



Praktikumsanleitung zum Versuch „Kreislaufbelastung des Menschen“

UNIVERSITÄT LEIPZIG

MEDIZINISCHE FAKULTÄT

CARL-LUDWIG-INSTITUT FÜR PHYSIOLOGIE

VERSION 2022

Stichwörter: Hochdrucksystem (Druckspeicher) und Niederdrucksystem (Volumenspeicher), Blutdruckregelung, venöser Rückstrom, Orthostasebelastung, Kreislaufanpassung an Muskelarbeit, Spiroergometrie, Belastungsgeräte, Belastungstests

Lernziele zur Praktikumsvorbereitung:

Nach der Vorbereitung zum Praktikumsversuch sind die Studierenden in der Lage:

- die hydrostatischen Einflüsse auf die Blutströmung und die Kreislauffunktion zu nennen und zu interpretieren,
- den Pressoreflex (Baroreflex) zu erklären,
- die Anpassungsmechanismen des Herz-Kreislauf-Systems zu Beginn und während einer körperlichen Tätigkeit zu beschreiben,
- Kennwerte der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit zu definieren und ihre Aussagekraft zu erläutern
- den Zusammenhang zwischen Kennwerten der Herz-Kreislauf-Funktion und der Ausdauer-Leistungsfähigkeit zu erklären.

1 Schellong–Test (Orthostatische Funktionsprüfung, Stehprobe)

Der Blutdruck dient der ausreichenden Perfusion aller Organe. Während das für den liegenden Menschen praktisch jederzeit zutrifft, kommt es beim Übergang vom Liegen zum Stehen unter dem Einfluss der Schwerkraft augenblicklich zu einer Erhöhung des hydrostatischen Drucks in den unterhalb des hydrostatischen Indifferenzpunktes gelegenen Gefäßregionen (ca. +85mmHg) und Druckabnahme im Kopfbereich (ca. -40 mmHg). Im venösen Gefäßsystem fangen primär die Venenklappen die Druckbelastung ab. Das von der arteriellen Seite einströmende Blut drückt die Klappen innerhalb von 1-2min von unten nach oben auf, wobei der Druck in den Fußvenen 100mmHg erreichen kann. Arterieller Zustrom und Füllungskapazität (abhängig vom Tonus der Skelettmuskulatur und Venentonus) bestimmen die Druckanstiegsgeschwindigkeit in den Venen.

Im Moment des Aufrichtens besteht ein hoher arterio-venöser Druckgradient (Venendruck noch niedrig, hoher arterieller Druck), der zu einer Steigerung des arteriellen Zuflusses um den Faktor 2 führt. Im Verlauf der geschilderten Vorgänge verlagern sich durch die Dehnbarkeit des venösen Systems (Volumenspeicherfunktion) ca. 500ml Blut in die abhängigen Körperpartien und verursachen einen verminderten venösen Rückstrom zunächst zum rechten Herzen. Nach Ausschöpfung der Speicherkapazität der Lunge (6-8 Schläge) nimmt auch die Füllung des linken Ventrikels ab, und in der Folge sinken Schlagvolumen (bis 40%) und Blutdruck. Beim Lagewechsel (Liegen \Rightarrow Stehen) und dessen Folgen kommt es über die Änderung der Baro- (Presso-) rezeptoraktivität im Carotissinus und Aortenbogen zu einer Steigerung der sympathischen Aktivität und gegenregulatorischen Maßnahmen, deren Zeitverläufe Hinweise auf die Kreislauffunktion geben:

1. Drosselung des Abflusses aus dem arteriellen System durch Erhöhung des peripheren Widerstandes (Vasokonstriktion) und Förderung des venösen Rückstroms durch Verengung von Venolen und Venen
2. Steigerung der Herzfrequenz und Sympathikuseffekte auf den Kontraktionsablauf des Herzmuskels

Neben den Ereignissen in der Frühphase (normal ca. 1min) gibt es länger dauernde Anpassungsvorgänge (Spätphase). Gewöhnlich bleiben Herzfrequenz und diastolischer Blutdruck im Stehen leicht erhöht gegenüber der Situation im Liegen.

Der Schellong-Test ist ein Suchtest, der für den Kreislaufgesunden nur eine geringfügige Störung der Kreislaufregulation darstellt und nach 30-40s abgeschlossen ist. Die Anpassungsvorgänge können regelrecht, mangelhaft oder überschießend sein. Am häufigsten ist die sympathikotone hyperdiastolische Regulationsstörung (70% der Dysregulationen), die durch ständige Zunahme der Herzfrequenz und des diastolischen Blutdrucks gekennzeichnet ist.

1.1 Prinzip des Versuches:

In regelmäßigen Intervallen wiederholte Bestimmung der Pulsfrequenz und des Blutdrucks nach Übergang vom Liegen zum Stehen unter Vermeidung anderer beeinflussender Faktoren (u.a.: Raumklima, akustische und optische Reize, Genussmittel und Medikamente sowie Emotionen)

1.2 Versuchsvorbereitung:

Der Versuch wird von 3 Studenten durchgeführt:

1. Versuchsleiter, Protokollant und Untersucher der Pulsfrequenz: Bestimmung palpatorisch an der A. radialis
2. Untersucher des Blutdrucks: Messung des systolischen und diastolischen Blutdrucks am anderen Arm auskultatorisch (s. Versuch Messung wichtiger Kreislaufgrößen)
3. Proband: 10 Minuten Liegen in Rückenlage bei völliger körperlicher und geistiger Entspannung mit angelegter Blutdruckmanschette (Redeverbot, kein Heben der Arme zu den Messungen)

1.3 Versuchsdurchführung:

1. Proband legt sich 10 min ruhig auf den Tisch (nicht bewegen, nicht sprechen usw.).
2. In 8. 9. 10. Minute 2 mal pro Minute Puls messen, 1 mal pro Minute Blutdruck messen.
3. Aus den Liegend-Messwerten von Puls und Blutdruck werden Mittelwerte gebildet, die in der Grafik als Ausgangswerte eingezeichnet werden.
4. Unmittelbar vor dem Aufstehen wird die Blutdruckmanschette bereits aufgepumpt, um sofort nach dem Aufstehen ohne Zeitverzögerung messen zu können.
5. Nach Ablauf der 10. Minute steht der Proband zügig auf und stellt sich ohne anzulehnen neben den Tisch. Beim Aufstehen überflüssige Bewegungen vermeiden, nicht aufspringen!
6. In 1. 2. und 3. Minute nach dem Aufstehen: 4 mal pro Minute Puls messen, 1 mal pro Minute Blutdruck messen.
7. In der 4-10. Minute nach dem Aufstehen: 1 mal pro Minute Puls und Blutdruck messen.
8. Alle Messwerte in Wertetabelle 1 notieren und in die Abb. 1 eintragen.

Minuten		Herzfrequenz [min^{-1}]				Blutdruck [mmHg]	
						systolisch	diastolisch
Ausgangs- werte	L 8						
	L 9						
	L10						
Mittelwerte L 8 bis L10							
Stehen	S 1						
	S 2						
	S 3						
	S 4						
	S 5						
	S 6						
	S 7						
	S 8						
	S 9						
	S 10						

Tabelle 1: Wertetabelle für Schellong-Test

1.4 Versuchsauswertung:

Protokoll: Sämtliche Ruhewerte werden arithmetisch gemittelt und zur besseren Übersicht als Abszissenparallele bis zum Zeitpunkt 0 in das Verlaufsdiagramm (s. Abb. 1) eingezeichnet (Beachtung der unterschiedlichen Ordinaten). Eintragen sämtlicher im Stehen gewonnener Werte und Verbindung zu einem Kurvenzug. Das Einzeichnen der Werte erfolgt jeweils in der Mitte des untersuchten Zeitintervalls. Das Verlaufsdiagramm ist weiterhin durch die im Schema enthaltenen Angaben zu vervollständigen.

1.1. Beschreiben Sie die physiologischen Vorgänge, die

- a) direkte Folge des Lagewechsels und
- b) Folge der Kompensationsreaktion des Kreislaufsystems sind!

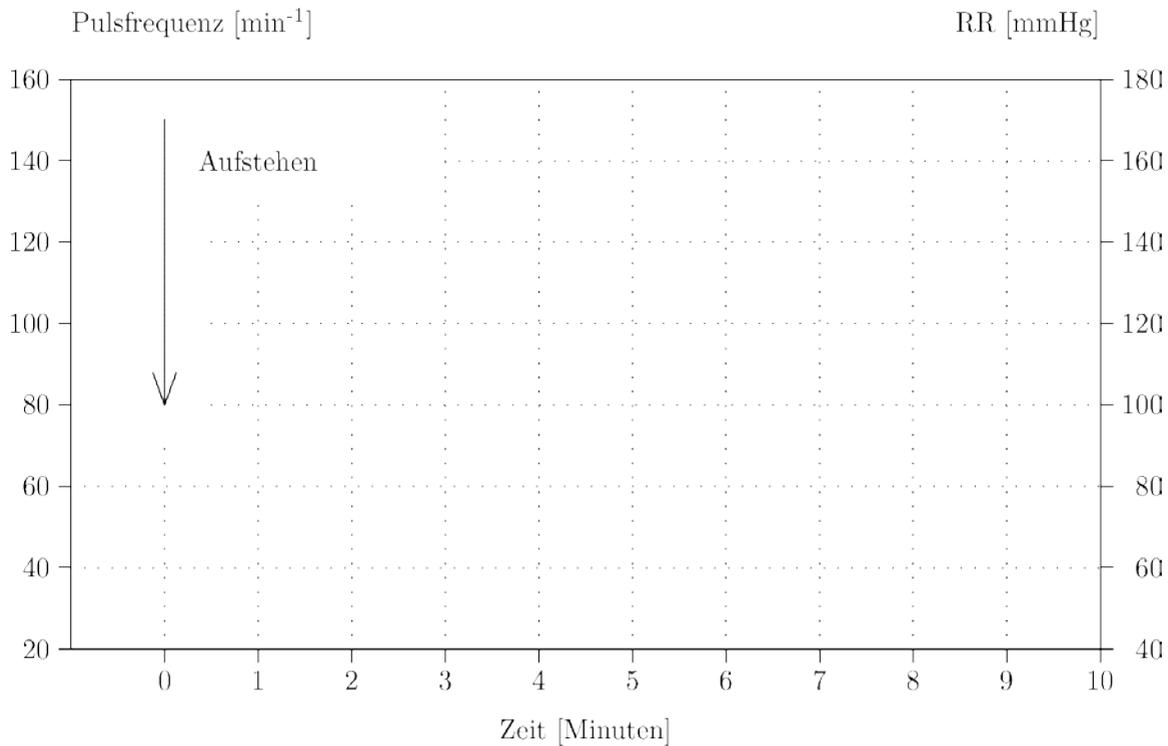
a) Direkte Folgen:

b) Kompensation:

1.2. Welche Änderungen von Herzfrequenz (HF), systolischem (p_S) und diastolischem Blutdruck (p_D) sind in der Sofortphase nach Aufstehen (erste Minute) und im weiteren Verlauf (nach der 1. Minute nach Aufstehen bis zum Ende des Beobachtungszeitraums) zu erwarten?

	Initialphase:	Weiterer Verlauf
HF:		
p_S :		
p_D :		

1.3. Entsprechen die Messwerte diesen erwarteten Änderungen? Wenn Sie Abweichungen von den erwarteten Änderungen beobachtet haben, geben Sie an, wodurch diese in Ihrem Versuch bedingt sein können.



Name des Probanden:

Raumtemperatur:

Alter in Jahren:

Luftfeuchte in %:

Körpermasse in kg:

Größe in m:

Versuchsleiter:

Abbildung 1: Tragen Sie bitte die Pulsfrequenz, den systolischen und diastolischen Blutdruck verschiedenfarbig ein

2 Ergometertest (Kreislaufanpassung an Muskularbeit)

Aus dem Verhalten verschiedener Kreislaufgrößen vor, während und nach einer definierten körperlichen Arbeit kann man auf die Belastbarkeit des Herz-Kreislauf-Systems schließen. Folgende Anforderungen müssen erfüllt sein:

Die an das Belastungsgerät abgegebene Leistung muss definiert und reproduzierbar sein. Eine Gewinnung der Messwerte, insbesondere der Herzfrequenz und des Blutdrucks, sollte auch während der Belastung erfolgen. Es ist eine vorwiegend dynamische Muskularbeit anzustreben.

Prinzipiell unterscheidet man Vita-maxima-Tests, bei denen die Grenzen der Belastungsfähigkeit geprüft werden, von submaximalen Tests oder Ergostase-Tests, bei denen unter der Belastung ein dynamischer Gleichgewichtszustand (steady state) erreicht wird.

Die Belastungszeit muss lang genug sein, dass der Organismus nach einer gewissen Einstellzeit einen Gleichgewichtszustand (steady state) erreichen kann; daher wird eine Belastungszeit von mindestens 4–6 Minuten gefordert. Das Verfahren soll standardisiert sein. Als Belastungsgeräte eignen sich insbesondere Fahrradergometer und Laufband. Die vorzugebende Belastungsintensität richtet sich nach der jeweiligen Fragestellung (Eignungs- und Tauglichkeitsuntersuchungen, Kontrolle der Therapie) und dem Probanden (Alter, Geschlecht, Gesundheits- und Trainingszustand).

2.1 Ergostase-Test

Der Proband wird mit 150 Watt (Frauen 100 Watt) für die Dauer von 6 Minuten belastet. Vor, während und nach der Belastung werden Pulsfrequenz und Blutdruck in regelmäßigen Intervallen gemessen.

2.1.1 Versuchsvorbereitung:

Der Versuch wird von 3 Studenten durchgeführt, deren Aufgaben sich wie im Versuchsteil 1) verteilen. Vor dem Versuch werden die entsprechenden Daten des Probanden in das Versuchsprotokoll eingetragen (s. unten).

Einstellen der Sitzhöhe am Fahrradergometer: Schraube herausdrehen, Sitz so verschieben, dass die Bohrung in der Gewindeöffnung sichtbar ist und Schraube wieder eindrehen. Pedale und Handgriff bitte nicht verstellen!

Achtung: Um Beschädigung des Sattels zu vermeiden, müssen spitze Gegenstände aus den Hosentaschen entfernt werden!

Mit der Netzverbindung des Stecker-Netzteils des Gerätes beginnt ein Selbsttest. Danach befindet sich das Display im Hauptprogramm und ist betriebsbereit. Die voreingestellte Belastung beträgt 25 Watt (Anzeige rechts im Display). Mit der (+)-Taste wird die gewünschte Belastung eingestellt. Für Frauen beträgt diese 100 Watt und für Männer 150 Watt. Es wird empfohlen, eine Tretgeschwindigkeit von 50-70 U/min einzuhalten. Werden die Tretkurbeln betätigt, beginnt die Zeitzählung.

Weitere Einzelheiten der Bedienung sind der Bedienungsanleitung an den Geräten zu entnehmen.

2.1.2 Versuchsdurchführung:

1. **Ausgangswert:** Proband setzt sich ruhig auf das Fahrradergometer (noch nicht treten). Puls mindestens 5 Minuten lang beobachten, wenn ein stabiler Ruhepuls erreicht ist, 3 Minuten lang 1 mal pro Minute Puls und Blutdruck messen. Belastung einstellen: Frauen 100W, Männer 150W.
2. **Belastungsphase:** Während der Belastung 1 mal pro Minute Puls und Blutdruck messen. Dauer der Belastung: 6 Minuten.
3. **Erholungsphase:** Nach Belastungsende bleibt der Proband sitzen: Erholungsphase (mind. 6-7 Minuten). Weiter 1 mal pro Minute Puls und Blutdruck messen.

Alle Messwerte in Wertetabelle 2 notieren und in die Abb. 2 einzeichnen, Probandendaten notieren!

	Minuten	Herzfrequenz [min^{-1}]	Blutdruck [mmHg]	
			systol.	diast.
Ausgangswerte:	1			
	2			
	3			
Belastung:	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
Erholung:	1			
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
	7			

Tabelle 2: Wertetabelle zum Ergostase-Test

Name des Probanden:

Raumtemperatur:

Alter in Jahren:

Luftfeuchte in %:

Körpermasse in kg:

Größe in m:

Versuchsleiter:

Indirekte Bestimmung des maximalen Sauerstoffaufnahmevermögens :

Anhand der Pulsfrequenz der letzten Belastungsminute und der Leistungsvorgabe ist mittels des Nomogramms (Abb. 3) das maximale Sauerstoffaufnahmevermögen $\dot{V}_{O_2\max}$ des Probanden indirekt zu bestimmen.

absolute $\dot{V}_{O_2\max} [ml \cdot \text{min}^{-1}]$

Relative $\dot{V}_{O_2\max} [ml \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}]$

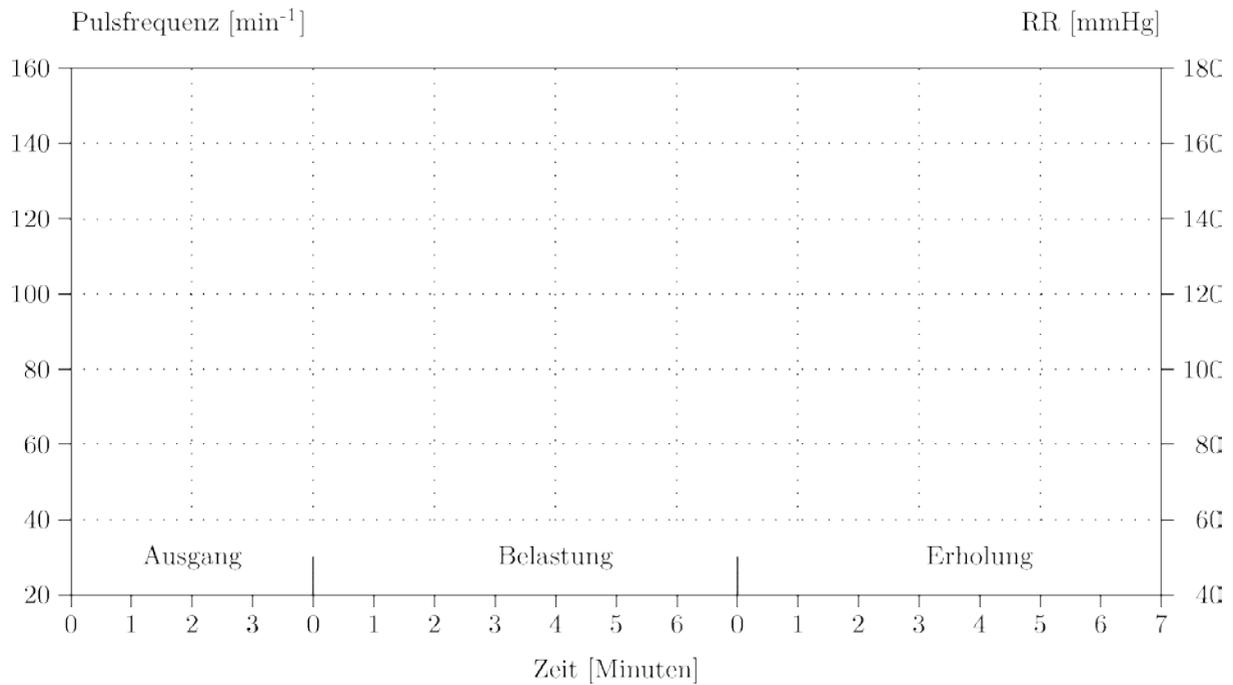


Abbildung 2: Ergostase-Test: Tragen Sie bitte wieder die Pulsfrequenz, den systolischen und diastolischen Blutdruck verschiedenfarbig ein!

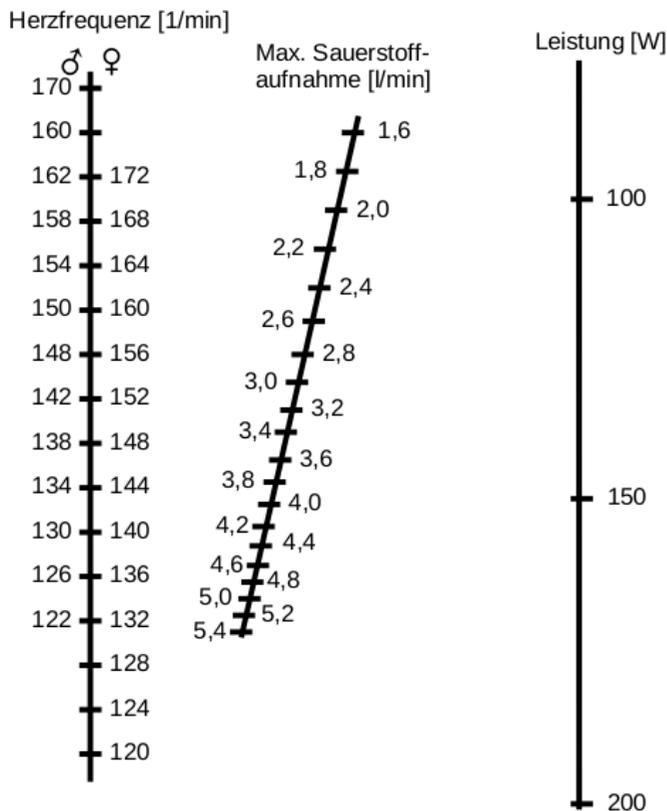


Abbildung 3: Vereinfachtes Nomogramm zur Abschätzung des maximalen Sauerstoffaufnahmevermögens (Astrand, P. O. & Ryhming, I.: A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work, *J.Applied.Physiol.*, **1954**, 7, 218-221).

Handhabung des Nomogramms: Markieren Sie auf der linken Ordinate die Pulsfrequenz der letzten Belastungsminute (Geschlecht der Versuchsperson beachten) und auf der rechten Ordinate die erbrachte Leistung. Verbinden Sie beide Punkte. Am Schnittpunkt mit der mittleren (schrägen) Ordinate können Sie die maximale Sauerstoffaufnahme in l/min ablesen.

2.1.3 Versuchsauswertung:

Protokoll:

2.1.1. Welche Änderungen von Herzfrequenz (HF), systolischem (p_S) und diastolischem Blutdruck (p_D) sind unter Belastung zu erwarten?

2.1.2. Wie sind diese Änderungen zu begründen? Beschreiben Sie die physiologischen Anpassungsreaktionen des Kreislaufsystems beim Beginn einer körperlichen Arbeit!

2.1.3. Warum kann man aus der Belastungsherzfrequenz die maximale O_2 -Aufnahme ($\dot{V}_{O_{2max}}$) abschätzen?

2.1.4. Was sagt $\dot{V}_{O_{2max}}$ aus? Schätzen Sie Ihren Probanden diesbezüglich ein! Bewerten Sie dabei auch die Zuverlässigkeit der von Ihnen erhobenen Messwerte!

2.2 Demonstration einer spiroergometrischen Untersuchung

Außer bei kurzfristigen Belastungen (anaerobe Energiebereitstellung) wird der Energieumsatz des arbeitenden Muskels von dessen Durchblutung begrenzt. Wenn bei körperlicher Arbeit $\geq 1/6$ der gesamten Körpermuskulatur eingesetzt wird und die Belastung länger als 2–3 Minuten andauert, wird die Energie fast ausschließlich auf aerobem Wege gewonnen. Leistungslimitierend ist dann die Sauerstofftransportkapazität des Blutkreislaufs.

Unter Spiroergometrie versteht man die Messung von Parametern der äußeren Atmung und des Herz–Kreislauf–Systems bei einer definierten körperlichen Belastung. Es ist ein diagnostisches Verfahren zur Beurteilung der kardiopulmonalen Belastbarkeit und Regulation und ebenfalls geeignet, Trainings- und Rehabilitationsauswirkungen zu kontrollieren.

Der wichtigste Parameter zur Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit des Probanden ist die maximale O_2 -Aufnahme ($\dot{V}_{O_{2max}}$, Aerobe Kapazität), d.h. die O_2 -Aufnahme, die bei maximaler Belastung erreicht wird. Bei Gesunden wird dieser Wert stark vom sportlichen Trainingszustand beeinflusst.

2.2.1 Vita–maxima–Untersuchung auf einem Fahrradergometer:

Ein freiwilliger gesunder Proband wird auf einem Fahrradergometer unter sog. Leistungsumsatzbedingungen¹ belastet. Beginnend mit 50 Watt wird die Belastung kontinuierlich nach einem vorgegebenen Belastungsprotokoll bis zur subjektiven Erschöpfung des Probanden gesteigert (Ausbelastungstest, Vita–maxima–Test). Dabei werden zahlreiche kardiopulmonale Funktionsparameter (z.B. Herzfrequenz, Blutdruck, Atemminutenvolumen, Sauerstoffaufnahme) gemessen, die einen Rückschluss auf die kardiopulmonale Ausdauerleistungsfähigkeit erlauben (s. 2.2.4.). Eine gute Leistungsbereitschaft des Probanden ist notwendig, damit der Grenzbereich der Leistungsfähigkeit erreicht wird („Vita maxima“). Als Ausbelastungskriterien gelten für Normalpersonen eine Herzfrequenz über 180min^{-1} und ein systolischer Blutdruck über 200mmHg (Abbruch!) sowie subjektiv empfundene Erschöpfung. Letztere beruht auf einer Ausschöpfung der Sauerstoffaufnahmefähigkeit. Sie ist u.a. daran zu erkennen, dass der RQ deutlich über 1 angestiegen ist.

Mit der im Praktikum verwendeten Gerätetechnik wird zusätzlich in vorgebbaren Zeitabständen (2 min) automatisch der Blutdruck gemessen. Die Körperkerntemperatur wird über die Wärmestrahlung am Trommelfell in Minutenabständen gemessen. Außerdem wird die Laktatkonzentration im Kapillarblut mehrmals im Versuchsverlauf bestimmt.

2.2.2 Messablauf:

Der Proband atmet über ein Mundstück bzw. eine Atemmaske Umgebungsluft, deren Stromstärke mit einem Turbinenrad-Sensor gemessen wird. Von der Expirationsluft wird eine Gasprobe abgesaugt und analysiert (CO_2 mittels Infrarotabsorption, O_2 mittels Brennstoffzelle)

2.2.3 Durchführung des Versuches:

Vor jeder spiroergometrischen Untersuchung ist der Proband ärztlich zu untersuchen.

Nach der Vorbereitung (Einstellen der optimalen Sattelhöhe am Ergometer, Aufsitzen, Anlegen der Elektroden zur EKG–Registrierung und Anschluss an das Gerät) werden über mindestens 5 Minuten die Ausgangswerte ermittelt. Anschließend beginnt die Versuchsperson mit der Belastungsphase. Entsprechend dem Belastungsschema wird kontinuierlich die erforderliche Leistung erhöht. Nach Abbruch der Belastungsphase registriert man mindestens bis zum Ende der 7. Erholungsminute, wobei der Proband mit Atemmaske auf dem Ergometer sitzen bleibt.

Wenn der Versuch im Praktikum nicht durchgeführt werden kann, können Sie den Versuchsablauf als Video ansehen: https://physiologie.medizin.uni-leipzig.de/e_learning/Kreislaufbelastung/vita1.php Das Video zeigt folgende Abschnitte:

Teil 1: Vorbereitungsphase und Ruhephase: Verkabelung des Probanden; Durchführung und Einschätzung des Atemstoßtests; Ruhephase und registrierte Parameter

Teil 2: Belastungsphase: Start der „Berg-Etappe“; nach wenigen Minuten der „Berg-Etappe“; kurz vor der anaeroben Schwelle

Teil 3: Späte Belastungsphase und Belastungsabbruch: Laktatmessung; Nachbelastungsphase (erste 2 min nach Belastungsabbruch)

¹ Äußere Voraussetzungen: Untersuchungsraum größer als 36m^2 ; Raumtemperatur 18 bis $22\text{ }^\circ\text{C}$; relative Luftfeuchtigkeit 30–60 %; störende Umweltreize gering halten (Lärm, Ablenkung)

Voraussetzungen seitens des Probanden: am Vortage keine größere körperliche Beanspruchung; bis 3 Stunden vor der Untersuchung kleine Kohlehydratmahlzeit erlaubt; am Untersuchungstag alle Medikamente und stärkeren Genussmittel vermeiden; Hautoberfläche weitgehend frei (mindestens Oberkörper); vor Versuch einige Minuten entspannen; positive Leistungsmotivation erforderlich.

2.2.4 Auswertung des Versuches:

a) Folgende Parameter werden während des Versuches in 30-s-Schritten erfasst und am Ende in Form einer Wertetabelle sowie in grafischer Form ausgegeben. Wenn der Versuch im Praktikum nicht durchgeführt werden kann, erhalten Sie die dem Video beigefügten Ergebnisblätter (siehe Link oben) zur Auswertung.

- Leistung [W]
- Herzfrequenz (HR, heart rate) [1/min]
- Herzfrequenzreserve (HRR, heart rate reserve) [1/min]
- Systolischer und diastolischer Blutdruck (P_{sys}, P_{dia}) [mmHg]
- Atemfrequenz (BR, breathing rate) [1/min]
- Atemminutenvolumen (V'E, Ventilation – expiratorisch gemessen) [L/min]
- Atmungsreserve (BR FEV%, breathing reserve) [% V'E_{max}]
- Sauerstoffaufnahme (V'O₂) [mL/min]
- Kohlendioxidabgabe (V'CO₂) [mL/min]
- Respiratorischer Quotient (RER, respiratory exchange rate; dt.: RQ)

Weiterhin sind in der Wertetabelle angegeben:

- Körpertemperatur (Temp.) [°C]
- Laktatkonzentration ([Lactat]) [mmol/L]

Das Werteblatt enthält auch die anthropometrischen Daten des Probanden. Zusätzlich werden in grafischer Form Leistung, Herzfrequenz, Atemminutenvolumen, systolischer und diastolischer Blutdruck, Herzfrequenz- und Atmungsreserve, Sauerstoffaufnahme, Kohlendioxidabgabe und Respiratorischer Quotient sowie zusätzlich Sauerstoffpuls (O₂-Puls) und Atemäquivalent für Sauerstoff (EqO₂) (Erklärung s. unten) dargestellt.

- Die **Herzfrequenzreserve** ist die Differenz aus maximaler Herzfrequenz und aktueller Herzfrequenz:

$$HRR = HR_{max} - HR_{akt} \quad [min^{-1}]$$

- Die **Atmungsreserve** ist die Differenz zwischen maximalem Atemminutenvolumen und aktuellem Atemminutenvolumen, angegeben in % des maximalem Atemminutenvolumens. Das maximale Atemminutenvolumen wird aus einem vor Beginn des Vita-maxima-Tests durchgeführten Atemstoßtest berechnet.

$$BR\ FEV\% = \frac{V'E_{max} - V'E_{akt}}{V'E_{max}} \quad [\%]$$

- Der **Respiratorische Quotient** (RQ oder RER) ist der Quotient aus Kohlendioxidabgabe und Sauerstoffaufnahme:

$$\text{Respiratorischer Quotient} = \frac{CO_2 - \text{Abgabe} [ml \cdot min^{-1}]}{O_2 - \text{Aufnahme} [ml \cdot min^{-1}]}$$

b) Aus diesen Parametern können weitere berechnet werden:

- **relative $\dot{V}_{O_2,max}$** : Der aussagefähigste Parameter zur Einschätzung der Ausdauerleistungsfähigkeit eines Probanden ist die körpermassebezogene maximale O₂-Aufnahme (relative $\dot{V}_{O_2,max}$).

$$\text{Körpermassebezogene maximale Sauerstoffaufnahme} = \frac{\text{maximale } O_2 - \text{Aufnahme} [ml \cdot min^{-1}]}{\text{Körpermasse} [kg]}$$

Durchschnittliche Werte für gesunde untrainierte und trainierte Frauen und Männer finden Sie in der „Formelsammlung zum Praktikum“ (Abschnitt 3.7).

- **P/P_{max}**: Bei Normalpersonen besteht zwischen der maximalen O₂-Aufnahme ($\dot{V}_{O_2,max}$) und der Belastung (in Watt) eine lineare Beziehung, daher kann man aus der höchsten im Test erreichten Leistung P bereits eine grob-orientierende Information über die Ausdauerleistungsfähigkeit des Probanden gewinnen. Eine genauere Einschätzung der Leistungsfähigkeit und des Trainingszustandes erlaubt der Quotient P/P_{max}, d.h., die höchste erreichte Leistung P bezogen auf den Referenzwert P_{max}. P_{max} wird auf der Basis von Körperoberfläche, Alter und Geschlecht berechnet (s. „Formelsammlung zum Praktikum“, S. 3-22). Die Körperoberfläche können Sie mit Hilfe der Tabelle 3.2 (s. „Formelsammlung zum Praktikum“, S. 3-1) abschätzen.

- **Sauerstoffpuls:** Unter den zahlreichen Prozessen, die am Transport des Sauerstoffs zu den Geweben beteiligt sind, ist die Kreislaufleistung bei sehr hohen Belastungen gewöhnlich der limitierende Faktor. Somit wird \dot{V}_{O_2max} maßgeblich von der Fähigkeit, das Schlagvolumen des Herzens zu steigern, bestimmt. Ein indirektes Maß für das Schlagvolumen ist der Sauerstoffpuls. In körperlicher Ruhe werden etwa 3-4 ml O₂ pro Herzschlag transportiert. Bei Belastung steigt dieser Wert bei untrainierten Personen auf etwa 8-10 ml pro Herzschlag, bei Trainierten können Werte von 20-25 ml erreicht werden.

$$\text{Sauerstoffpuls} = \frac{O_2 - \text{Aufnahme} [ml \cdot \text{min}^{-1}]}{\text{Herzfrequenz} [min^{-1}]}$$

- **Atemäquivalent:** Bei sehr hohen Belastungen kann über den Kreislauf nicht mehr so viel Sauerstoff zur arbeitenden Muskulatur transportiert werden, wie diese für die Bewältigung der Belastung braucht, so dass zunehmend mehr Energie auf anaerobem Wege gewonnen werden muss (anaerober Bereich). Dadurch entwickelt sich eine Laktatazidose, in deren Folge es zu einem verstärkten Atmungsantrieb und einer überproportionalen Steigerung der Ventilation kommt. Diese spiegelt sich in einem Anstieg des Atemäquivalents für Sauerstoff (EqO₂) wider. EqO₂ gibt das Verhältnis von Atemminutenvolumen zu O₂-Aufnahme an:

$$\text{Atemäquivalent} = \frac{\text{Atemminutenvolumen} [ml \cdot \text{min}^{-1}]}{O_2 - \text{Aufnahme} [ml \cdot \text{min}^{-1}]}$$

Der resultierende Wert ist dimensionslos. In Ruhe liegt er um 25 (20-30). Allerdings kann psychische Erregung auch in körperlicher Ruhe eine Hyperventilation und damit eine Zunahme des Atemäquivalents bewirken.

Bei mäßiger körperlicher Belastung kann das Atemäquivalent infolge verbesserten O₂-Transports sinken. Bei erschöpfender körperlicher Arbeit steigt die Ventilation auf Grund der Laktatazidose stark an, während der durch die Kreislaufleistung limitierte O₂-Transport kaum noch zunehmen kann. Das Atemäquivalent kann in dieser Situation Werte über 30-40 erreichen.

c) Abschätzung der anaeroben Schwelle:

Die **anaerobe Schwelle** gilt als Kriterium der sportmedizinischen Dauerleistungsgrenze (nicht im arbeitsmedizinischen Sinn). Damit wird der Belastungszustand erfasst, bei dem Laktatbildung und -eliminierung sich gerade noch im Gleichgewicht befinden. Die Laktatkonzentration im Blut liegt dann bei etwa 4 mmol/L. Diese Leistung kann über lange Zeit aufrechterhalten werden. Bei höheren Belastungen entwickelt sich auf Grund der zunehmenden anaeroben Energiegewinnung eine Laktatazidose (anaerober Bereich). Als Folge der resultierenden Ventilationssteigerung steigt die CO₂-Abgabe stärker als die O₂-Aufnahme. Der Zeitpunkt, an dem die CO₂-Abgabe größer wird als die O₂-Aufnahme (d.h. an dem der RQ den Wert 1 übersteigt), kann zur Abschätzung der anaeroben Schwelle herangezogen werden. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die O₂-Aufnahme ca. 70-80 % der maximalen O₂-Aufnahme, die Herzfrequenz liegt etwa im Bereich um 160 min⁻¹. Untrainierte Personen erreichen ihre anaerobe Schwelle gewöhnlich bei niedrigeren Leistungen als Trainierte. Zur Orientierung: Bei einem jungen untrainierten Mann beträgt die Leistung an der anaeroben Schwelle etwa 2,5 W/kg.

In die **Tabellen 3 und 4** sind wichtige Parameter einzutragen, die die kardiopulmonale Situation bei erschöpfender Belastung charakterisieren. Zum Vergleich werden diese Parameter unter Ruhebedingungen und bei maximaler Belastung (Tabelle 3) bzw. sehr kurz nach Belastungsabbruch (Tabelle 4) gegenübergestellt. Einige der Parameter geben Auskunft über die kardiopulmonale Leistungsfähigkeit des Probanden; andere kennzeichnen Körperfunktion und Stoffwechselsituation bei maximaler Belastung.

	Ruhe	Max. Belastung
\dot{V}_{O_2} [ml min ⁻¹]		
\dot{V}_{O_2} (relativ) [ml min ⁻¹ kg ⁻¹]		
O ₂ -Puls [ml / Herzschlag]		
Leistung [W]	-----	
Quotient P / P _{max}	-----	
Herzfrequenzreserve HRR		
Atmungsreserve BR FEV%		
Laktatkonzentration [mmol/L]		
EqO ₂		

Tab. 3: Wichtige kardiopulmonale Parameter in Ruhe und bei maximaler Belastung

	Ruhe	ca. 1min nach Belastungsabbruch
EqO ₂		
RQ (RER)		

Tab. 4: Wichtige stoffwechselabhängige Parameter in Ruhe und nach Belastungsabbruch

In **Tabelle 5** sind einige Parameter einzutragen, die die anaerobe Schwelle charakterisieren. Anhand dieser Parameter können Sie die Güte unserer Abschätzung der anaeroben Schwelle beurteilen.

Anaerobe Schwelle	Zeitpunkt:	
Laktatkonzentration [mmol/L]		
Leistung [W]		
Leistung (körpermassebezogen) [W kg ⁻¹]		
Herzfrequenz		
\dot{V}_{O_2} [ml min ⁻¹]		
\dot{V}_{O_2} bezogen auf $\dot{V}_{O_{2max}}$ [%]		

Tab. 5: Charakterisierung der anaeroben Schwelle

- Formel zur Berechnung der Körperoberfläche (KO) [in m²] für Erwachsene

Tikusisi 2001 [13]	
♀	$KO = 0,18557 \cdot h^{0,55} \cdot m^{0,47}$
♂	$KO = 0,20301 \cdot h^{0,6} \cdot m^{0,44}$
3D-Scanner 395 männl. und 246 weibl. Probanden	

h: Körpergröße in m; m Körpergewicht in kg

- Referenzwert P_{max} der Leistungsfähigkeit für Frauen und Männer [in W]

Frauen: $P_{max} = 3,993 + 86,641 \cdot KO - 0,015 \cdot LA - 0,346 \cdot KO \cdot LA$
Männer: $P_{max} = 6,773 + 136,141 \cdot KO - 0,064 \cdot LA - 0,916 \cdot KO \cdot LA$

KO: Körperoberfläche in m²; LA: Lebensalter in Jahren

P_{max} gilt für durchschnittlich trainierte Probanden. Der Trainingszustand errechnet sich aus der tatsächlich geschafften Leistung (P bei Abbruch der Belastung) durch P_{max}. Um den Faktor 2 zu schaffen, benötigt man ein ca. 5-jähriges Aufbautraining mit 8 bis 10 Stunden pro Woche (s. Formelsammlung; Quelle: [18], S. 86)

Protokoll: Für die Auswertung verwenden Sie bitte das Werteblatt „Ergospirometrie“. Es enthält die unter 2.2.4 aufgelisteten Parameter. Die 3 Versuchsphasen sind fortlaufend untereinander aufgelistet. Einige Zeilen sind farbig hervorgehoben (R Ruhephase; AT Anaerobe Schwelle; max maximale Belastung; E initiale Erholungsphase). Aus diesen Zeilen sind die für die weitere Auswertung erforderlichen Werte zu entnehmen. Außerdem finden Sie grafische Darstellungen relevanter Parameter im Zeitverlauf (s. Abschnitt 2.2.4).

Anmerkung: In der späten Belastungsphase können manche Werte (z.B. Herzfrequenz, Blutdruck) durch Schwitzen oder heftige Bewegung des Probanden falsch gemessen werden und sind daher nicht immer repräsentativ.

Name der Versuchsperson:
Alter in Jahren:
Geschlecht:
Körpermasse in kg:
Größe in m:
Körperoberfläche in m²:
Referenzleistung P_{max}:

Raumtemperatur:
Luftfeuchte in %:

Diskussion:

- 2.2.1. Schätzen Sie die Ausdauer-Leistungsfähigkeit der Versuchsperson ein. Orientieren Sie sich an den im Anhang gegebenen Richtwerten.
- 2.2.2. Auf welchen Parametern basiert Ihre Einschätzung?
- 2.2.3. Welcher dieser Parameter hat die höchste Aussagekraft?
- 2.2.4. Interpretieren Sie die in Ruhe, bei maximaler Belastung und kurz nach Belastungsabbruch erreichten Werte von RQ und EqO₂. Warum steigen beide Werte bei maximaler Belastung und kurz nach Belastungsabbruch so stark an?
- 2.2.5. Vergleichen Sie die kurz vor Belastungsabbruch erreichten Werte von Herzfrequenzreserve und Atmungsreserve. Interpretieren Sie diese Werte.
- 2.2.6. Entspricht die hier vorgenommene Abschätzung der anaeroben Schwelle den Erwartungswerten hinsichtlich Laktatkonzentration, Leistung (pro kg Körpermasse), Herzfrequenz und $\dot{V}O_2$ [% $\dot{V}O_{2max}$]?

Anhang: Richtwerte

		Frauen	Männer
\dot{V}_{O_2} / Körpergewicht in ml/(min kg) (Ruhe)		2,3- 3,3	3,2 - 4,8
\dot{V}_{O_2max} / Körpergewicht in ml/(min kg)	untrainiert	< 37	<42
	wenig-mäßig trainiert	38 ...48	43 ...52
	gut trainiert	>49	>53
	Ausdauer-Leistungssp.	>70	>80

Tabelle 4: Richtwerte für die Sauerstoffaufnahme bezogen auf das Körpergewicht. Hochtrainierte Ausdauersportler (Skilanglauf, Radrennen) erreichen die in der Tabelle angegebenen Spitzenwerte und damit eine doppelt so hohe max. Sauerstoffaufnahme im Vergleich zu Untrainierten.

Atemäquivalent für $O_2 = \frac{\dot{V}_E}{\dot{V}_{O_2}}$	
Ruhe	25
Hohe Belastung (nach Überschreiten der anaeroben Schwelle)	40 ...50 <i>(nicht in jedem Fall)</i>

	O ₂ -Puls	
	untrainiert	trainiert
Ruhe	ca. 3 ...4 ml/Herzschlag	
Belastung	ca. 8...10 ml/Herzschlag	ca. 20 ...25 ml/Herzschlag

Anaerobe Schwelle (AT)	
Leistung	ca. 2,5W/kg (untrainierte junge Männer)
Herzfrequenz	ca. 160 Schläge pro min
\dot{V}_{O_2}	ca. 70 ...80 % von \dot{V}_{O_2max}