

Inhaltsverzeichnis

I	Grundkurs			
1	Klinischer Einsatz und Nutzen der Spiroergometrie	18		
1.1	Einst und jetzt: Empirie versus Messtechnik	18	1.3 Indikation, Fragestellung, Einflussfaktoren, Risiken	20
1.2	Welche Informationen liefert die Spiroergometrie?.....	19	1.4 Zuverlässigkeit der Messwerte.....	23
1.2.1	Information für den Laien	19	1.5 Spiroergometrie im Soll und Haben ...	24
1.2.2	Information für den Kollegen	19	1.5.1 Liquidation	24
1.2.3	Information für einen (pneumologischen/ kardiologischen) Fachkollegen	20	1.6 Spiroergometrie liefert ein komplexes Bild	26
2	Technische und formale Grundlagen.....	27		
2.1	Gerätekunde.....	27	2.4 Portable Spiroergometrie – Einsatz in der Sport- und Arbeitsmedizin.....	54
2.1.1	Originäre Werte – abgeleitete Werte	27	2.4.1 Technischer Entwicklungsstand	54
2.1.2	Atemgase – Sensorik von O ₂ und CO ₂	27	2.4.2 Anwendungsbereiche	55
2.1.3	(Atem-)Fluss und (Atem-)Volumen	30	2.4.3 Belastungsprotokolle für die mobile Spiroergometrie	55
2.1.4	Probenschlauch (Sample Line) und andere „Kleinigkeiten“	31	2.4.4 Limitationen.....	58
2.1.5	Datenflut und Mitteilung der Werte	32	2.4.5 Erfahrungsbericht: Mobile Spiro- ergometrie in der Arbeitsmedizin	59
2.1.6	Standardisierung der Aufzeichnung.....	33	2.5 Sollwerte.....	59
2.1.7	Formale Aspekte der 9-Felder-Grafik (9-FG) – konventionelle und „neue“ Darstellung der 9 Felder	34	2.5.1 Allgemeines	59
2.1.8	Kalibration und Eichung, Validierung und Qualitätskontrolle	34	2.5.2 Normwerte der Leistung in Watt	60
2.1.9	Speicherung der Daten und Kommunikation mit Kollegen.....	35	2.5.3 Normwerte der maximalen O₂-Aufnahme	61
			2.5.4 Formeln zur Errechnung der Soll-Watt- Belastung	62
2.2	Messparameter	35	2.6 „Navigationshilfe“ und Systematik der Auswertung für die 9-Felder-Grafik	62
2.2.1	Basisgrößen und abgeleitete Größen	36	2.6.1 Aufbau der 9-Felder-Grafik und Übersicht	63
2.2.2	Zusammengesetzte Größen	37	2.6.2 Systematik der Auswertung, Vorgehen und Reihenfolge	66
2.2.3	Luftdruck / Barometerdruck: „Historie“...	37	2.7 Praxis im Funktionslabor: Ratgeber für Ärzte und Assistenzpersonal	71
2.2.4	Anhang „Zweierlei Maß“	38	2.7.1 Vorbereitung des Geräts	71
2.2.5	Begriffe und Definitionen (Glossar)	38	2.7.2 Vorbereitung des Patienten	72
2.2.6	Darstellung weiterer Messwerte und abgeleiteter Größen, die bei der Spiroergometrie Anwendung finden (eine Übersicht).....	39	2.7.3 Zeitfenster und zeitlicher Ablauf	73
			2.7.4 Klinische Beobachtung und Quantifi- zierung von Luftnot und Erschöpfung (Borg-Skala)	75
2.3	O₂-Aufnahme und Belastungsprotokolle	42	2.7.5 Spirometrikriterien einer akzeptablen Durchführung	78
2.3.1	O ₂ -Aufnahme	42	2.7.6 Blutgasanalyse und Spiroergometrie	79
2.3.2	Abschätzung der O ₂ -Aufnahme in Ruhe und unter Belastung	44	2.7.7 Überprüfung der vorliegenden Messung auf Qualität und Plausibilität	81
2.3.3	Wirkungsgrad bei ergometrischen Belastungen	44		
2.3.4	Soll-Leistung bzw. Soll-VO ₂ (in Watt und VO ₂) bei Übergewicht	45		
2.3.5	Belastungsprotokolle	46		

3	Physiologische Grundlagen (Rekapitulation ausgewählter Themen)	84			
3.1	Physiologie und Pathophysiologie der pulmonalen Adaptation.....	84	3.5.4	Ventilatorische Schwellen (VT 1, VT2) (physiologische Basis).....	138
3.1.1	Weg des O ₂ „von der Nase zum Mitochondrium“ – Modell der 3 Zahnräder ...	84	3.6	Spiroergometrische Bestimmung der aerob-anaeroben Schwelle (VT 1 und VT 2)	141
3.2	Exkurs in die Atemphysiologie und Lungenfunktionsdiagnostik	89	3.6.1	Definitionen und Übersicht.....	141
3.2.1	Ventilation und Atemmechanik	89	3.6.2	Warum ist die Bestimmung der VT 1 und VT 2 wichtig?.....	142
3.2.2	Diffusion.....	98	3.6.3	Wie werden VT 1 und VT 2 bestimmt?.....	142
3.2.3	Mismatch, Ventilations-Perfusions-Verhältnis.....	101	3.6.4	Theorie und Praxis	145
3.2.4	O ₂ -Transport.....	102	3.6.5	Zusammenfassung zur aerob-anaeroben Schwelle	147
3.2.5	Blutgasanalyse und Spiroergometrie	108			
3.3	Physiologie und Pathophysiologie der muskulären Adaptation.....	111	3.7	Sauerstofftransport (V̄O₂) und Spiroergometrie-Würfel.....	149
3.3.1	Allgemeine Muskelphysiologie	111		Alfred Hager	
3.3.2	Spiroergometrie und Muskulatur	111	3.7.1	Energie- und Sauerstoffspeicher.....	149
3.3.3	Periphere Muskulatur	112	3.7.2	Sauerstoffaufnahme	149
3.3.4	Muskelfasern	113	3.7.3	Sauerstoffpuls	152
			3.7.4	Herzarbeit, Herzleistung, Kreislaufarbeit, Kreislaufleistung	152
3.4	Physiologie und Pathophysiologie der kardiozirkulatorischen Adaptation	114			
3.4.1	Physiologie und Pathophysiologie der Kardiozirkulation	114	3.8	Pathophysiologie der Dyspnoe	154
3.4.2	Pathophysiologie der Herzinsuffizienz: Aspekte zur Spiroergometrie.	121	3.8.1	Einleitung und Versuch einer Definition ..	154
			3.8.2	Language of Breathlessness	154
			3.8.3	Modell der Wahrnehmung und Verarbeitung von Dyspnoe	155
3.5	Stoffwechsel – Energiebereitstellung	133	3.8.4	Dyspnoe im Kontext kardiopulmonaler Erkrankungen	157
3.5.1	Begriffe: RER – R – RQ – innere und äußere Atmung	133	3.8.5	Dyspnoe im Spiegel der Spiroergometrie ..	158
3.5.2	Energiegewinnung	133			
3.5.3	RER unter Belastung	137			

II Aufbaukurs

4	9-Felder-Grafiken nach Wasserman	166			
4.1	9-Felder-Grafik (9-FG) nach Wasserman – klassische und „neue“ Version (2013).....	166	4.4	9-Felder-Grafik: Felder zur Ventilation	190
			4.4.1	Ventilatorische Felder im Überblick	190
4.2	Aufbau der 9-Felder-Grafik und Einführung	167	4.4.2	Feld 1: V̄E – Rampe – (BR)	191
			4.4.3	Feld 7: VT – V̄E – BF– Isoplethen – BR	195
4.3	9-Felder-Grafik: Felder zur Zirkulation und Leistung	170	4.5	9-Felder-Grafik: Felder zur Atemeffizienz (Atemökonomie) und zum Gasaustausch	198
4.3.1	Kardiozirkulatorische Felder im Überblick	170		Felder zur Atemeffizienz und zum Gasaustausch im Überblick	198
4.3.2	Feld 3: V̄O ₂ – V̄CO ₂ – Rampe – RER.....	172	4.5.1	Atemeffizienz in Feld 4 und Feld 6: V̄E – V̄CO ₂ – Slope – Intercept	199
4.3.3	Feld 2: Herzfrequenz – O ₂ -Puls – Herzfrequenzreserve	178	4.5.2	Feld 4	200
4.3.4	Feld 5: V̄CO ₂ /V̄O ₂ – HR/V̄O ₂ – V-Slope – HR-Korridor	185	4.5.3	Feld 6	202
4.3.5	Feld 8: Respiratory Exchange Rate (RER) – Atemreserve (BR) – Laktatkurve	189	4.5.4	Feld 9: Gasaustausch	204
			4.5.5		

4.6	Spiroergometrie bei Kindern.....	212	4.8.2	Normalbefund	217
	<i>Alfred Hager</i>		4.8.3	Obstruktive Ventilationsstörungen.....	218
4.6.1	Belastungsformen:		4.8.4	Restriktive Ventilationsstörungen	220
	Laufband versus Fahrrad	212	4.8.5	Sonderfälle.....	221
4.6.2	Abbruchkriterien.....	213	4.9	Schemata charakteristischer 9-Felder-Grafiken	223
4.6.3	Besonderheiten in der Auswertung	213	4.9.1	Normalbefund	223
4.6.4	Normwerte Sauerstoffaufnahme.....	213	4.9.2	Lungenfibrose	224
4.7	Befunddokumentation – Standardisierung und Befundmitteilung im Arztbrief	214	4.9.3	COPD und dynamische Überblähung.....	225
4.7.1	Spiroergometriebereicht: Wie, an wen und warum?	214	4.9.4	Linksherzinsuffizienz (NYHA III–IV).....	226
4.7.2	Spiroergometriebereicht: Was sollte er enthalten?.....	215	4.9.5	Pulmonale Hypertonie (PH) und chro- nische thromboembolische pulmonale Hypertonie (CTEPH)	226
4.7.3	Beispiel eines Berichtes	215	4.9.6	Schwere Adipositas mit Hypoventilation..	228
4.7.4	Charakteristika von Sonderfällen (ohne Grafiken).....		4.9.7	Charakteristika von Sonderfällen (ohne Grafiken).....	228
4.8	Atemstrategien	216			
4.8.1	Strömungsbegrenzung und Flussreserve..	216			
5	Spezielle Themen: „Gut zu wissen“				231
5.1	Wie schätze ich die vermutliche Leistungsfähigkeit des Probanden / Patienten ein?		5.4.3	Inertgas-Rückatmungsmethode	267
		231	5.4.4	Spiroergometrische Differenzialdiagnostik – klinischer Informationsmehrwert der Inertgas-Rückatmungsmethode	272
5.1.1	Übersicht	231	5.4.5	Anwendung in der kardiovaskulatorisch- pulmonal-muskulären Differenzial- diagnostik.....	273
5.1.2	Vorgehen in der Praxis.....	232	5.5	Hydraulische Herzleistung (Cardiac Power) und Kreislaufleistung (Circulatory Power)	278
5.2	Spiroergometrie und präoperative Risikoabschätzung	236	5.5.1	Katharina Meyer Circulatory Power, Circulatory Stroke Work und Exercise Cardiac Power	278
5.2.1	Bedeutung	236	5.5.2	Variablen der Herzleistung aus der kombinierten Spiroergometrie und Hämodynamikmessung	279
5.2.2	Risikoeinschätzung vor nicht kardiochirurgischen Eingriffen	236	5.6	Spiroergometrie in der Rehabilitation ..	281
5.2.3	Operationsrisiken bei großer Abdominalchirurgie	242	5.6.1	Allgemeine Gesichtspunkte der Spiro- ergometrie in der Rehabilitation.....	281
5.2.4	Risiken bei lungenresezierenden Eingriffen	242	5.6.2	Einsatz der Spiroergometrie in der Rehabi- litation bei pneumologischen Krankheiten (speziell COPD)	283
5.3	Klinische Anwendung der Spiroero- metrie bei kardialen Krankheitsbildern	251	5.6.3	Training in der Rehabilitation bei Herzinsuffizienz – Die Bedeutung der Spiroergometrie	287
5.3.1	Übersicht	251	5.7	Katharina Meyer Spiroergometrie bei pulmonaler Hypertonie	
5.3.2	Herzinsuffizienz.....	251	5.7.1	Daniel Dumitrescu Pulmonale Hypertonie – ein heterogenes Erkrankungsspektrum	295
5.3.3	Koronare Herzerkrankung	262	5.7.2	Diagnostik	295
5.3.4	Erworbenen Herzkloppenvitien	262			
5.3.5	Komplexe angeborene Herzfehler.....	263			
5.4	Methodik und klinische Anwendung der Inertgas-Rückatmungsmethode ..	266			
	<i>Katharina Meyer</i>				
5.4.1	Nicht invasive Methoden zur Bestimmung von pulmonalem Blutfluss, Schlagvolumen, Herzzeitvolumen und assoziierten Parametern im Rahmen der Spiro- ergometrie	266			
5.4.2	Traditionelle Methoden zur Bestimmung von Herzzeitvolumen und arterio-venöser O₂-Ausschöpfung.....	266			

5.7.3	Verlaufs- und Therapiekontrollen.....	300	5.9.3	Spezielle Krankheitsbilder in der Begutachtung	322
5.7.4	Risikostratifizierung und prognostische Einschätzung	302	5.10	Sport- und Präventivmedizin:	
5.8	Spiroergometrie bei Adipositas	303		Spiroergometrie in der Ausdauerleistungsdagnostik	330
5.8.1	Adipositas – Erfahrungen aus der (pneumologischen) Praxis	303		<i>Ralph Schomaker, Andreas Greiwing</i>	
	<i>Hubert N. Trötschler</i>		5.10.1	Einführung.....	330
5.8.2	Auswirkung eines hohen BMI auf die Atemmechanik und problematischer Bezug auf $\dot{V}O_2$-Sollwerte	305	5.10.2	Testbedingungen und Ausbelastung in der Sportmedizin	331
	<i>Hubert N. Trötschler</i>		5.10.3	Schwellenbestimmung mittels Spiroergometrie und Laktatmessung.....	333
5.8.3	Adipositas – Beurteilung der Leistungsfähigkeit und Risikostratifizierung aus kardiozirkulatorischer Sicht	307	5.10.4	Definition von Trainingszonen	336
	<i>Katharina Meyer</i>		5.10.5	Einsatzindikationen von Trainingszonen..	340
			5.10.6	$\dot{V}O_2$ und Energieverbrauch.....	343
			5.10.7	Beurteilung sportlicher Ausdauerleistungsfähigkeit	346
5.9	Spiroergometrie in der Begutachtung, bei Bewertung und Beurteilung	312	5.10.8	Präventivmedizinische Effekte verschiedener Trainingsmethoden	351
5.9.1	Übersicht	312			
5.9.2	Welche Informationen liefert die Spiroergometrie bei der Bewertung und Beurteilung?.....	313			

III Abschlusskurs

6	Standards bei der Durchführung der Spiroergometrie	356			
6.1	Formale Aspekte.....	356	6.3	Standards während der Belastung.....	360
6.1.1	Indikationen.....	356	6.3.1	Intrabreath-Manöver	360
6.1.2	Stellenwert der Blutgasanalyse	356	6.3.2	Blutgase	360
6.1.3	Abbruchkriterien.....	356	6.3.3	Standardisierung der Belastungsgrafiken ..	361
6.1.4	Ziel des Belastungstests	357	6.3.4	Plausibilitätsprüfungen während und nach CPET.....	361
6.1.5	Apparative Voraussetzungen.....	357			
6.2	Einflussfaktoren	357	6.4	Auswertung und Befundweitergabe...	362
6.2.1	Belastungsform und -art	358	6.4.1	Auswertung	362
6.2.2	Komponenten im Belastungsverlauf.....	358	6.4.2	Befundweitergabe	362
6.2.3	Rampenhöhe und Belastungsdauer	360	6.4.3	Kommunikation über Befunde	362
7	Fallbeispiele.....				365
7.1	Technische und formale Fallstricke	365	7.1.6	Beispiel 6: O_2-Sensor liefert zu niedrige Messwerte	369
7.1.1	Beispiel 1: Ungünstige Skalierungen und Belastungsform verhindern die Erkenntnis	365	7.1.7	Beispiel 7: Nicht adäquate Ventilation wegen Undichtigkeit der Maske	371
7.1.2	Beispiel 2: Kooperation (Hypo- und Hyperventilation)	366	7.1.8	Beispiel 8: Wechsel von Nasen- zu Mundatmung, unkorrekte Reihenfolge der BGA-Eingaben, Fokussierung auf einzelne Felder	371
7.1.3	Beispiel 3: RER (RQ) nicht plausibel – Fehler im Gasanalysator	367			
7.1.4	Beispiel 4: RER (RQ) nicht plausibel – Fehler beim Eingeben von Zahlenwerten der Eichgase ins System	368	7.1.9	Beispiel 9: Sample Line (Probenschlauch) verstopt	375
7.1.5	Beispiel 5: RER zu hoch – anhaltend hohe RER, kein Leertreten	368			

7.2	Kasuistiken – Sonderfälle	378	7.4	Kasuistiken mit vorwiegend kardiologischer Problematik	427
7.2.1	Kasuistik 1: Beratung zum Freizeitsport ..	378	7.4.1	Kasuistik 1: Freizeitsportler mit Herzrhythmusstörung	427
7.2.2	Kasuistik 2: CPET und Anämie (Ober-lappenkarzinom und Kolonpolypen)	381	7.4.2	Kasuistik 2: Präoperative Beurteilung, Pneumektomie	429
7.2.3	Kasuistik 3: Spiroergometrie in 1300 und in 4 300 m Höhe	382	7.4.3	Kasuistik 3: Chronisch thromboembo-lische pulmonale Hypertonie (CTEPH)....	431
7.2.4	Kasuistik 4: Völlige Leistungsschwäche bei mitochondrialer Myopathie (Enzymstörung in der Atmungskette)	385	7.4.4	Kasuistik 4: Idiopathische pulmonale Hypertonie vor und unter Therapie	433
7.3	Kasuistiken mit vorwiegend pneumologischer Problematik	388	7.4.5	Kasuistik 5: Asylbewerber mit Leistungs-schwäche, Kooperationsmangel? – Sarko-dose mit Beteiligung von Herz und Lunge	436
7.3.1	Kasuistik 1: Alveolarproteinose (Alveoläres Füllungssyndrom).....	388	7.4.6	Kasuistik 6: Ironman mit Herzleiden (DCM und HTX bei einem Leistungs-sportler)	438
7.3.2	Kasuistik 2: Bullösес Lungenemphysem vor und nach Lungenvolumenreduktion (LVR)	391	7.4.7	Kasuistik 7: Univentrikuläres Herz (Single Ventricle).....	440
7.3.3	Kasuistik 3: Intrinsic Asthma mit Hypoventilation.....	395	7.4.8	Kasuistik 8: Herzinsuffizienz bei dilatativer Kardiomyopathie, EOV?.....	444
7.3.4	Kasuistik 4: Multiple AV-Malformationen.	399	7.4.9	Kasuistik 9: Hochgradige pseudo-asymptomatische Aortenklappenstenose .	447
7.3.5	Kasuistik 5: Sarkidose, Verlaufskontrolle unter Therapie	401	7.4.10	Kasuistik 10: Leistungseinschränkung bei operiertem Ventrikelseptumdefekt ...	451
7.3.6	Kasuistik 6: Hypoventilation bei zentraler Atemantriebsstörung und Schlafapnoe-Syndrom.....	405	7.4.11	Kasuistik 11: Koronare Herzerkrankung und Bronchialkarzinom	455
7.3.7	Kasuistik 7: Hypoventilation bei extrathorakaler Stenose (subglottisches Lymphom)	406	7.4.12	Kasuistik 12: Herzinsuffizienz, Pleuraerguss, Niereninsuffizienz und Lymphadenopathie	458
7.3.8	Kasuistik 8: Lungentransplantation (LTx) bei COPD	409	7.5	Sport- und Fitnessberatung	462
7.3.9	Kasuistik 9: Operation eines Bronchialkarzinoms bei ausgedehntem Lungenemphysem	412	7.5.1	Kasuistik 1: Spiroergometrie in der Trainingsberatung	462
7.3.10	Kasuistik 10: Bronchialkarzinom: Totraumventilation – präoperative Risikobewertung	416	7.5.2	Kasuistik 2: Indirekte Kalorimetrie zur Wettkampfplanung bei einem Triathleten	466
7.3.11	Kasuistik 11: Ventilatorische Limitierung bei Lungenfibrose (UIP-Muster)	420	7.6	Arbeitsmedizin und Bewertung/ Begutachtung	469
7.3.12	Kasuistik 12: Ventilatorische Limitierung bei Langerhans-Zell-Histiozytose (LCH)...	423	7.6.1	Kasuistik 1: Asbestose mit schwerer Restriktion	469
			7.6.2	Kasuistik 2: Laryngeale und tracheale Stenose mit Hypoventilation	472
			7.6.3	Kasuistik 3: Spiroergometrie in der Arbeits- und Sozialmedizin: Studie Leistungserfordernis im „Housekeeping“ .	476

IV Anhang

8 Überprüfen Sie Ihr Wissen	482
8.1 Fragen	482
8.1.1 Gerätekunde, Messtechnik, Praxis im Funktionslabor.....	482
8.1.2 O ₂ -Aufnahme und Belastungsprotokolle ..	482
8.1.3 Gasaustausch (Pathophysiologie).....	483
8.1.4 Atemmechanik (Pathophysiologie).....	483
8.1.5 Muskelkraft	484
8.1.6 Herzinsuffizienz (Pathophysiologie).....	484
8.1.7 Stoffwechsel	485
8.1.8 Aerob-anaerobe Schwelle	485
8.1.9 Dyspnoe	486
8.1.10 9-Felder-Grafik – Zirkulation und Leistung	486
8.1.11 9-Felder-Grafik – Ventilation	487
8.1.12 9-Felder-Grafik – Gasaustausch	487
8.1.13 Wie schätze ich die Belastbarkeit des Probanden/Patienten ein?.....	488
8.1.14 Risikoabschätzung, z. B. vor Operationen..	488
8.1.15 Spiroergometrie bei Herzinsuffizienz....	489
8.1.16 Spiroergometrie und Rehabilitation.....	489
8.1.17 Spiroergometrie und Begutachtung.....	490
8.2 Antworten	490
8.2.1 Gerätekunde, Messtechnik, Praxis im Funktionslabor	490
8.2.2 O ₂ -Aufnahme und Belastungsprotokolle ..	491
8.2.3 Gasaustausch (Pathophysiologie).....	492
8.2.4 Atemmechanik (Pathophysiologie).....	492
8.2.5 Muskelkraft	493
8.2.6 Herzinsuffizienz (Pathophysiologie).....	493
8.2.7 Stoffwechsel	493
8.2.8 Aerob-anaerobe Schwelle	493
8.2.9 Dyspnoe	494
8.2.10 9-Felder-Grafik – Zirkulation und Leistung	494
8.2.11 9-Felder-Grafik – Ventilation	494
8.2.12 9-Felder-Grafik – Gasaustausch	495
8.2.13 Wie schätze ich die Belastbarkeit des Probanden/Patienten ein?.....	495
8.2.14 Risikoabschätzung, z. B. vor Operationen..	496
8.2.15 Spiroergometrie bei Herzinsuffizienz....	496
8.2.16 Spiroergometrie und Rehabilitation.....	496
8.2.17 Spiroergometrie und Begutachtung.....	496
9 Weiterführende Informationen.....	497
9.1 Fitnesskategorien, Sollwerte für die maximale Leistung, Leistungseinschätzung	497
9.2 Kardiologische Einschätzung.....	498
9.3 Spezielle Parameter zur Spiroergometrie	499
9.4 Maximale Sauerstoffaufnahme und maximale Leistung.....	501
9.4.1 Formeln für Errechnung der Soll-Watt-Belastung	501
9.4.2 Formeln zur Berechnung der maximalen $\dot{V}O_2$	502
9.4.3 Formeln zur Berechnung der maximalen $\dot{V}O_2/kg$ Körpergewicht ..	503
10 Historische Aspekte.....	504
10.1 Spiroergometrie in Deutschland – Wie es war und wie es ist.....	504
10.1.1 Kurze Darstellung der Geschichte von Belastungsuntersuchungen	504
10.1.2 Die aerob-anaerobe Schwelle	506
10.1.3 Fazit	508
10.2 How It Really Happened – Exercise Gas Exchange, Breath-by-Breath	509
Karlman Wasserman	
11 Ein persönliches Nachwort zur Spiroergometrie-Arbeitsgruppe	511
Rolf F. Kroidl	
Sachverzeichnis	512