* 1984; 56: 464-71
- [14] Johnson BD, Babcock MA, Suman OE, et al. Exercise-induced diaphragmatic fatigue in healthy humans. *J Physiol* 1993; 460: 385-405
- [15] Sheel AW, Respiratory Muscle Training in Healthy Individuals. *Sports Med* 2002; 32 (9): 567-581
- [16] Dempsey JA, Adams L, Ainsworth DM, et al. Airway, lung, and respiratory function during exercise. In: Rowell LB, Shepherd JT, editors. *Exercise: regulation and integration of multiple systems*. New York (NY): Oxford University Press, 1996: 448-514
- [17] Klinke R, Silbernagl S. Physiologie. Thieme Verlag 2010; S 302f
- [18] Volianitis S, McConnell AK, Koutedakis Y, et al. Inspiratory muscle training improves rowing performance. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33 (5): 803-9
- [19] Markov G, Spengler CM, Knopfli-Lenzin C, et al. Respiratory muscle training increases cycling endurance without affecting cardiovascular responses to exercise. *Eur J Appl Physiol* 2001; 85(3-4): 233-9
- [20] Henke KG, Sharratt M, Pegelow D, et al. Regulation of endexpiratory lung volume during exercise. *J Appl Physiol* 1988; 64 (1): 135-46
- [21] Dempsey JA, Forster HV, Ainsworth DM. Regulation of hyperpnea, hyperventilation, and respiratory muscle recruitment during exercise. In: Dempsey JA, Pack AI, editors. *Regulation of breathing*. New York (NY): Marcel Dekker, 1995: 1065-134
- [22] Aaron EA, Seow KC, Johnson BD, et al. Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J Appl Physiol* 1992; 72: 1818-25
- [23] Harms CA, Wetter TJ, McClaran SR, et al. Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *J Appl Physiol* 1998; 85: 609-18
- [24] Manohar M. Blood flow to the respiratory and limb muscles and to abdominal organs during exertion in ponies. *J Physiol* 1986; 377: 25-35
- [25] Manohar M. Costal vs crural diaphragmatic blood flow during submaximal and near-maximal exercise in ponies. *J Appl Physiol* 1988; 65 (4): 1514-9
- [26] Musch TI, Friedman DB, Pitetti KH, et al. Regional distribution of blood flow of dogs during graded dynamic exercise. *J Appl Physiol* 1987; 63 (6): 2269-77
- [27] Johnson BD, Babcock MA, Suman OE, et al. Exercise-induced diaphragmatic fatigue in healthy humans. *J Physiol* 1993; 460: 385-405
- [28] Sonetti DA, Wetter TJ, Pegelow DF, et al. Effects of respiratory muscle training versus placebo on endurance exercise performance. *Respir Physiol* 2001; 127 (2-3): 185-99
- [29] Spengler CM, Roos M, Laube SM, et al. Decreased exercise blood lactate concentrations after respiratory endurance training in humans. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1999; 79 (4): 299-305
- [30] Wehrlin JP, Hallen J. Linear decrease in $\dot{V}O_{2max}$ and performance with increasing altitude in endurance athletes. *Eur J Appl Physiol* 2006; 96: 404-412
- [31] Vogt M, Hoppeler H. Is Hypoxia Training Good for Muscles and Exercise Performance? *Progress in Cardiovascular Diseases* 52 (2010) 525-533
- [32] Robergs RA, et al. Multiple variables explain the variability in the decrement in $\dot{V}O_{2max}$ during acute hypobaric hypoxia. *Med.Sci.Sports Exerc* 1998; 30: 869-879

- [33] Saunders PU, Pyne DB, Gore CJ. Endurance training at altitude. *High Alt Med Biol* 2009; 10: 135-148.
- [34] Silbernagl S, Despopoulos A. *Taschenatlas der Physiologie*. Thieme 2003
- [35] Klinke R, Silbernagl S. *Physiologie*. Thieme Verlag 2010; S610f
- [36] Ekblom B. Blood boosting and sport. *Balliere's Clin Endocrinol Metab* 2000; 14: 89-98
- [37] Ekblom B, Wilson G, Astrand PO. Central circulation during exercise after venesection and reinfusion of red blood cells. *J Appl Physiol* 1976; 40: 379-383
- [38] Calbet JA, Lundby C, Koskolou M, et al. Importance of hemoglobin concentration to exercise: acute manipulations. *Respir Physiol Neurobiol* 2006; 151: 132-140
- [39] Lundby C, Robach P, Boushel R, et al. Does recombinant human Epo increase exercise capacity by means other than augmenting oxygen transport? *J Appl Physiol* 2008; 105: 581-587
- [40] Lundby C, Thomsen JJ, Boushel R, et al. Erythropoietin treatment elevates haemoglobin concentration by increasing red cell volume and depressing plasma volume. *J Physiol* 2007, 578: 309-314
- [41] Brun J-F, Bouchahda C, Chaze D, et al. The paradox of haematocrit in exercise physiology: which is the 'normal' range from an hemorheologist's viewpoint? *Clin Hemorheol Microcirc* 2000; 22: 287-303
- [42] El-Sayed MS, Ali N, El-Sayed AZ. Haemorheology in exercise and training. *Sports Med* 2005; 35 : 649-670
- [43] Morkeberg JS, Belhage B, Damsgaard R. Changes in blood values in elite cyclists. *Int J Sports Med* 2009; 30: 130-138
- [44] Schmidt W, Maassen N, Tegtbur U, et al. Changes in plasma volume and red cell formation after a marathon competition. *Eur J Appl Physiol* 1989; 58: 453-458
- [45] Brun J, Bouchahda C, Chaze D, et al. The paradox of hematocrit in exercise physiology: which is the "normal" range from an hemorheologist's viewpoint? *Clin Hemorheol Microcirc* 2000; 22: 287-303
- [46] Böning D, Cristancho E, Serrato M, et al. Hemoglobin mass and peak oxygen uptake in untrained and trained female altitude residents. *Int J Sports Med* 2004; 25: 1-8
- [47] Wagner PD. A theoretical analysis of factors determining $\dot{V}O_2$ max at sea level and altitude. *Respir Physiol* 1996; 106: 329-349
- [48] Kuipers H, Moran J, Dubravcic-Simunjak S, et al. Hemoglobin level in elite speed skaters from 2000 up to 2005, and its relationship with competitive results. *Int J Sports Med* 2007
- [49] Schmidt W, Prommer N. Effects of various training modalities on blood volume. *Scand J Med Sci Sports* 2008; 18 (Suppl 1): 57-69
- [50] Ashenden MJ, Gore CJ, Parisotto R, et al. Effect of altitude on second-generation blood tests to detect erythropoietin abuse by athletes. *Haematologica* 2003; 88: 1053-1062
- [51] Böning D. Altitude and hypoxia training – a short review. *Int J Sports Med* 1997; 18: 565-570
- [52] Gore CJ, Clark SA, Saunders PU. Nonhematological mechanisms of improved sea-level performance after hypoxic exposure. *Med Sci Sports Exerc* 2007; 39: 1600-1609
- [53] Altman PL, Dittmer DS. *Respiration and Circulation*. Bethesda, Maryland: Federation of the American Societies for Experimental Biology 1971
- [54] Hsia CC, Johnson RL Jr, Dane DM, et al. The canine spleen in oxygen transport: gas exchange and hemodynamic responses to splenectomy. *J Appl Physiol* 2007; 103: 1496-1505
- [55] Wu EY, Ramanathan M, Hsia CCW. Role of hematocrit in the recruitment of pulmonary diffusing capacity: comparison of human and dog. *J Appl Physiol* 1996; 80: 1014-1020
- [56] Prommer N, Ehrmann U, Schmidt W, et al. Total haemoglobin mass and spleen contraction: a study on competitive apnea divers, non-diving athletes and untrained control subjects. *Eur J Appl Physiol* 2007; 101: 753-759
- [57] Robertson RJ, Gilcher, Metz KF, et al. Hemoglobin concentration and aerobic work capacity in women following induced erythrocytemia. *J Appl Physiol* 1984; 57: 568-575
- [58] Böning D, Maassen N, Pries A. No proof for augmented arterial oxygen content as only factor influencing exercise capacity after Epo doping. *J Appl Physiol* 2008; 105: 1988
- [59] Vogel J, Kiessling I, Heinicke K, et al. Transgenic mice overexpressing erythropoietin adapt to excessive erythrocytosis by regulating blood viscosity. *Blood* 2003; 102: 2278-2284
- [60] Böning D, Maassen N, Pries A. The Hematocrit Paradox – How Does Blood Doping Really Work? 2010 *Int J Sports Med*, published online
- [61] Nadel ER. Temperature regulation and hyperthermia during exercise. *ClinChestMed* 84; 5: 13-20
- [62] Klinke R, Silbernagl S. *Physiologie*. Thieme Verlag 2010; S 504f

- [63] Wendt D, van Loon L, van Marken Lichtenbelt W. Thermoregulation during Exercise in the Heat: Strategies for Maintaining Health and Performance; *Sports Med* 2007; 37(8): 669-682
- [64] Sawka MN, Montain SJ. Fluid and electrolyte supplementation for exercise heat stress. *Am J Clin Nutr* 2000; 72: 564-72
- [65] Sawka MN. Physiological consequences of hypohydration: exercise performance and thermoregulation. *Med Sci Sports Ex* 1992; 24: 657-70
- [66] Armstrong LE, Maresh CM. The induction and decay of heat acclimatisation in trained athletes. *Sports Med* 1991; 12: 302-12
- [67] Pandolf KB. Time course of heat acclimation and its decay. *Int J Sports Med* 1998; 19: S157-60
- [68] Allan JR, Wilson CG. Influence of acclimatization on sweat sodium concentration. *J Appl Physiol* 1971; 30: 708-12
- [69] Guyton AC, Hall JE. *Textbook of medical physiology*. Philadelphia (PA): Saunders Company, 1996
- [70] Sawka MN, Montain SJ. Fluid and electrolyte supplementation for exercise heat stress. *Am J Clin Nutr* 2000; 72: S564-72
- [71] Convertino VA, Armstrong LE, Coyle EF, et al. American College of Sports Medicine position stand: exercise and fluid replacement. *Med Sci Sports Exerc* 1996; 28: i-vi
- [72] Maughan RJ, Leiper JB, Vist GE. Gastric emptying and fluid availability after ingestion of glucose and soy protein hydrolysate solutions in man. *Exp Physiol* 2003; 89: 101-8
- [73] Coyle EF. Fluid and fuel intake during exercise. *J Sports Sci De2004*; 22: 39-55
- [74] Shirreffs SM, Maughan RJ. Volume repletion after exercise induced volume depletion in humans: replacement of water and sodium losses. *Am J Physiol* 1998; 274: F868-75
- [75] Maughan RJ, Shirreffs SM. Recovery from prolonged exercise: restoration of water and electrolyte balance. *J Sports Sci* 1997; 15: 297-303
- [76] Hue O, Antoine-Jonville S, Galy O, et al. Maximal oxygen uptake, ventilatory thresholds and mechanical power during cycling in Tropical climate in Guadeloupean elite cyclists. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2010; 13: 607-612
- [77] Nybo L, Jensen T, Nielsen B, et al. Effects of marked hyperthermia with and without dehydration on VO₂ kinetics during intense exercise. *J Appl Physiol* 2001; 90:1057-64
- [78] Stadie WC, Austin JH, Robinson HW. The effect of temperature on the acid-base protein equilibrium and its influence on the CO₂ absorption curve on whole blood, true and separated serum. *J Biol Chem* 1925; 66: 901
- [79] Bae JS, Lee JB, Matsumoto T, et al. Prolonged residence of temperate natives in the tropics produces a suppression of sweating. *Pflugers Arch* 2006; 453:67-72
- [80] Voltaire B, Galy O, Coste O, et al. Effect of fourteen days of acclimatization on athletic performance in tropical climate. *Can J Appl Physiol* 2002; 27:551-62
- [81] Laursen PB, Rhodes EC. Physiological analysis of a high intensity ultraendurance event. *Strength Conditioning J* 1999; 21 (1): 26-38
- [82] Coyle EF. Fluid and carbohydrate replacement during exercise: how much and why? *Sports Sci Exchange* 1994; 7: 3, 50
- [83] Rauch HG, Hawley JA, Woodey M, et al. Effects of ingesting a sports bar versus glucose polymer on substrate utilisation and ultraendurance performance. *Int J SportsMed* 1999; 20May (4): 252-7
- [84] Tsintzas K, Williams C. Human muscle glycogen metabolism during exercise. *Sports Med* 1998; 25
- [85] Karelis A, Smith J, Passe D, et al. Carbohydrate Administration and Exercise Performance; *Sports Med* 2010; 40 (9): 747-763
- [86] Rehrer NJ, Brouns F, Beckers EJ. Gastric emptying with repeated drinking during running and bicycling. *Int J Sports Med* 1990; 11: 238-43
- [87] Alpers DH. Digestion and absorption of carbohydrates and proteins. In: Johnson LR, Alpers DH, Christensen J, et al., editors. *Physiology of the gastrointestinal tract*. 3rd ed. New York: Raven Press, 1994: 1723-50
- [88] Brouns F, Saris WHM, Rehrer NJ. Abdominal complaints and gastrointestinal function during long-lasting exercise. *Int J Sports Med* 1987; 8: 175-89
- [89] Langenfeld ME, Seifert JG, Rudge SR, et al. Effect of carbohydrate ingestion on performance of non-fasted cyclists during a simulated 80-mile time trial. *J Sports Med Phys Fitness* 1994; 34 (3): 263-70
- [90] Koolman J, Röhm KH. *Taschenatlas der Biochemie*. Thieme 2003; S 338
- [91] Klinke R, Silbernagl S. *Physiologie*. Thieme Verlag 2010; S 98ff

[92] Markworth P. Sportmedizin: Physiologische Grundlagen. RORORO 1983; S 214ff

[93] Hollmann W, Hettinger Th. Sportmedizin: Arbeits- und Trainingsgrundlagen. Schattauer 1990

7. Tabellen und Abbildungsverzeichnis

Table 1: Weltrekorde über verschiedene Langdistanzen. nach diversen Quellen u.a.

<http://www.iaaf.org/statistics/rebycat/index.html> ; www.letour.fr Stand: 01.02.2011 (Vintler M)

Table 2: Übersicht über die Formen der Ausdauer (Vintler M)

Table 3: Zusammenhang zwischen respir. Quotienten (RQ) und Energieausbeute aus Kohlenhydraten und Fetten. nach Klinke R, Silbernagl S. Physiologie. Thieme Verlag 2010; S 601(Vintler M)

Table 4: Limitierung der max. Sauerstoffaufnahme; nach Hollmann W, Hettinger Th. Sportmedizin: Arbeits- und Trainingsgrundlagen. Schattauer 1990 (Vintler M)

Table 5: nach Wendt D, van Loon L, van Marken Lichtenbelt W. Thermoregulation during Exercise in the Heat: Strategies for Maintaining Health and Performance; Sports Med 2007; 37 (8): 669-682

Table 6: Charakteristika der Muskelfasertypen. nach Klinke R, Silbernagl S. Physiologie. Thieme Verlag 2010; S 597

Abbildung 1: Atmung, Kreislauf und Muskulatur (Vintler M)

Abbildung 2: Hollmann W, Hettinger Th. Sportmedizin: Arbeits- und Trainingsgrundlagen. Schattauer 1990

Abbildung 3: Zitratzyklus. Quelle: <http://de.enc.tfode.com/Citratzyklus> Stand: 01.02.2011

Abbildung 4: Cori-Zyklus. Quelle: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cori-Zyklus.svg?uselang=de> Stand: 01.02.2011