

5. Herz-Kreislauf-System (ca. 6 Std.)

- Anatomie des Herzens
- Sauerstoffversorgung des Herzens
- Erregungsbildungs- und Erregungsleitungssystem des Herzens
- Arbeitsphasen des Herzens
- Kenngrößen der Herzfunktion
- Entstehung des Blutdrucks
- arterielles und venöses Gefäßsystem
- Zusammensetzung und Funktionen des Blutes

5.1 Allgemeine Grundlagen zum Herz-Kreislaufsystem

Hauptaufgaben des HKS :

- Versorgung der Billionen von Zellen der verschiedenen Körpergewebe mit Nähr- und Wirkstoffen und Sauerstoff
- Abtransport von Stoffwechselprodukten

| Bestandteile des HKS | Aufgaben |
|----------------------|--|
| Herz | |
| Blut | |
| Gefäße | |
| – Arterien | – führen sauerstoffreiches (arterielles) Blut vom Herzen weg |
| – Venen | – führen sauerstoffarmes (venöses) Blut zum Herzen hin |
| Ausnahmen | |
| – Lungenarterien | – transportieren venöses Blut (vom Herzen weg) |
| – Lungenvenen | – transportieren artielles Blut (zum Herzen hin) |

Innerhalb von 60 Sekunden durchfließt das gesamte Blut des Menschen - das sind 5 bis 6 Liter - einmal den Organismus.

5.2 Anatomie und Aufbau des Herzens

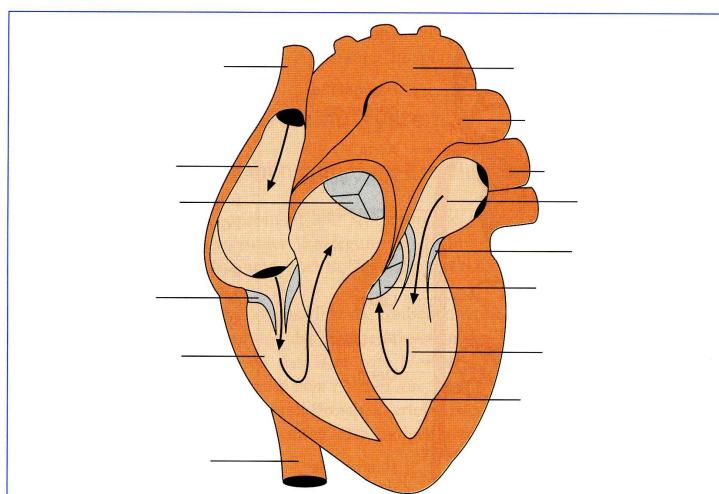


Abb. 1: Schematische Darstellung des Herzens; Lage: 2/3 links der Mediallinie, Herzspitze auf Zwerchfell

- : 2 muskelstarke Kammern und 2 muskelschwache Vorhöfe
- Die beiden Vorhöfe liegen oberhalb, die beiden Kammern unterhalb der Vorhofkammergrenze,
- Linke und rechte Herzhälften sind durch eine Scheidewand abgetrennt: Vorhof- bzw. Kammentrennwand.
- Herzwand sie besteht von innen nach außen aus:

-
-
-
-

- In den rechten Vorhof münden 2 Venen: die obere und untere Hohlvene, die das O₂-arme venöse Blut aus dem Körper zum Herzen führen.
- In den linken Vorhof münden 4 Lungenvenen, die O²-reiches Blut aus der Lunge bringen.
- Aus den Kammern entspringt je eine große Ader:
 - die aus der rechten Kammer
 - die (Körperschlagader) aus der linken Kammer

5.3 Die Sauerstoffversorgung

Sie erfolgt durch die (Koronargefäße). Das Herz verbraucht selbst ca. 8% der ausgestoßenen Blutmenge.

Die O₂ - Ausschöpfung des Herzmuskel ist mit 70% wesentlich größer als die des Skelettmuskels (20-25%), gleich ob bei großer Arbeit oder nicht.

Bei hoher Belastung kann das Herz seinen Eigenbedarf also nur durch ein erhöhtes Blutangebot steigern, nicht durch höhere O₂ - Ausschöpfung. Der Skelettmuskel dagegen kann seine Durchblutung bis auf das 30-fache des Ruhewertes steigern! (Das Herz nur um das 4-fache)

5.4 Erregungsbildungs- und Erregungsleitungssystem

Reize werden vom Sinusknoten, in der Wand des rechten VH weitergeleitet an den AV-Knoten = Atrioventrikularknoten an der VH-Kammer-Grenze. Von dort zum His-Bündel, welches vom AV-Knoten ausgehend sich in zwei Schenkel teilt. Das Erregungsleitungssystem endet mit vielen Verzweigungen (Purkinje-Fasern) im Kammermyocard

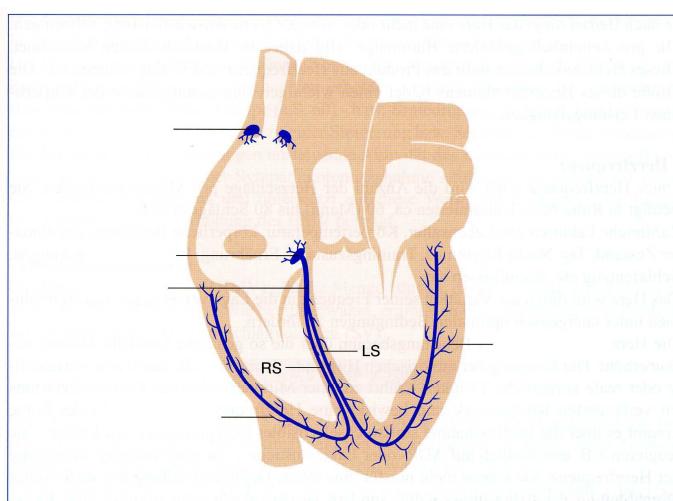


Abb. 2: Schematische Darstellung des Erregungsbildungs- und Erregungsleitungssystems des Herzens; RS / LS = Rechter und linker Schenkel

5.5 Arbeitsphasen des Herzens

Das Herz arbeitet nach einer rhythmischen Aufeinanderfolge von Anspannung (=.....) und Erschlaffung (=.....).

Ruhepuls (70 Schl./Min) → ca. 1 sek.
Belastungspuls (180-200 Schl./Min) → ca 0,3 sek.

Kammer-Systole = Vorhof-Diastole der VH und umgekehrt.

Kammersystole

- | | |
|------------------|--|
| Anspannungszeit | <ul style="list-style-type: none"> – Erregungsausbreitung – Isometrische Kontraktion des Herzmuskels bis zur Öffnung der Taschenklappen |
| Austreibungszeit | <ul style="list-style-type: none"> – Blutauswurf in die Aorta bzw. Pulmonalarterie (Kammerdruck > arterieller Druck) – Öffnung der Taschenklappen – Vom gesamten Ventrikelvolumen eines Untrainierten (ca. 130 ml) werden etwa 70 ml ausgeworfen |

Kammerdiastole

- | | |
|--------------------------------------|--|
| Erschlaffungszeit (Entspannungszeit) | <ul style="list-style-type: none"> – Zunächst alle Klappen geschlossen – Rascher Druckabfall wg. Entspannung der Kammermuskulatur → Öffnung der Segelklappen zw. VH und Kammern (Kammerdruck < Vorhofdruck) |
| Füllungszeit | <ul style="list-style-type: none"> – Blut strömt aus den VH in die Kammern |

Unterstützung der Blutbewegung durch die Bewegung der Klappen- bzw. Ventilebene

- Während der *Kammersystole* wird die *Ventilebene in Richtung Herzspitze* gesenkt. Der entstehende Unterdruck unterstützt die Füllung der VH
- Verlagerung der Klappenebene während der Kammerdiastole nach oben → rasche initiale Füllung der Kammern → Nach 1/3 der Diastole sind die Kammern bereits zu $\frac{3}{4}$ gefüllt (wichtig bei hohen Frequenzen)

5.6 Kenngrößen der Herzfunktion

Herzfrequenz

-
- in Ruhe 60-80 Schläge/min
- bei Belastung bis etwa 200/min
- bei Kindern bis zu 240/min
- Maximale HF = 220 - Lebensalter

Schlagvolumen

-

Die Veränderung des Schlagvolumens unterliegt einer zweifachen Regelung:

- a) In erster Linie durch die Herzmuskelkaserlänge (→ Vordehnung durch Kammerfüllung)
 - starke Füllung/Vordehnung z.B. durch erhöhten venösen Rückfluss durch Muskelpumpe
 - geringe Füllung/Vordehnung z.B. durch Pressatmung (intrathorakalen Druck ↑ ⇒ venös. Rückstrom ↓)
- b) Sympathikuswirkung (Kontraktilitätszunahme der Herzmuskulatur)
 - Stimulierung der sympathischen Herznerven z.B. durch "Leistungseinstellung" oder durch im Blut zirkulierendes Adrenalin und Noradrenalin

Herzminutenvolumen/Herzzeitvolumen

-
- $HMV = HF \times SV$
- Herzminutenvolumen in Ruhe beim Untrainierten ca. 5 Liter
- Steigerung bei Belastung auf das Vierfache möglich
- Steigerung bei Trainierten um das 8-fache möglich

Der Untrainierte steigert sein HMV vorwiegend durch
der Trainierte durch Dies ist wegen des geringeren Sauerstoffverbrauchs (beim Herzschlag) energetisch günstiger.

Die tägliche Arbeitsleistung des Herzens liegt bei 10.000 mkp, was einem Blutauswurf von >7000l entspricht

Sauerstoffpuls

-
- Bei Trainierten liegt er wesentlich höher als bei Untrainierten, ca. 30 ml : 18 ml

5.7 Die Entstehung des Blutdrucks

Blutdruck - Blutdruckregulation

- Der arterielle Blutdruck ist die treibende Kraft für die Blutzirkulation. Er schwankt zwischen dem
–Druck (Kontraktion des Herzens): ca. mmHg und dem
– (Windkesselfunktion): ca. mmHg
gemessen an der Arterie (z.B. Sauna –Tauchbecken 360 mmHg – 180 mmHg)
- Aufgabe der Blutdruckregulation ist ein immer konstanter „mittlerer Blutdruck“.
 - zu hoher Druck : Schädigung des Hirns, der Nieren und der Gefäße
 - zu niedriger Druck: Minderversorgung der Zellen
- Die Steuerung geschieht prinzipiell durch zwei Mechanismen.
 - a) Einstellung des peripheren Widerstandes in den Gefäßen:
durch biochemische Steuerung erfolgt lokale Weitstellung der Gefäße in der Arbeitsmuskulatur, Sympathikus stellt andere Gefäße eng und erhöht deren Strömungswiderstand.
 - b) Einstellung der Herzauswurfleistung

Exkurs: Anpassung des Herzens an sportliche Belastung bzw. Entlastung

a) Anpassung des Herzens an sportliche Belastung

Kurzfristig unter Belastung

→ Erhöhung des HZV

Langfristig bei ausreichender Trainingsintensität

→ adaptive Veränderungen

→ **Sportherz**

Morphologische Veränderungen

- Herzvergrößerung**

a) Hypertrophie

→ Gewichtszunahme durch Neusynthese von Zellelementen

b) Dilatation (hauptsächlich)

Erweiterung der Herzhöhlen durch

- vermehrten Rückstrom venösen Blutes bei intensiver Muskeltätigkeit und
- regulative Weitstellung des Herzens auf nervalem Wege

Das Sportherz verfügt über eine erhöhte Restblutmenge (doppelt so hoch wie beim Untrainierten), die unter Belastung

- als Schlagvolumenreserve dienen kann und
- ein Sofortdepot bei Engpässen im Blutrückstromvolumen (Preßatmung) darstellt.

- Adaptive Veränderungen im Bereich der kardialen Gefäßversorgung**

- Erweiterung der Koronareingänge

- Querschnittszunahmen der Herzkranzarterien

- verstärkte Ausbildung von Kollateralen → insgesamt Verbesserung der Blutversorgung (Unter Kollateralen versteht man Anastomosen, die einen Parallelweg zur Hauptstrombahn bilden → Umgehungskreisläufe bei Arterienverschlüssen)

Funktionelle Veränderungen

Vergrößerung von

- Schlagvolumen**

Steigerung des Schlagvolumens ist nicht nur von der *Herzhypertrophie*, sondern auch von

- *verstärkten sympathischen Antrieben und*
- *verstärktem venösem Rückstrom abhängig.*

Schlagvolumen

- des Untrainierten fällt bei hohen Frequenzen wieder ab
(maximal bei 110-120 Schläge/Min: etwa 120 ml gegenüber 70 ml in Ruhe)
- des Trainierten bleibt bis 200 Schläge/Min konstant: etwa 200 ml gegenüber 105 ml in Ruhe

- Herzminutenvolumen**

Untrainierter: 5 l (Ruhe) – 25 l (Belastung)

Trainierter: 5 – 40 l

- Sauerstoffpuls**

Er gibt diejenige Menge O_2 an, die pro Herzaktion vom Organismus aufgenommen werden kann. Bei Trainierten liegt er wesentlich höher als bei Untrainierten, Verhältnis ca. 30 ml:18 ml

Verringerung der

- Herzfrequenz

Verantwortlich für die geringere Frequenz eines Sportherzens sind:

- Herzvergrößerung
- vegetative Umstellung (verstärkter Einfluss des Vagus → stärkster parasympathischer Nerv des vegetativen Nervensystems und wichtigster Antagonist des Sympathikus)
- verbesserte periphere Sauerstoff- und Substratausnutzung wegen vermehrter Kapillarisierung

Vorteile eines trainierten Herzens

- geringere Herzfrequenz in Ruhe (min 27 Schläge/min) und bei Belastung
- stellt sich bei Belastungsbeginn schneller und genauer auf die Belastungsanforderungen ein
- Herzzeitvolumen wird hauptsächlich über Schlagvolumenzunahme und weniger über Frequenzzunahme gesteigert (Volumenarbeit energetisch günstiger als Frequenzarbeit)
- eine Abnahme der Herzfrequenz um 10 Schläge/min bewirkt eine Sauerstoff-energieeinsparung um 15%
- eine geringere Herzfrequenz verbessert die kardiale Blutversorgung, da bei niedrigeren Frequenzen das Verhältnis von Diastole - in ihr wird das Herz mit Blut versorgt - und Systole günstiger ist
- doppeltes Herzzeitvolumen in der Ausbelastungsphase wie untrainiertes Herz
- schnelle Anpassung an die Ausgangsverhältnisse in der Nachbelastungsphase (Puls sinkt bei Trainierten von 180 Schläge/min auf 120 Schläge/ min innerhalb einer Minute nach Belastungsende)

b) Anpassung des Herzens an Entlastung

Rückbildung des Sportherzens bei Reduktion oder Ausbleiben der Trainingsreize, aber:

Nach Beendigung des Hochleistungstrainings nicht abrupt mit dem Ausdauertraining aufhören → Gefahr des Entlastungssyndroms (4-20 Tage nach Trainingsende; Dauer bis zu mehrere Monate):

- Herzstiche
- Druckgefühl in der Herzgegend
- Herzrhythmusstörungen
- Unruhezustände

Grund: Missverhältnis zwischen Hochleistungsregulation und fehlender Belastung

Deshalb: Abtrainieren für 1 Jahr im Voraus planen

5.8 Das Gefäßsystem

5.8.1 Aufbau und Funktion des arteriellen Gefäßsystems

- Arterien, Arteriolen

Die Wand besteht aus 3 Schichten:

a) Tunica intima

innere Schicht als sehr glatte Auskleidung für geringe Reibung; Alter: Verkalkung (Arteriosklerose), Fettablagerung → Verdickung der Innenwand → Blutdruckerhöhung → Herzinfarktrisiko (Verschluss von Kranzgefäßen)

b) Tunica media

glatte Muskulatur und elastische Fasern → durch Spannungs- und Längenveränderung wird die Durchblutung reguliert (Gefäßeng- bzw. Gefäßweitstellung)

c) Tunica externa

lockeres Bindegewebe → schützt das Gefäß vor mechanischer Überdehnung → verbindet das Gefäß mit der Umgebung

Je nach Überwiegen der einzelnen Bestandteile unterscheidet man:

Arterien vom elastischen Typ

- herznah (elastische Fasern überwiegen)
- für die Windkesselfunktion (Sportphysiologie I, S. 162) der großen Arterien von Bedeutung → gleichmäßiger Blutstrom

Arterien vom muskulösen Typ

- mit zunehmender Entfernung zum Herzen zu finden (glatte Muskulatur überwiegt)
- wegen veränderlichem Durchmesser auch „Widerstandsgefäße“ genannt (sie ermöglichen Gefäßeng- bzw. Gefäßweitstellung)

- Kapillaren (etwa 5 Mrd., Gesamtlänge etwa 100.000 km)

- Wandung nur aus einer Schicht bestehend → Stoff- und Flüssigkeitsaustausch über
 - a) Diffusion → Austausch über feinste Poren (z.B. Natrium, Chloridionen)
 - b) Filtration → Flüssigkeitsaustausch über hydrostatischen Druck, z.T. 60 l/min zuviel Auswärtsfiltration → Wasser im interstitiellen Raum = Ödem

5.8.2 Aufbau und Funktion des venösen Gefäßsystems

- Venen und Venolen

- Venolen = kleinste Venen
- dünnerne Wandung als bei den Arterien
- Wandung sehr gut dehnbar → unter Ruhebedingungen befindet sich fast die Hälfte des Blutes darin (Kapazitätsgefäße)
- Venenklappen im Extremitätenbereich, um Rückfluss des Blutes in die Peripherie zu verhindern
- Unterstützung des Rückflusses des venösen Blutes durch Muskelpumpe bzw. Pulswelle einer benachbarten Arterie

Wichtig: Nach intensiven Lauf- und Sprungaktivitäten weitertraben oder –gehen.

5.8.3 Kurzschlussverbindungen

- Arteriovenöse Anastomosen

- Verbindungen zw. Arteriolen und Venolen, die bei Bedarf verschlossen werden können.
- Unter Ruhebedingungen sind sie geöffnet, dann fließt das Blut unter Umgehung der Kapillaren direkt von den kleinen Arterien in die kleinen Venen.
- Bei Belastung werden sie geschlossen; das Blut fließt durch das Kapillarbett und kann die Muskulatur besser mit Sauerstoff versorgen.

5.9 Blut

5.9.1 Funktion und Zusammensetzung des Blutes

5.9.1.1 Funktionen des Blutes

- **Transportfunktion** ⇒
- **Atemfunktion** ⇒
- **Nährfunktion** ⇒
- **Spülfunktion** ⇒
- **Steuerungsfunktion** ⇒
- **Wasser- und Elektrolyttransportfunktion** ⇒
- **Wärmetransportfunktion** ⇒
- **Pufferfunktion** ⇒
- **Abwehrfunktion** ⇒

5.9.1.2 Zusammensetzung des Blutes

- durchschnittliches Blutvolumen: ca. 5 Liter bzw. 7-8 % des Körpergewichts
- Das Blutvolumen ist abhängig von Körpergröße und -gewicht, sowie vom Trainingszustand

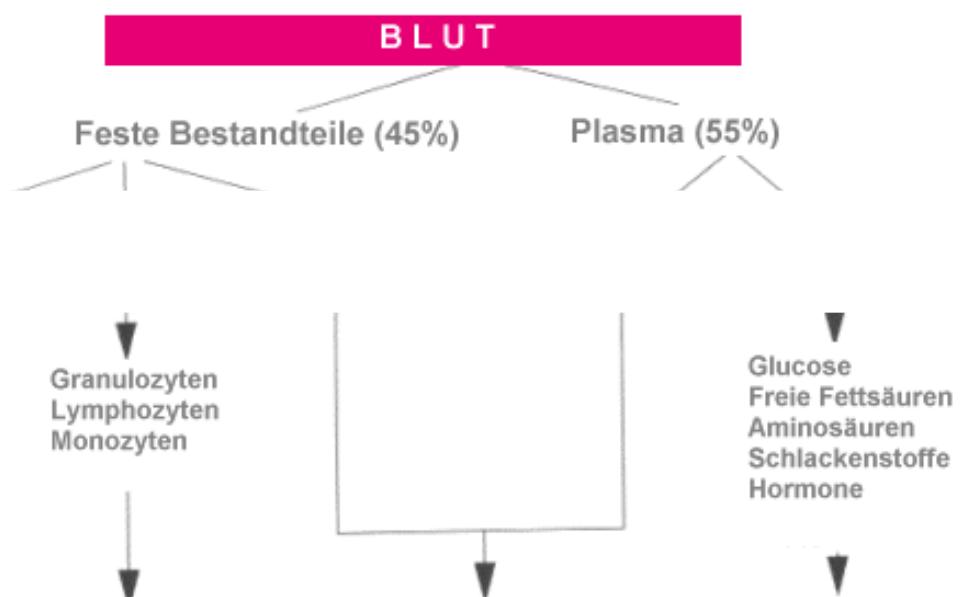


Abb. 3: Zusammensetzung und Aufgaben des Blutes

- **Blutplasma:** 90% Wasser, 7 – 8 % Proteine und etwa 1% Mineralien. Ferner Nährstoffe, harnpflichtige Substanzen und Hormone.
- **Blutzellen:**
 - a) *Roten Blutzellen* (Erythrozyten; O₂-Transport durch Hämoglobin; Problem der großen CO-Affinität von Hämoglobin: 0,1 % CO in der Atemluft blockieren 60% des Hämoglobins zum Sauerstofftransport → Raucher!!); Erythrozyten entstehen in rotem Knochenmark: etwa 200 Mrd. täglich, insgesamt etwa 25 Billionen
 - b) *Weisse Blutzellen* (Leukozyten): Leukozyten entstehen im Knochenmark, Lymphknoten, Milz. Unspezifische Abwehr: Phagozytose (Abwehr von Infektionen): Fremdstoffe werden umschlossen und aufgelöst → Blutzellen verfetten → Eiter
Spezifische Abwehr: Bildung von Antikörpern
 - c) *Blutplättchen* (Thrombozyten): Blutstillung (Bluterinnung): Das Gerinnen des Blutes bewirkt, das kleinere Wunden nach kurzer Zeit von selbst aufhören zu bluten. Dabei entsteht über der Wundfläche zunächst ein Netzwerk aus Fibrin, in dessen Maschen die Blutkörperchen hängen bleiben, so dass nur noch etwas Blutwasser, d. h. Blutserum aus der Wunde austreten kann. Die Gerinnungsfähigkeit des Blutes ist eine wichtige Schutzeinrichtung des Körpers. Ohne sie würde der Mensch schon an geringen Verletzungen verbluten.

5.9.2 Anpassung des Blutes an Belastung

- **Kurzfristige Anpassungen**

Relative Zunahme der zellulären Bestandteile wegen Wasserverlust → „Bluteindickung“ → erhöhte Konzentration sauerstoffbindender roter Blutkörperchen und Optimierung aller Diffusionsvorgänge

- **Längerfristige Anpassungen**

Durch ein regelmäßiges Ausdauertraining kommt es zu einer Vermehrung des Blutvolumens (bis zu 40%). Das höhere Blutvolumen ist dabei vor allem auf ein gestiegenes Plasmavolumen (Beteiligung: 2/3) gegenüber dem Volumen der roten Blutkörperchen (Erythrozyten) (Beteiligung: 1/3) zurückzuführen. Das bedeutet:

- tendenzielle Abnahme des Hämatokritwertes (Volumenanteil der festen Bestandteile des Blutes) → Blut wird dünnflüssiger → Verringerung der inneren Reibung → geringere Druckarbeit des Herzens → Energieeinsparung
- absolute Zunahme der roten Blutkörperchen und des Hämoglobin (roter Farbstoff in den Erythrozyten) → Erhöhung der Sauerstofftransportfähigkeit
- erhöhte körperliche Leistungsfähigkeit wegen Wasserreserve für die Wärme-regulation
- Zunahme der Pufferkapazität → geringere Ermüdbarkeit
- Optimierung der Blutumverteilung in Richtung Arbeitsmuskulatur
- effektivere Ausschöpfung des an die roten Blutkörperchen gebundenen Sauerstoffs

| | Blutvolumen (ml/kg) | Erythrozytvolumen (ml/kg) | Plasmavolumen (ml/kg) | Hämatokrit (%) |
|-----------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------|
| Untrainiert | 77 | 30 | 47 | 45.0 |
| Semitrainiert | 91 | 36 | 55 | 45.5 |
| Ski-Alpin | 88 | 36 | 52 | 44.8 |
| Schwimmen | 97 | 37 | 60 | 43.5 |
| Leichtathletik | 105 | 40 | 65 | 43.4 |
| Radrennsport | 107 | 46 | 61 | 47.2 |
| Triathlon | 107 | 40 | 67 | 43.2 |

Tab. 1: Relatives Blutvolumen und Teilvolumina bei Untrainierten und Ausdauertrainierten Sportlern unterschiedlicher Disziplinen