

Inhaltsverzeichnis

I Grundkurs

1	Klinischer Einsatz und Nutzen der Spiroergometrie	18
1.1	Einst und jetzt: Empirie versus Messtechnik	18
1.2	Welche Informationen liefert die Spiroergometrie?	19
1.2.1	Information für den Laien	19
1.2.2	Information für den Kollegen	19
1.2.3	Information für einen (pneumologischen/ kardiologischen) Fachkollegen	20
1.3	Indikation, Fragestellung, Einflussfaktoren, Risiken	20
1.4	Zuverlässigkeit der Messwerte	23
1.5	Spiroergometrie im Soll und Haben	24
1.5.1	Liquidation	24
1.6	Spiroergometrie liefert ein komplexes Bild	26
2	Technische und formale Grundlagen	27
2.1	Gerätekunde	27
2.1.1	Originäre Werte – abgeleitete Werte	27
2.1.2	Atemgase – Sensorik von O ₂ und CO ₂	27
2.1.3	(Atem-)Fluss und (Atem-)Volumen	30
2.1.4	Probenschlauch (Sample Line) und andere „Kleinigkeiten“	31
2.1.5	Datenflut und Mittelung der Werte	32
2.1.6	Standardisierung der Aufzeichnung	33
2.1.7	Formale Aspekte der 9-Felder-Grafik (9-FG) – konventionelle und „neue“ Darstellung der 9 Felder	34
2.1.8	Kalibration und Eichung, Validierung und Qualitätskontrolle	34
2.1.9	Speicherung der Daten und Kommunikation mit Kollegen	35
2.2	Messparameter	35
2.2.1	Basisgrößen und abgeleitete Größen	36
2.2.2	Zusammengesetzte Größen	37
2.2.3	Luftdruck / Barometerdruck: „Historie“	37
2.2.4	Anhang „Zweierlei Maß“	38
2.2.5	Begriffe und Definitionen (Glossar)	38
2.2.6	Darstellung weiterer Messwerte und abgeleiteter Größen, die bei der Spiroergometrie Anwendung finden (eine Übersicht)	39
2.3	O₂-Aufnahme und Belastungsprotokolle	42
2.3.1	O ₂ -Aufnahme	42
2.3.2	Abschätzung der O ₂ -Aufnahme in Ruhe und unter Belastung	44
2.3.3	Wirkungsgrad bei ergometrischen Belastungen	44
2.3.4	Soll-Leistung bzw. Soll- $\dot{V}O_2$ (in Watt und $\dot{V}O_2$) bei Übergewicht	45
2.3.5	Belastungsprotokolle	46
2.4	Portable Spiroergometrie – Einsatz in der Sport- und Arbeitsmedizin	54
2.4.1	Technischer Entwicklungsstand	54
2.4.2	Anwendungsbereiche	55
2.4.3	Belastungsprotokolle für die mobile Spiroergometrie	55
2.4.4	Limitationen	58
2.4.5	Erfahrungsbericht: Mobile Spiro- ergometrie in der Arbeitsmedizin	59
2.5	Sollwerte	59
2.5.1	Allgemeines	59
2.5.2	Normwerte der Leistung in Watt	60
2.5.3	Normwerte der maximalen O ₂ -Aufnahme	61
2.5.4	Formeln zur Errechnung der Soll-Watt- Belastung	62
2.6	„Navigationshilfe“ und Systematik der Auswertung für die 9-Felder-Grafik	62
2.6.1	Aufbau der 9-Felder-Grafik und Übersicht	63
2.6.2	Systematik der Auswertung, Vorgehen und Reihenfolge	66
2.7	Praxis im Funktionslabor: Ratgeber für Ärzte und Assistenzpersonal	71
2.7.1	Vorbereitung des Geräts	71
2.7.2	Vorbereitung des Patienten	72
2.7.3	Zeitfenster und zeitlicher Ablauf	73
2.7.4	Klinische Beobachtung und Quantifi- zierung von Luftnot und Erschöpfung (Borg-Skala)	75
2.7.5	Spirometrikriterien einer akzeptablen Durchführung	78
2.7.6	Blutgasanalyse und Spiroergometrie	79
2.7.7	Überprüfung der vorliegenden Messung auf Qualität und Plausibilität	81

3	Physiologische Grundlagen (Rekapitulation ausgewählter Themen)	84
3.1	Physiologie und Pathophysiologie der pulmonalen Adaptation	84
3.1.1	Weg des O ₂ „von der Nase zum Mitochondrium“ – Modell der 3 Zahnräder	84
3.2	Exkurs in die Atemphysiologie und Lungenfunktionsdiagnostik	89
3.2.1	Ventilation und Atemmechanik	89
3.2.2	Diffusion	98
3.2.3	Mismatch, Ventilations-Perfusions-Verhältnis	101
3.2.4	O ₂ -Transport	102
3.2.5	Blutgasanalyse und Spiroergometrie	108
3.3	Physiologie und Pathophysiologie der muskulären Adaptation	111
3.3.1	Allgemeine Muskelphysiologie	111
3.3.2	Spiroergometrie und Muskulatur	111
3.3.3	Periphere Muskulatur	112
3.3.4	Muskelfasern	113
3.4	Physiologie und Pathophysiologie der kardiozirkulatorischen Adaptation	114
3.4.1	Physiologie und Pathophysiologie der Kardiozirkulation	114
3.4.2	Pathophysiologie der Herzinsuffizienz: Aspekte zur Spiroergometrie	121
3.5	Stoffwechsel – Energiebereitstellung	133
3.5.1	Begriffe: RER – R – RQ – innere und äußere Atmung	133
3.5.2	Energiegewinnung	133
3.5.3	RER unter Belastung	137
3.5.4	Ventilatorische Schwellen (VT 1, VT 2) (physiologische Basis)	138
3.6	Spiroergometrische Bestimmung der aerob-anaeroben Schwelle (VT 1 und VT 2)	141
3.6.1	Definitionen und Übersicht	141
3.6.2	Warum ist die Bestimmung der VT 1 und VT 2 wichtig?	142
3.6.3	Wie werden VT 1 und VT 2 bestimmt?	142
3.6.4	Theorie und Praxis	145
3.6.5	Zusammenfassung zur aerob-anaeroben Schwelle	147
3.7	Sauerstofftransport ($\dot{V}O_2$) und Spiroergometrie-Würfel	149
	Alfred Hager	
3.7.1	Energie- und Sauerstoffspeicher	149
3.7.2	Sauerstoffaufnahme	149
3.7.3	Sauerstoffpuls	152
3.7.4	Herzarbeit, Herzleistung, Kreislaufarbeit, Kreislaufleistung	152
3.8	Pathophysiologie der Dyspnoe	154
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
3.8.4	Dyspnoe im Kontext kardiopulmonaler Erkrankungen	157
3.8.5	Dyspnoe im Spiegel der Spiroergometrie	158

II Aufbaukurs

4	9-Felder-Grafiken nach Wasserman	166
4.1	9-Felder-Grafik (9-FG) nach Wasserman – klassische und „neue“ Version (2013)	166
4.2	Aufbau der 9-Felder-Grafik und Einführung	167
4.3	9-Felder-Grafik: Felder zur Zirkulation und Leistung	170
4.3.1	Kardiozirkulatorische Felder im Überblick	170
4.3.2	Feld 3: $\dot{V}O_2$ – $\dot{V}CO_2$ – Rampe – RER	172
4.3.3	Feld 2: Herzfrequenz – O ₂ -Puls – Herzfrequenzreserve	178
4.3.4	Feld 5: $\dot{V}CO_2/\dot{V}O_2$ – HR/ $\dot{V}O_2$ – V-Slope – HR-Korridor	185
4.3.5	Feld 8: Respiratory Exchange Rate (RER) – Atemreserve (BR) – Laktatkurve	189
4.4	9-Felder-Grafik: Felder zur Ventilation	190
4.4.1	Ventilatorische Felder im Überblick	190
4.4.2	Feld 1: $\dot{V}E$ – Rampe – (BR)	191
4.4.3	Feld 7: VT – $\dot{V}E$ – BF – Isoplethen – BR	195
4.5	9-Felder-Grafik: Felder zur Atemeffizienz (Atemökonomie) und zum Gasaustausch	198
4.5.1	Felder zur Atemeffizienz und zum Gasaustausch im Überblick	198
4.5.2	Atemeffizienz in Feld 4 und Feld 6: $\dot{V}E$ – $\dot{V}CO_2$ – Slope – Intercept	199
4.5.3	Feld 4	200
4.5.4	Feld 6	202
4.5.5	Feld 9: Gasaustausch	204

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

5.7.3	Verlaufs- und Therapiekontrollen	300	5.9.3	Spezielle Krankheitsbilder in der Begutachtung	322
5.7.4	Risikostratifizierung und prognostische Einschätzung	302			
5.8	Spiroergometrie bei Adipositas	303	5.10	Sport- und Präventivmedizin: Spiroergometrie in der Ausdauerleistungsdiagnostik	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 VO 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 Risikostratifikation aus kardiozirkulatorischer Sicht	307	5.10.4	Definition von Trainingszonen	336
	<i>Katharina Meyer</i>		5.10.5	Einsatzindikationen von Trainingszonen ..	340
5.9	Spiroergometrie in der Begutachtung, bei Bewertung und Beurteilung	312	5.10.6	VO ₂ und Energieverbrauch	343
5.9.1	Übersicht	312	5.10.7	Beurteilung sportlicher Ausdauerleistungsfähigkeit	346
5.9.2	Welche Informationen liefert die Spiroergometrie bei der Bewertung und Beurteilung?	313	5.10.8	Präventivmedizinische Effekte verschiedener Trainingsmethoden	351

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	7.1.9	Beispiel 9: Sample Line (Probenschlauch) verstopft	375
7.1.4	Beispiel 4: RER (RQ) nicht plausibel – Fehler beim Eingeben von Zahlenwerten der Eichgase ins System	368			
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 (Oberlappenkarzinom und Kolonpolypen)	381	7.4.2	Kasuistik 2: Präoperative Beurteilung, Pneumektomie	429
7.2.3	Kasuistik 3: Spiroergometrie in 1300 und in 4300 m Höhe	382	7.4.3	Kasuistik 3: Chronisch thromboembolische 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 Leistungsschwäche, Kooperationsmangel? – Sarkoidose mit Beteiligung von Herz und Lunge	436
7.3.1	Kasuistik 1: Alveolarproteinose (Alveoläres Füllungsyndrom).	388	7.4.6	Kasuistik 6: Ironman mit Herzleiden (DCM und HTX bei einem Leistungssportler)	438
7.3.2	Kasuistik 2: Bullöses 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, EO?	444
7.3.4	Kasuistik 4: Multiple AV-Malformationen.	399	7.4.9	Kasuistik 9: Hochgradige pseudoasymptomatische Aortenklappenstenose	447
7.3.5	Kasuistik 5: Sarkoidose, 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	8.2	Antworten	490
8.1.1	Gerätekunde, Messtechnik, Praxis im Funktionslabor	482	8.2.1	Gerätekunde, Messtechnik, Praxis im Funktionslabor	490
8.1.2	O ₂ -Aufnahme und Belastungsprotokolle ..	482	8.2.2	O ₂ -Aufnahme und Belastungsprotokolle ..	491
8.1.3	Gasaustausch (Pathophysiologie)	483	8.2.3	Gasaustausch (Pathophysiologie)	492
8.1.4	Atemmechanik (Pathophysiologie)	483	8.2.4	Atemmechanik (Pathophysiologie)	492
8.1.5	Muskelkraft	484	8.2.5	Muskelkraft	493
8.1.6	Herzinsuffizienz (Pathophysiologie)	484	8.2.6	Herzinsuffizienz (Pathophysiologie)	493
8.1.7	Stoffwechsel	485	8.2.7	Stoffwechsel	493
8.1.8	Aerob-anaerobe Schwelle	485	8.2.8	Aerob-anaerobe Schwelle	493
8.1.9	Dyspnoe	486	8.2.9	Dyspnoe	494
8.1.10	9-Felder-Grafik – Zirkulation und Leistung	486	8.2.10	9-Felder-Grafik – Zirkulation und Leistung	494
8.1.11	9-Felder-Grafik – Ventilation	487	8.2.11	9-Felder-Grafik – Ventilation	494
8.1.12	9-Felder-Grafik – Gasaustausch	487	8.2.12	9-Felder-Grafik – Gasaustausch	495
8.1.13	Wie schätze ich die Belastbarkeit des Probanden/Patienten ein?	488	8.2.13	Wie schätze ich die Belastbarkeit des Probanden/Patienten ein?	495
8.1.14	Risikoabschätzung, z. B. vor Operationen. .	488	8.2.14	Risikoabschätzung, z. B. vor Operationen. .	496
8.1.15	Spiroergometrie bei Herzinsuffizienz.	489	8.2.15	Spiroergometrie bei Herzinsuffizienz.	496
8.1.16	Spiroergometrie und Rehabilitation	489	8.2.16	Spiroergometrie und Rehabilitation	496
8.1.17	Spiroergometrie und Begutachtung	490	8.2.17	Spiroergometrie und Begutachtung	496
9	Weiterführende Informationen	497			
9.1	Fitnesskategorien, Sollwerte für die maximale Leistung, Leistungseinschätzung	497	9.4.1	Formeln für Errechnung der Soll-Watt-Belastung	501
9.2	Kardiologische Einschätzung	498	9.4.2	Formeln zur Berechnung der maximalen $\dot{V}O_2$	502
9.3	Spezielle Parameter zur Spiroergometrie	499	9.4.3	Formeln zur Berechnung der maximalen $\dot{V}O_2$ /kg Körpergewicht ...	503
9.4	Maximale Sauerstoffaufnahme und maximale Leistung	501			
10	Historische Aspekte	504			
10.1	Spiroergometrie in Deutschland – Wie es war und wie es ist	504	10.1.3	Fazit	508
	<i>Wildor Hollmann</i>		10.2	How It Really Happened – Exercise Gas Exchange, Breath-by-Breath	509
10.1.1	Kurze Darstellung der Geschichte von Belastungsuntersuchungen	504		<i>Karlman Wasserman</i>	
10.1.2	Die aerob-anaerobe Schwelle	506			
11	Ein persönliches Nachwort zur Spiroergometrie-Arbeitsgruppe	511			
	<i>Rolf F. Kroidl</i>				
	Sachverzeichnis	512			