

# Spiroergometrische Apparaturen und Verfahren

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, weil 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 Fettsäurenverbrennung einen Wert von 0,70.

Arbeitsuntersuchungen mittels der Spiroergometrie können mit geschlossenen und offenen Systemen durchgeführt werden. Je mehr Sauerstoff im **geschlossenen System** entnommen wird, desto steiler steigt das Spirogramm an. Gleichzeitig wird dem System diejenige Menge an Sauerstoff wieder zugeführt, die akut verbraucht worden ist. Die Ausatemluft wird nach Absorption des Kohlendioxids z. B. mittels Natronkalk zum Probanden zurückgeleitet.

Beim **offenen System** sind die Wege von Ein- und Ausatemluft getrennt. Inspiratorisch wird Außenluft zugeführt. Auf der Expirationsseite werden das Volumen der Ausatemluft sowie deren  $O_2$ - und  $CO_2$ -Fraktionen bestimmt. Aus diesen Messgrößen lassen sich die  $O_2$ -Aufnahme und die  $CO_2$ -Abgabe berechnen. Dabei kann mit diskontinuierlichen, chemischen Absorptionsverfahren oder mit kontinuierlich messenden Gasanalysatoren gearbeitet werden. Um unter verschiedenen Bedingungen gemessene **Atemvolumina** vergleichbar zu machen, müssen die Gasvolumina auf Standardbedingungen umgerechnet werden. Im Fall der **Atemluft** handelt es sich um den BTPS, das heißt *body temperature pressure saturated*. Die Temperatur wird dabei mit 37 °C festgesetzt, entsprechend der Körpertemperatur im Alveolarraum, der Druck mit 760 mm Hg, entsprechend dem Luftdruck auf Meereshöhe, die Wasserdampfsättigung mit 100 %, entsprechend den Bedingungen im Alveolarraum. Computerisierte Spirometriegeräte nehmen diese Umrechnung meistens automatisch vor.

Bei den **Atemgasen**  $O_2$  und  $CO_2$  wird ein anderer Standard verwendet, STPD, das heißt *standard temperature pressure dry*. Die Temperatur wird mit 0 °C angenommen, der Druck mit 760 mm Hg und die Wasserdampfsättigung mit 0 %.

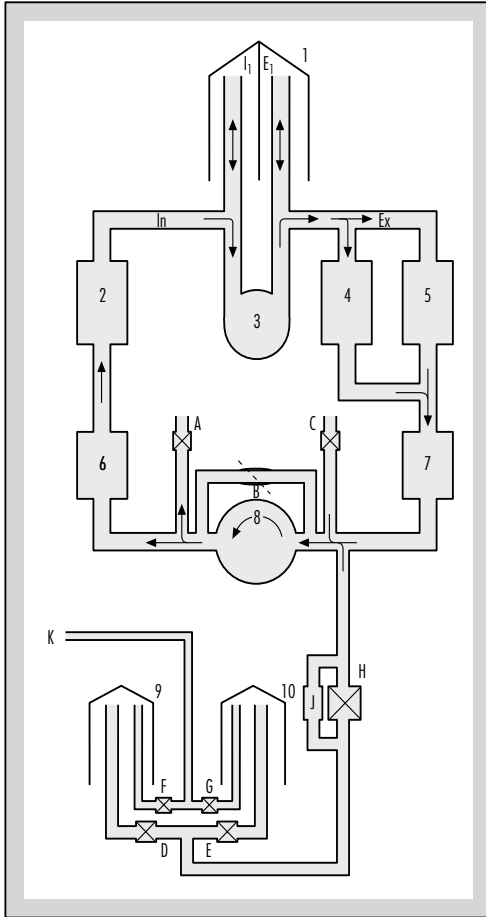


Abb. 1-19a Schaltplan eines großen Spirographen nach Knipping, „Magna-Test 710“ der Firma Meditron. 1 = Atemdoppelglocke, I = inspirativer Teil, E = expirativer Teil; 2 = Befeuchter; 3 = Patientengefuge; 4 und 5 = Absorber; 6 = Kühler; 7 = Strömungsmesser; 8 = Gebläse; 9 und 10 = Sauerstoffglocken (je 9 l Sauerstoff enthaltend); A = Ausblasventil; B = Lüftungsventil; C = Ansaugventil; D und E = O<sub>2</sub>-Einlassventile; F und G = O<sub>2</sub>-Auslassventile; H = O<sub>2</sub>-Regelventil; J = Handregler; K = Anschluss an O<sub>2</sub>-Flasche.

## Methodisches zum Spirographensystem nach Knipping

Bei dem Spirographensystem nach Knipping handelt es sich um einen **Gasstoffwechselapparat mit geschlossenem, ventilfreiem Kreislauf**. Er besteht aus dem Spirometer, einer Turbine

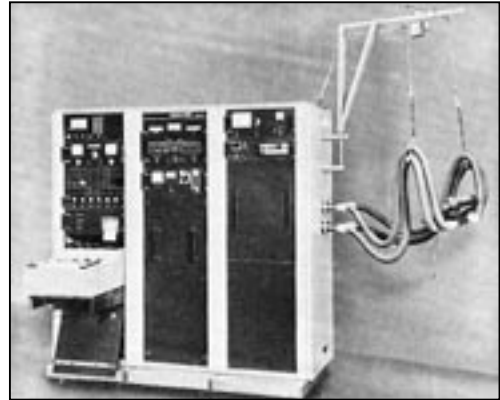


Abb. 1-19b Spirograph mit geschlossenem System „Magna-Test, Typ 710“ der Firma Meditron, Hamburg

bzw. einem Exhauster, einem CO<sub>2</sub>-Absorber und einer Gesichtsmaske für den Anschluss des Patienten. Beweglich für Volumenänderungen ist lediglich die durch Sperrwasser abgedichtete Spirometerglocke. Sie überträgt jede Volumenänderung mittels Glaskapillarschreiber auf geeichtes Registrierpapier, welches auf einem Wechsellaufkymographen in wählbaren Tempi abläuft. Die Pumpe sorgt für ein dauerndes Zirkulieren der im System befindlichen Luft. Ein Strömungsmesser zeigt die Strömungsgeschwindigkeit in l · min<sup>-1</sup> an. Sie lässt sich entsprechend der Belastungshöhe bis auf 600 l · min<sup>-1</sup> steigern. Der Luftdruck im System entspricht den Außenluftverhältnissen. Er wird durch ein Druckausgleichsventil kontrolliert. Zur Konstanthaltung der Lufttemperatur sind automatisch arbeitende Kontaktthermometer und Kühlvorrichtungen eingebaut (Abb. 1-19a und b).

Der Patient entnimmt dem geschlossenen System ständig Sauerstoff, was in einem Absinken der Spirometerglocke volumetrisch angezeigt wird. Das ausgeatmete Kohlendioxid wird durch Natronkalk gebunden. Aus dem Anstieg der Atemkurve in der Zeiteinheit auf dem Kymographenpapier ergibt sich die O<sub>2</sub>-Aufnahme in Milliliter.

Die Einschaltung eines Sauerstoffstabilisators ermöglicht eine absolute Konstanz des O<sub>2</sub>-Gehalts in der Systemluft. Dies wird durch eine

fortlaufende, regulierbare  $O_2$ -Zufuhr parallel zum  $O_2$ -Verbrauch bei gleichzeitiger Entnahme volumetrisch gleicher Mengen Systemluft mittels zweier untereinander verbundener Glocken erreicht, deren Durchmesser und Inhalt dem der Spirometerglocke entsprechen.

Um innerhalb kürzester Zeit die Gaszusammensetzung im Kreislaufsystem von Außenluftverhältnissen auf  $O_2$ -Atmung und umgekehrt verändern zu können, wird hinter einem geschlossenen Schott bei laufender Pumpe Sauerstoff eingeblasen. Nach 2- bis 3-maligem Durchspülen des Systems befindet sich nahezu reiner Sauerstoff im System. Bei der Umschaltung von  $O_2$ -Atmung auf Luftatmung herrschen nach etwa 6-maligem Durchwaschen wieder Außenluftverhältnisse im Spirographensystem. Zur dosierten Erhöhung des  $O_2$ -Gehalts in der Systemluft z. B. im *steady state* einer Belastung oder auch in Körperruhe ist ein so genanntes „Balance-Gefäß“ in das System einschaltbar, in welchem sich Sauerstoff befindet, sodass man ein Gasgemisch mit einem  $O_2$ -Gehalt von 60 Vol.-% erhält durch einfaches Umlegen eines Hebels.

Der Anschluss des Patienten erfolgt mit einer **Plexiglas-Gesichtsmaske** (Abb. 1-20). Pendelatmung und Totraumatemung werden durch eingebaute Strömungsrichtungslamellen sicher vermieden. Da keine Atemventile benötigt werden, verläuft die Atmung völlig ungehindert. Zusatzgeräte stabilisieren neben der Temperatur die Wasserdampfspannung.

## Computerisierte Spiroergometrie

Fortschritte in der Technologie führten in den letzten 3 bis 4 Jahrzehnten zur Automatisierung der Atemgasanalysen. Die offenen Systeme haben Spirographen weitgehend verdrängt, obwohl mit der alten Spirographentechnik eine unvergleichliche Präzision in der Bestimmung der Atemgase sowie eine einfache Wartung verbunden war. Die computerisierte Spiroergometrie wird vielfach *cardiopulmonary exercise testing* (CPX) genannt.

**Prinzipielle Bestandteile** der computerisierten Spiroergometrieanlage sind das Ergometer,



Abb. 1-20 Die Vollsichtmaske der Firma Dargatz, entwickelt in der Medizinischen Universitätsklinik Köln. Durch mehrere technische Einrichtungen konnte jede Rückatmung zuverlässig vermieden werden, selbst in höchsten Belastungsstufen mit größten Atemminutenvolumina.

der Flussmesser, der  $O_2$ -Analysator, der  $CO_2$ -Analysator, die Rechneinheit und der Drucker (Abb. 1-21). Das Ergometer ist computergesteuert mit der Spiroergometrieanlage verbunden. Hierdurch wird in Abhängigkeit von dem jeweilig eingegebenen Programm als Untersuchungsprotokoll sowohl die Wattzahl berücksichtigt als auch über das EKG die Herzfrequenz und über eine automatisierte Blutdruck-Messanlage der Blutdruck. Ein Pneumotachograph registriert den Luftfluss. Die Flussmesser können nach folgenden 3 unterschiedlichen Messprinzipien arbeiten:

- **Lamellenspirozeptor** (nach Fleisch): Hierbei wird ein laminarer Luftstrom durch die Lamellen erzeugt. Die Luftströmung bewirkt im Lamellenspirozeptor einen der Strömung