ACADEMY OF SPORTS
Bildung schafft Zukunft.

LESEPROBE

Medizinische Spiroergometrie

Kapitel 2

Kapitel 2 – Spiroergometrie

2.1 Historischer Überblick

Die **erste Anwendung** der Spiroergometrie wurde in den frühen **20er Jahren** von Knipping und Brauer Überwiegend für **klinische Zwecke** entwickelt. Dabei wurden die Atemminutenvolumina mit Hilfe großer Sammelbehälter (Douglassäcke) gesammelt und die Konzentration von CO_2 und O_2 mit chemischen Verfahren analysiert. Im späteren Verlauf wurden Spirometer zur fortlaufenden Registrierung spirometrischer Testgrößen in die Untersuchung eingeführt. Diese Geräte waren allerdings sehr groß und unförmig, darüber hinaus durch komplexe Kallibrationsprozesse für die Routineanwendung nur sehr schwer einsetzbar. In den folgenden Jahren wurden zwar leichter zu handhabende Spirometriesysteme entwickelt, ein Nachteil all dieser Geräte lag allerdings darin, dass sie unverhältnismäßig groß waren und die Untersuchungen einen sehr hohen methodischen Aufwand erforderten. Somit entsprachen die ersten Spirometer, die produziert wurden, den heutigen Anforderungen bei weitem nicht. Vor allem bezüglich Genauigkeit und der Größe der Geräte wurden gerade in den vergangenen Jahren enorme Fortschritte gemacht.

Damit die Geräte den Präzisionsanforderungen des menschlichen Körpers entsprachen, haben Hill und Mitarbeiter im Jahr 1924 die Entwicklung weitergeführt. Dabei bestand vor allem eine Ungenauigkeit in der Messung der maximalen Sauerstoffaufnahmefähigkeit. Diese konnte bei Hill et al. an wissenschaftlichen Ansprüchen gemessen nicht exakt bestimmt werden. Erst später ließen die Apparaturen Messungen von Größenordnungen bis 3500 ml/min (1949) und dann sogar bis 5000 ml/min (1954) zu. Heutzutage sind die Geräte auch in der Lage, die Gasaustauschkinetik während der Belastung zu ermitteln.

Chronologisch setzte sich allerdings die Entwicklung der Spirometrie mit der Einführung der ergometrischen Belastungsverfahren in den 30er und der Entdeckung des Zusammenhangs zwischen metabolischen und respiratorischen Parameter in den darauf folgenden Jahren fort.

Ab den 60er Jahren gewann allerdings die Laktatbestimmung zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit gegenüber der Spirometrie an Bedeutung. Die Durchführung der Laktatbestimmung als Routineuntersuchung zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit hatte überwiegend einen rein praktischen Hintergrund. Die spirometrischen Messverfahren bestanden noch aus großen Apparaturen, die nur schwer direkt am Trainingsort einsetzbar waren, wohingegen das Blut zur Laktatbestimmung an jedem Ort abgenommen werden konnte. Die notwendige Analyse konnte, damals wie heute, später und ortsungebunden vorgenommen werden. Auch gewann die Laktatbestimmung in der Trainingssteuerung an Bedeutung, weil die Auswertung der Laktatwerte

die Erstellung eines Trainingsprogramms ermöglichte. Im Grunde genommen konnte man den Trainingsmodus eines jeden Sportlers nach seinen Laktatwerten richten, es somit optimieren und z. B. auch ein Übertraining vermeiden. Es wurde die Meinung vertreten, dass dieses Zwischenprodukt des anaeroben Stoffwechsels geeignet wäre, um die Problematik des aeroben Stoffwechsels zu ergründen. Man war der Auffassung, dass die Leistungsgrenze der Sportler allgemein durch die Messung der Laktatwerte bei vorgegebenen Belastungen bestimmt werden konnte.

In den vergangenen drei Jahrzehnten wurden zahlreiche Laktatschwellenkonzepte veröffentlicht. Einer der Vorreiter auf diesem Gebiet war Mader, der 1976 mit seiner Studie die aerob – anaerobe Schwelle (AAS) als Übergang zwischen dem hauptsächlich aeroben zum überwiegend anaeroben Energiestoffwechsel der Arbeitsmuskulatur definierte. Der 1974 aus der DDR (Halle) in die Bundesrepublik Deutschland geflüchtete Mader konnte dabei auf sein umfangreiches leistungsdiagnostisches Wissen aufbauen, welches er als Sportmediziner im Bereich des Leistungssports in der DDR gewonnen hatte. Dabei beschrieb Mader allerdings nur den Laktatanstieg ohne dabei andere wichtige Parameter wie VO_2max oder den respiratorischen Quotienten (RQ) zu berücksichtigen. Nichtsdestotrotz wurde 1981 dann ein Konzept entworfen, das auch bei Fünfkämpfern, Wasserballspielern und im Prinzip im gesamten Sport zur Leistungsdiagnostik Anwendung fand.

In den 70er und 80er Jahren wurden vermehrt sportartspezifische Testverfahren entwickelt. Da man festgestellt musste, dass sich je nach angewandtem Verfahren die Möglichkeit zur Einschätzung der Leistungsfähigkeit deutlich zwischen Sportlern aus unterschiedlichen Sportarten unterschied. Gerade für den Schwimmsport war eine Umsetzbarkeit von sportartspezifischen Tests direkt auf Bedingungen des Wassers kaum möglich, da die üblicherweise im Rahmen einer Gesundheitsuntersuchung durchgeführten Leistungstests auf dem Fahrradergometer durchgeführt wurde.

Schon sehr früh, nach dem Beginn regelmäßiger flächendeckender sportmedizinischer und leistungsdiagnostischer Untersuchungen für Kaderathleten stellte man fest, dass sich die Fahrradergometrie nur sehr bedingt zur Einschätzung der individuellen Leistungsfähigkeit eignete.

Sehr früh wurden daher für Sportarten mit überwiegenden Laufbelastungen die Laufbandergometrie, sowie die Drehkurbelergometrie beispielsweise für Kanuten und schließlich die Ruderergeometrie für Ruderer eingeführt, um eine sportartspezifische Testung der Leistungsfähigkeit durchführen zu können. Ein Problem bestand nach wie vor in der Sportart Schwimmen, da es bis der Anfang der 80er Jahre keine sportartspezifische Testmethode gab. Insoweit erlaubten die im Rah-

men der Gesundheitsuntersuchung durchgeführten Tests für Schwimmer auf dem Fahrradergometer meistens nur eine allgemeine Aussage über den Zustand des Kardiopulmonalen Systems.

Wesentliche Grundlage der meisten sportartspezifischen Tests war die Beziehung der Laktatkonzentration bei definierten Belastungen. Erst die Anwendung von moderner Technik ermöglichte die Umsetzung von adäquaten Tests im Schwimmsport.

2.2 Begriffe und Parameter

Bei allen Formen der Ergometrie ist zwischen einer **physikalischen** und einer **biologischen Leistung** zu unterscheiden. Um eine gegebene physikalische Leistung in Bezug auf eine bestimmte körperliche Betätigungsform zu erreichen, können unterschiedliche biologische Leistungen erforderlich sein, da der Wirkungsgrad der biologischen Leistung von den mechanischen Verhältnissen des Ergometers sowie von zahlreichen endogenen und exogenen Faktoren bestimmt wird. Dazu zählen Drehzahl, Kurbelhöhe, Kurbellänge, Winkelstellungen, Größe der eingesetzten Muskelmasse, Körperposition, Übungszustand hinsichtlich der vorgegebenen Arbeitsform, Alter, Geschlecht und anthropometrische Daten, Ernährungszustand, klimatische Faktoren, Tages und Jahreszeit. Die Messung des Energieumsatzes eines Menschen in Körperruhe und bei körperlicher Arbeit kann auf direktem und indirektem Wege vorgenommen werden. Der Erstere beinhaltet die – sehr selten benutzte – Wärmeabgabe, die Letztere die Ermittlung der O_2-Aufnahme pro Zeiteinheit.

Die Beurteilung des **Energieumsatzes** nach der Messung des O_2-Verbrauchs hat zur Grundlage, dass 200 ml O_2-Verbrauch ca. 4,18 kJ entsprechen. Somit kann 1 l O_2-Verbrauch ca. 20,9 kJ gleichgesetzt werden. Da die O_2-Speicherkapazität des Organismus außerordentlich gering ist, kann anhand der über die Lunge in den Organismus aufgenommenen O_2-Menge die von dem Gewebe benutzte O_2-Menge ermittelt und daraus der Energieumsatz berechnet werden.

Das **Verhältnis** zwischen *CO_2-Abgabe* und *O_2-Aufnahme* wird als **respiratorischer Quotient (RQ)** bezeichnet. Er beträgt in Körperruhe bei mitteleuropäischer Kost ca. 0,85. Da bei der Glucoseverbrennung genau so viel Kohlendioxid entsteht, wie an Sauerstoff verbraucht wird, gilt hierfür ein RQ von 1,00. Bei alleiniger Proteinverbrennung findet man einen RQ von 0,81, bei der Fettsäureverbrennung einen Wert von 0,70.

Hinsichtlich der Aufnahme und Abgabe der Gasmengen, unterscheidet man bei der Spirometrie zwischen ***offenensystemische*** *und* ***geschlossenensystemische Spirometer****:*

- Beim *offensystemischen Spirometer* atmet der Proband bzw. der Patient die Umgebungsluft über ein Ventil ein. Die ausgeatmete Luft wird durch ein Behälter aufgefangen und gemessen (Atemzeitvolumen). Mit Hilfe einer chemischen Gasanalyse lassen sich die 0^2- und Co^2- Konzentration im Ausatemgas ermitteln um danach im Vergleich mit der Außenluft die Sauerstoffaufnahme zu ermitteln.

  Der wesentliche Vorteil des offenen Systems liegt darin, dass man durch den geringen apparativen Aufwand, ortsunabhängige Umsatzbestimmungen vornehmen kann. Des Weiteren kann durch die genaue Ermittlung der Kohlendioxidkonzentration der respiratorische Quotient ermittelt werden.

- Beim *geschlossensystemischen Spirometer* atmet die Versuchsperson über ein Mundstück, welches mit dem Spirometer verbunden ist, aus und ein. Dabei wird durch eine spezielle Vorrichtung das ausgeatmete Kohlendioxid absorbiert und der verbrauchte Sauerstoff fortwährend aus einem weiteren Behälter nachgefüllt. Dabei entspricht die Nachfüllmenge pro Zeiteinheit der Sauerstoffaufnahme pro Zeiteinheit.

  Der entscheidende Nachteil dieses Systems, ist der enorme apparative Aufwand. Zusätzlich führen eine verbesserte Analytik und geringere Anschaffungs- und Betriebskosten, des offenen Systems, zu einer stetig sinkenden Nutzung des geschlossenen Systems.

Leseprobe

2.3 Grundlagen zum Energieverbrauch

2.3.1 Energieumsatz

Beim Energieumsatz handelt es sich um ein allgemeines Merkmal lebender Zellen. Damit ist die Aufnahme energiereicher Nährstoffe, deren Umsetzung im Körper und die Abgabe energieärmerer Stoffwechselprodukte gemeint. Sinn und Zweck des gesamten Prozesses besteht in der Energiegewinnung. Die auf diese Weise gewonnene Energie dient der Verrichtung mechanischer Arbeit z. B. Muskeltätigkeit, chemischer Arbeit wie die Drüsentätigkeit ebenso der Stoffwechselarbeit wie Strukturaufbau.

1. Der **Tätigkeitsumsatz** entspricht dem Energieumsatz der aktiven Zellen, seine Höhe hängt demnach vom Aktivitätsniveau ab.
2. Der **Bereitschaftsumsatz** entspricht dem Energieumsatz, den die Zelle zu ihrer sofortigen uneingeschränkten Funktionsfähigkeit benötigt.
3. Der **Erhaltungsumsatz** entspricht dem Energieumsatzminimum, das die Zelle zum Erhalt ihrer Struktur unbedingt benötigt.

Beim Unterschreiten dieser Größe sind irreversible Zellschädigungen die Folge. Das Nebenprodukt Wärme, das bei diesem Prozess frei wird, geht ohne Nutzen für den Körper verloren. Fette und Kohlenhydrate werden für den Betriebsstoffwechsel genutzt, während Eiweiß eigentlich beim Baustoffwechsel eine Rolle spielt. Als Maßeinheit für den Energieumsatz wurde früher Kilokalorien (Kcal) pro Zeiteinheit benutzt.

Dabei entspricht:

1 Joule = 1 Wattsekunde = 2.39×10^{-4} Kcal
1 Kcal = 4187 Joule = 4.187 KJ (~ 0.0042 MJ)

Lesenobs

2.3.2 Kalorisches Äquivalent

Die Energieausbeute im zellulären Stoffwechsel kann über das Verfahren der indirekten Kalorimetrie bestimmt werden. Hierbei werden die verbrannten Nährstoffe, der aufgenommene Sauerstoff und das abgegebene Kohlendioxid in eine stöchiometrische Beziehung gesetzt. Teilt man die beim Verbrennungsprozess freiwerdende Energie (J) durch die verbrauchten Liter O2 erhält man das Kalorische Äquivalent (KÄ) von 1l O2 für den verbrannten Nährstoff. *Der Wert des KÄ variiert je nach Brennwert des verwendeten Nährstoffs und nimmt für die einzelnen Nährstoffe folgende Werte an:*

Glucose 21,4 KJ/lO_2 = 5,1 Kcal/ lO_2
Proteine 8,8 KJ/lO_2 = 4,48 Kcal/ lO_2
Fette 19,6 KJ/lO_2 = 4,69 Kcal/ lO_2

Gemischte mitteleuropäische Kost :

20,2 KJ/lO_2 = 4,83 Kcal/ lO_2

2.3.3 Respiratorischer Quotient und Kohlendioxidabgabe

Die Anteile der unterschiedlichen energieliefernden Substanzen gehen aus dem respiratorischen Quotienten hervor. Beim letzteren handelt es sich um den Quotienten aus der Menge aufgenommenen Sauerstoffs zur Menge das abgegebenen Kohlendioxids (CO_2/CO_2). Der durchschnittliche RQ bei üblicher, gemischter Kost beträgt etwa 0,82 und ergibt ein zugehöriges KÄ von 20,2 kJ (4,83 Kcal) pro Liter O_2. Bei ausschließlicher Kohlenhydratverbrennung gäbe es eine Steigerung des RQ auf 1,0 (5,1 Kcal /lO_2), während er bei reiner Fettverbrennung auf 0,7 (4,69 Kcal /lO_2) sinken würde. Außerdem ermöglicht die Verwendung des KA die ständige Ermittlung des oxidaktiven Energieumsatzes durch die Bestimmung der pulmonalen Sauerstoffaufnahme.

Eventuelle Fehler schließt man aus, indem man den RQ über längere Perioden integriert. Etwaige Fehler können ihre Ursache im gegenseitigen Umbau von Nährstoffen oder in einem inkonstanten arteriellen CO_2 – Druck haben. Der Fehler, der durch das Einsetzen eines Durchschnittswerts gegenüber der maximal möglichen Abweichung des Energieäquivalents in Abhängigkeit vom RQ auftreten kann, beträgt maximal ± 4 %. Es hat sich als praktisch erwiesen, in der Arbeits- und Sportphysiologie nach Stegemann den Anteil des Eiweißstoffwechsels am Energieumsatz gänzlich außer Acht zu lassen. Dies beeinträchtigt den Arbeitsumsatz vor allem deshalb kaum, weil dieser nahezu ausschließlich aus Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel besteht.

Lesepro be

Das Kohlendioxid als Endprodukt des aeroben Stoffwechsels verlässt den Körper über die Atmung. Die Kohlendioxidabgabe (VCO_2) ist diejenige Menge an Kohlendioxid, die pro Zeiteinheit von der Lunge an die Umgebungsluft abgegeben wird.

Dieses Parameter, das die Abgaberate aller Gewebe einschließt, wird über die Spirometrie bestimmt. Im Ruhezustand des Körpers beträgt die abgeatmete Menge ca. 230 ml CO_2 /min. Die Höhe der CO_2- Abgabe wird im Wesentlichen durch *drei Faktoren* bestimmt:

- die Höhe des *aeroben Energieumsatzes*.
- Den Anteil des *oxidaktiven Substrats* an Kohlenhydraten und Fetten.
- Die *Ventilation*.

Zusätzlich entsteht bei Muskelarbeit CO_2 durch Pufferung von Laktat. Dieses erfolgt durch Austreibung von CO_2 aus den Bikarbonaten (H_2CO_2). Bei ansteigender Belastung zeigt die CO2 – Abgabe keinen streng linearen Verlauf. VCO_2 nimmt ab etwa 70 % der VO_2max exponentiell zu. Im Vergleich mit der O_2 – Aufnahme ist der Anstieg etwas steiler, bis sich bei einem RQ von 1 beide Linien kreuzen.

In Grenzbereichen der Leistungsfähigkeit beobachtet man einen Anstieg des RQ über 1,0 infolge der Arbeits-Hyperventilation, der seine Ursache in einer metabolischen Azidose des Blutes hat, der wiederum eine vermehrte Laktatbildung im arbeitenden Muskel zugrunde liegt.

In solchen Phasen übersteigt die Menge an abgeatmetem CO_2 dem an gebildetem .Die Art der verbrannten Nährstoffe ist aus der Größe des RQ abzuleiten. Es liegt aber nahe, dass er von anderen Faktoren beeinflusst wird, da sein Wert nicht nur zwischen 0,7 (Fette) und 1,0 (Kohlenhydrate) schwankt.

Außer dem Nährstofftyp spielen Hyperventilation und Nährstoffumbau hierbei eine Rolle. Eine erschöpfende körperliche Belastung, metabolische Azidose oder aber auch respiratorische Alkalose können zu solch einer Hyperventilation fuhren, die den RQ bis auf 1,4 und höher ansteigen kann.

Bei reichlicher Zufuhr von Kohlenhydraten (Kohlenhydratmast) entstehen vermehrt Fette. Diese enthalten weniger Sauerstoff als die Kohlenhydrate, und deshalb wird im Stoffwechsel Sauerstoff frei, was zur Senkung der durch die Lunge aufgenommenen Sauerstoffmenge führt; dies gipfelt in einem Ausstieg des RQ auf Werte über 1,0. Um eine genaue Deutung des Energiestoffwechsels über den RQ zu gewährleisten scheint es also eminent wichtig zu sein, sich über eine eventuelle Beeinflussung der Messung durch die oben genannten Faktoren zu vergewissern. Diese Fehlerquellen rühren daher, dass die Überlegungen zur Bestimmung des Energiestoffwechsels sich immer

dem Zellstoffwechsel als Grundlage bedienen Normalerweise müssten zur Bestimmung eines den Stoffwechsel beschreibenden RQ (Metabolischer RQ) die CO_2-Produktion und der O_2- Verbrauch vor und hinter dem beteiligten Organ gemessen werden.

Da dies sich beim Menschen nicht realisieren lässt, wird hier RQ über die äußere Atmung ermittelt. Der so ermittelte „Ventilations–RQ“ gibt zuerst die momentanen Ventilationsverhältnisse der Atemgase CO_2 und O_2 wieder. Nach Nowackis Auffassung ist es allerdings nur statthaft, ihn lediglich bei Ruheatmung und evtl. Bei Arbeiten im „steady state“ mit dem Metabolischen RQ gleichzusetzen.

Demzufolge kann die Ermittlung des Ventilations –RQ bei körperlicher Arbeit nur dann den metabolischen Verhältnissen entsprechen, wenn es eine konstante Atmung über eine längere Zeit gibt (*steady state*). Laut Stegemann ist es ebenso möglich, den Metabolischen RQ bei einer Integration des Ventilations –RQ über einen längeren Zeitraum abzuleiten.

Im Ruhezustand ist der RQ –Wert mehr oder weniger konstant. Bei beginnender körperlicher Belastung sinkt er in den ersten Minuten unter den Ruhewert, weil CO_2 im Fett vermehrt gelöst und O_2 mehr aufgenommen wird. Wenn dabei eine Sättigung des Fettes eingetreten ist, steigt CO_2 im Blut wieder an, wodurch auch der RQ ansteigt. Hält die Belastung über mehrere Stunden an, beobachtet man wiederum eine Senkung des RQ, die durch erschöpfte Glykogendepots und die zunehmende Fettverbrennung bedingt ist.

In der Erholung steigt der RQ zunächst für kurze Zeit an. Die Höhe des Anstiegs wird durch Art und Größe der Leistung, Konstitution, Alter, Geschlecht, Trainingszustand bestimmt. Der RQ kann dann 1,5 – 2,0 betragen. Dies liegt wahrscheinlich an der noch anhaltenden, vermehrten CO_2-Abatmung bei schnell abfallender VO_2. Nach wenigen Minuten fällt der RQ umgekehrt proportional zur körperlichen Leistungsfähigkeit bis teilweise unter den Ruhewert.

Leseprobe

Auf einen Blick

- Der respiratorische Quotient (RQ) ist das Verhältnis von abgegebenem Kohlendioxid (Zähler) zu aufgenommenem Sauerstoff (Nenner).
- Der RQ gibt Hinweise auf die Energieträger für die Muskelkontraktion.
- Liegt der RQ-Wert unter 1, wird mehr Sauerstoff aufgenommen als CO2 abgegeben.
- Bei Werten zwischen 0,75 und 0,80 wird die Energie vorrangig aus dem aeroben Fettstoffwechsel gewonnen.
- Liegt der RQ-Wert über 1, wird mehr CO2 abgegeben als Sauerstoff aufgenommen, der anaerobe Energiestoffwechsel ist also dominant

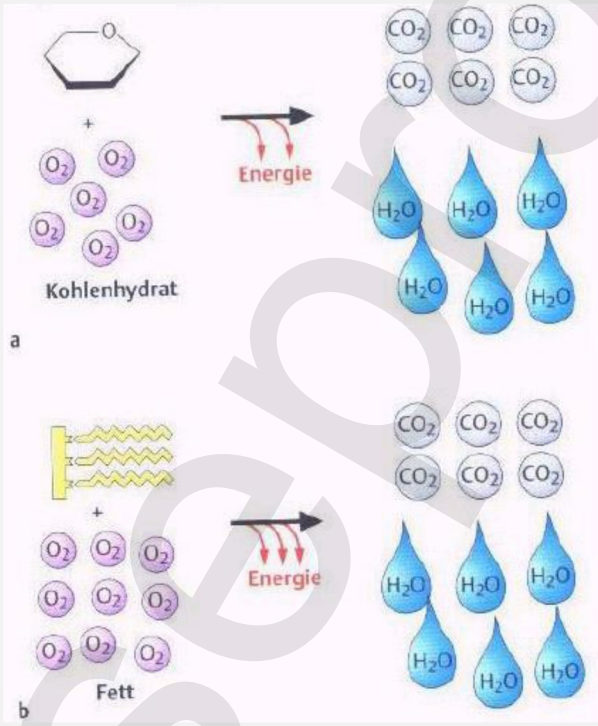

Abbildung 1 - Stoffwechselsituationen

- Erlaubt Aussagen über die aktuelle Stoffwechselsituation:

RQ = 0,7	reine Fettsäure-Oxidation
RQ = 0,85	gemischtes Verhältnis von 50 % KH zu 50 % Fett (Kalorienverbrauch: 220 kcal / 30 min)
RQ = 0,9	gemischtes Verhältnis von 67 % KH zu 33 % Fett (Kalorienverbrauch: 332 kcal / 30 min)
RQ = 1	reine Glukose-Oxidation ($C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O$ + Energie)
RQ > 1	Belastung im Bereich der Ausbelastung/Nachbelastungsphase

Lesepro

2.4 Grundlagen zur Atmung

Der Gasaustausch zwischen Luft und Blut findet in den Alveolen statt. Seine Effektivität hängt von der Ventilation ab: zyklischen Atembewegungen, die alternierend (wechselnd) zur Volumenzu- und –abnahme in den Alveolen führen.

Bei der Inspiration. werden die Alveolen mit Frischluft gefüllt, bei der Exspiration wird die verbrauchte Luft mit hohen Kohlendioxidanteil abgegeben. Bedeutende Aspekte der Lungenfunktion können über die Bestimmung von Lungenvolumina ermittelt werden. Diese Volumina können mittels Glockenspirometer oder mittels Pneumotachometer (Atemgeschwindigkeitsmesser) bestimmt werden.

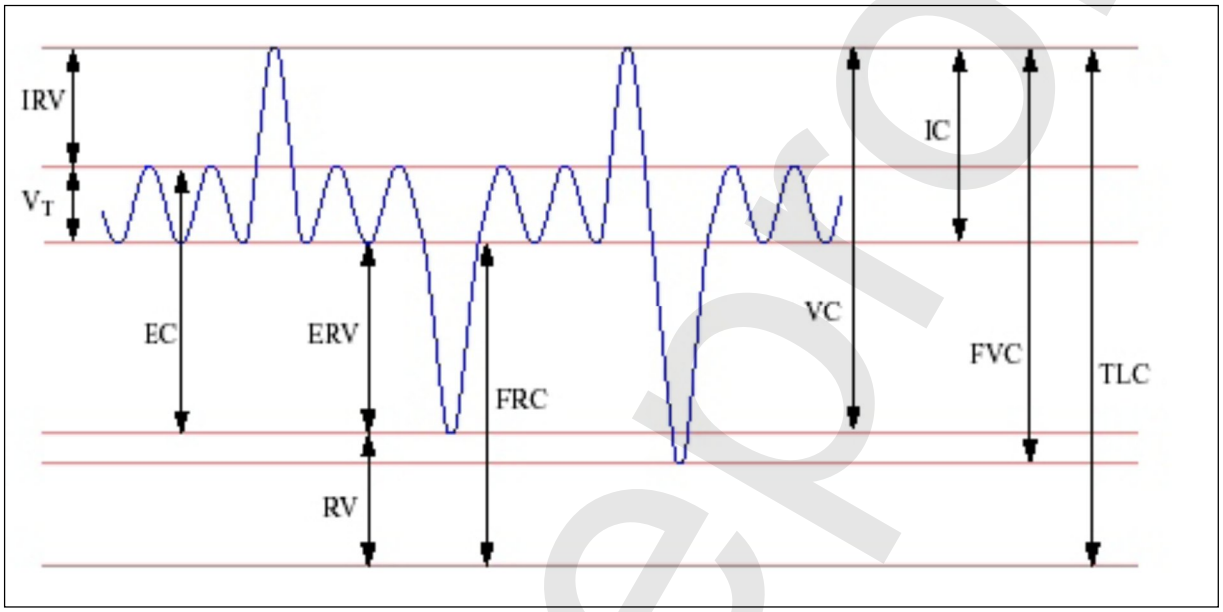

Abbildung 2 - Beispielauswertung Spirometer

Lesepobe

2.4.1 Atmungsparameter (Abkürzungen)

Abkürzung	***Bedeutung***
AMV	Atemminutenvolumen (AZV * AF)
AZV (VT)	Atemzugvolumen
AF (f)	Atemfrequenz (Atemzüge/Minute)
FVC.	forcierte Vitalkapazität
VC (VK)	Vitalkapazität
AGW	Atemgrenzwert
AST (FEV1)	forciertes exspiratorisches Volumen in 1 s - Atemstoßtest
FEV1/FVC	FEV1 als % des FVC
IRV	Inspiratorisches Reservevolumen
ERV	Exspiratorisches Reservevolumen
IC	Inspiratorische Kapazität (AZ + IRV)
EC	Exspiratorische Kapazität (AZ + ERV)
RV	Residualvolumen
FRC	forcierte Residualkapazität (RV + ERV)
TLC	totales Lungenvolumen
Sk	Sekundenkapazität

Tabelle 1 - Abkürzungsparameter

Leseprobe

ACADEMY OF SPORTS GMBH
Willy-Brandt-Platz 2, 71522 Backnang

TEL **0800 589 12 54** (gebührenfrei)
+49 7191 907 14-30 (aus dem Ausland)
FAX **+49 7191 907 14-50**

info@academyofsports.de
WWW.ACADEMYOFSPORTS.DE