

Historische Aspekte zu Belastungsuntersuchungen, speziell zur Spiroergometrie¹

Historical Aspects on CPET (Cardio Pulmonary Exercise Testing)

Autoren

R. F. Kroidl, S. Schwarz, B. Lehnigk

Institut

ehemals: Herz-Lungen Praxis Stade

Bibliografie

DOI 10.1055/s-2006-944315
Pneumologie 2007; 61: 291–294
© Georg Thieme Verlag KG
Stuttgart · New York
ISSN 0934-8387

Korrespondenzadresse

Dr. Rolf F. Kroidl
Frommholdstr. 71
21680 Stade
rolf.kroidl@t-online.de

Die ersten Schritte in Richtung einer Belastungs-Physiologie liegen im Dunkeln. Es ist jedoch zu vermuten, dass zwei gesellschaftliche Entwicklungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts hierbei beteiligt waren: Zum einen die Arbeitswelt mit ihren vielfältigen körperlichen Anforderungen, zum anderen die damals in ersten Ansätzen verfügbare Freizeit mit Zuwendung zur Körperertüchtigung (Sport). Jetzt, hundert Jahre später, besteht Einvernehmen: Belastungsuntersuchungen bieten in Praxis und Klinik wichtige Informationen zur Erweiterung diagnostischer Erkenntnis, sie ermöglichen präventive und/oder therapeutische Folgerungen. In der Arbeitsmedizin (Begutachtungen), in der Sport- und Rehabilitations-Medizin sind Belastungsteste unverzichtbare Grundlage für eine fundierte Beratung und Beurteilung.

Man benutzt in der Spiroergometrie das Ergebnis der Gedankenwelt aus Generationen-überschreitenden Forschungen in Physiologie, Biochemie und Klinik, verbunden mit den Möglichkeiten, die Physik und Ingenieurskunst zusammen mit der Entwicklung der Computertechnik zur Verfügung stellen. Diese „Werkzeuge“ und diese Methoden sind heute selbstverständlich. Ein kurzer Rückblick mag jedoch helfen und darauf aufmerksam machen, wie sich unser jetziges Wissen entwickelt hat und dass es sicherlich auch weiterhin der Entwicklung und Veränderung unterworfen bleiben wird.

Die folgenden Informationen beruhen im Wesentlichen auf verschiedenen Quellen:

der Beitrag von Hollmann und Valentin in der MMW 1980, Hollmanns Bericht zur Gründung des Institutes für Kreislaufforschung und Sportmedizin (Deutsche Sporthochschule in Zusammenarbeit mit der Medizinischen Universitätsklinik Köln) und Hollmanns Nachruf zum Tode von H. W. Knipping 1985.

Persönliche Mitteilungen aus einer Korrespondenz mit Karlman Wasserman vom Früh-

jahr 2006 sowie dessen Beitrag im AJRRCM 2002.

Ergänzungen von Joh. Dietrich Meyer-Erkelenz, ehemals Aachen.

Lesern, die sich tiefer mit der Historie zur Ergometrie beschäftigen wollen, sei die wissenschaftliche Hinterlassenschaft von E. Jokl empfohlen. Prof. Dr. med. Dr. h. c. Ernst Jokl (geboren 1907 in Breslau, verstorben 1997 in den USA) war ein international anerkannter Sportmediziner und mehrfach ausgezeichnete Sportwissenschaftler, der als Jude 1933 Deutschland verlassen musste. Seine Erben haben den wissenschaftlichen Nachlass 1998 der Deutschen Sporthochschule in Köln übergeben.

Das erste Fahrradergometer der Welt ist vermutlich von dem Franzosen Bouny 1896 in Paris entwickelt worden. Im Jahre 1954 existierten laut Auskunft des Max-Planck-Instituts für Arbeitsphysiologie in Dortmund 14 Fahrradergometer in Deutschland, von denen acht im dortigen Institut experimentellen Zwecken dienten. In der Kölner Medizinischen Universitätsklinik (H. W. Knipping) bediente man sich einer im Stehen verrichteten Drehkurbelarbeit, welche an einem 380 kg schweren Wirbelstromergometer durchgeführt wurde.

Historische Entwicklung in Deutschland (die Schule von H. W. Knipping, Med. Uniklinik Köln)

Hugo Wilhelm Knipping (1895–1984) arbeitete in den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts in Hamburg bei Ludolph Brauer. Dort entwickelte er bereits 1924 einen Spirographen zur Grundumsatz-Bestimmung. Als Lehrstuhlinhaber in Düsseldorf

¹ Dieser Beitrag ist eine überarbeitete und erweiterte Version des historischen Artikels im „Kursbuch Spiroergometrie“ von Kroidl/Schwarz/Lehnigk. Georg Thieme Verlag, 2006.

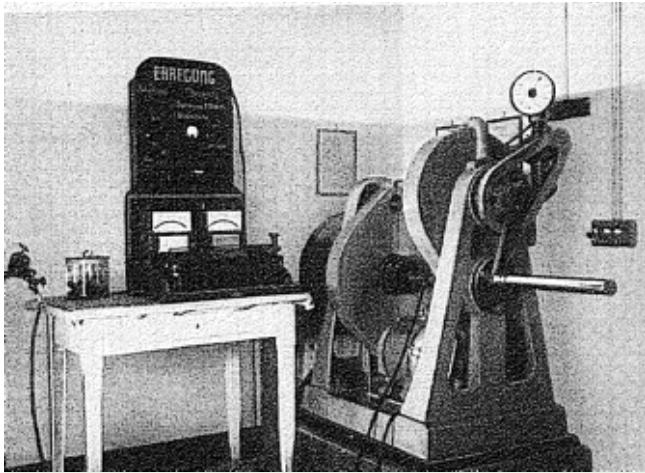


Abb. 1 (aus H. W. Knipping, Über die Funktionsprüfung von Atmung und Kreislauf. Beitr. Klin. Tbk. (1936) 88: 503–518.)

Ergograph, Arbeitswerte von 30 Watt an werden während der Untersuchung ohne Versuchsunterbrechung stufenweise gesteigert, unter Umständen bis 500 Watt und mehr. Das gewünschte Arbeitsmaß wird links an den Widerständen eingestellt und die geleistete Arbeitsmenge unmittelbar abgelesen. Das Trägheitsmoment ist durch große Metallscheiben erhöht. Der Tourenzähler ist über der Drehkurbel sichtbar.

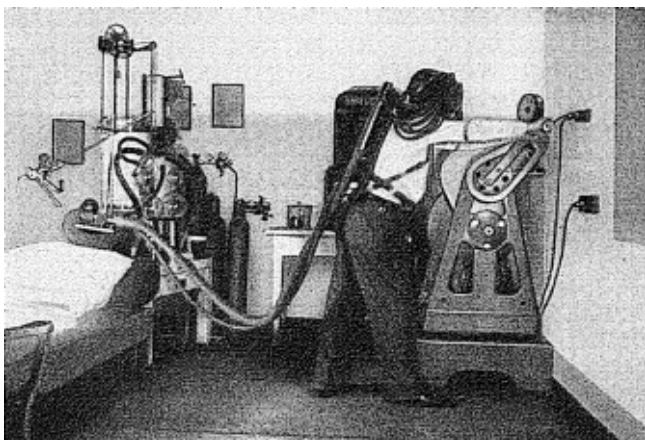


Abb. 2 (aus H. W. Knipping, Über die Funktionsprüfung von Atmung und Kreislauf. Beitr. Klin. Tbk. (1936) 88: 503–518.)

Links die spiographische Apparatur. Die Leitungen zum Patient sind verlängert, und der Patient kann sich frei bewegen. Der Patient ist nicht durch ein Mundstück, sondern durch eine große, weiche Zelluloidmaske angeschlossen. Der Patient arbeitet am Ergographen, Drehkurbelarbeit (siehe **Abb. 1**).

(ab 1934) und Ordinarius für Innere Medizin in Köln (ab 1939) war er wegweisend in der Kardiologie, der Nuklearmedizin (sog. Isotopenthorakographie) und der Sportmedizin. Seine klinische Vision, die Innere Medizin (namentlich Kardiologie und Pneumologie) mit der Sportmedizin zu verknüpfen, äußerte sich in einer Aussage aus der Mitte der 50er Jahre, die hochaktuell auch Thema unserer jetzigen Erörterungen ist: „... Es ist sehr gut möglich, dass wir durch Bewegungstherapie und Sport mehr an Verbesserungen der Herzmuskeldurchblutung, Bildung von Anastomosen usw. erreichen als durch manche gepriesenen operativen oder medikamentösen Verfahren“.

Etwa ab 1924 und 1929 (H. W. Knipping und L. Brauer in Hamburg) beschäftigten sich Kliniker und Physiologen vermehrt mit dem Gasstoffwechsel in Ruhe und unter Belastung, wobei ein

Handkurbelergometer zusammen mit einem Spirographen (**Abb. 1** u. **2**) die ersten Messungen im Sinne einer Spiroergometrie ermöglichten (Knipping, 1929).

Als Kontrast und als Beleg der technischen Weiterentwicklung sei ein modernes tragbares Gerät zur Erfassung spiroergometrischer Daten abgebildet (**Abb. 3**).

Die technische Entwicklung lief parallel zur physiologischen Erkenntnis. Die folgenden damals erarbeiteten und geprägten (historischen) Begriffe sind uns weniger vertraut, beinhalten aber für uns weiterhin höchst relevante und entscheidende physiologische Eckpunkte:

Vita maxima heute: Maximale O₂-Aufnahme (V'O₂max bzw. V'O₂peak)

Vita minima heute: O₂-Aufnahme in völliger Ruhe (Grundumsatz)

Leistungsteste nach dem „Prinzip der kleinen Wattstufen“ heute: am ehesten Rampenprotokoll

Atemgrenzwert heute: MVV (maximal voluntary ventilation).

Begriffe, die auch jetzt noch – allerdings meist mit anglosächsischer Nomenklatur – verwandt werden, wurden gleichfalls in den 30er-Jahren des letzten Jahrhunderts erarbeitet:

Atemreserve (1929)

Atemäquivalent (1932)

Respiratorische Ruheinsuffizienz und Belastungsinsuffizienz (1937)

Spirographisches O₂-Defizit (1937)

Nach dem Kriege (Ende der 40er und 50er Jahre) vertiefte sich die technische Zusammenarbeit der Kliniker und Physiologen mit der Hamburger Firma A. Dargatz. Die Ergometer-Technik wurde optimiert und Messsysteme zur Erfassung hoher Leistungen (3 L, später 5 L V'O₂) wurden in der Deutschen Sporthochschule in Köln installiert. Die so gewonnene Erkenntnis aus der Sportmedizin führte zur Beschreibung der Beziehung von Ventilation und O₂-Aufnahme und des Laktat-Stoffwechsels. Ein Be-



Abb. 3 Fortschritte in der Messtechnik und der Datenübertragung (Telemetrie) ermöglichen immer kleinere und handlichere Geräte. Tragbare Messeinrichtungen werden in der Sportmedizin verwendet. Hier ist der Einsatz bei der DHS (Deutsche Sporthochschule) in Köln abgebildet. Abbildung J. Latsch, Köln.

griff, der heute im Zentrum unserer Aufmerksamkeit steht, wurde seinerzeit als „**PoW**“ = Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung geprägt; wir sprechen heute von der **AT** (anaerobic threshold = aerob-anaerobe Schwelle).

Die „Ausdauergränze“ oder die „O₂-Dauerleistungsgrenze“ (Hollmann 1960 ff) sind ja nicht nur Begrifflichkeiten, sondern auch tiefgehende physiologische Konzepte, die damals erarbeitet wurden. Ab 1962 kamen Erkenntnisse aus Muskelbiopsien hinzu.

Entwicklung der Messtechnik

Heute stehen Gas-Analysatoren zur Verfügung, die mit einer Analysezeit von 90 msek sozusagen unermüdlich, genau, reproduzierbar in quasi Echtzeit mit Messwerten versorgen. Damit ist eine Erfassung physiologischer Daten Atemzug für Atemzug (breath by breath) möglich. Zusammen mit den Daten aus dem Kreislauf (Puls, EKG, Blutdruck) und der Ventilation (Atemminutenvolumen [AMV], Atemtiefe [VT] und Atemfrequenz [AF]) kommt über 12 – 15 Minuten eine sehr große Datenmenge zusammen, die ohne sinnvolle und grafische Aufbereitung nicht fassbar und beurteilbar wäre. Dies wurde erst durch die Verfügbarkeit schneller Computer mit schnellen Farbdruckern ermöglicht.

Atemgasanalyse

John Scott Haldane (geboren 1860 in Edinburgh; gestorben 1936 in Oxford) entwickelte um 1912 eine Analysetechnik zur Messung von Gasen in der Luft. Die Analytik war sehr exakt, benötigte aber große Probenmengen, ein hochqualifiziertes Laborteam und reichlich Zeit.

Per Fredrik Scholander (geboren 1905 in Schweden, gestorben 1980 in Kalifornien) veröffentlichte 1947 eine Verbesserung der Analytik („*Analyzer for Accurate Estimation of Respiratory Gases in One-half Cubic Centimeter Samples*“). In kurzer Zeit (5 – 10 Minuten) konnte nun an kleinen Proben die Gasanalyse durchgeführt werden.

Blutgasanalyse (BGA)

Donald D. Van Slyke (1883 – 1971, Biochemiker, New York) entwickelte 1924 ein Gerät zur volumetrischen und manometrischen Analyse der Blutgase (O₂, CO₂, N₂) nach deren Freisetzung durch Unterdruck, Umwandlung von Hämoglobin in Methämoglobin (Ferricyanid-Lösung) und CO₂-Absorption (NaOH, Natriumhyposulfit-Lösung). Ein Analysengang dauerte etwa 20 min, so dass mit allen Verrichtungen eine arterielle und venöse Blutgasanalyse erst 40 bis 50 Minuten nach der Entnahme zur Verfügung stand.

Blutgasbestimmungen nach van Slyke waren in der Forschung noch bis 1970 die Standardmethode zur Bestimmung von O₂ und CO₂.

Poul B. Astrup (geboren 1915 in Kopenhagen, gestorben 2000, Physiologe) eröffnete 1956 die breite klinische Anwendung der Blutgasanalyse über eine Mikromethode zur Bestimmung des pH und des Kohlendioxids im Arterien- u. Kapillarblut (Ermittlung weiterer Säure-Basen-Messgrößen mittels Henderson-Has-

selbach-Gleichung oder aus einem Nomogramm, Firma Radiometer).

Die skandinavische Schule hat in den 50er und 60er Jahren wesentlich zur Weiterentwicklung der Spiroergometrie beigetragen; zu nennen sind unter anderen I. und P. O. Åstrand, A. Holmgren und K. Rodahl. Hier wurden entscheidende Arbeiten zur Methodik und zur Erstellung von Sollwert-Kollektiven geleistet.

Karlman Wasserman (USA) und seine Schule

Karlman Wasserman (K. W.) aus Torrance, Kalifornien, hat die aktuelle internationale Spiroergometrie-Szene maßgebend geprägt. K. W. graduierte zunächst an der Tulane Universität in New Orleans in Physiologie (1949) und studierte ab 1951 Medizin. Während des Internships an der Johns Hopkins Universität in Baltimore bekam er 1959 das Angebot, als Fellow bei Dr. Julius Comroe in San Franzisko (UCSF) zu arbeiten. Der „Absprung“ in die Exercise Physiology datiert zum November 1960. Dr. Comroe war damals daran interessiert, epidemiologische Daten zur Prävalenz von Herzerkrankungen zu erhalten, und man suchte nach einer Methode, diese Patienten mittels einfacher und nicht-invasiver Methoden in einem frühen (vorklinischen) Stadium zu identifizieren. K. W. schlug vor, als Vergleichs- und Messpunkt die V'O₂ zu betrachten, bei der sich ein Überschuss an Laktat einstellte. Dies könne man ja einfach und nicht-invasiv über den Anstieg der Ventilation sekundär dem Anfluten von HCO₃ erkennen, also zum Zeitpunkt der jetzt so benannten anaeroben Schwelle (AT).

K. W. hatte damals nicht die Arbeiten von W. Hollmann aus den späten 50er-Jahren gekannt, so dass analoge Forschungen etwa zu gleichen Zeit dies- und jenseits des Atlantiks durchgeführt wurden.

Im Rahmen dieser Überlegungen entwickelte K. W. seinerzeit auch das bekannte Konzept der drei in einander greifenden Zahnräder als Metapher für die Interaktion von Ventilation, Zirkulation und Stoffwechsel. 1961 wechselte er nach Stanford (nahe San Franzisko), wo ihm 1964 der erste Computer für seine Arbeiten zur Verfügung gestellt wurde. Der Zufall und das Glück brachten es mit sich, dass K. W. 1965 einen jungen graduierten Physiker namens William L. Beaver in Stanford traf, der ihm kongenial half, Physik und Physiologie für die Forschung zu vereinen. Man arbeitete an der breath-by-breath-Methode (1973) und beschrieb 1986 gemeinsam die V-slope-Methode.

Entwicklung der 9-Felder Grafik (9-FG)

Die 9-FG ist ein international akzeptierter Standard zur Dokumentation und Analyse der Vielzahl über eine Belastungsdauer von ca. 10–15 Minuten erhobenen physiologischen Werte. Atemzug für Atemzug erhobene Parameter zur Kreislauf- und zur Atemregulation werden hier – jetzt mit schnellen Rechnern und Farbdruckern – nicht nur tabellarisch, sondern vor allem graphisch aufgezeichnet. Dies ermöglicht eine visuelle, synoptische Interpretation, ähnlich wie wir dies vom EKG her kennen.

● **Abb. 4** zeigt als Beispiel die 9-FG eines Patienten mit Lungen- und Herzsarkoidose (zu weiteren Informationen sei auf das *Kursbuch Spiroergometrie* [Thieme Verlag] verwiesen).

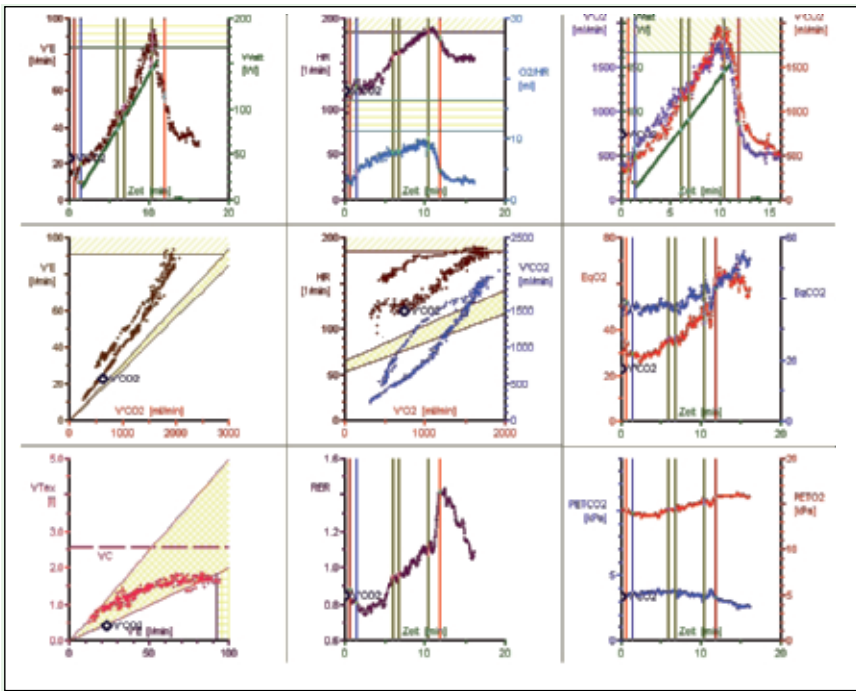


Abb. 4 (9-Felder-Grafik nach K. Wasserman) 26-jähriger Mann mit starker Leistungsschwäche. Diese wurde zunächst (fälschlich) als Kooperationsmangel gedeutet. Die synoptische Betrachtung der 9-FG zeigt sofort, dass eine sehr gute Kooperation vorlag und die Limitierung sowohl ventilatorisch wie auch kardiozirkulatorisch begründet ist. Die Diagnose einer Sarkoidose mit Beteiligung von Herz und Lunge wurde gestellt. (Weitere Hinweise siehe Kursbuch Spiroergometrie)

Wie kam es zur Entwicklung dieser Darstellungsart?

Um 1978 wurde K. W. von den staatlichen Arbeitsbehörden (US Department of Labor) gefragt, auf welchem Wege man am besten ca. 1000 Asbest-exponierte Werftarbeiter untersuchen und screenen könnte. Zusammen mit James Hansen machte sich K. W. an die Arbeit und stellte bald fest, dass die Auswertung endloser Zahlenreihen und Tabellen unpraktisch und ermüdend war. Man begann – der Not gehorchend – die Vielzahl der Messdaten in Grafiken darzustellen. Man wollte nicht mehr als eine Seite dazu verwenden und landete – über Versuch und Irrtum – bei der jetzigen Form der 9-Felder-Grafik (9-FG). Als „Nebenprodukt“ dieser Arbeiten ergaben sich auch die bekannten Algorithmen zu den Normalwerten, wobei der kritische Anwender das damalige Ursprungskollektiv der Werftarbeiter Kaliforniens im Vergleich zu dem eigenen Kollektiv im Auge hat.

Spiroergometrie, derzeit in Deutschland

Die Spiroergometrie mit allen ihren wissenschaftlichen und technischen Facetten hat – wie dargestellt – auch deutsche Wurzeln. Insbesondere hat die Sportmedizin (W. Hollmann und seine Schule in Köln, basierend auf den Vorgaben von H. W. Knipping) entscheidend dazu beigetragen. Eine Standardisierung der Spiroergometrie wurde bei internationalen Symposien der RWTH Aachen (Meyer-Erkelenz) erarbeitet und 1980 publiziert. Die Arbeitsgruppe von H. Matthis in Freiburg hat in den 70er Jahren Leistungsuntersuchungen in großen Höhen (bis 4000 Meter) durchgeführt, 1980 wurden von ihr Ergebnisse von Sollwertuntersuchungen veröffentlicht. Dennoch war die Anwendung dieser Methodik in pneumologischen und kardiologischen Kliniken und Praxen, in der Arbeits- und der Rehabilitations-Medizin lange Zeit zögerlich. Dies war sicher auch der vormalig doch recht anspruchsvollen Technik geschuldet. Mit dem Einzug schneller Analysatoren, der Verbreitung eines sehr einleuchten-

den Auswertesystems (9-FG nach K. W.), der Computer-unterstützten Datenaufbereitung und der farbigen Darstellung der Grafiken mit schnellen Druckern hat sich daran Entscheidendes geändert. Aus der Kardiologie kamen zu Beginn der 90er Jahre wichtige Impulse über zwei so genannte „CPX-Symposia“ in Köln. Diese eröffneten auch hilfreiche Kontakte zu K. W. und seiner Arbeitsgruppe.

Unter anderem hat seit 1989 die *Spiroergometrie-Arbeitsgruppe*² Kräfte gebündelt und – über fruchtbare und freundschaftliche Kontakte zwischen pneumologisch und kardiologisch tätigen Kollegen – ein sehr lebhaftes Diskussionsforum geschaffen.

Auf Initiative von Karlman Wasserman etabliert sich derzeit eine internationale Arbeitsgruppe, genannt *ISEIRE* (International Society of Exercise Intolerance Research and Education). Die Spiroergometrie-Arbeitsgruppe mit Einbindung in die Deutsche Gesellschaft für Pneumologie (DGP) und die Deutsche Gesellschaft für Kardiologie (DGK) wird als „German Chapter“ dabei mitwirken.

Literatur

- 1 Knipping HW. Über die Funktionsprüfung von Atmung und Kreislauf. Beitr Klin Tbk 1936; 88: 503 – 518
- 2 Matthis H. Atmung und Kreislauf. In: Hartmann G (Hrsg.). Alpiner Hochleistungstest 1969. Bern: Hans Huber, 1973: 81 – 93
- 3 Rühle KH, Fischer J, Matthis H. Sollwerte kardiopulmonaler Messgrößen in Ruhe und unter Belastung zur Anwendung für Kleincomputer. Atemwegs- u. Lungenkrkh 1980; 6: 90 – 94
- 4 Meyer-Erkelenz JD, Mosges RW, Sieverts H. Cardiopulmonary function under load. Report of the results of the 1979 colloquium in Aachen. Prax Klin Pneumol 1980; 34: 585 – 560
- 5 Hollmann W, Valentin H. 50 Jahre Spiroergometrie 1929 bis 1979. Münch med Wschr 1980; 5: 169 – 174
- 6 Wasserman K. Series “How it Really Happened”. Am J Respir Crit Care Med 2002; 165: 325 – 326
- 7 Kroidl RF, Schwarz S, Lehnigk B. Kursbuch Spiroergometrie. Georg Thieme Verlag, 2006

² Kontakt zur Spiroergometrie-Arbeitsgruppe über www.spiroergo-ag.de