

## Versuch 8: Energetik / Verdauung

---

### 8.1 Laktoseintoleranz / Spiroergometrie

#### Aufgaben

- ⇒ Durchführung des H<sub>2</sub>-Atemtests:
  - Bestimmung des Zeitverlaufs der H<sub>2</sub>-Exhalation nach einer Laktose-, Fruktose- sowie Laktulosebelastung.
- ⇒ Berechnung folgender Parameter auf der Basis von Messdaten exemplarisch durchgeführter spiroergometrischer Versuchreihen:
  - Energieumsatz, Wirkungsgrad, spezifische Ventilation, Sauerstoffpuls, Herzzeitvolumen.

#### Lernziele

📖 Kohlenhydratverdauung | Pankreasfunktion | Oligosaccharidasen | Darmresorptionsvorgänge | Verdauungsenzymdefekte | Malabsorption. Direkte und indirekte Kalorimetrie | Energiehaushalt | Anabolismus | Katabolismus | Brennwert | Energieumsatz | körperliche Leistungsfähigkeit | Energiebereitstellung | Ergometrie | Wirkungsgrad

#### 8.1.1 H<sub>2</sub>-Atemtest

Laktoseintoleranz wie auch die häufig koexistente Fruktoseintoleranz sind typische Störungen im Kohlenhydratstoffwechsel, die mit einer ineffizienten oder gestörten Resorption des Disaccharids Laktose bzw. des Monosaccharids Fruktose im Dünndarm einhergehen. Dadurch gelangt vermehrt das entsprechende Saccharid in den Dickdarm, wo es durch Gärung der Darmbakterienansiedlung zu kurzkettigen Fettsäuren, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> metabolisiert wird. Es können auch nennenswerte Mengen an Methan dabei entstehen. Die Mehrzahl der betroffe-

nen Patienten klagen über Symptome wie Darmkrämpfe und Blähungen (Ursache: vermehrte  $\text{CO}_2$ -Bildung), osmotische Diarrhoe (Fettsäuren) sowie Übelkeit, Müdigkeit, Kopfschmerzen und Schwindel, hervorgerufen durch eine Vielzahl im Darm gebildeter biogener Amine.

Hauptursache für eine Laktoseintoleranz liegt in einem Mangel an der Disaccharidase Laktase, dem weltweit häufigsten Enzymdefekt. Klinisch stuft man diesen Defekt als *Maldigestion* ein, um ihn gegen die *Malabsorption*, einem Defekt in dem  $\text{Na}^+$ -Monosaccharid-Cotransportsystem, abzugrenzen. Geographisch lässt sich ein charakteristisches Nord-Süd-Gefälle in der Inzidenzrate der Laktoseintoleranz feststellen. Während im nördlichen und mitteleuropäischen Raum höchstens 15–20% der Bevölkerung laktoseintolerant sind, steigt die Häufigkeit im Mittelmeerraum auf etwa 70% an und betrifft in den äquatornahen Zonen Afrikas und Asiens fast 100% der Bevölkerung.

Neben diesem endemisch vorkommenden Laktosemangel und kongenitalen Fällen einer Laktoseintoleranz seien vollständigkeithalber auch erworbene sekundäre Formen angesprochen, die teils infektiösen, teils chronischen Darmerkrankungen (z.B. Morbus Crohn, Sprue, Zöliakie) zuzuschreiben sind.

Die bei Laktose- wie auch Fruktoseintoleranz durch vermehrte Gärung im Darm gebildeten Gase (Meteorismus) diffundieren in das Pfortadersystem und werden über die Lunge abgeatmet, so dass sie in der Ausatemluft nachweisbar sind. Beim  $\text{H}_2$ -Atemtest macht man von dieser Möglichkeit Gebrauch, da man heute in der Lage ist, geringste Mengen an  $\text{H}_2$  in der Atemluft zu detektieren. Nach einer oralen Laktosebelastung misst man zu verschiedenen Zeiten die  $\text{H}_2$ -Konzentration in der Expirationsluft und spricht bei einem Anstieg von größer als 20 ppm (parts per million) von einer Laktoseintoleranz. Leider versagt dieser Test bei einem Teil der Bevölkerung (etwa 5–10%), bei dem keine  $\text{H}_2$ -produzierenden Darmbakterien vorliegen. Ein negativer  $\text{H}_2$ -Atemtest ist daher kein sicherer Beweis für den Ausschluss einer Laktoseintoleranz. Um sich diesbezüglich abzusichern, wiederholt man den Test mit der Gabe eines definitiv nicht resorbierbaren Kohlenhydrats, wie z.B. Laktulose. Bleibt bei der Laktulosebehandlung der zu erwartende  $\text{H}_2$ -Anstieg aus, handelt es sich bei dem betreffenden Patienten um einen *non-responder*.

Führt man den Laktulosebelastungstest mit gesunden Probanden durch, lässt sich aus dem Anstiegsbeginn der  $\text{H}_2$ -Exhalation darüberhinaus die *orocoele Transitzeit* abschätzen.

### Messprinzip der $\text{H}_2$ -Konzentration

Die  $\text{H}_2$ -Konzentration in der Atemluft wird mit Hilfe des  $\text{H}_2$ -Atemtestgeräts *LactoFAN* gemessen. Das Messverfahren basiert auf einem elektrochemischen Brennstoffelement, das durch die Reaktion von  $\text{H}_2$  mit dem Elektrolyt an einer Elektrode und  $\text{O}_2$  (aus der Umgebungsluft) an der anderen Elektrode angetrieben wird. Diese Redoxreaktion erzeugt einen elektrischen Strom, der proportional zur  $\text{H}_2$ -Konzentration ist. Aus diesem Messstrom ermittelt das Gerät die  $\text{H}_2$ -Spitzenkonzentration in der ausgeatmeten Luft und zeigt das Messergebnis in Teilen pro Million (ppm) an.

### Versuchsablauf

An 3 Probanden, die spätestens 4 Stunden vor Testbeginn nur ein kleines Frühstück bzw. eine kleine Mahlzeit zu sich genommen haben sollten, werden parallel die  $\text{H}_2$ -Exhalationstests unter Laktose-, Fruktose- und Laktulosebelastung durchgeführt. Ein Proband nimmt 30 g Laktose, der Zweite 30 g Fruktose und der Dritte 20 g Laktulose\* in wassergelöster Form zu sich. Unmittelbar nach dem Trinken wird der Ausgangswert der  $\text{H}_2$ -Konzentration in der Expirationsluft gemessen. Nach 60 min und danach in 15minütigem Abstand sind weitere Einzelmessungen durchzuführen.

Die gemessenen  $\text{H}_2$ -Konzentrationen sind als Funktion der Zeit in das Ergebnisprotokoll einzutragen und die vorliegenden Zeitprofile im Vergleich zu typisch krankhaften Verläufen zu diskutieren.

#### \* Hinweis zur Laktulosebelastung

Laktulose wird als mildes Abführmittel bei Verstopfung, die durch ballaststoffreiche Ernährung nicht zu verhindern ist, verschrieben. Zu Beginn einer Behandlung wird beim Erwachsenen eine Tagesdosis bis 50 g (entspricht einer 2,5fachen Praktikumsdosis) empfohlen. Die abführende Wirkung beruht auf einer Erhöhung des osmotischen Drucks im Enddarm, wodurch sich ein weicherer, voluminöserer Stuhl einstellt. Die Spaltung der Laktulose in Monosaccharide durch Darmbakterien fördert Gärungsprozesse, die die Darmperistaltik anzuregen vermögen (Gasbildung, Ansäuerung). Als Nebenwirkungen können vorwiegend bei mittleren und höheren Dosierungen leichte Bauchschmerzen und Blähungen auftreten. Unter hoher Dosierung sind auch Übelkeit und Durchfälle möglich.

### 8.1.2 Spiroergometrie

Es gibt im wesentlichen zwei Methoden zur Bestimmung des Energieumsatzes:

- *direkte Kalorimetrie*: direkte Ermittlung der Wärmeproduktion des Körpers,
- *indirekte Kalorimetrie*: Berechnung des Energieumsatzes aufgrund von spirometrischen und atemgasanalytischen Messungen.

In der Praxis wird die indirekte Kalorimetrie als weniger komplizierte und hinreichend genaue Methode bevorzugt. Hierbei besteht eine stöchiometrische Beziehung zwischen verbrannter Substratmenge, aufgenommener O<sub>2</sub>-Menge, abgegebener CO<sub>2</sub>-Menge und freigesetzter Energie.

Die Berechnung erfordert die Kenntnis folgender Größen:

- *Respiratorischer Quotient (RQ)*, d.h. Quotient aus abgegebener CO<sub>2</sub>-Menge geteilt durch aufgenommene O<sub>2</sub>-Menge. Anhand des Respiratorischen Quotienten läßt sich der prozentuale Anteil von Kohlenhydraten und Fetten am Umsatz berechnen, und damit das kalorische Äquivalent angeben. Bei etwas genauerer Bestimmung des Umsatzes müssten die Gasanteile, die der Eiweißoxydation entsprechen, ermittelt und von den gemessenen Volumina subtrahiert werden. Da zu diesem Zweck die Harnstoffausscheidung bestimmt werden müsste, wird in der Klinik und auch im Praktikum auf diese Korrektur verzichtet. Der durch diese Vereinfachung entstandene Fehler beträgt unter physiologischen Bedingungen größenordnungsmäßig nur 1%.
- *Kalorisches Äquivalent des Sauerstoffes*, d.h. die umgesetzte Kalorienmenge pro Liter verbrauchten Sauerstoffes bei der Verbrennung einer bestimmten Nährstoffkombination.

Die Berechnung des Energieumsatzes anhand der indirekten Kalorimetrie ist aber nur möglich, wenn dem Organismus ausreichend Sauerstoff zur Verfügung steht, d.h. die Stoffwechselvorgänge müssen unter *aeroben* Bedingungen ablaufen. Speziell die Muskulatur ist aber in der Lage, auch bei nicht ausreichender Sauerstoffversorgung bis zu einem gewissen Grad Arbeit zu verrichten. Die für die Muskelarbeit unmittelbar erforderliche Energie wird durch Spaltung von ATP in ADP und P bereitgestellt. Da die ATP-Reserven der Muskelzellen (etwa 5 mmol/l) nur gering sind, muß von Anbeginn einer Arbeit an ständig ATP resynthetisiert werden. Die ATP-Resynthese kann ohne Verzögerung über einen sekundären Energiespeicher, das Kreatinphosphat, erfolgen, der jedoch ebenfalls schnell erschöpft ist. Im wesentlichen muß die Regeneration des ATP über die

Phosphorylierung von ADP erfolgen. Diese kann sowohl über die *anaerobe Glykolyse* ablaufen als auch aerob über die Atmungskette, wobei die letztere mit wesentlich höherem Wirkungsgrad arbeitet. Bei der anaeroben Glykolyse entstehen 2 mol ATP pro mol Glukose, hingegen aerob in der Atmungskette 36 mol ATP pro mol Glukose (siehe Teilversuch 8.2.2).

Prinzipiell kann im Muskel auch unter anaeroben Bedingungen Energie für die Kontraktion bereitgestellt werden. Dabei häuft sich jedoch Laktat an. Wird eine kritische Laktatkonzentration überschritten, stellt der Muskel aufgrund der zunehmenden Azidose seine Tätigkeit ein (*anaerob-laktazide Stoffwechsellage*).

Da zu Beginn einer Arbeit die Anpassung von Atmung und Kreislauf an den erhöhten Bedarf eine gewisse Anlaufzeit braucht, kann der schlagartig erhöhte *Sauerstoffbedarf* nicht sofort völlig abgedeckt werden: Der Organismus geht ein *Sauerstoffdefizit* ein. Dieses Defizit wird erst nach Beendigung der Arbeit abgetragen. Wenn Blutzufuhr und Atmung angepasst sind, um den für die Arbeit erforderlichen Sauerstoff anzuliefern, stellt sich innerhalb weniger Minuten ein Gleichgewichtszustand (*steady state*) ein, in dem sich Bedarf und Versorgung entsprechen. Nur im steady state ist es zulässig, anhand spirometrisch erhobener Daten den *Energieumsatz* zu berechnen.

Die Differenz zwischen dem Energieumsatz bei Arbeit und dem Ruheenergieumsatz wird als Leistungszuwachs oder Leistungszuschlag bezeichnet. Man versteht darunter denjenigen Energieaufwand, der für die körperliche Arbeit zusätzlich erforderlich ist.

Das Verhältnis von abgegebener Leistung (*N*) und Leistungsumsatz (*Q*) wird als *Bruttowirkungsgrad* der betreffenden Tätigkeit bezeichnet.

Berücksichtigt man bei der Berechnung nur den Leistungszuwachs, d.h. Leistungsumsatz (*Q*) minus Ruheumsatz (*Q<sub>R</sub>*), so erhält man den aussagekräftigeren *Nettowirkungsgrad*. Der Nettowirkungsgrad des Muskels beträgt unter optimalen Bedingungen 30–35%. Dieser Wirkungsgrad wird bei physiologischen Tätigkeiten, z.B. Gehen, Steigen oder Ziehen von Lasten, nahezu erreicht. Bei vielen anderen Betätigungen ist er durch den Energieverbrauch für statische oder Halteanteile und für Leerbewegungen, die keinen Beitrag zur eigentlichen Arbeit liefern, geringer.

Bestimmt man den Umsatz bei Leerbewegungen und Haltearbeit (z.B. Treten auf dem Fahrradergometer ohne Bremsung) und zieht diesen Leerumsatz (*Q<sub>L</sub>*) vom Arbeitsumsatz ab, so kann man den *reinen Wirkungsgrad* berechnen.

Der Wirkungsgrad der Muskulatur kann durch körperliches Training nicht verbessert werden. Daraus folgt, daß der Trainierte bei identischer Ergometerbelastung gleichviel Sauerstoff verbraucht wie der Untrainierte. Um den gesteigerten Sauerstoffbedarf der Muskulatur während der Belastung abdecken zu können, muß das Herzzeitvolumen ansteigen. Außerdem wird die arterio-venöse O<sub>2</sub>-Konzentrationsdifferenz besser ausgeschöpft. Aufgrund einer besseren Kapillarisation kann im trainierten Muskel die arterio-venöse Sauerstoffkonzentrationsdifferenz höhere Werte erreichen als im untrainierten Muskel. Bei einer bestimmten Belastungsstufe findet man jedoch beim Trainierten und beim Untrainierten die gleiche arterio-venöse Sauerstoffkonzentrationsdifferenz und damit auch das gleiche Herzzeitvolumen. Infolge einer trainingsbedingten Vergrößerung des Herzens (Sportherz) ist das Schlagvolumen beim Trainierten unter allen Belastungen größer als beim Untrainierten, so daß beim Ausdauertrainierten ein bestimmtes Herzzeitvolumen mit einer geringeren Herzfrequenz gefördert werden kann. Da der Ausdauertrainierte eine höhere Maximalherzfrequenz als der Untrainierte erreichen kann, verfügt er über größere kardiopulmonale Reserven.

Ab einer bestimmten Belastungsstufe ist der Organismus nicht mehr in der Lage, den Sauerstoffbedarf der Muskulatur komplett abzudecken, d.h. ein steady state kann sich nicht mehr einstellen. Diese Belastungsgrenze liegt beim Trainierten höher, da er sowohl eine höhere Herzzeitvolumenzunahme erzielt, als auch – infolge der verbesserten Kapillarisation – mehr Sauerstoff aus dem Blut schöpfen kann.

Nach dem FICKSchen Verfahren läßt sich das *Herzzeitvolumen* aus der Sauerstoffaufnahme und der arterio-venösen Sauerstoffkonzentrationsdifferenz berechnen. Das *Schlagvolumen* ergibt sich als Quotient aus Herzzeitvolumen und Herzfrequenz.

Schließlich erlauben spiroergometrische Untersuchungen auch Aussagen über die Atemökonomie. Wir bestimmen im Praktikum die sogenannte *spezifische Ventilation (Atemäquivalent)*. Man versteht darunter die Luftmenge, die ventiliert werden muß, um 1 l Sauerstoff aufzunehmen.

### Versuchsablauf

Exemplarisch werden Ihnen für die eigentlichen Berechnungen Messdaten von spiroergometrischen Untersuchungsreihen zur Verfügung gestellt, die bereits folgendermaßen durchgeführt worden sind:

### Messprinzip

Das im Praktikum eingesetzte Fahrradergometer besitzt ein elektrisches rückgekoppeltes Bremssystem. Die eingebaute Wirbelstrombremse erzeugt ein Gegen Drehmoment; das Produkt aus Drehmoment und Umdrehungsgeschwindigkeit ergibt die Leistung, die vorgewählt wird. Unabhängig von der Tretfrequenz garantiert die elektrische Bremskraftrückkopplung, dass stets die eingestellte Leistung erbracht wird, da bei Abfall bzw. Anstieg der Tretfrequenz die Bremskraft entsprechend erhöht bzw. gesenkt wird. Der Wirkungsgrad des Radfahrens hängt deutlich von der Tretfrequenz ab. Daher wird empfohlen, möglichst annähernd die optimale Tretfrequenz von 50 min<sup>-1</sup> einzuhalten, die fortlaufend von dem Drehzahlmesser angezeigt wird.

Die spirometrischen Messungen erfolgen mit der *PowerCube*-Messeinrichtung für die Spiroergometrie (s. Versuch 5.2.2), die neben den wichtigen spirometrischen Parametern eine fortlaufende Analyse der Atemgase ermöglicht. Der O<sub>2</sub>-Gehalt wird chemisch durch eine Sauerstoffzelle, der CO<sub>2</sub>-Gehalt durch ein Ultraschalllichte-Messverfahren gemessen.

### Messreihe

Zuerst werden die verschiedenen Parameter (O<sub>2</sub>-Verbrauch, CO<sub>2</sub>-Abgabe, expiratorisches Atemzeitvolumen, Herzfrequenz) unter Ruhebedingung gemessen. Während dieser Messung liegt der Proband einige Minuten ruhig und entspannt auf einer Liege, bis sich die Messwerte stabilisiert haben. Anschließend werden die oben genannten Parameter unter Leerlaufbedingungen (Leistung = 0 Watt, Tretfrequenz = 50 min<sup>-1</sup>) und für unterschiedliche Belastungsstufen (Leistung 40, 80, 120 und 160 Watt; 50 min<sup>-1</sup>) auf dem Fahrradergometer registriert.

In der *Ruhephase* atmet der Proband eine Minute lang ruhig ein und aus, ohne zu treten. Nach der Ruhephase tritt der Proband die Pedale mit der empfohlenen Drehzahl (50 min<sup>-1</sup>) ca. 8 Minuten lang. Diese Tretgeschwindigkeit muss bei allen Belastungen unbedingt beibehalten werden.

Zu Beginn der Arbeit entsteht ein Defizit in der Sauerstoffaufnahme. Nach Beendigung der Arbeit wird in der Erholungsphase eine erhöhte Sauerstoffmenge nachgeatmet, um die entstandene Sauerstoffschuld abzutragen. Zwischen der initialen Anpassungsphase und der Erholungsphase stellt sich ein aerobes Gleichgewicht, auch *steady state* bzw. *aerobe Arbeitsphase* genannt, ein, sofern die Dauerleistungsgrenze nicht überschritten ist. Im steady state entspricht die aufgenommene Sauerstoffmenge dem Sauerstoffbedarf. Die Anpassungsphase dauert erfahrungs-

gemäß ca. 3 Minuten. Für die zu berechnenden Parameter (Energieumsatz, Wirkungsgrad, spezifische Ventilation, Herzzeitvolumen, Schlagvolumen) sind die im steady state gemessenen Daten ausschlaggebend.

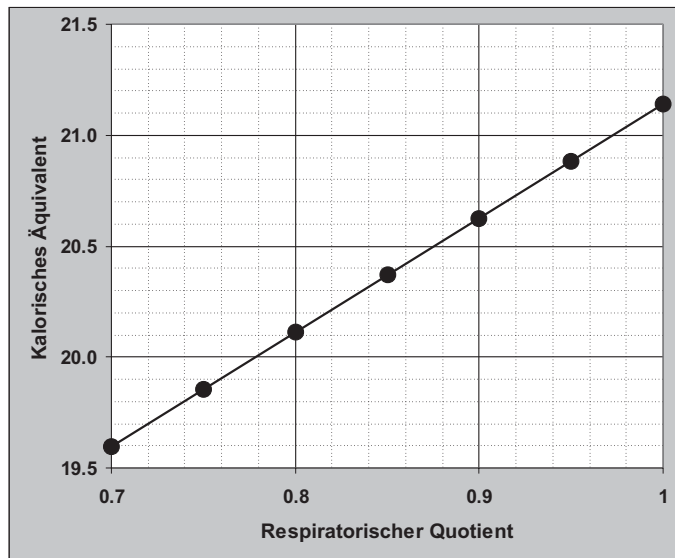
Der Arbeitsphase muss eine ausreichend lange *Erholungsphase* folgen, bis die zu messenden Parameter auf ihren Ruhewert zurückgekehrt sind. Nach jeweils 3-minütiger Erholungsphase werden die Messungen unter den Belastungen 40, 80, 120 und 160 Watt durchgeführt, wobei durchweg das bereits erläuterte Belastungsprofil „*Ruhe – Belastung – Erholung*“ einzuhalten ist.

## Auswertung

### Respiratorischer Quotient (RQ)

Der respiratorische Quotient errechnet sich aus dem Verhältnis der abgegebenen CO<sub>2</sub>-Menge zur aufgenommenen O<sub>2</sub>-Menge pro Zeit:

$$RQ = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}} \quad (1)$$



**Abb. 8-1** Kalorisches Äquivalent. Die lineare Regressionsgerade für das kalorische Äquivalent ist:  $kalAeq = 5,14 \cdot RQ + 16,0$  [kJ/lO<sub>2</sub>].

### Kalisches Äquivalent

Unter dem kalorischen Äquivalent (*kalAeq*) versteht man diejenige Energiemenge, die pro Liter verbrauchten Sauerstoffs bei der Verbrennung einer Substanz (Kohlenhydrate, Fette, Eiweiß) im Körper freigesetzt wird. Respiratorischer Quotient und kalorisches Äquivalent sind näherungsweise miteinander linear verknüpft, so dass sich jedem RQ-Wert ein bestimmtes kalorisches Äquivalent zuordnen lässt (siehe Abb. 8-1).

### Energieumsatz

Durch Multiplikation des kalorischen Äquivalentes mit dem gemessenen Sauerstoffverbrauch ergibt sich der Energieumsatz in kJ/min:

$$Energieumsatz = \dot{V}_{O_2} [l/min] \times \text{kalorisches Äquivalent} [kJ/lO_2] \quad (2)$$

### Wirkungsgrad

Für die Berechnung des Wirkungsgrades gelten folgende Beziehungen (1 Watt = 1 Joule/s = 60 Joule/min):

$$\text{Bruttowirkungsgrad} = \frac{N}{Q} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{Nettowirkungsgrad} = \frac{N}{Q - Q_R} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{Reiner Wirkungsgrad} = \frac{N}{Q - Q_L} \times 100\% \quad (5)$$

äußere Leistung (*N*), Leistungsumsatz (*Q*), Ruheumsatz (*Q<sub>R</sub>*), Leerumsatz (*Q<sub>L</sub>*)

### Spezifische Ventilation (Atemäquivalent)

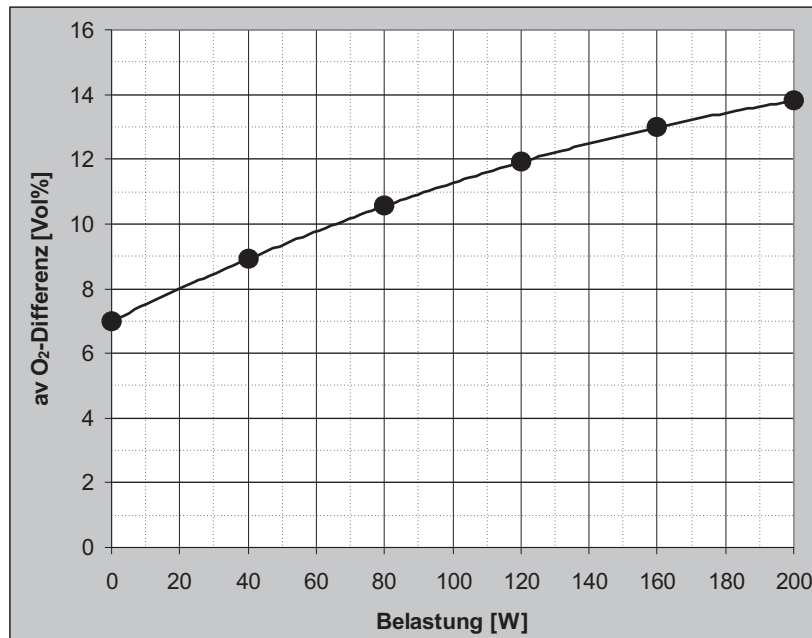
Die spezifische Ventilation ergibt sich aus dem Quotienten expiratorisches Atemminutenvolumen ( $\dot{V}_E$ ) durch Sauerstoffaufnahme ( $\dot{V}_{O_2}$ ). Sie wird zur quantitativen Beschreibung der Atemökonomie herangezogen.

$$\text{Spezifische Ventilation} = \frac{\dot{V}_E [l/min]}{\dot{V}_{O_2} [l/min]} \quad (6)$$

### Sauerstoffpuls

Dividiert man die pro Minute aufgenommene Sauerstoffmenge durch die Herzfrequenz ( $HF$ ), so erhält man den Sauerstoffpuls. Man versteht darunter die pro Herzschlag aufgenommene Sauerstoffmenge, die vom Schlagvolumen und von der arterio-venösen Sauerstoffkonzentrationsdifferenz ( $\Delta O_{2,av}$ ) abhängt. Da für eine bestimmte Belastungsstufe die arterio-venöse Sauerstoffkonzentrationsdifferenz weitgehend unabhängig vom Trainingszustand für alle Versuchspersonen in etwa gleich groß ist, kann der Sauerstoffpuls zur Abschätzung des Schlagvolumens herangezogen werden:

$$\text{Sauerstoffpuls} = \frac{\dot{V}_{O_2}}{HF} \quad (7)$$



**Abb. 8-2** Arterio-venöse Sauerstoffkonzentrationsdifferenz als Funktion der körperlichen Belastung. Die eingezeichnete Regressionskurve folgt der Gleichung:  $y = -0,00009 x^2 + 0,051 x + 7,0$

In umfangreichen spiroergometrischen Untersuchungen wurde von REINDELL u. Mitarbeiter die arterio-venöse Sauerstoffkonzentrationsdifferenz an untrainierten und trainierten Versuchspersonen gemessen (siehe Abb. 8-2).

### Herzzeitvolumen (HZV)

Anhand der gemessenen Sauerstoffaufnahme und der angegebenen arterio-venösen Sauerstoffkonzentrationsdifferenz wird nach der von FICK angegebenen Formel das Herzzeitvolumen berechnet:

$$HZV = \frac{\dot{V}_{O_2}}{\Delta O_{2,av}} \quad (8)$$

### Schlagvolumen (SV)

Dividiert man das Herzzeitvolumen durch die Herzfrequenz, so erhält man das Schlagvolumen:

$$SV = \frac{HZV}{HF} \quad (9)$$

### Grafische Auftragung der ermittelten Parameter

Abschließend sind die gemessenen und berechneten Parameter (Atemminutenvolumen, Sauerstoffaufnahme, Herzfrequenz, Sauerstoffpuls, Herzzeitvolumen, Schlagvolumen) in die unter EXCEL vorbereitete Tabelle, die on-line in entsprechende Diagramme umgesetzt werden, einzutragen und auszudrucken.



## 8.2 Energieumsatz

### Aufgaben

- ⇒ Bestimmung des Energieumsatzes in Ruhe mittels der indirekten Kalorimetrie.
- ⇒ Messung der Laktatkonzentration im Blut unter erschöpfender körperlicher Tätigkeit.

### Lernziele

Siehe auch Lernziele zu Teilversuch 8.1 | Grundumsatz | anaerobe Glykolyse | Laktatstoffwechsel | muskuläre Sauerstoffschuld | Erholungspuls

### 8.2.1 Grundumsatz

Der Energieumsatz des Menschen, der besonders stark von körperlichen Tätigkeiten, d.h. von der geleisteten Arbeit, abhängt, unterliegt einer Vielzahl weiterer Einflüsse. Einerseits spielen die Umgebungsbedingungen, wie Tageszeit, Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, optischer und akustischer Reizstärkepegel etc. eine zusätzliche Rolle. Andererseits beeinflussen individuelle Gegebenheiten, wie Geschlecht, Alter, hormoneller Status, zentralnervöser Aktivitätszustand sowie die Stoffwechselsituation, den Umsatz.

Da sich der Umsatz im Rahmen bestimmter Erkrankungen, wie Schilddrüsenüber- oder -unterfunktion, im Fieber, erhöhter Sympathikotonus etc., erheblich ändern kann, kommt der Umsatzbestimmung am Menschen auch klinische Bedeutung zu. Ein Vergleich mit Umsatznormwerten ist aber nur sinnvoll, wenn der Umsatz unter definierten Standardbedingungen gemessen wird. Man spricht in diesem Fall von dem *Grundumsatz*. Folgende Bedingungen sind an die Grundumsatzbestimmung geknüpft:

- *Frühmorgendliche Messung*. Der Energieumsatz unterliegt einem tageszeitlichen Rhythmus mit einem Minimum in den frühen Morgenstunden.
- *Nüchternheit*. Nahrungsaufnahme und Verdauung führen zu einer Umsatzsteigerung (*spezifisch-dynamische Wirkung*).

## 8.2 Energieumsatz

- *Ruhe*. Ruhiges und entspanntes Liegen ohne geistige Anspannung.
- *Behaglichkeitstemperatur* (indifferente Umgebungstemperatur).  
Frieren oder Schwitzen können deutliche Umsatzsteigerungen auslösen.

Der Grundumsatz ist bezüglich Alter, Geschlecht und Körperoberfläche zu normieren, so dass ein interindividueller Vergleich gestattet ist. So lässt sich der Normwert des Grundumsatzes (*BMR* = Basic Metabolic Rate) mit Hilfe der HARRIS-BENEDICT-Formel unter Eingabe des Körpergewichts  $G$  [kg], der Körpergröße  $H$  [cm] und des Alters  $A$  [Jahre], wie folgt, berechnen:

$$\begin{array}{ll} \text{Männer} & BMR = 66.5 + 13.7 G + 5.0 H - 6.8 A \quad [\text{kcal/d}] \\ \text{Frauen} & BMR = 655.1 + 9.6 G + 1.9 H - 4.7 A \quad [\text{kcal/d}] \end{array}$$

### Versuchsgang

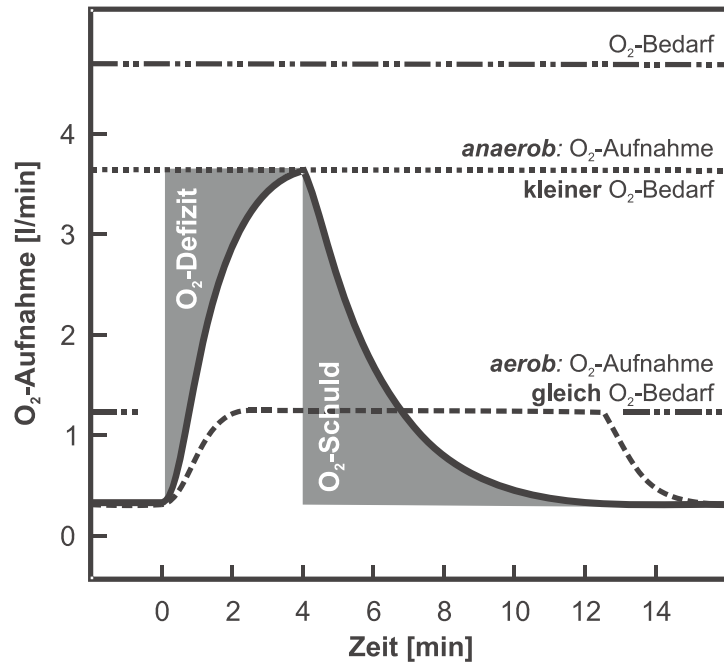
Statt des Grundumsatzes soll an einer VP ersatzweise der Ruheumsatz mit der Methode der indirekten Kalorimetrie bestimmt werden, da im Praktikum nicht alle geforderten Standardbedingungen erfüllt werden können. Mit Hilfe des Spiroergometriemessplatzes (s. Teilversuch 8.1.2) werden an der entspannt liegenden Versuchsperson der  $O_2$ -Verbrauch, die  $CO_2$ -Abgabe sowie das expiratorische Atemminutenvolumen solange fortlaufend registriert, bis sich die Messwerte stabilisiert haben.

Die Auswertung erfolgt analog Teilversuch 8.1.2 in den 3 Schritten:

1. Berechnung des Respiratorischen Quotienten RQ.
2. Bestimmung des kalorischen Äquivalents unter Verwendung des RQ.
3. Berechnung des Energieumsatzes mittels gemessenem Sauerstoffverbrauch und kalorischem Äquivalent.

### 8.2.2 Anaerobe Glykolyse

Die muskuläre Energiebereitstellung basiert prinzipiell auf drei verschiedenen Stoffwechselprozessen, die mit sehr unterschiedlichen Zeitkonstanten einer abrupten muskulären Belastungssteigerung angepasst werden, um die ATP-Spiegel in den betroffenen Muskelfasern selbst unter erschöpfender Belastung nahezu konstant zu halten (s. Abb. 8-3).



**Abb. 8-3** Zeitverlauf der  $O_2$ -Aufnahme unter anaerober Arbeitsbelastung. Während bei mäßiger Belastung ein steady state erreicht wird, geht der Organismus unter Maximalbelastung ein stetig wachsendes  $O_2$ -Defizit ein, das letzten Endes zum Abbruch der Leistung führt. In der Erholungsphase muss diese angehäuften  $O_2$ -Schuld wieder abgetragen werden.

### 1. Anaerob-alkalotazide ATP-Regeneration

In den ersten 10–20 s nach Arbeitsbeginn kann durch Hydrolyse energiereiches Phosphat vom Kreatinphosphat direkt auf ADP übertragen werden, um ATP zu resynthesisieren. Dieser Vorgang läuft ohne Sauerstoffverbrauch fast verzögerungsfrei ab. Er ist aber in Anbetracht der geringen Kreatinphosphatreserven schnell erschöpft.

### 2. Anaerob-laktazide ATP-Regeneration

In einem zweiten Anpassungsschritt greift der Organismus zunehmend auf die Energiereserven der Kohlenhydrate zurück. Da die Sauerstoffversorgung anfänglich noch nicht Schritt halten kann, und die myoglobingebundenen

$O_2$ -Vorräte schnell aufgezehrt sind, begünstigt der sinkende  $O_2$ -Partialdruck die Umwandlung von Pyruvat in Laktat. Man spricht von anaerober Glykolyse, die aus 1 mol Glukose nur 2 mol ATP bereitstellen kann. Diese kann von anderen Muskelfasern, vom Myokard und Leberzellen aufgenommen, in Pyruvat zurückverwandelt und in den Mitochondrien dann letztlich aerob oxidiert werden. Etwa ein Drittel des in die Leberzellen gelangten Laktats wird in der Glukoneogenese wieder zu Glukose aufgebaut.

### 3. Aerob-alkalotazide ATP-Regeneration

Wird die Ausdauerleistungsgrenze nicht überschritten, so kann über einen längeren Zeitraum durch vollständige Oxidation von Kohlenhydraten und freien Fettsäuren aerob Energie bereitgestellt werden. Der Wirkungsgrad der Energieausbeutung ist hoch: komplette Oxidation von 1 mol Glukose liefert 36 mol ATP. Die Energieausbeute übersteigt die anaerobe um das Zwanzigfache!

Selbst unter mäßiger Leistungssteigerung steigt die Laktatkonzentration im Blut initial sehr schnell an. Die Konzentration von 2 mmol/l markiert definitionsgemäß die sog. aerobe Schwelle. Ein aerob-anaerober Übergangsbereich zwischen 2 und 4 mmol/l Blutlaktat kann über längere Zeiträume toleriert werden, d.h. Laktatbildung und -abbau halten sich die Waage.

Unter höherer Belastung wird der steady state für Laktat überschritten, und es kommt zu einer steigenden Laktatakkumulation, was sehr schnell zur Übersäuerung der Muskulatur (= Laktazidose) und konsekutiv zum Leistungsabbruch führt. Erfahrungsgemäß findet man ab einer Laktatkonzentration von 4 mmol/l einen stark überproportionalen Laktatanstieg mit steigender Belastung, und definiert diese Grenze als anaerobe Schwelle, die als sehr grobes Maß zur Beurteilung eines Ausdauertrainingszustandes dienen kann.

Wird dem Organismus eine bis zur Erschöpfung führende Leistung abverlangt, wächst die Laktatkonzentration stetig an. Dies beweist, dass die Energiebereitstellung vorwiegend anaerob erfolgt. Die parallel zunehmende Atemtätigkeit und mit ihr die steigende  $O_2$ -Aufnahme sind demnach nicht in der Lage, die erforderliche Energie aerob bereitzustellen: der Organismus geht ein  $O_2$ -Defizit ein (s. Abb. 8-3). Nach Abbruch der Arbeit muß der Organismus in der Erholungsphase das  $O_2$ -Defizit abbauen, was in der noch länger anhaltenden erhöhten  $O_2$ -Aufnahme bzw. Atemtätigkeit zum Ausdruck kommt. Diese erhöhte  $O_2$ -Aufnahme, als  $O_2$ -Schuld interpretiert, dient zur:



- Resynthese von Kreatinphosphat
- Glukoneogenese aus Laktat
- Oxidation von Laktat im Zitratzyklus
- Auffüllung der Hämoglobin- und Myoglobinspeicher.

Die  $O_2$ -Schuld (s. Abb. 8-3) ist größer als das  $O_2$ -Defizit, was in den grau unterlegten Flächen unter den Kurven zum Ausdruck kommt.

### Versuchsablauf

In einem sogenannten anaeroben Maximaltest soll sich eine Versuchsperson bis zur Erschöpfung ergometrisch belasten. Der Test darf nur an gesunden und bevorzugt trainingserfahrenen Personen durchgeführt werden. Zu Beginn der Untersuchung wird aus dem kapillären Blut, das vom Ohrläppchen gewonnen wird, die Laktatkonzentration mit Hilfe sog. Laktat-Teststreifen in Verbindung mit dem zugehörigen *LactateScout*-Messgerät bestimmt. Das in der Blutprobe enthaltene Laktat wird durch das auf dem Messstreifen aufgetragene Enzym *Laktatoxidase* oxidiert. Die bei der Oxidation freigesetzten Elektronen werden über einen Redoxmediator auf eine Arbeitselektrode übertragen, was zu einem zur Laktatkonzentration proportionalen elektrischen Strom führt.

Ein Atemgurt zur Registrierung der Atemtätigkeit, insbesondere der Atemfrequenz, und ein Pulsaufnehmer zur Überwachung der Herzfrequenz werden der Versuchsperson umgelegt. Die VP soll erst nach einer zweiminütigen Aufwärmphase und einer anschließenden gleich langen Erholungsphase mit dem Maximaltest beginnen.

Sie muß von Anbeginn an maximal schnell und kräftig das Ergometer bewegen. Sobald die VP erste Anzeichen starker Ermüdung oder Erschöpfung verspürt, muß sie die Übung abbrechen. Insbesondere sollte die Herzfrequenz den Wert von  $180 \text{ min}^{-1}$  nicht überschreiten! Sofort nach Beendigung des Tests wird erneut die Laktatkonzentration bestimmt. Die Atem- sowie die Pulsaufzeichnung müssen solange fortgesetzt werden, bis in etwa wieder die Ausgangswerte erreicht worden sind. Anhand dieser Aufzeichnungen sollen  $O_2$ -Defizit,  $O_2$ -Schuld sowie Erholungspuls diskutiert werden. Unter dem Erholungspuls versteht man die Summe aller Herzschläge in der Erholungsphase nach Beendigung einer körperlichen Tätigkeit bis zum Erreichen des Ruhepulses. Er dient oft zur groben Abschätzung der Belastungsstärke einer vorausgegangenen Tätigkeit.

## 8.3 Speichel

### Aufgaben

- ⇒ Bestimmung der Speichelsekretion unter Ruhe- und Stimulationsbedingung.
- ⇒ Untersuchung der stärkespaltenden Aktivität der Speichel-Amylase in Abhängigkeit des pH-Wertes.

### Lernziele

Speichelproduktion und -sekretion | Zusammensetzung des Speichels | Aufgaben des Speichels | Kau- und Schluckvorgang | Mundhygiene | Saccharidbestandteile der Nahrung | Poly- und Oligosaccharidspaltung

### 8.3.1 Speichelsekretion

Der Mundspeichel nimmt eine ganze Reihe von wichtigen Aufgaben durch Befechten der Mundhöhle wahr:

- Er vermag einerseits als Lösungsmittel für einen Teil der Nahrungsstoffe die Geschmacksempfindung zu verbessern, andererseits die gekaute Nahrung gleitfähig zu machen, um den Kau- und Schluckvorgang zu fördern.
- Er erleichtert das Sprechen.
- Dank seiner chemischen Zusammensetzung garantiert er die Gesundheit der Zähne, sofern sie ausreichend umspült werden.
- Aufgrund seines Gehalts an Lipozym, Peroxidase, Laktoferrin und Immunglobulin A (IgA) besitzt er eine antibakterielle und antivirale Wirkung.
- Er mischt beim Kauen Verdauungsenzyme unter den Nahrungsbrei.

Der Speichel wird in den 3 großen paarigen Drüsen Glandula parotis, submandibularis und sublingualis gebildet, die durch zahlreiche kleine schleimbildende Drüsen in der Wangen-, Gaumen- und Rachenschleimhaut sowie durch Zungengrunddrüsen unterstützt werden.

Die Speichelsekretion ist reflektorisch gesteuert, wobei Berührung der Mundschleimhaut beim Kauvorgang sowie Geruchs- und Geschmacksreize besonders stimulierend wirken. Auch ohne derartige Reizung findet immer eine Basalsekretion von ca. 0.5 l/d statt, entsprechend 0.3–1 ml/min, die unter maximaler Stimulation – z. B. Kauen einer Zitronenscheibe – auf ein Mehrfaches ansteigen kann.

Zur Beurteilung der Speichelflussrate werden folgende Referenzbereiche in der einschlägigen Literatur vorgeschlagen:

Klassifizierung der Fließrate	Speichelfluß [ml/min]	
	in Ruhe	unter Stimulation
Hypersalivation	> 1	> 3.5
Normosalivation	0.25–1	1.0–3.5
Hyposalivation	0.1–0.25	0.5–1
Xerostomie	< 0.1	< 0.5

**Tab. 8-1** Klassifizierungsschema für die Beurteilung der Speichelsekretion.

Eine stark verminderte Speichelsekretion führt zu Mundtrockenheit (Xerostomie), die Kauen, Schlucken und Sprechen massiv beeinträchtigen kann und die Neigung zu Karies und sogar zu Geschwürbildung fördert.

Der Speichel, der zu 99 % aus Wasser besteht, enthält eine Reihe von Ionen ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  und  $\text{Cl}^-$ ) sowie Proteine (Mucine, Enzyme, Wachstumsfaktoren und Immunglobuline), wobei die Konzentrationen seiner Bestandteile und vor allem sein pH-Wert mit der Flussrate deutlich schwanken kann.

Die Speichelsekretion der 3 großen Speicheldrüsen steht unter sympathischer und parasympathischer Kontrolle. So wird unter dem Einfluß der sympathischen Innervation ein viskösere,  $\text{H}_2\text{O}$ -ärmerer Speichel als unter parasympathischem Einfluß sezerniert, was sich oft bei Aufregung oder Stress in einer „Mundverschleimung“ niederschlägt, die das Sprechen erschweren kann.

Die Speichelproduktion durchläuft zwei Stufen:

- In den Azini wird ein plasmatisotoner Primärspeichel sezerniert.
- In den Ausführungsgängen werden bei relativ geringer  $\text{H}_2\text{O}$ -Permeabilität  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  resorbiert und im Gegenzug nur  $\text{K}^+$  und  $\text{HCO}_3^-$  sezerniert.

Der pH-Wert des Ruhespeichels liegt bei 6.5–6.9 und steigt unter Stimulation auf 7.2–7.6 an. Ein  $\text{H}^+$ -Ionenanstieg ist unerwünscht, da  $\text{H}^+$  den Zahnschmelz demineralisiert und damit die Kariesentstehung begünstigt.

### Versuchsablauf

Die Speichelflussrate wird unter Ruhebedingungen sowie unter starker Stimulation durch Kauen eines Paraffinkaukörpers bzw. geschmacksneutralen Kaugummi gemessen. Die Versuchspersonen sollten folgende Verhaltensinstruktionen vor der Untersuchung befolgen:

- Ausreichende Flüssigkeitsaufnahme unter Verzicht auf säurehaltige Getränke.
- Intensive Reinigung der Zähne ca. 2 Stunden vor der eigentlichen Messung ohne weitere Nahrungsaufnahme.
- Unmittelbar vor der Messung kurzes Ausspülen des Mundes mit Wasser.

Die sialometrische Untersuchung ist folgendermaßen durchzuführen:

Der Speichel sollte während der sialometrischen Phase im vorderen Abschnitt des Mundbodens gesammelt werden, wobei Schluckbewegungen unbedingt zu unterdrücken sind. Die Sammelphase erfolgt in sitzender Position mit etwas nach vorn geneigtem Kopf und leicht hängendem Unterkiefer. Etwa 5 sec vor Beginn der eigentlichen Sammelphase muß der im Mund vorhandene Speichel abgeschluckt werden. In 2-minütigen Abständen ist der angesammelte Speichel in einem einzigen Expektationsstoss in das Wägeschälchen zu entleeren. Dieser Vorgang ist unter Ruhebedingung dreimal zu wiederholen.

Für die Untersuchung der stimulierten Speichelsekretion wird das Kauen des Kaugummi als mechanisches Stimulans eingesetzt. Während der Umstellungsphase aus der Ruhebedingung heraus wird empfohlen, zunächst 30 s lang den Kaugummi vorzukauen, den dabei sezernierten Speichel abzuschlucken, um dann mit Start der Stoppuhr die Sammelphase zu beginnen. Die Kaufrequenz und -intensität können von der Versuchsperson individuell gewählt werden. Ein dreimaliges Sammeln im 2-Minutentakt ist für diese Bestimmung ausreichend.

Das jeweilige gesammelte Speichelvolumen wird gravimetrisch gemessen, indem die Volumenwerte aus den Gewichtswerten mit Hilfe der mittleren spezifischen Speicheldichte von 1.05 g/ml berechnet werden. Der Quotient aus Sammelvolumen geteilt durch die Sammelzeit liefert die gesuchte Speichelflussrate in ml/min.

Mit dem in Versuch 6.3 bereits eingesetzten Osmometer bzw. pH-Meter sind in den beiden Speichelproben die *Osmolarität* bzw. der *pH-Wert* zu bestimmen.

### 8.3.2 Speichel-Amylase

Bereits der Speichel enthält das wesentliche Verdauungsenzym  $\alpha$ -Amylase, das von der Glandula parotis sezerniert wird. Die  $\alpha$ -Amylase ist für die glykosidische Spaltung der Stärke zuständig, die beim Menschen mehr als die Hälfte der mit der Nahrung aufgenommenen Kohlenhydrate ausmacht. Obwohl die Speichelamylase allein in der Lage wäre, die gesamte Stärke in der Nahrung zu spalten, reicht die Kontaktzeit üblicherweise nicht aus, da mit dem Hinunterschlucken des Bissens die Amylase im sauren Milieu des Magensaftes umgehend inaktiviert wird. Damit ist die  $\alpha$ -Amylase, die vom Pankreas in das Duodenum abgegeben wird, für die normale Stärkeverdauung primär verantwortlich. Die Amylase des Speichels steht eher im Dienste der oralen Hygiene, um Nahrungsreste, die an den Zähnen hängen- bzw. haftenbleiben, durch Abbau zu beseitigen. Ihr pH-Optimum liegt etwa zwischen 5.5 und 7.2.

Benutzt man die „Jodprobe“ als quantitative Nachweismethode für Stärke, kann man mit ihr im Reagenzglas die Enzymaktivität der Speichelamylase sichtbar machen. Atomares Jod lagert sich in die spiralig aufgebaute Stärke ein, womit eine massive Änderung der Lichtabsorption ins Dunkelblaue verbunden ist. Setzt man einer definierten Stärkelösung eine bestimmte Speichelmenge zu, lässt sich die enzymatische Aktivität der enthaltenen Amylase am Stärkeumsatz, der seinerseits photometrisch an der abnehmenden Stärkekonzentration abgelesen werden kann, bestimmen.

#### Versuchsablauf

Die enzymatische Spaltung einer 1%igen Stärkelösung durch die Speichelamylase wird durch den Zusatz der Lugolschen Lösung sichtbar gemacht. Die Lugolsche Lösung enthält 5 g Jod und 10 g Kaliumjodid in 100 ml A. dest. Die Reaktion soll in gepufferter Lösung (pH = 7.6) sowie in saurem Milieu (pH = 2.0 entsprechend des Magensaftes) demonstriert werden. Eine tiefblaue Verfärbung bedeutet noch nicht abgebaute Stärke, eine schwach rötliche bzw. hellgelbe Verfärbung zeigt die Abnahme der Stärkekonzentration durch Spaltung an.