



Dennis Bösch · Carl-Peter Criée

Lungenfunktions- prüfung

Durchführung – Interpretation –
Befundung

4. Auflage

EBOOK INSIDE

 Springer

Lungenfunktionsprüfung

Dennis Bösch
Carl-Peter Criée

Lungenfunktions- prüfung

Durchführung – Interpretation – Befundung

4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 110 Abbildungen und 19 Tabellen

Dennis Bösch
Medizinische Klinik V – Klinik für Pneumologie
Landau an der Isar, Deutschland

Carl-Peter Criée
Evangelisches Krankenhaus Göttingen-
Weende e. V.
Bovenden, Deutschland

ISBN 978-3-662-55973-4 ISBN 978-3-662-55974-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-55974-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnetet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: ©Aliaksei Lasevich, stock.adobe.com (Symbolbild mit Fotomodell), ID: 107940801

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 4. Auflage

Untersuchungen der Lungenfunktion haben eine zentrale Bedeutung in der Pneumologie, sind aber teils auch ein wichtiger Bestandteil der allgemeininternistischen Diagnostik. Im Rahmen des technischen und medizinischen Fortschritts werden sämtliche Methoden ständig verfeinert und die Erkenntnisse erweitert und zum Teil revidiert, was auch in regelmäßig aktualisierte Leitlinien und Empfehlungen mündet. 12 Jahre nach Erscheinen der ersten Auflage ist es nun erneut nötig geworden, das Buch

abermals vollständig zu aktualisieren und bei dieser Gelegenheit nochmals zu erweitern. Wir freuen uns über das ungebrochene Interesse und sehen uns in unserem Ansatz bestätigt, die praxisorientierte Methodik fortzusetzen und auszubauen. Wir wünschen allen Interessierten eine anregende und hoffentlich erkenntnisreiche Lektüre.

Landau a. d. Isar, Göttingen, im Juli 2019

Dr. med. Dennis Bösch

Prof. Dr. med. Carl-Peter Criée

Vorwort zur 1. Auflage

Nicht zuletzt dem technischen Fortschritt mit immer kompakteren und bedienerfreundlicheren Geräten ist es zu verdanken, dass die Lungenfunktionsdiagnostik zunehmende Verbreitung findet. Zudem wecken ein stark anhaltender Wissenszuwachs und stetig steigende Zahlen an Patienten mit obstruktiven Lungenerkrankungen seit Jahren das Interesse an Lungenfunktionsstörungen und entsprechenden Untersuchungsmethoden. Bei zunehmender klinischer Bedeutung der Lungenfunktionsdiagnostik im klinischen Alltag gehören die verschiedenen Methoden der Lungenfunktionsprüfung in den Krankenhäusern und den internistischen, allgemeinmedizinischen und pädiatrischen Praxen heute zum Standard. Neben der weit verbreiteten Spirometrie sind dies die Bodyplethysmographie, Diffusionstestung, Mundverschlussdruckmessung, Blutgasanalyse und die erweiterten Untersuchungen mit Provokation und Bronchospasmolyse.

Dieses Buch richtet sich an alle, die mit der Durchführung und Befundung von Lungenfunktionsprüfungen befasst sind. Dem Leser soll nach bewusst kurzer Einführung in die verschiedenen Methoden systematisch – anhand authentischer, klinischer Patientenfallbeispiele – die Befundung und Interpretation der Untersuchungsergebnisse unter Berücksichtigung der klinischen Umstände vermittelt

werden. Hierzu wurden über 60 Untersuchungsergebnisse von Patienten, die mit Geräten verschiedener Hersteller und unterschiedlichen Modellen erhoben worden waren, ausgesucht und zusammengestellt. Wichtige Punkte und Hintergrundinformationen zu den jeweiligen Untersuchungen und Funktionsstörungen sind hervorgehoben und gesondert zusammengefasst. Dabei wurde mit großer Sorgfalt versucht, die Empfehlungen der deutschen und internationalen Fachgesellschaften zu berücksichtigen.

Neben dem Anfänger wird auch der Fortgeschrittene wertvolle Informationen zur täglichen Praxis finden, da die Beispiele neben den klassischen Befundkonstellationen auch seltenere und kompliziertere Fälle aufzeigen. Abschließend bietet ein Kapitel die Möglichkeit, das erworbbene Wissen und die erlernten Fertigkeiten anhand z. T. komplexerer Fallübungen zu kontrollieren. Dieses Buch soll zudem auch als Kompendium und Nachschlagewerk für die tägliche Praxis dienen.

Wir wünschen Ihnen eine interessante und lehrreiche Lektüre sowie viel Erfolg und Freude bei der Befundung eigener Lungenfunktionsuntersuchungen.

Göttingen, im Dezember 2006
Dr. med. Dennis Bösch Bremen
Prof. Dr. med. Carl-Peter Criée

Inhaltsverzeichnis

1	Lungenfunktionsprüfung im Überblick	1
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
2	Lungenfunktionsparameter	5
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
2.1	Allgemeines	6
2.2	Statische und dynamische Volumina	9
2.3	Atemflussparameter	10
2.4	Resistance-Parameter	11
2.5	Conductance-Parameter	12
2.6	Diffusionsparameter	12
2.7	Mundverschlussdruckparameter	12
2.8	Blutgasanalyseparameter	12
3	Spirometrie	15
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
3.1	Einleitung und Messprinzip	16
3.2	Durchführung der Untersuchung	17
3.3	Ventilationsstörungen	18
3.4	Fallbeispiele	18
4	Bodyplethysmografie	57
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
4.1	Einleitung und Messprinzip	58
4.2	Durchführung der Untersuchung	62
4.3	Fallbeispiele	63
5	Bronchospasmolysetestung und Provokationstestung	105
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
5.1	Einleitung	106
5.2	Bronchospasmolysetestung	106
5.3	Provokationstestung	106
5.4	Fallbeispiele	109
6	Diffusionsmessung	125
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
6.1	Einleitung	126
6.2	Fallbeispiele	129

7	Mundverschlussdruckmessung	151
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
7.1	Einleitung	152
7.2	Fallbeispiele	155
8	Peak-Flow-Messung	163
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
8.1	Einleitung	164
8.2	Fallbeispiele	165
9	Blutgasanalyse	173
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
9.1	Einleitung	174
9.2	Fallbeispiele	177
10	Pulsoxymetrie	193
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
10.1	Einleitung	194
10.2	Fallbeispiele	195
11	6-Minuten-Gehtest	199
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
11.1	Einleitung und Messprinzip	200
11.2	Fallbeispiele	200
12	Die Variable Patient	205
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
12.1	Lungenfunktion in den Phasen des Lebens	206
12.2	Individuelle Lungenfunktionen im Vergleich zu Referenzpopulationen	208
12.3	Erworbene Einflüsse der Lungenfunktion	209
13	Befundung der Lungenfunktionsprüfung	211
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
13.1	Voraussetzungen einer validen Lungenfunktionsdiagnostik	212
13.2	Interpretationsstrategien	212
14	Gemischter Übungsteil	215
	<i>Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée</i>	
	Serviceteil	241
	Verzeichnis der Fallbeispiele	243
	Quellenhinweis	245
	Index	247

Abkürzungsverzeichnis

6MWD	„6-minute walking distance“ (6-Minuten-Gehtest)	IVC	inspiratorische Vitalkapazität
art.	arteriell	kap.	kapillär
ATS	American Thoracic Society	K_{CO}	Krogh-Faktor Kohlenmonoxid (syn.: TL _{CO} /V _A bzw. DL _{CO} /V _A)
BE	Base Excess (Basenüberschuss)	kg	Kilogramm
BGA	Blutgasanalyse	KL	Körperlänge
BMI	Body-Mass-Index [kg/m ²]	kPa	Kilopascal
BTPS	„body temperature, pressure, saturated“	l	Liter
COPD	Chronic Obstructive Pulmonary Disease	LLN	„lower limit of normal“
CT	Computertomographie	MEF	maximale exspiratorische Flussgeschwindigkeit
C_aO₂	arterieller Sauerstoffgehalt	MID	„minimal important difference“
DGP	Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin	O₂	Sauerstoff
DL_{CO}	Diffusionskapazität (Syn.: TL _{CO})	OHS	adipositasassoziiertes Hypoventilationssyndrom
EGKS	Europäische Gemeinschaft für Kohle und Stahl	OSAS	obstruktives Schlafapnoesyndrom
ERS	European Respiratory Society	P_{0,1}	inspiratorischer Mundverschlussdruck bei 0,1 s
ERV	exspiratorisches Reservevolumen	PCF	Peak Cough Flow
FEF	forcierte exspiratorische Flussgeschwindigkeit	pCO₂	Kohlendioxidpartialdruck
FEV₁	Einsekundenkapazität	PEF	exspiratorischer Peak Flow
FEV₁%	relative Einsekundenkapazität	pH	pH-Wert
FRC	funktionelle Residualkapazität	PIF	inspiratorischer Peak Flow
FVC	forcierte Vitalkapazität	PI_{max}	maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck
G_{eff}	Atemwegsconductance	pO₂	Sauerstoffpartialdruck
Hb	Hämoglobin	R_{eff}	effektiver Atemwegswiderstand
HCO₃	Bikarbonat	R_{occ}	okklusiver Atemwegswiderstand
IC	inspiratorische Kapazität	R_{os}	oszillatorischer Atemwegswiderstand
IOS	Impuls-Oszillometrie	R_{aw}	Atemwegswiderstand
IRV	inspiratorisches Reservevolumen	R_{tot}	totaler Atemwegswiderstand
ITGV	intrathorakales Gasvolumen (syn.: FRC)	RSD	residuale Standardabweichung
		RV	Residualvolumen
		s	Sekunde
		SaO₂	Sauerstoffsättigung, arteriell
		sG_{eff}	spezifische Atemwegsconductance
		SpO₂	Sauerstoffsättigung, pulsoxymetrisch
		sR_{eff}	spezifischer effektiver Atemwegswiderstand
		sR_{tot}	spezifischer totaler Atemwegswiderstand

sR_{aw}	spezifischer Atemwegswiderstand	V_A	Alveolarvolumen
TGV	thorakales Gasvolumen (syn.: ITGV bzw. FRC)	V_{in}	inspiratorisches Volumen (Diffusionsmessung)
TLC	totale Lungenkapazität	VC	Vitalkapazität
TL_{CO}	Transferfaktor Kohlenmonoxid (syn.: DLCO)	VC_{in}	inspiratorische Vitalkapazität
		VT	Tidalvolumen



Lungenfunktionsprüfung im Überblick

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

Die Hauptaufgabe der Lunge besteht im Gasaustausch. In einem ausgewogenen Zusammenspiel aus Lunge und Herz-Kreislauf-System müssen die verschiedenen Organe mit Sauerstoff (O_2) versorgt und andererseits metabolisch anfallendes Kohlendioxid (CO_2) aus dem Körper eliminiert werden. Die Lungenfunktion setzt sich aus verschiedenen Teilverfahren zusammen. Ein zentrales Element ist die Ventilation, also die Belüftung der Lungen durch Ein- und Ausatmung. Die Atmung unterliegt hierbei komplexen Gesetzmäßigkeiten und Regelmechanismen, die ein sehr variables Anpassen der Funktion an verschiedenste Einflüsse und Anforderungen ermöglicht. Neben der Atmung und dem Gasaustausch kommt der Lunge zudem eine wichtige Aufgabe in der Regulation des Säure-Basen-Haushaltes des Organismus zu. Im Blut gepufferte saure Valenzen können über das Abatmen des Säureanhydrids CO_2 eliminiert werden.

Der Atemapparat setzt sich aus den beiden Lungen, den dazugehörigen Atemwegen sowie dem Atemzentrum, zentralen und peripheren chemosensiblen Strukturen, einem komplexen nervalen Netzwerk und dem muskuloskeletalem Thorax zusammen. Neben der Kenntnis der verschiedenen anatomischen Abschnitte ist es wichtig, die Lungenfunktion als komplexes physiologisches Zusammenspiel von Einzelfunktionen zu verstehen. Vereinfacht können folgende Funktionsbereiche – und somit auch Störbereiche – unterscheiden werden:

- die Ventilation,
- die Perfusion,
- die Diffusion,
- das Zusammenspiel aus Ventilation und Perfusion,
- die Atemmuskelfunktion mit ihrer zentralen Steuerung.

Die zugrundeliegende Pathophysiologie von Störungen der einzelnen Teilverfahren kann unterschiedlich sein. Eine Ventilationsstörung kann beispielsweise obstruktiv oder restriktiv sein. Nicht selten kommt es auch zu kombinierten Funktionsstörungen. So führen einige Lungenerkrankungen neben Ventilationsstörungen

gleichzeitig auch zu Diffusionsstörungen und im Weiteren zur Veränderung der Perfusion etc. Eine sinnvolle und effektive Untersuchung der Funktionsstörungen setzt daher gewisse Kenntnisse über zugrundeliegende pathophysiologische Mechanismen pneumologischer Krankheitsbilder voraus.

Die Lungenfunktionsdiagnostik ist ein sehr heterogenes Feld von unterschiedlichen Messmethoden, mit denen die verschiedenen Aspekte der Lungenfunktion im Einzelnen oder – z. B. bei der Blutgasanalyse – zum gewissen Grad auch summarisch dargestellt und überprüft werden können. Bereits das Messen der Atemfrequenz kann uns, analog dem Messen der Pulsfrequenz, oft einen ersten Anhalt über das Vorliegen und die Schwere einer Lungenfunktionsstörung geben. Ein erwachsener Patient mit Dyspnoe und einer erhöhten Atemfrequenz (Tachypnoe) von beispielsweise 25/min sollte dringend weiter untersucht werden.

Die Bandbreite der apparativen Lungenfunktionsdiagnostik ist weit gefächert und reicht von einfachen mobilen Handgeräten (z. B. Peak-Flow-Meter) bis hin zu komplexen Messapparaturen (Spiroergometrie), der zeitliche Untersuchungsaufwand kann weniger als 1 min betragen, aber auch 30 min und mehr. Im Wesentlichen stehen uns nachfolgende Tests bzw. Messmethoden zur Verfügung:

- Spirometrie,
- Bodyplethysmografie,
- Bronchospasmolyse-/Provokationstestung,
- Diffusionstestung,
- Mundverschlussdruckmessung ($P_{0,1}/PI_{max}$),
- Atemwegswiderstandsmessung (R_{occ}/IOS),
- Peak-Flow-Messung,
- Blutgasanalyse,
- Pulsoxymetrie,
- Spiroergometrie.

Mit den einzelnen Methoden ist es möglich, verschiedene (Atem-)Volumina, Flussgeschwindigkeiten, Atemwegswiderstände, thorakale Druckverhältnisse und Diffusionsverhältnisse zu untersuchen. Ergänzt werden die Messungen ggf. um entsprechende Veränderungen der

Lungenfunktion nach Medikamentengabe oder auch durch Exposition gegenüber Reizstoffen.

Die Indikation zur Durchführung einer Lungenfunktionsprüfung liegt meist in der Abklärung und Objektivierung einer Dyspnoe, also der unangenehmen subjektiven Wahrnehmung der Atmung. Die mit einer Lungenfunktionsstörung einhergehenden Erkrankungen können zudem in ihrem lungenfunktionellen Verlauf beobachtet und die Therapie hinsichtlich ihrer Wirksamkeit unmittelbar oder auch

über längere Verläufe überprüft werden. Des Weiteren wird die Lungenfunktionsdiagnostik auch im Rahmen präventiver Screening-Untersuchungen, bei arbeitsmedizinischen Fragestellungen oder auch zur Risikoabschätzung vor belastenden Eingriffen durchgeführt.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die verschiedenen Methoden nach kurzer Einführung anhand unterschiedlicher Beispiele einfacher und komplexer Lungenfunktionsstörungen dargestellt und erläutert.



Lungenfunktionsparameter

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

- 2.1 Allgemeines – 6
- 2.2 Statische und dynamische Volumina – 9
- 2.3 Atemflussparameter – 10
- 2.4 Resistance-Parameter – 11
- 2.5 Conductance-Parameter – 12
- 2.6 Diffusionsparameter – 12
- 2.7 Mundverschlussdruckparameter – 12
- 2.8 Blutgasanalyseparameter – 12
- Weiterführende Literatur – 13

2.1 Allgemeines

Die genaue Kenntnis der Bedeutung der einzelnen Messwerte und ihrer Zusammenhänge ist eine Grundvoraussetzung für die Interpretation der Lungenfunktionsprüfung.

Man unterscheidet die statischen Volumina, also die zeitunabhängigen einzelnen Teilvolumina der Totalkapazität (z. B. die Vitalkapazität), von den dynamischen Volumina, die in forcierten Atemmanövern in Bezug zur Zeit ermittelt werden (z. B. die Einsekundenkapazität). Des Weiteren können Atemstromstärken bzw. Atemflüsse (z. B. der Peak Flow), Munddruckverhältnisse, Atemwegswiderstände, Diffusionsparameter und Blutgaswerte gemessen werden. Die einzelnen Parameter werden nachfolgend erläutert und in den □ Abb. 2.1, 2.2 und 2.3 veranschaulicht.

Die Werte sind jeweils als Istwert (also gemessener Wert) und in der Regel auch als Sollwert (Referenzmittelwert) mit entsprechender prozentualer Abweichung des Messwertes vom Sollwert angegeben.

Normal- bzw. Sollwerte beziehen sich auf eine bestimmte Kohorte gesunder Referenzpersonen. Gewisse Unterschiede zwischen den einzelnen Personen sind normal und Ausdruck der Individualität der Menschen. Man spricht auch von der Streuung der Werte um den Mittelwert. Der eigentliche Sollwert ist also gemittelt aus den Werten der zugrundeliegenden Referenzkohorte.

Die bisher gebräuchlichsten Normalwerte sind von der European Respiratory Society (ERS) publiziert worden. Es handelt sich um die sogenannten EGKS-Werte (Europäische Gesellschaft für Kohle und Stahl). Die Regressionsgleichungen zur Berechnung des Sollwertes finden sich in □ Tab. 3.1 in ▶ Kap. 3. Die Streuung ist im Wesentlichen auf die lockere Korrelation zwischen Körperlänge und Lungenvolumen zurückzuführen. Diese Lungenfunktionswerte wurden durch Reihenuntersuchungen in den 60er- und 70er-Jahren ermittelt, die jedoch den heutigen epidemiologischen und biostatischen Anforderungen nicht mehr entsprechen.

Basierend auf Messungen von 74.187 gesunden Probanden vom 3. bis 95. Lebensjahr wurden daher im Dezember 2012 neue biometrische Referenzwerte publiziert (Quanjer et al. 2012). Es handelt sich um die ersten multi-ethnischen spirometrischen Lungenfunktionsreferenzwerte. Für folgende Parameter wurden neue Referenzgleichungen erstellt: FVC, FEV₁, FEV₁/FVC, FEF₂₅₋₇₅, FEF₇₅, und zusätzlich für den Altersbereich unter 10 Jahre: FEV_{0,75}, FEV_{0,75}/FVC. Diese neuen Referenzwerte (Global Lung Initiative, GLI 2012) weisen für FVC und FEV₁ im mittleren und höheren Lebensabschnitt um ca. 10 % höhere Werte auf als nach den bisherigen, in □ Tab. 3.1 genannten Referenzempfehlungen. Sie geben zudem die Unterschiede verschiedener ethnischer Gruppen wieder. Die Auswertungen der GLI 2012 zeigen, dass die Streuung der Messwerte weder einem fixen Wert noch einer einheitlichen relativen Abweichung vom Referenzwert entspricht, wie es in den in □ Tab. 3.1 aufgeführten EGKS-Werten angenommen wurde. Daher können die Normalwerte und der untere Grenzwert nicht mehr wie bei den EGKS-Werten über Regressionsgleichungen errechnet werden, sondern sie werden über ein Softwareprogramm ermittelt.

Die Software für die GLI-2012-Berechnungen kann kostenlos unter ▶ www.lungfunction.org heruntergeladen werden.

Die ERS hat 2017 zudem aus der GLI neue Referenzwerte für die Diffusionsleistung DL_{CO} veröffentlicht. Der Datensatz basiert auf der Untersuchung von 12.660 gesunden Nichtrauchern zwischen 5 und 85 Jahren. Die Referenzwerte wurde jedoch noch nicht von der DGP bewertet bzw. übernommen.

Sowohl bei den EGKS- als auch bei den GLI-Normalwerten wird der Mittelwert (Sollwert) sowie das 5. Perzentil des Frequenzspektrums der in der Referenzpopulation gemessenen Werte bestimmt (sogenanntes Referenzintervall). Werte unterhalb des 5. Perzentils (unterer Grenzwert, LLN = „lower limit of normal“) gelten als pathologisch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5 %. Anders ausgedrückt: Weniger als 5 % der ge-

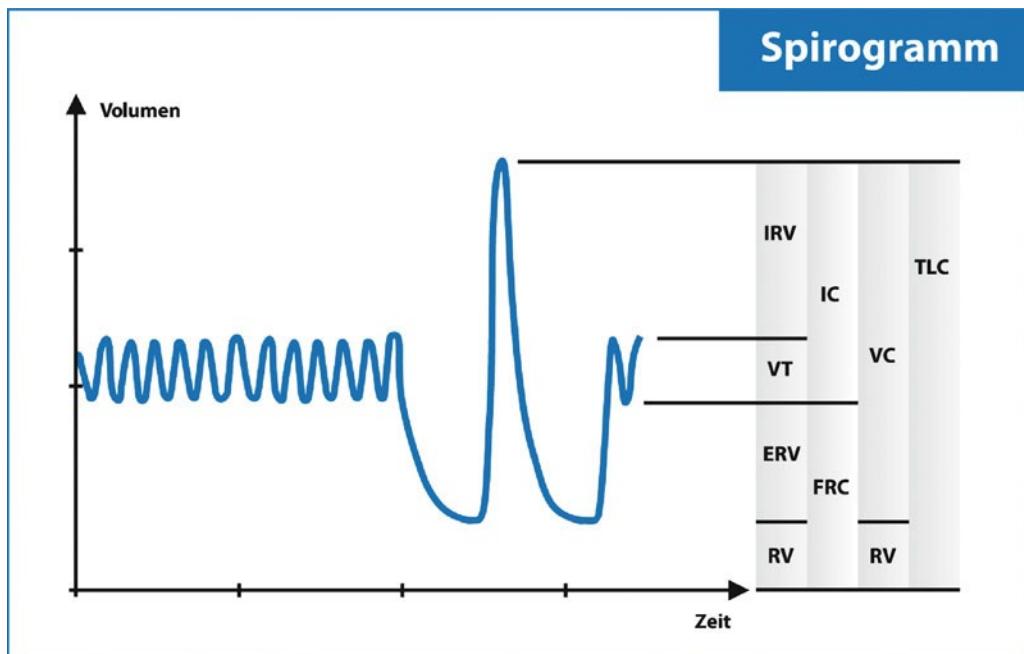


Abb. 2.1 Übersicht der Volumina

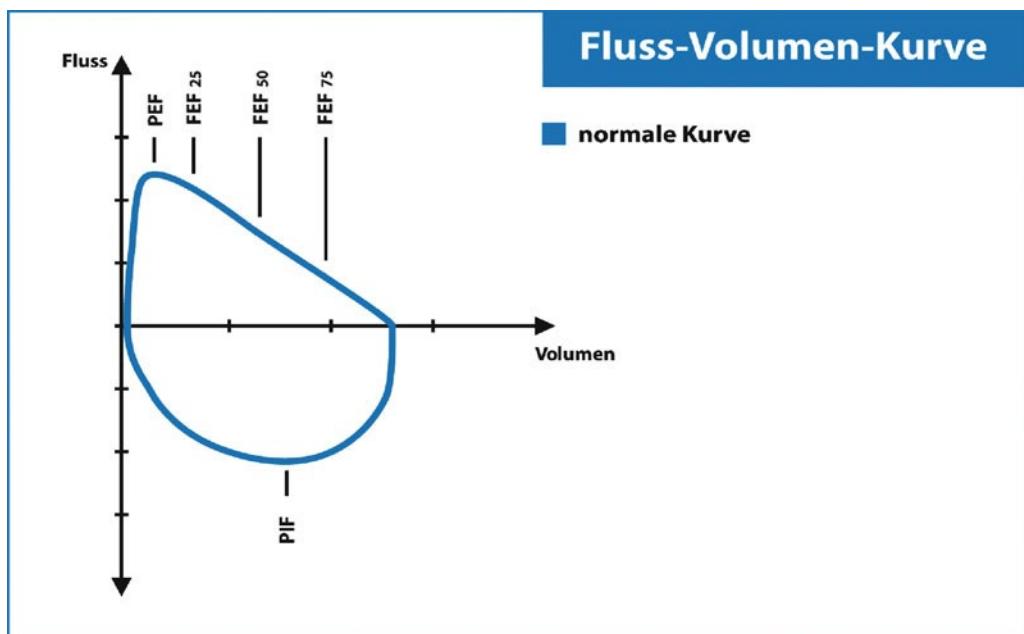


Abb. 2.2 Übersicht der spirometrischen Atemflussparameter

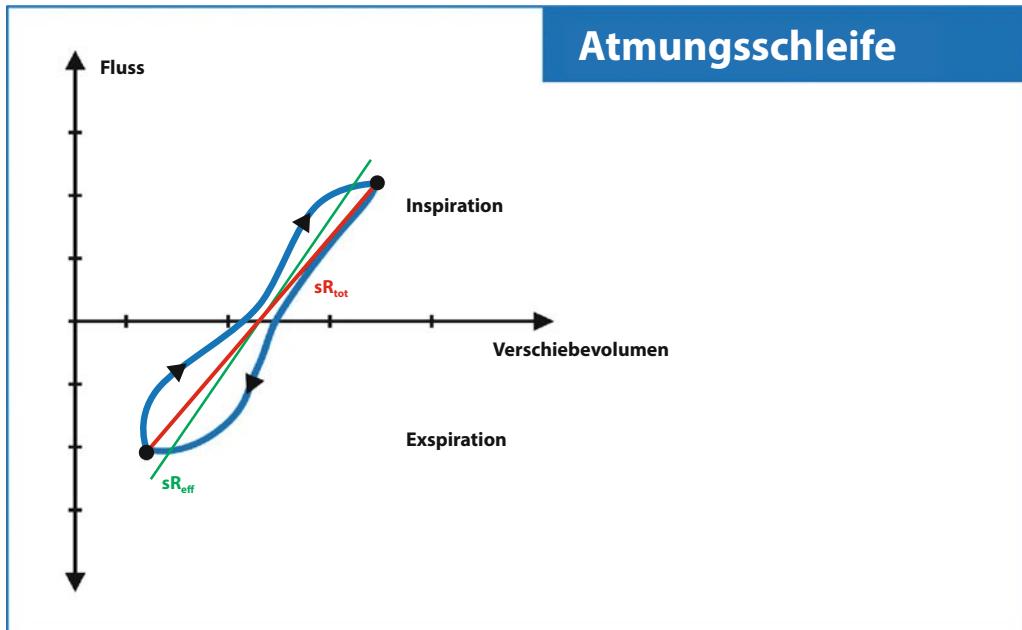


Abb. 2.3 Atmungsschleife mit spezifischer Resistance (sR_{tot} und sR_{eff})

sunden Bevölkerung weisen einen Wert unterhalb des 5. Perzentils auf. Somit sind aber auch bis zu 5 % der unterhalb des Normbereichs liegenden Werte nicht krankheitsbedingt. Bei den GLI-Werten wird zusätzlich ein sogenannter Z-Score für den einzelnen Messwert durch Division der Differenz zwischen Messwert und dem Referenzmittelwert durch die Standardabweichung des Referenzkollektivs errechnet. Der Z-Score gibt an, um wie viele Standardabweichungen ein Messwert vom Mittelwert abweicht. So entspricht $Z = 0$ genau dem Mittelwert, und $Z = -2$ bedeutet, dass der Messwert 2 Standardabweichungen unterhalb vom Mittelwert liegt. Ein Z-Wert von 1,645 entspricht dem 5. Perzentil und damit dem unteren Grenzwert (LLN). Je weiter der Z-Score unterhalb von 1,645 liegt, desto wahrscheinlicher ist der Messwert pathologisch (Abb. 2.4).

Auch ist das teilweise noch geübte Vorgehen, FVC oder FEV_1 als pathologisch zu werten, wenn sie unterhalb von 80 % des Sollwertes liegen, nur bis zu einem Alter von ca. 40 Jahren zu vertreten. Mit zunehmendem Alter sinkt das

5. Perzentil kontinuierlich ab, sodass in höherem Alter der untere Grenzwert (LLN) sogar noch unterhalb von 70 % des Sollwerts liegt.

Sofern die neuen Referenzwerte der GLI-2012 als heutiger Goldstandard noch nicht in die Software (der zur Verfügung stehenden Messapparatur) implementiert sind, sollten die alten EGKS-Werte mit Nutzung der LLN weiter angewandt werden.

Abschließend muss noch angemerkt werden, dass natürlich auch ein im Normbereich liegender Wert pathologisch sein kann, wenn z. B. eine im Referenzbereich liegende Vitalkapazität durch einen Lungengerüstprozess von einem zuvor deutlich erhöhten Wert nun reduziert ist oder wenn eine im Normbereich liegende FEV_1 durch einen Bronchodilatationstest über den Normbereich hinaus ansteigt. Darum sollte man den individuellen Verlauf der Kenngrößen der Lungenfunktion verfolgen, um beurteilen zu können, ob die erhobenen Werte für den individuellen Patienten noch im Normbereich liegen oder schon pathologisch sind.

2.2 • Statische und dynamische Volumina

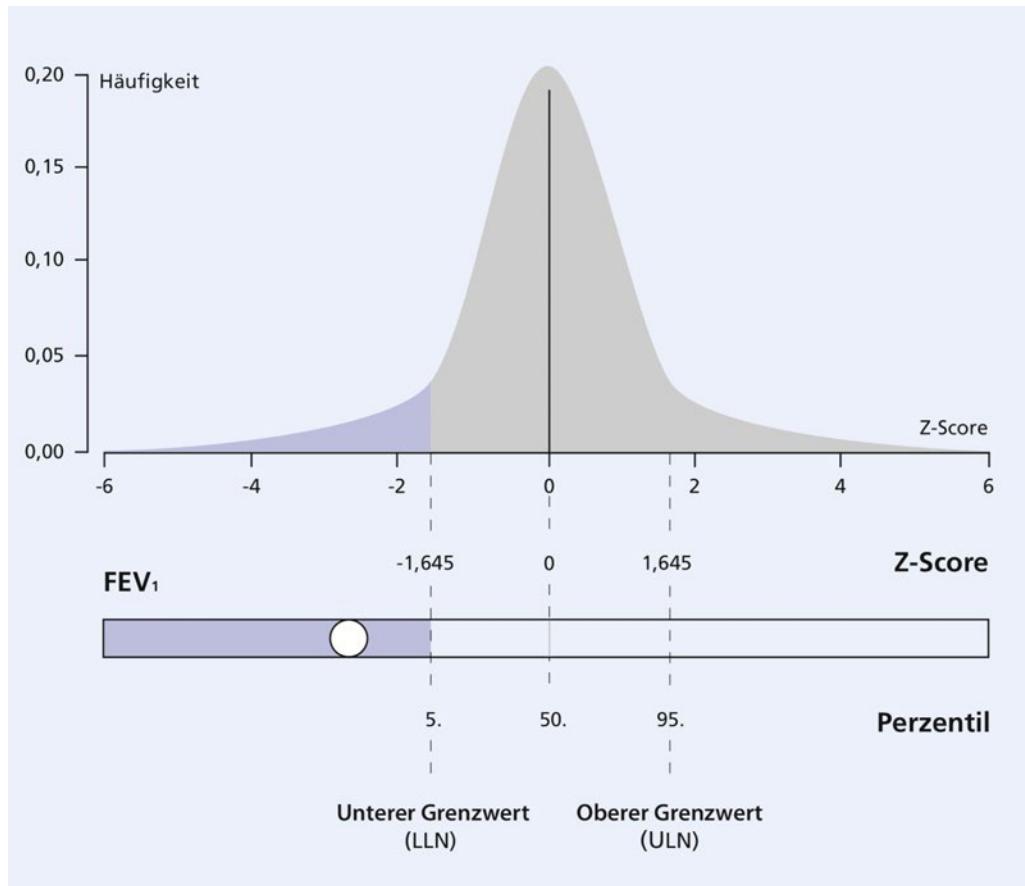


Abb. 2.4 Z-Score und Perzentile der Lungenfunktionsparameter der gesunden Referenzpopulation. Die spirometrischen Messparameter (hier am Beispiel des FEV_1) sind pathologisch, wenn sie einen Z-Score weniger als $-1,645$ aufweisen, damit liegen sie unter dem 5. Perzentil, welches dem unteren Grenzwert (LLN) entspricht. (Criée et al. 2015; aus der „Leitlinie zur Spirometrie“ mit freundlicher Genehmigung der Georg Thieme Verlag KG)

2.2 Statische und dynamische Volumina

VT	Atemzugvolumen/Tidalvolumen: das pro (Ruhe-)Atemzug ein- bzw. ausgeatmete Volumen. Der Wendepunkt zwischen Aus- und Einatmung bezeichnet die Atemmittellage.
IRV	Inspiratorisches Reservevolumen: das Volumen, das nach normaler Inspiration noch zusätzlich maximal ausgeatmet werden kann.

IC	Inspiratorische Kapazität: das Volumen, das aus der Atemruhelage heraus noch maximal eingeatmet werden kann, also $VT + IRV$.
ERV	Exspiratorisches Reservevolumen: das Volumen, das nach normaler Exspiration noch zusätzlich maximal ausgeatmet werden kann.
VC_{in}	Inspiratorische Vitalkapazität (auch IVC): das Volumen, das nach maximaler Expiration maximal eingeatmet werden kann.

VC_{ex}	Exspiratorische Vitalkapazität (auch EVC): das Volumen, das nach maximaler Inspiration maximal ausgeatmet werden kann. Es kann zwischen einer langsamen („relaxed“) Expiration und einer forcierten Expiration (FVC) unterschieden werden. Bei gesunden Probanden besteht keine systematische Differenz zwischen IVC und EVC; nur bei obstruktiven Lungenerkrankungen kann IVC größer sein als EVC und FVC. EVC ist in der Regel größer als FVC.	FEV₁	Einsekundenkapazität (forciertes exspiratorisches Volumen in 1 s): das nach maximaler Inspiration unter stärkster Anstrengung schnellstmöglich ausgeatmete Volumen der ersten Sekunde.
FVC	Forcierte Vitalkapazität: das nach kompletter Inspiration unter stärkster Anstrengung schnellstmöglich ausgeatmete maximale Volumen (Tiffeneau-Manöver).	FEV₁ %	Relative Einsekundenkapazität: das nach maximaler Inspiration unter stärkster Anstrengung schnellstmöglich ausgeatmete Volumen der ersten Sekunde im Verhältnis zur Vitalkapazität (FVC oder VC _{in} , s. oben). Ausgedrückt als Prozentanteil der FEV ₁ an der FVC bzw. VC _{in} .
FRC	Funktionelle Residualkapazität: das Volumen, das sich nach normaler Expiration (endexspiratorisch) noch in der Lunge befindet, also ERV + RV. Bestimmung nur der ventilierten Anteile mittels Heliumdilutionsmethode (FRC _{SB} , also mittels Single-Breath-Methode) oder mittels Bodyplethysmografie (FCR _{pleth}). Die FRC entspricht physiologisch dem TGV.	PEF	Peak Expiratory Flow: maximale exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit, die bei forciertter Expiration nach kompletter Inspiration erreicht werden kann.
TGV	(Intra-)Thorakales Gasvolumen (ITGV): das Volumen, das sich nach normaler Expiration (endexspiratorisch) noch in der Lunge befindet, also ERV + RV. Bestimmung mittels Bodyplethysmografie – neben den ventilierten Anteilen werden auch die gasgefüllten Anteile erfasst. Entspricht physiologisch der FRC, die mittels Heliumdilution ermittelt wird, jedoch nur den ventilierten Anteil erfasst. Bei intrathorakalen Lufteinschlüssen (z. B. „trapped air“ oder Emphysembullae) kann die TGV (bzw. FRC _{pleth}) größer sein als die FRC _{SB} .	PIF	Peak Inspiratory Flow: maximale inspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit, die bei forciertter Inspiration nach kompletter Expiration erreicht werden kann.
RV	Residualvolumen: das Volumen, das nach maximaler Expiration noch in der Lunge verbleibt und nicht ausgeatmet werden kann.	MEF₇₅	Maximale exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) zu dem Zeitpunkt, bei dem noch 75 % der VC auszuatmen sind.
TLC	Totale Lungenkapazität: das Volumen, das sich nach maximaler Inspiration in der Lunge befindet, also VC + RV.	MEF₅₀	Maximale exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) zu dem Zeitpunkt, bei dem noch 50 % der VC auszuatmen sind.
		MEF₂₅	Maximale exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) zu dem Zeitpunkt, bei dem noch 25 % der VC auszuatmen sind.
		MEF₇₅₋₂₅	Maximale exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) im Volumenabschnitt 75–25 % der noch auszuatmenden FVC.

2.4 • Resistance-Parameter

FEF₂₅	Maximale (forcierte) exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) zu dem Zeitpunkt, bei dem 25 % der VC ausgetatmet wurden (= MEF₇₅).
FEF₅₀	Maximale (forcierte) exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) zu dem Zeitpunkt, bei dem 50 % der VC ausgetatmet wurden (= MEF₅₀).
FEF₇₅	Maximale (forcierte) exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) zu dem Zeitpunkt, bei dem 75 % der VC ausgetatmet wurden (= MEF₂₅).
FEF₂₅₋₇₅	Maximale exspiratorische Atemstromstärke bzw. Flussgeschwindigkeit (Flow) im Volumenabschnitt 25–75 % der ausgetatmeten FVC (= MEF₇₅₋₂₅).

MEF und FEF unterscheiden sich lediglich hinsichtlich ihrer Nomenklatur voneinander. Während sich die MEF jeweils auf das noch auszuatmende Volumen (des Tiffeneau-Manövers bzw. FVC) bezieht, ist es bei der FEF das bereits ausgeatmete Volumen (angegeben als Prozent der FVC). MEF wurde vornehmlich im europäischen Raum angewandt, während FEF überwiegend im angloamerikanischen Raum verbreitet ist und nun auch bei uns als primärer Ausdruck empfohlen wird.

Bei Bewertung des forcierten Exspirationsmanövers (Tiffeneau-Manöver) sind zwei Phänomene zu berücksichtigen:

- Es besteht eine deutliche **Anstrengungsabhängigkeit** („effort dependence“) der exspiratorischen Atemflüsse. Dies gilt insbesondere für die 1. Hälfte der ausgetatmeten Vitalkapazität. Bei unzureichender Mitarbeit des Patienten sind die Atemflüsse entsprechend niedriger. Andererseits sind die maximalen (forcierten) Atemflüsse bei maximaler Anstrengung, bedingt durch die Kompression der Atemwege, häufig etwas geringer als bei submaximaler Anstrengung. Bei schlechter Reproduzierbarkeit einer submaximalen Anstrengung

ist jedoch stets ein maximal forciertes Manöver zu fordern.

- Das zweite Phänomen ist die **Zeitabhängigkeit** („time dependence“). Bei langsamer Inspiration (bis zum TLC-Niveau) mit zusätzlicher Pause (>1 s) vor der forcierten Exspiration sind die Atemflüsse bis zu 25 % geringer als bei schneller Inspiration ohne Pause vor der forcierten Exspiration. Ursache hierfür sind unterschiedliche viskoelastische Eigenschaften der Lunge und eine unterschiedlich gute Aktivierung der Exspirationsmuskulatur abhängig vom zeitlichen Verlauf. Es wird daher eine zügige Inspiration ohne Pause vor der anschließenden forcierten Exspiration empfohlen.

2.4 Resistance-Parameter

Über die Atmungsschleife lässt sich die sogenannte spezifische Resistance (sR_{aw}) ermitteln. Sie ist Ausdruck des Atemwegswiderstandes sowie des Lungenvolumens und proportional zur Resistance (R_{aw}) und zur FRC. Die Ermittlung der spezifischen Resistance kann anhand zweier verschiedener Methoden erfolgen: nach dem Verfahren von Matthys als sogenannter effektiver spezifischer Atemwegswiderstand (sR_{eff}) oder nach dem Verfahren von Ulmer als totaler spezifischer Atemwegswiderstand (sR_{tot}). Die Unterschiede werden in ▶ Kap. 4 näher erläutert.

Durch zusätzliche Messung der funktionellen Residualkapazität (FRC_{pleth}) im Verschlussmanöver lässt sich dann im Weiteren der eigentliche Atemwegswiderstand, auch als Resistance (R_{aw}) bezeichnet, errechnen.

sR_{tot}	Totaler spezifischer Atemwegswiderstand: Gerade zwischen maximalem in- und exspiratorischem Druckpunkt der Atmungsschleife.
R_{tot}	Totaler Atemwegswiderstand (Resistance) bzw. Strömungswiderstand: Berechnung: $R_{tot} = sR_{tot} / (FRC_{pleth} + VT/2)$

sR_{eff}	Effektiver spezifischer Atemwegswiderstand: Ermittelt über die Fläche von Atmungsschleife und Fluss-Volumen-Kurve der Ruheatmung.	V_A	Alveolarvolumen: V_A + Totraumvolumen entspricht weitestgehend der TLC. Messung mittels Heliumdilution.
R_{eff}	Effektiver Atemwegswiderstand: Berechnung: $R_{eff} = sR_{eff} / (FRC_{pleth} + VT/2)$	V_{in}	Volumen, das zu Messbeginn inspiriert wird und möglichst der VC entsprechen soll.

2.5 Conductance-Parameter

Die spezifische Atemwegsconductance ist reziprok zur spezifischen Resistance und beschreibt die Leitfähigkeit der Atemwege. Demnach bedeutet eine hohe Resistance gleichzeitig eine niedrige Conductance.

sG_{eff}	Spezifische Atemwegsconductance: Kehrwert der sR_{eff} ($sG_{eff} = 1/sR_{eff}$ bzw. $= 1/R_{eff}/FRC$)
G_{eff}	Atemwegsconductance: Kehrwert der R_{eff} ($G_{eff} = 1/R_{eff}$)

2.6 Diffusionsparameter

$FRC\text{-He}$	Funktionelle Residualkapazität (mittels Heliumdilution); s. FRC, TGV. Synonym auch FRC_{SB} (SB = Single Breath), da neben He zunehmend auch CH_4 (Methan) genutzt wird.
$RV\text{-He}$	Residualvolumen (mittels Heliumdilution); s. RV. Synonym auch RV_{SB} .
TL_{CO}	Transferfaktor (auch DLCO-Diffusionskapazität): Produkt aus K_{CO} und V_A , beschreibt die Gesamtaufnahme von CO durch die Lunge nach vollständiger Inspiration.
K_{CO}	Krogh-Faktor (auch TL_{CO}/V_A oder DL_{CO}/V_A -Transferkoeffizient bzw. Diffusionskoeffizient): Primäre Messgröße, beschreibt die CO-Aufnahme als Konzentrationsabfall pro Zeiteinheit und in Abhängigkeit der alveolokapillären Druckdifferenz.

2.7 Mundverschlussdruckparameter

$P_{0,1}$	Inspiratorischer Mundverschlussdruck 0,1 s nach Beginn der Inspiration, bei Ruheatmung.
PI_{max}	Maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck bei forciertter Inspiration nach vorheriger kompletter Expiration bis zum Residualvolumen.
$P_{0,1}/PI_{max}$	Mundverschlussdruck $P_{0,1}$ bezogen auf den maximalen statischen Inspirationsdruck.
$P_{0,1}/MV$	Mundverschlussdruck $P_{0,1}$ bezogen auf das Atemminutenvolumen.
$P_{0,1}/(VT/ti)$	Mundverschlussdruck $P_{0,1}$ bezogen auf die mittlere Inspirationsgeschwindigkeit bei Ruheatmung.

2.8 Blutgasanalyseparameter

$CO\text{-Hb}$	Carboxyhämoglobin: Hämoglobinfraktion, die mit Kohlenmonoxid gebunden ist.
$Met\text{-Hb}$	Methämoglobin: Hämoglobinfraktion mit dreiwertig oxidiertem Eisen im Hb.
pH	pH -Wert: aktueller Gehalt an freien Protonen (H^+ -Ionenkonzentration).
pO_2	Sauerstoffpartialdruck: Teildruck des Sauerstoffs am Gesamtgasgemisch.
pCO_2	Kohlendioxidpartialdruck: Teildruck des Kohlendioxids am Gesamtgasgemisch.

HCO_3	Bikarbonat: Konzentration an Bikarbonat bzw. Standardbikarbonat (berechnet für normoventilatorische Verhältnisse).
BE	Basenüberschuss („base excess“): Abweichung der Pufferbasen.
SaO_2	Sauerstoffsättigung: Hämoglobinanteil, der mit Sauerstoff gesättigt (oxygeniert) ist.

Weiterführende Literatur

Criée C-P, Baur X, Berdel D, Bösch D et al (2015) Leitlinie zur Spirometrie. Pneumologie 69(3):147–164
Quanjer PH, Stanojevic S, Cole TJ, Baur X et al (2012) multi-ethnic reference values for spirometry for the 3–95 year age range: the global lung function 2012 equations. Eur Respir J. 40(6):1324–1343



Spirometrie

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

- 3.1 Einleitung und Messprinzip – 16**
- 3.2 Durchführung der Untersuchung – 17**
- 3.3 Ventilationsstörungen – 18**
- 3.4 Fallbeispiele – 18**
- Weiterführende Literatur – 56**

3.1 Einleitung und Messprinzip

Unter einer Spirometrie versteht man die Messung von Lungenvolumina bzw. Atemstromstärken am Mund. Die Spirometrie ist weit verbreitet und besitzt einen hohen Stellenwert in der differenzialdiagnostischen Untersuchung und Bewertung respiratorischer Symptome. Darüber hinaus kommt einigen Messwerten eine hohe Bedeutung als prognostischer Faktor von Atemwegserkrankungen zu. Mit relativ geringem apparativem und zeitlichem Aufwand ist die Spirometrie einfach durchführbar und ermöglicht die Ermittlung grundlegender Atemvolumina sowie in- und exspiratorischer Atemflussverhältnisse. Sie ist deshalb hervorragend als Screening-Untersuchung geeignet. Die □ Abb. 3.1 zeigt ein Modell eines einfachen Spirometers.

Der besondere Wert der Spirometrie liegt in der Diagnostik obstruktiver Ventilationsstörungen und der Möglichkeit, die therapeutische Beeinflussbarkeit dieser sehr häufigen Ventilationsstörung zu objektivieren. Es sei darauf hingewiesen, dass andere Störungen der Lungenfunktion mit der Spirometrie nicht oder nur eingeschränkt darstellbar sind. Patienten mit schwerster Ateminsuffizienz können daher unter Umständen ein normales Untersuchungsergebnis in der Spirometrie aufweisen.

Erste Untersuchungen von Atemvolumina gehen bis auf das Jahr 1681 zurück (G. A. Borelli). Nach einer stetigen Weiterentwicklung hat Alfred Fleisch um 1925 mit der Pneumotachografie die Glockenspirometrie, den Keilbalg und andere ursprüngliche Messformen abgelöst und ein neues Zeitalter der Lungenfunktionsprüfung eingeleitet. Das forcierte Exspirationsmanöver wurde erstmals von Tiffeneau und Pinelli 1947 beschrieben und ist bis heute als Tiffeneau-Manöver bekannt.

Ein Pneumotachograf arbeitet mittels eines bekannten Widerstandes, der in die Atemströmung der zu untersuchenden Person geschaltet ist. Der Widerstand wird hierbei entweder durch ein Sieb (nach Lilly) oder ein System von Kapillarröhrchen (nach Fleisch) erzeugt. Der Widerstand bewirkt einen atemflussabhängigen Druckabfall. Diese Druckdifferenz wird in elektrische Spannung umgewandelt und verhält sich proportional zur Atemströmung (□ Abb. 3.2). Durch Integration dieser Spannung über die Zeit kann dann zusätzlich das Volumen bestimmt werden. Alternativ wurden Pneumotachografen entwickelt, die die Strömung mittels eines schräg in die Atemluft einfallenden Ultraschallmessstrahls ermitteln (□ Abb. 3.3).

Bei der Spirometrie per Ultraschall basiert die Flussmessung auf der Beeinflussung des Ul-



□ Abb. 3.1 Spirometer mit Mundstück. (Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Vyaire Medical GmbH)

3.2 • Durchführung der Untersuchung

Abb. 3.2 Druckdifferenzmessung des Pneumotachografen

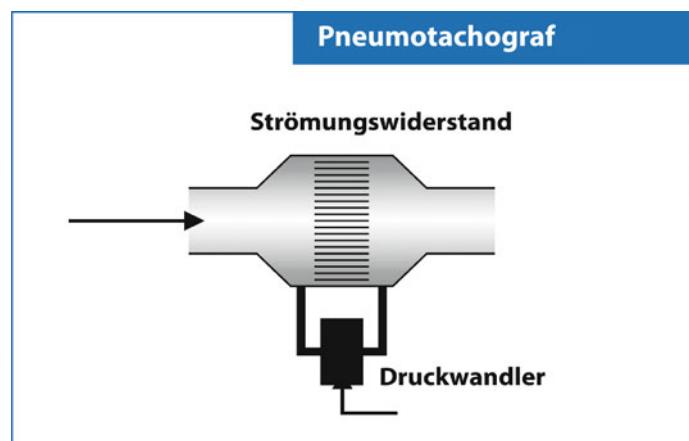
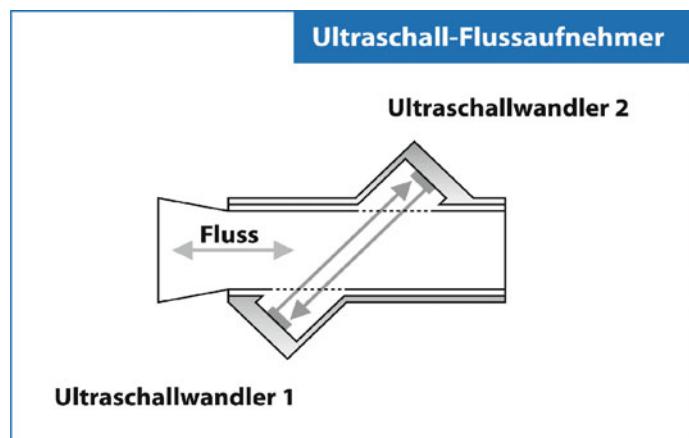


Abb. 3.3 Ultraschall-Flussaufnehmer



traschallsignals durch den Atemstrom. Zwei diagonal gegenüberliegende Schallwandler senden und empfangen abwechselnd Ultraschallwellen. Ein Fluss im Atemrohr beschleunigt bzw. bremst nun die Schallwellen in der einen oder anderen Richtung. Die Größe der Differenz der Schall-Laufzeiten korreliert hierbei mit der Flussgeschwindigkeit. Diese Technik wird mittlerweile zum Teil auch bei Tischspirometern angeboten.

Bei der grafischen Darstellung der Spirometrie wird die Volumenänderung typischerweise gegen die Zeit (Volumen-Zeit-Kurve) und die Flussgeschwindigkeit im Verhältnis zum Volumen (Fluss-Volumen-Kurve) wiedergegeben (Abb. 2.1 und 2.2 in ▶ Kap. 2). Zudem erfolgt

die tabellarische Ausgabe diverser Volumen- und Flussparameter.

3.2 Durchführung der Untersuchung

Für die Durchführung einer korrekten und aussagekräftigen Untersuchung sollten einige Dinge beachtet werden:

- Der Patient sollte beengende Kleidungsstücke ablegen bzw. öffnen.
- Die Körpergröße sollte (ohne Schuhe) gemessen werden, da die Angaben häufig fehlerhaft sind.

- Die Messung erfolgt im Sitzen, da sich sämtliche Referenzwerte auf eine sitzende Position beziehen.
- Die Nase wird mit einer Nasenklemme verschlossen.
- Der Patient nimmt das Mundstück zwischen die Zähne, die Zunge liegt dabei unter dem Mundstück, und die Lippen umschließen das Mundstück vollständig.

Die eigentliche Spirometrie besteht aus einer Ruhespriometrie und einer direkt anschließenden forcierten Spirometrie, die sich mehrmals wiederholt, um die Reproduzierbarkeit und somit die Güte der Messung sicher bestimmen zu können. Der Messablauf ist folgender:

- Nach kurzer Eingewöhnungszeit, in der sich der Patient unter Ruheatmung an das Gerät adaptiert, werden 3–4, jedoch mindestens 2 Tiffeneau-Manöver durchgeführt. Zwischen den einzelnen Manövern soll der Patient 2- bis 3-mal spontan atmen.
- Das Manöver beginnt, indem der Patient aufgefordert wird, langsam pressend maximal auszuatmen. Danach folgt eine zügige und vollständige Inspiration zur Bestimmung der inspiratorischen VC. Nach möglichst geringer Pause (unter 1 s) schließt sich eine forcierte maximale Expiration an, bis ein deutliches Plateau im zeitlichen Volumenverlauf sichtbar wird (Exspiration mindestens 6 s).
- Wichtig ist neben der maximalen Anstrengung des forcierten Exspirationsmanövers das Erreichen der maximalen Volumengrenzwerte, d. h. zunächst RV-, dann TLC- und anschließend wieder RV-Niveau.

Der Ablauf der Spirometrie ist auch anhand der Volumen-Zeit-Kurve in □ Abb. 2.1, ▶ Kap. 2, dargestellt.

3.3 Ventilationsstörungen

Mittels Spirometrie lässt sich eine Ventilationsstörung nachweisen und meist auch grob differenzieren. Ventilationsstörungen werden

vereinfacht in obstruktive und restriktive Störungen eingeteilt.

Eine **obstruktive Ventilationsstörung** ist durch eine Abnahme der maximalen Atemstromstärken bzw. Atemflüsse charakterisiert und lässt sich mittels Spirometrie sehr gut ermitteln. Der PEF sowie die FEF sind jeweils vermindert (konkave Krümmung der Exspirationskurve), die VC ist meist normal (siehe Fluss-Volumen-Kurve). In der Volumen-Zeit-Kurve ist ein verlängertes Exspirium mit vermindertem FEV₁ zu erkennen.

Restriktive Ventilationsstörungen sind durch eine Einschränkung der Lungenausdehnung charakterisiert. Hierbei sind die Atemvolumina (TLC und VC) entsprechend vermindert. Der Fluss ist dabei proportional zur Volumenminderung reduziert, d. h. es liegt keine eigentliche Flussminderung vor, der Tiffeneau-Index (FEV₁/FVC) beträgt ca. 100 % vom Soll, und die Fluss-Volumen-Kurve ist nicht eingedellt, sondern manchmal sogar leicht konvex gekrümmmt.

Definiert ist die Restriktion über eine TLC-Verminderung, weshalb sie mittels einfacher Spirometrie im Grunde nur vermutet, aber nicht eindeutig diagnostiziert werden kann.

Gemischte Ventilationsstörungen mit Anteilen obstruktiver und restriktiver Ventilationsstörungen lassen sich mittels einfacher Spirometrie somit ebenfalls nicht ausreichend differenzieren und bedürfen einer weiteren Untersuchung mittels ergänzender Bodyplethysmografie.

Die □ Abb. 3.4 und 3.5 verdeutlichen das Prinzip der Darstellung obstruktiver und restriktiver Ventilationsstörungen anhand der Fluss-Volumen-Kurve.

3.4 Fallbeispiele

Die folgenden 14 Fallbeispiele sind ungeschönt aus der täglichen Praxis entnommen und führen systematisch durch die Interpretation von Spirometrie-Untersuchungsergebnissen und die Befundung von Ventilationsstörungen. Ergänzt werden die Beispiele durch wichtige Hinweise für die tägliche Praxis und wertvolle Hintergrundinformationen.

3.4 • Fallbeispiele

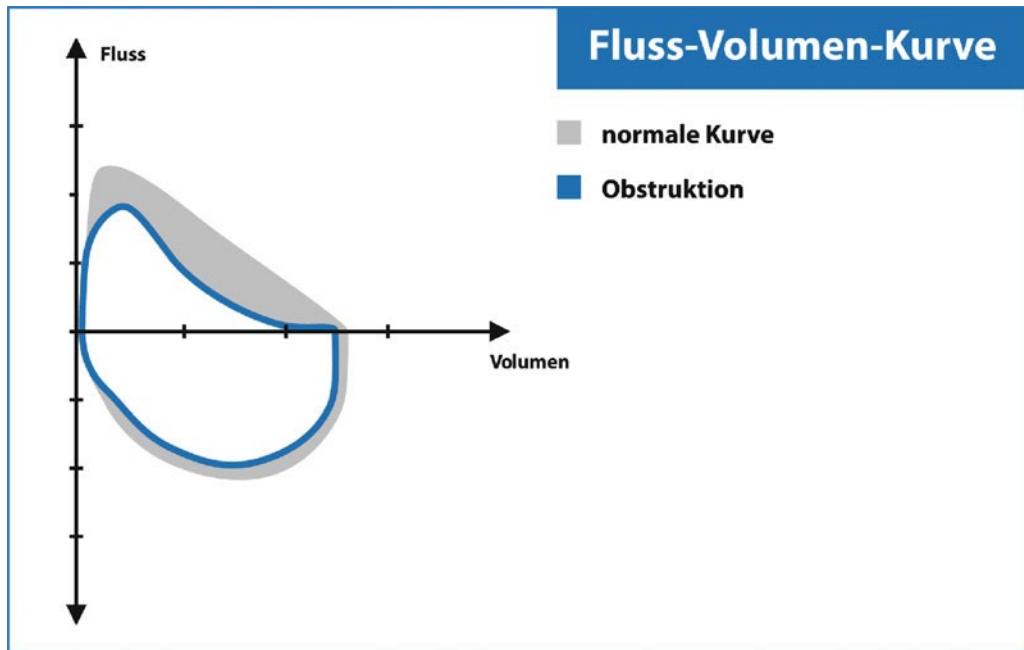


Abb. 3.4 Obstruktive Ventilationsstörung

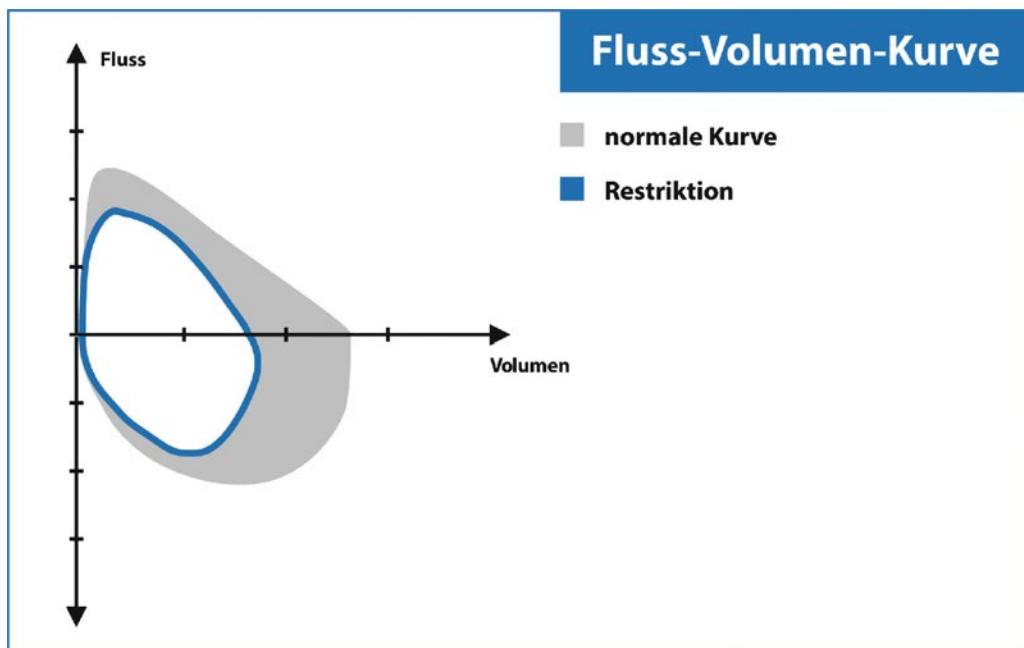


Abb. 3.5 Restriktive Ventilationsstörung

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 1

65 Jahre, weiblich, 175 cm, 78 kg, 26 kg/m²

Das erste Beispiel zeigt die Spirometrie einer 65-jährigen Frau mit leichter Belastungsdyspnoe unklarer Genese.

Links oben kann der gesamte Untersuchungsablauf in der Volumen-Zeit-Grafik nachvollzogen werden. Nach kurzer Eingewöhnung (4 × Ruheatmung) erfolgt das erste von 3 Exspirations- bzw. Tiffeneau-Manövern. Die Manöver sind jeweils durch 4 Zyklen einer Ruheatmung getrennt. Das erste und hier beste Manöver wird rechts oben in der Fluss-Volumen- sowie der Volumen-Zeit-Grafik dargestellt. Inmitten der Fluss-Volumen-Kurve ist zudem die Schleife der Ruheatmung dargestellt. Links und rechts davon lassen sich IRV und ERV ablesen.

Die 4 Punkte in der Volumen-Zeit-Kurve der gesamten spirometrischen Untersuchung markieren die Messmarken der inspiratorischen Vitalkapazität und des Tidalvolumens. In der Mitte der Abbildung finden Sie die Fluss-Volumen- und Volumen-Zeit-Kurven der einzelnen Tiffeneau-Manöver zum direkten Vergleich übereinander dargestellt. Schon bei Betrachtung der Fluss-Volumen-Kurve mit dem zusätzlich optisch hinterlegten Normwertverlauf (graues Dreieck) kann eine relevante Ventilationsstörung ausgeschlossen werden. Der Eindruck eines Normalbefundes lässt sich durch Betrach-

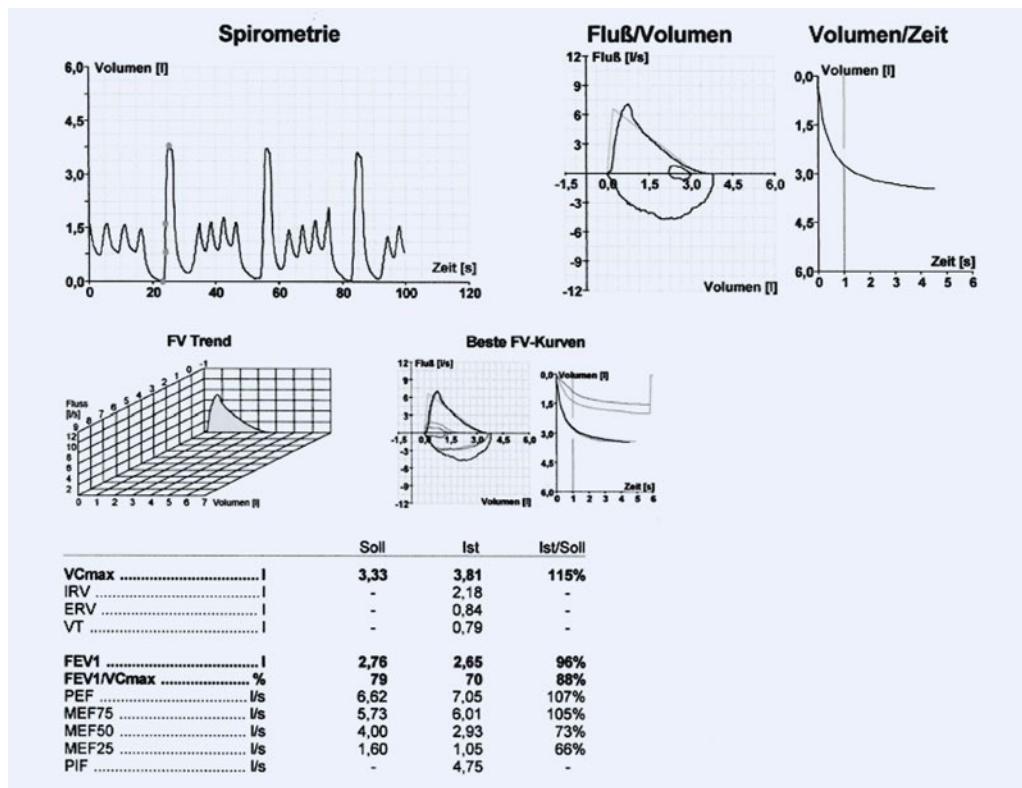


Abb. 3.6 Spirometrie Fallbeispiel 1

tung der einzelnen Messparameter bestätigen. Die im Normbereich liegende relative Einsekundenkapazität ist – bei ebenfalls normaler VC – wegweisend für den Normalbefund.

Der leicht verminderte Fluss zum Ende der Exspiration (MEF₂₅ entspricht FEF₇₅) ist durch den etwas überschießenden Fluss zu Beginn des Manövers (s. nasenförmige Ausbuchtung von PEF und MEF₇₅) bedingt und ist nicht mit einer peripheren Obstruktion zu verwechseln.

Zusammenfassend: aktuell kein Nachweis einer Ventilationsstörung, d. h. keine Obstruktion oder Restriktion. Allerdings muss betont werden, dass dies nicht gleichzusetzen ist mit dem generellen Ausschluss einer Lungenfunktionsstörung.

Als Ursache für die Beschwerden der Patientin wurden im Weiteren eine leichte Transferstörung (Diffusionsmessung) sowie eine Oxygenierungsstörung (BGA) im Rahmen einer Herzinsuffizienz festgestellt.

⌚ Sind die relative Einsekundenkapazität (FEV₁ %) und die VC im Normbereich, liegt keine relevante Ventilationsstörung vor. Es handelt sich jedoch immer nur um eine Momentaufnahme der Ventilationsfunktion. Beim Asthma bronchiale bzw. beim hyperreagiblen Bronchialsystem besteht typischerweise eine starke Variabilität der Ventilationsfunktion mit Wechsel zwischen meist normaler Ventilationsfunktion und phasenweise vorliegender obstruktiver Ventilationsstörung. Ferner ist ein Normalbefund nicht mit dem generellen Ausschluss einer Lungenfunktionsstörung bzw. pulmonalen Erkrankung zu verwechseln, da durch die Spirometrie nur ein Teil der Lungenfunktion untersucht wird.



Indikationen und Kontraindikationen der Spirometrie

Typische Indikationen einer Spirometrie sind:

- Abklärung unspezifischer Symptome wie Dyspnoe, Husten, in-/exspiratorische Atemgeräusche, Zyanose etc.
- Diagnostik von Atemwegserkrankungen (z. B. COPD, Asthma bronchiale)
- Screening bei Zigarettenrauchen
- Verdacht auf Erkrankungen von Atemwegen, Lunge, Herz, knöchernem Thorax sowie Skelettmuskulatur mit Auswirkungen auf die Atmung
- Verdacht auf Erkrankungen der Atempumpe (Atemzentrum, zugehörige Nerven und Muskeln)
- Verlaufs-/Therapiekontrolle bronchopulmonaler Erkrankungen
- Präoperative Diagnostik
- Arbeitsmedizinische Kontrolle
- Allgemeine gesundheitliche Vorsorge

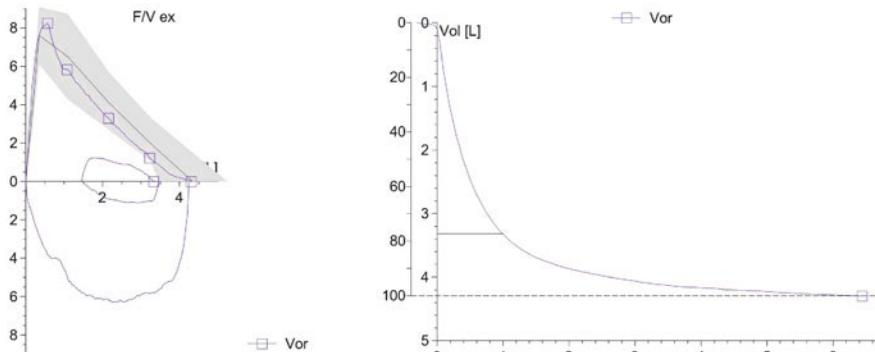
Als Kontraindikationen gelten:

- Myokardinfarkt/akutes Koronarsyndrom, akute Lungenembolie. Es wird empfohlen, auf eine Spirometrie mit forcierten Atemmanövern während der ersten 6 Wochen zu verzichten.
- Spannungspneumothorax
- Großes aszendierendes Aortenaneurysma, zerebrales Aneurysma
- Hämoptysen unklarer Genese
- Kürzliche Augen-, Thorax- oder Abdomenoperation. Es wird empfohlen, auf eine Spirometrie mit forciertem Atemmanöver gemäß chirurgischer Empfehlung (in der Regel 4 Wochen, bei minimalinvasiver Chirurgie meist deutlich kürzer) zu verzichten
- Ebenfalls vermieden werden sollten: akute Erkrankungen, die die Technik negativ beeinflussen können (z. B. Übelkeit/Erbrechen etc.)

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 2**25 Jahre, weiblich, 172 cm, 77 kg, 26 kg/m²**

Die Lungenfunktionsprüfung des nachfolgenden Beispiels wurde im Rahmen einer Untersuchung zur Sporttauglichkeit durchgeführt.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
VC MAX	L	4.33	3.46	4.29	99.1					Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.33	3.46	4.29	99.1					Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.69	2.97	3.32	89.9					Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	85.87	74.27	77.34	90.1					Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	7.60	6.12	8.26	108.6					ECCS (1993)
FEF 25	L/s	6.51	4.29	5.83	89.5					ECCS (1993)
FEF 50	L/s	4.08	2.68	3.30	80.9					Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	1.96	1.05	1.22	62.1					Quanjer GLI (2012)
PIF	L/s			6.31						

Abb. 3.7 Spirometrie Fallbeispiel 2

?

Betrachten Sie die Fluss-Volumen-Kurve und die Volumen-Zeit-Kurve. Gibt es Hinweise auf eine Lungenfunktionsstörung?

■ Interpretation der Untersuchung

Es lässt sich eine gute Mitarbeit erkennen. Die Fluss-Volumen-Kurve folgt dem Verlauf der Normwertkurve, und die exspiratorischen Messpunkte liegen im Bereich der normalen Streuung (grauer Bereich). Somit kann eine Ventilationsstörung, d. h. Obstruktion oder Restriktion, zum Untersuchungszeitpunkt ausgeschlossen werden. Auch die Volumen-Zeit-Kurve zeigt einen normalen Verlauf mit einem altersgerechten Tiffeneau-Index (FEV_1/FVC) von fast 80 % (horizontaler Strich bei dem Einsekundenwert).

Bestätigt wird dies durch die numerischen Messwerte, die jeweils um den Sollmittelwert liegen, sowie das Ampelschema des Z-Scores. Die grünen Punkte bedeuten, dass die jeweiligen Messwerte im Normwertbereich liegen. Zudem ist zu beachten, dass die neuen Referenzwerte der Global Long Funktion Initiative (GLI) von 2012 – soweit für die Parameter verfügbar – verwendet wurden. Dies ist insofern von Relevanz, als dass sie ca. 10 % über denen der alten Sollwertformeln der EGKS von 1993 liegen. Da die GLI-2012-Werte noch nicht flächendeckend genutzt werden, ist es unerlässlich, bei der Beschreibung auch die absoluten Werte zu kommunizieren, denn die relativen Werte (% vom Soll) können zwischen den Lungenfunktionslabors differieren.

► Die Befundung sollte systematisch sein:

Ist die Mitarbeit gut bzw. die Durchführung korrekt?

Aus der Fluss-Volumen-Kurve des forcierten Exspirationsmanövers lässt sich die spirometrische Funktion herauslesen. Sind die Flüsse normal? Ist die VC normal? Häufig finden sich typische Formen eingeschränkter Fluss-Volumen-Kurven (s. hierzu auch □ Abb. 3.4 und 3.5).

Erst im nächsten Schritt soll die Funktionsstörung anhand der numerischen Werte quantifiziert werden. Der untere Sollgrenzwert bzw. Z-Score hilft dabei, grenzwertige Abweichungen zu erkennen.

Angegeben ist jeweils der Sollmittelwert („Soll“) sowie der untere Sollgrenzwert („Soll uG“ bzw. LLN) und der Z-Score (Abweichung vom Sollmittelwert mit Ampelschema).



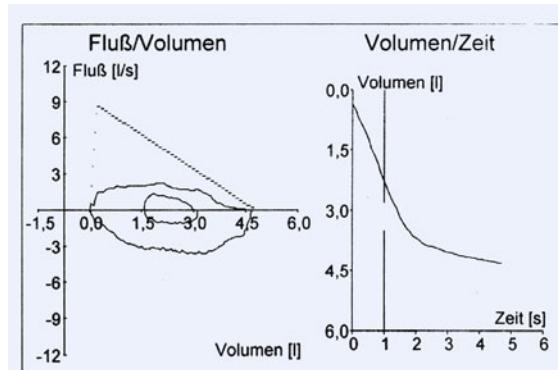
Ein Z-Score bis zu einer Abweichung von $-1,64$ Standardabweichungen vom Sollmittelwert (LLN) ist als normal definiert und mit grün markiert. Werte unterhalb (bzw. oberhalb) der $1,64$ -fachen Standardabweichung sind orange und solche über bzw. unter einer $2,46$ -fachen Standardabweichung (d. h. $1,5 \times 1,64$) sind rot dargestellt. Dabei ist die Grenze zwischen orange und rot willkürlich gewählt und dient lediglich der Verdeutlichung des Schwergrades.

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 3**64 Jahre, männlich, 183 cm, 89 kg, 27 kg/m²**

Im nachfolgenden Beispiel ist der Befund eines asymptomatischen Patienten dargestellt, der wegen eines Kolonkarzinoms operiert werden soll.

Abb. 3.8 Erste Spirometrie Fallbeispiel 3



	Soll	Ist	Ist/Soll
FEV1	1	3,52	59%
FEV1/VCmax	%	76	57%
PEF	l/s	8,65	26%
MEF75	l/s	7,66	26%
MEF50	l/s	4,61	42%
MEF25	l/s	1,77	73%
PIF	l/s	-	-
		3,63	

Zeigt das Beispiel einen normalen Befund?

■ Interpretation der Untersuchung

Beim ersten Blick auf den Kurvenverlauf und die Werte hat man den Eindruck einer deutlichen Ventilationsstörung. Tatsächlich handelt es sich jedoch lediglich um eine deutlich eingeschränkte Mitarbeit oder auch unzureichende Anleitung durch den durchführenden Untersucher. Die Messung wurde wiederholt.

Der folgende Befund (► Abb. 3.9) zeigt den gleichen Patienten noch am selben Nachmittag. Erfreulicherweise konnte bei dem Patienten, wie klinisch auch erwartet, doch noch ein Normalbefund erhoben werden.

Es ist jedoch kritisch zu anzumerken, dass sowohl der Untersuchungsablauf (siehe Grafik „Spirometrie“), als auch die Mitarbeit (Grafik „Spirometrie“ und „Beste FV-Kurven“) nicht den Vorgaben entsprechend bzw. eingeschränkt sind. Mitunter ist es jedoch unerlässlich, Kompromisse einzugehen, um überhaupt eine Aussage zu erhalten, die allerdings unter Berücksichtigung der Güte getroffen werden muss. In diesem Fall konnte eine relevante Ventilationsstörung sicher ausgeschlossen werden – selbst bei suboptimaler Mitarbeit bzw. Durchführung.

➤ **Mit der Anleitung bzw. Führung durch die Untersuchung und der letztendlichen Mitarbeit steht und fällt das Ergebnis der Lungenfunktionsprüfungen. Nur bei einer guten Mitarbeit sind die Ergebnisse uneingeschränkt zu bewerten.**

Da der Befunder die Messung meist nicht selbst durchführt oder beobachtet, ist es unerlässlich, die Mitarbeit mit den Ergebnissen, z. B. in Form einer vereinbarten Kodierung, zu dokumentieren. Hilfreich ist auch die Darstellung der verschiedenen Messmanöver übereinander in einer separaten Grafik. ► Abb. 3.10 zeigt die verschiedenen Tiffeneau-Manöver einer einzigen Untersuchung (!), die völlig von einander abweichen und die Mitarbeitsabhängigkeit eindrücklich widerspiegeln.

Nur die untersuchende MTA kann diese einzelnen Manöver sehen und muss die Mitarbeit entsprechend dokumentieren

oder die Untersuchung solange wiederholen, bis die Qualität und somit die Validität verbessert ist.



Wie erkenne ich die Qualität der Mitarbeit?

Neben dem subjektiven Eindruck in Hinblick auf die Bemühungen bzw. die Ausführung gibt es einige objektive Hinweise (Reproduzierbarkeits-/Akzeptanzkriterien) für eine gute oder weniger gute Mitarbeit:

- Bei Durchführung des Tiffeneau-Manövers sollte in der Volumen-Zeit-Kurve am Ende der maximalen Inspiration eine kurze (lediglich angedeutete) und am Ende der maximalen Expiration eine deutliche (längere) Plateauphase erkennbar sein.
- Die Fluss-Volumen-Kurve sollte geschlossen sein.
- Am Beginn der Expiration sollte (bis auf ganz wenige Ausnahmen) ein Peak Flow erkennbar sein (Peak = Spitze). Bei steilem Anstieg sollte dieser innerhalb von 120 ms erreicht werden.
- Es sollen mindestens 3 Versuche durchgeführt werden. Mindestens 2 erzielte Fluss-Volumen-Kurven sollten annähernd deckungsgleich verlaufen. Die Differenz von FEV_1 und FVC soll nicht mehr als 5 % und weniger als 150 ml betragen.
- Bei einer FVC von <1 l darf die Differenz nicht mehr als 100 ml betragen.
- Die Expiration soll >6 s (Kinder <10 Jahren >3 s) betragen.
- Die Kurven sollten möglichst frei von Hustenartefakten oder ähnlichen Störeinflüssen und nicht unterschiedlicher Anstrengung sein.

Das Fallbeispiel hat die Mitarbeitsabhängigkeit eindrucksvoll gezeigt. Grundvoraussetzungen für eine gute Patientenmitarbeit sind eine gute Schulung der untersuchenden Person und eine korrekte, patientengerechte Anleitung bzw. Führung des Untersuchten während der Untersuchung. Hierbei muss vom Patienten stets die maximale Leistung gefordert werden.

Weitere Hinweise zur korrekten Durchführung der Untersuchung finden sich auch in ► Abschn. 3.2.

3.4 • Fallbeispiele

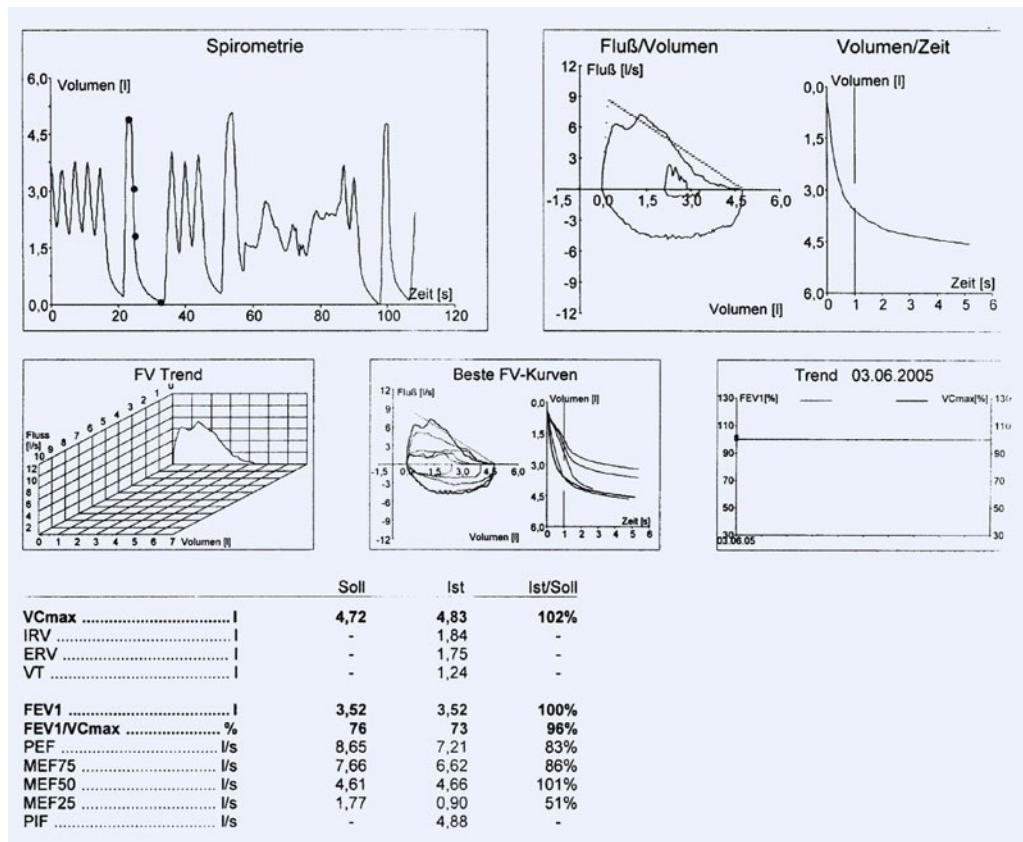


Abb. 3.9 Zweite Spirometrie Fallbeispiel 3

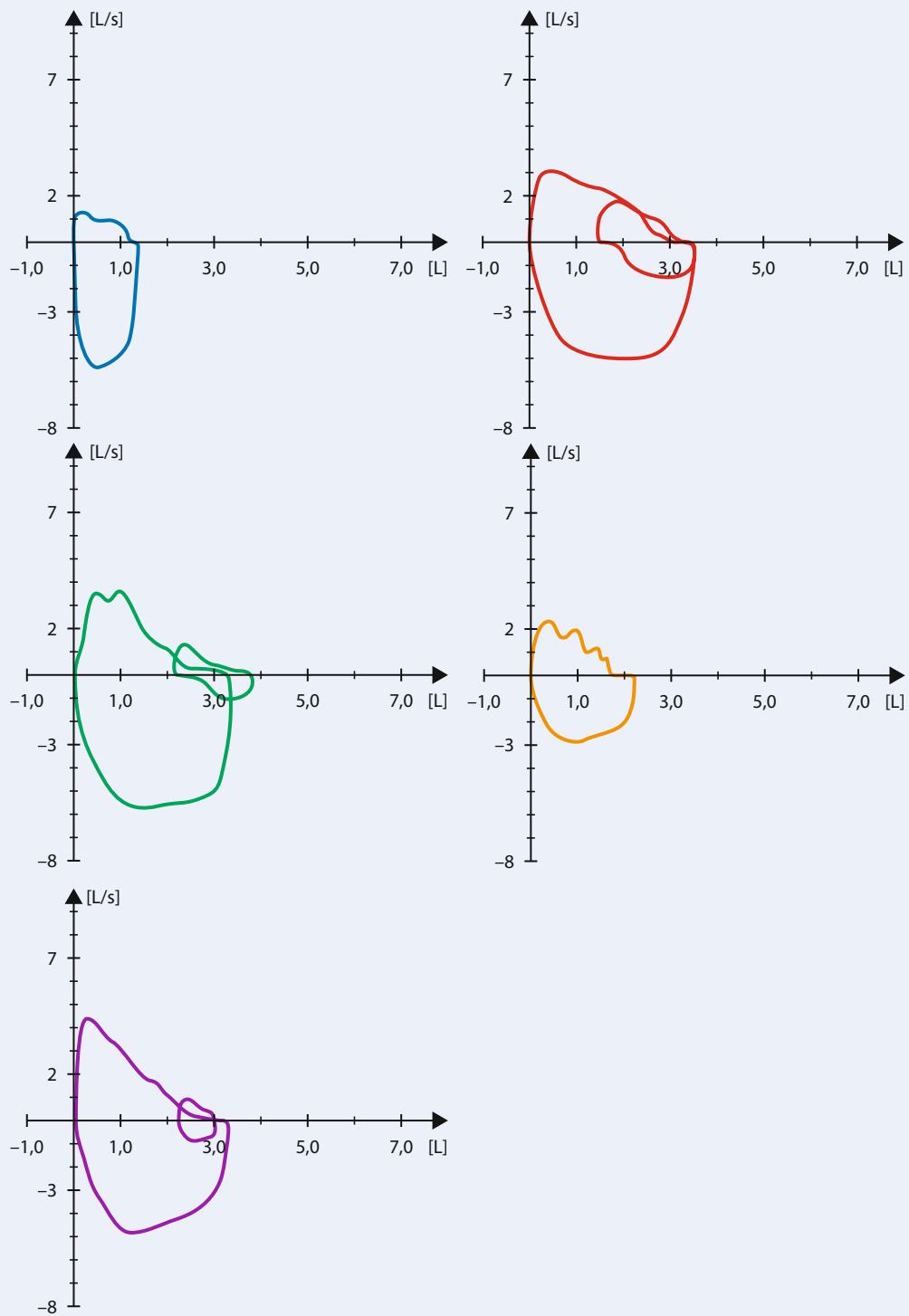


Abb. 3.10 Beispiel stark varierender Tiffeneau-Manöver – unzureichende Mitarbeit

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 4

70 Jahre, weiblich, 138 cm, 80 kg, 42 kg/m²

Nachfolgend ist der Befund einer Patientin mit langjährig bekannter obstruktiver Lungenerkrankung dargestellt. Die Untersuchung wurde unter der laufenden Therapie durchgeführt.

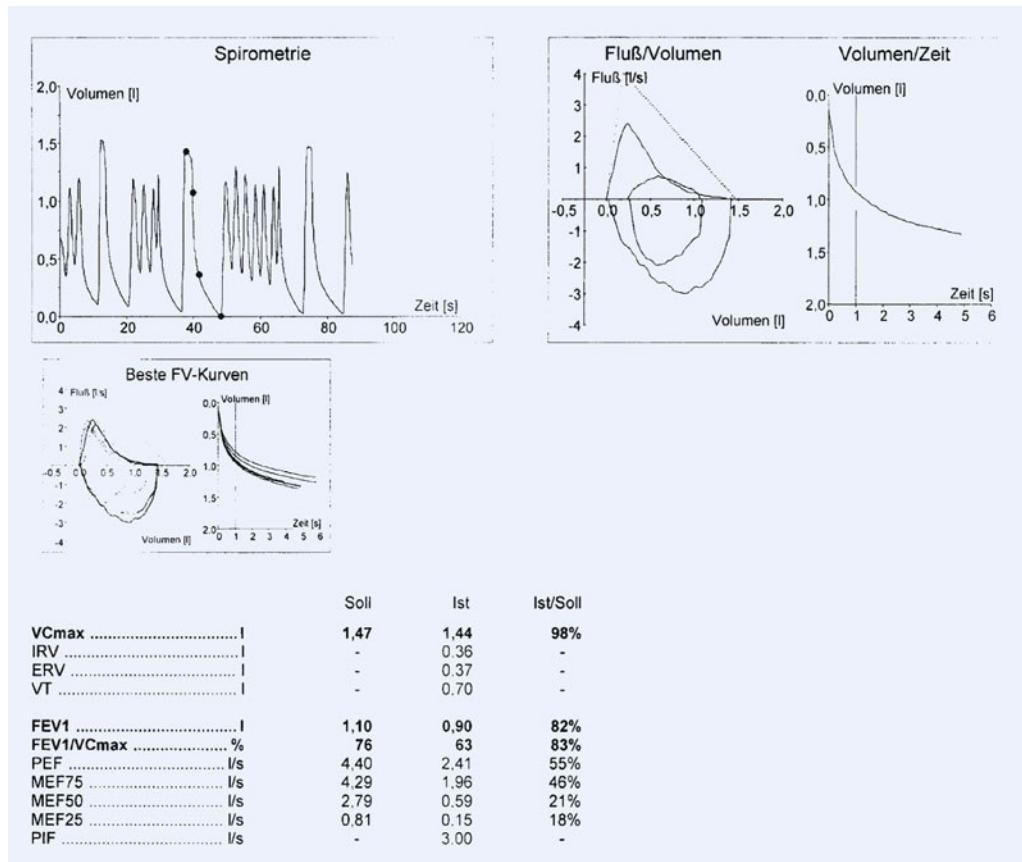


Abb. 3.11 Spirometrie Fallbeispiel 4

?

Schauen Sie sich die Kurven und die dazugehörigen Werte an und versuchen Sie, einen Befund zu formulieren.

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurvenverläufe sprechen für eine gute Mitarbeit der Patientin. Der exspiratorische Teil der Fluss-Volumen-Kurve ist konkav gekrümmmt. Die Atemflussparameter (PEF, FEV₁, MEF_{75,50,25}) sind deutlich eingeschränkt.

Bei normaler VC und leicht eingeschränkter Einsekundenkapazität sowie folglich auch leicht eingeschränkter relativer Einsekundenkapazität (Tiffeneau-Index) kann zusammenfassend der Befund einer leichtgradigen obstruktiven Ventilationsstörung (bei vorbekannter und behandelner obstruktiver Lungenerkrankung) gestellt werden.

❷ Eine obstruktive Ventilationsstörung ist durch eine Flusslimitation mit Verminde-
rung der altersabhängigen relativen Ein-
sekundenkapazität (FEV₁/VC_{in}) auf Werte
unterhalb der 5. Perzentile definiert.
Hierbei ist die Abnahme der maximalen
exspiratorischen Atemstromstärken (MEF
bzw. FEF) charakteristisch und für das

typische Bild der Fluss-Volumen-Kurve
bestimmend. Die Regressionsgleichungen
der Referenzwerte mit Errechnung der
5. Perzentile sind in □ Tab. 3.1 dargestellt.

In unserem Beispiel ergibt sich ein unterer Grenzwert (LLN) für FEV₁/VC_{in} von 65 % (75,8–10,7). Mit 63 % liegt die Patientin somit unter der 5. Perzentile. Die weit verbreitete Anwendung der fixen Ratio von 0,7 bzw. 70 % gemäß GOLD ist zwar einfach, aber nicht korrekt, da die relative Einsekundenkapazität (FEV₁/FVC) altersabhängig ist und der Mittelwert bei Patienten <50 Jahren über 70 % und bei Patienten >50 Jahren unter 70 % liegt und somit bei unreflektierter Anwendung gerade im Alter viele falsch positive Befunde gestellt würden.



Der spirometrische Schweregrad der Obstruktion wird über die Einschränkung der FEV₁ bestimmt. Hierbei ist zu beachten, ob die Werte prä- oder post-dilatatorisch ermittelt wurden.

■ Tab. 3.1 Regressionsgleichungen (EGKS-Werte, 1993) für Lungenvolumina und exspiratorische Atemstromstärken für Erwachsene im Alter von 18–70 Jahren

Geschlecht	Parameter	Einheit	Mittelwert-Gleichung	1,64 × RSD
Männer	VC _{in}	l	(6,10 × KL) – (0,028 × A) – 4,65	±0,92
	FVC	l	(5,76 × KL) – (0,026 × A) – 4,34	±1,00
	FEV ₁	l	(4,30 × KL) – (0,029 × A) – 2,49	±0,84
	PEF	l/s	(6,14 × KL) – (0,043 × A) + 0,15	±1,99
	MEF ₅₀	l/s	(3,79 × KL) – (0,031 × A) – 0,35	±2,17
	FEV ₁ /VC (%)		–0,18 × A + 87,21	±11,8
Frauen	VC _{in}	l	(4,66 × KL) – (0,024 × A) – 3,28	±0,69
	FVC	l	(4,43 × KL) – (0,026 × A) – 2,89	±0,71
	FEV ₁	l	(3,95 × KL) – (0,025 × A) – 2,60	±0,62
	PEF	l/s	(5,50 × KL) – (0,030 × A) – 1,11	±1,48
	MEF ₅₀	l/s	(2,45 × KL) – (0,025 × A) + 1,16	±1,81
	FEV ₁ /VC (%)		–0,19 × A + 89,10	±10,7

KL Körperlänge in Metern, A Alter in Jahren

Bei Patienten zwischen 18 und 25 Jahren wird in der Gleichung das Alter 25 eingesetzt

Die 5. Perzentile errechnet sich durch die Subtraktion von 1,64 × RSD (residuale Standardabweichung) vom errechneten Mittelwert

3.4 • Fallbeispiele

Die klinischen Schweregrade bestimmter obstruktiver Ventilationsstörungen (Asthma bronchiale, COPD) müssen nicht mit dem spirometrischen Schweregrad der Obstruktion (☞ Tab. 3.2) übereinstimmen. In den Spirometrie-Leitlinien der deutschen Atemwegsliga/DGP von 2015 wurde die Klassifikation vereinfacht (☞ Tab. 3.2).

☞ **Tab. 3.2** Spirometrischer Schweregrad der Obstruktion

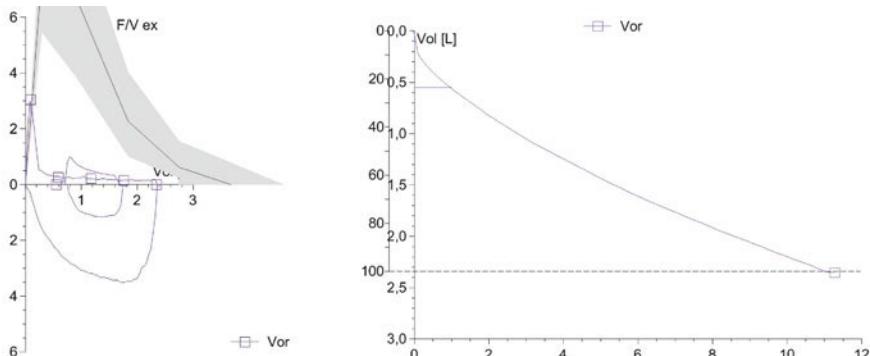
Schweregrad	FEV ₁ (in % vom Soll)
I – leicht	>60
II – mittelschwer	60–40
III – schwer	<40

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 5

67 Jahre, männlich, 166 cm, 71 kg, 26 kg/m²

Der Patient des fünften Beispiels wurde mit progredienter Ruhedyspnoe bei vorbekannter COPD vorstellig.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-Z-Score ₁	Author
VC MAX	L	3.67	2.74	2.34	63.8	Quanjer GLI (2012)
FVC	L	3.67	2.74	2.34	63.8	Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	2.83	2.06	0.55	19.5	Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	77.13	63.89	23.58	30.6	Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	7.46	5.47	3.04	40.7	ECCS (1993)
FEF 25	L/s	6.65	3.84	0.26	3.8	ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.27	1.02	0.21	9.4	Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.62	0.23	0.15	24.0	Quanjer GLI (2012)
PIF	L/s			3.52		

Abb. 3.12 Spirometrie Fallbeispiel 5

Wie ist das Untersuchungsergebnis zu bewerten?

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. Schwergradige Obstruktion (DGP III bzw. GOLD IV). Ein rascher Abfall des PEF und ein sehr stark eingeschränkter Fluss im mittleren Abschnitt der forcierteren Exspiration deuten auf einen exspiratorischen Bronchialkollaps hin. Hierfür spricht auch, dass der Fluss der Ruheatmung bei gleichem Volumenstand deutlich über dem der forcierteren Kurve liegt. Das Exspirium ist entsprechend lang (>11 s) mit stark verzögter Entleerung in der Volumen-Zeit-Kurve.

Die VC ist leichtgradig vermindert. Ursache hierfür ist am ehesten eine Überblähung, die jedoch ohne Bodyplethysmografie nicht gezeigt werden kann, ebenso wenig wie eine zusätzliche Restriktion, die differenzialdiagnostisch gleichwohl vorliegen könnte.

Zusammenfassend ergibt sich ein typischer COPD-Aspekt mit schwerer Obstruktion und leichter VC-Minderung, am ehesten bei zu erwartender Überblähung.

☞ **Die COPD ist durch eine chronische Obstruktion charakterisiert. Häufig ergeben sich zudem Zeichen der Atemwegsinstabilität. Oftmals liegt zudem eine VC-Minderung vor, die meist durch eine gleichzeitige Überblähung mit sog. Air Trapping verursacht ist. Ergänzend ist daher eine**

Bodyplethysmografie empfehlenswert, um die funktionellen Veränderungen noch differenzierter beurteilen und einzelne Veränderungen sicherer zuordnen zu können. Bei sehr starker Einschränkung ist diese zusätzliche Untersuchung jedoch nicht immer möglich.

Bei Erstbefund einer Obstruktion empfiehlt sich zudem die Durchführung einer Bronchospasmolyse, um die Reversibilität der Obstruktion zu prüfen. Denn nicht jede Obstruktion ist durch das Vorliegen einer COPD bedingt.



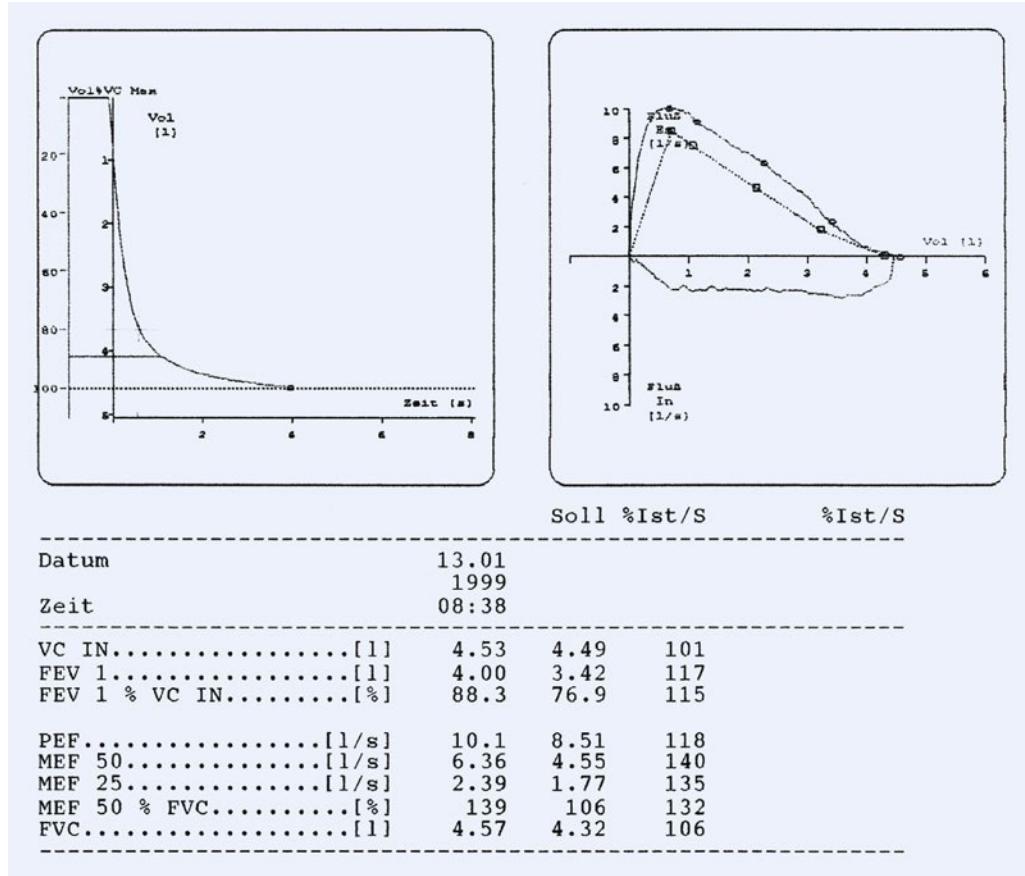
Die Differenzialdiagnose der Obstruktion umfasst viele Krankheiten:

- Asthma bronchiale
- COPD (chronisch-obstruktive Bronchitis, obstruktives Lungenemphysem)
- Obstruktive Bronchiolitis
- Bronchiektasien
- Zystische Fibrose (Mukoviszidose)
- Silikose
- Intra-/extrathorakale Atemwegsstenosen (Tumoren, Stimmbandparese, Larynxödem)
- Lungenparenchymerkrankungen mit Obstruktion (z. B. Sarkoidose)
- Tumoren (endobronchial oder komprimierend extrabronchial)

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 6**58 Jahre, männlich, 176 cm, 83 kg, 27 kg/m²**

Das folgende Beispiel zeigt die Spirometrie eines 58-jährigen Patienten, der bei vorliegendem Pankreaskarzinom präoperativ im Rahmen einer Risikoabschätzung untersucht werden sollte und bei dem bislang keine Ventilationsstörung bekannt war.

**Abb. 3.13** Spirometrie Fallbeispiel 6

?

Ergeben sich durch den Befund Hinweise auf ein erhöhtes perioperatives Risiko?

■ Interpretation der Untersuchung

Bei unauffälliger Expiration fällt eine abgeflachte, plateauähnliche Inspirationskurve mit einem PIF von ca. 3 l/s auf. (Vergleichen Sie hierzu den bauchigen Inspirationsteil z. B. aus Fall 2.) Erklärt ist dieser Befund durch eine langsame, nicht forciert durchgeführte Inspiration, also letztlich die Mitarbeit. Um Missverständnisse zu vermeiden, sollte deshalb bei entsprechender Kurvenveränderung immer zusätzlich noch eine forcierte Inspiration gefordert werden. Differenzialdiagnostisch könnte es sich nämlich auch um eine variable extrathorakale Stenose mit inspiratorischer Flusslimitierung handeln (Abb. 3.14). Im konkreten Fallbeispiel wiesen jedoch die anderen Manöver (hier nicht abgebildet) einen normalen inspiratorischen Flussverlauf auf. Die VC und das FEV₁ sowie die übrigen Werte lagen im Normbereich. Eine Ventilationsstörung war somit ausgeschlossen.

Zusammenfassend handelt es sich um einen Normalbefund bei leicht eingeschränkter Mitarbeit. Aus Sicht der Ventilationsfunktion besteht somit kein erhöhtes perioperatives Risiko.

➤ Eine unauffällige Spirometrie schließt eine aktuelle Ventilationsstörung aus. Von der Norm abweichende Kurvenverläufe bzw. veränderte Messwerte sind jedoch nicht zwangsläufig mit dem Vorliegen einer Ventilationsstörung gleichzusetzen. Stets muss hier die Mitarbeit berücksichtigt werden. Die bestmögliche Mitarbeit ist von entscheidender Bedeutung!

Der sichere Ausschluss einer obstruktionsbedingten Flussveränderung ist nur durch den Vergleich der Kurven mehrerer Manöver möglich. Deckungsgleich veränderte Kurven sprechen für eine pathologische Beeinträchtigung, unterschiedliche Kurvenverläufe eher für eine mitarbeitsbedingte Veränderung. Bei der Untersuchung werden daher immer so viele Manöver gefordert, dass mindestens 2 Kurven nahezu kongruent verlaufen. In unserem Beispiel ist aus technischen Gründen nur eine Kurve dargestellt. Bei Unkenntnis der anderen Kurven müsste die Untersuchung wiederholt oder eine weitergehende Abklärung eingeleitet werden.

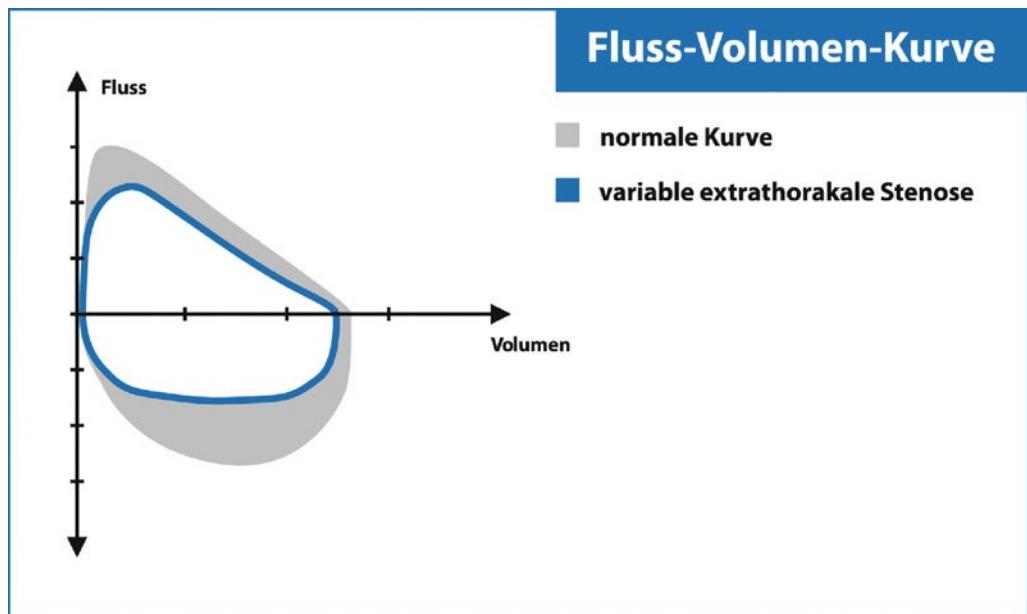


Abb. 3.14 Variable extrathorakale Stenose

3.4 • Fallbeispiele

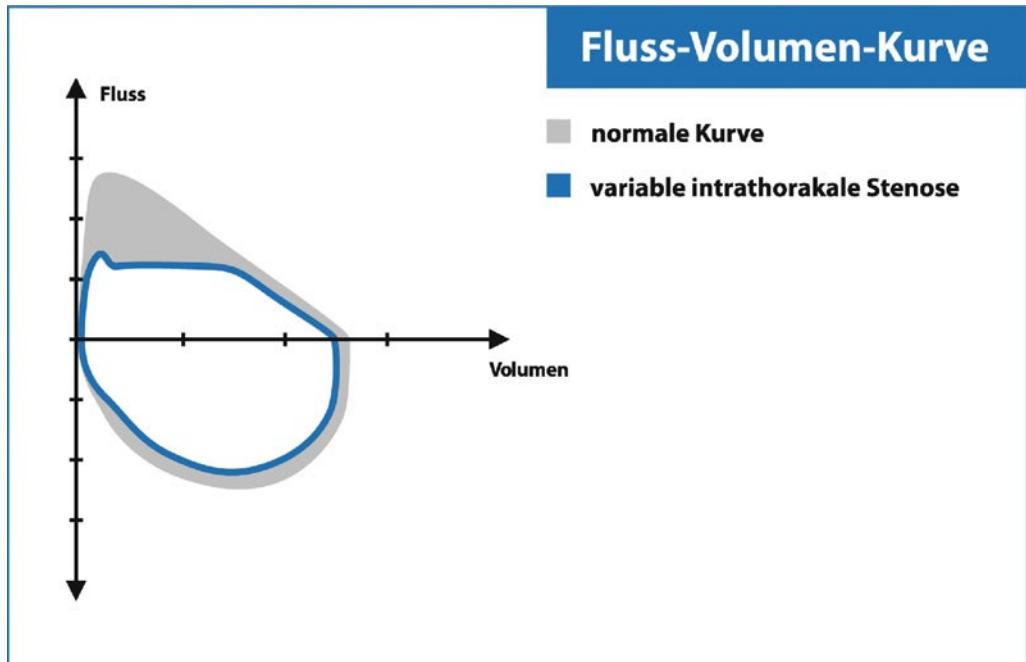


Abb. 3.15 Variable intrathorakale Stenose

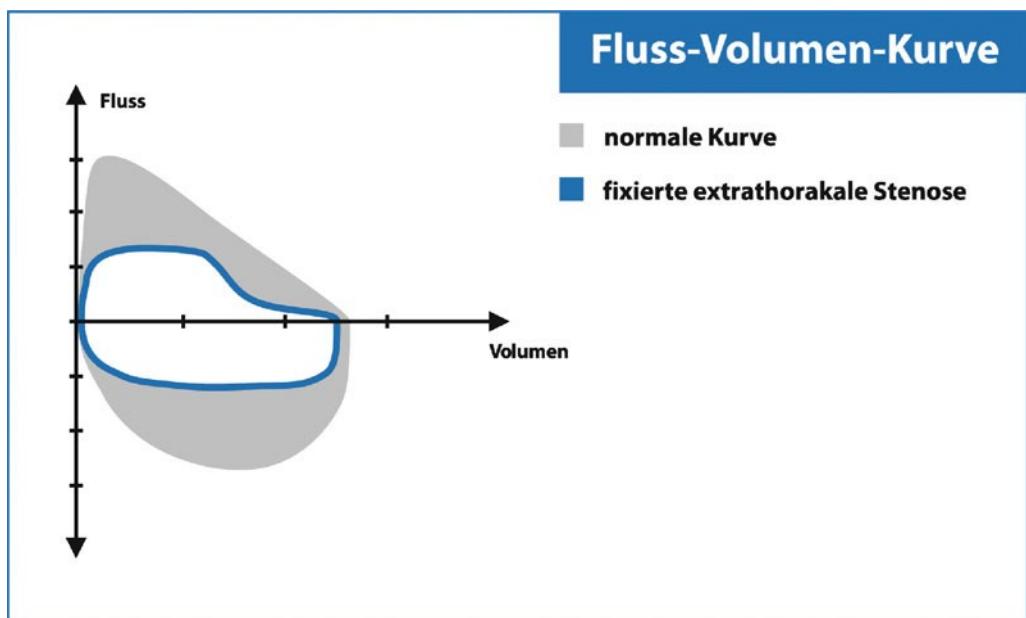


Abb. 3.16 Fixierte extrathorakale Stenose



Unterscheidung variabler intrathorakaler und extrathorakaler Stenosen

Vereinfacht kann man sagen: Eine intrathorakale Obstruktion erkennt man an einer exspiratorischen Flusslimitierung, erfasst durch ein forcierter Exspirationsmanöver (☞ Abb. 3.15).

Eine extrathorakale Obstruktion erkennt man an einer inspiratorischen Flusslimitierung, erfasst durch ein forcierter Inspirationsmanöver (☞ Abb. 3.14).

3

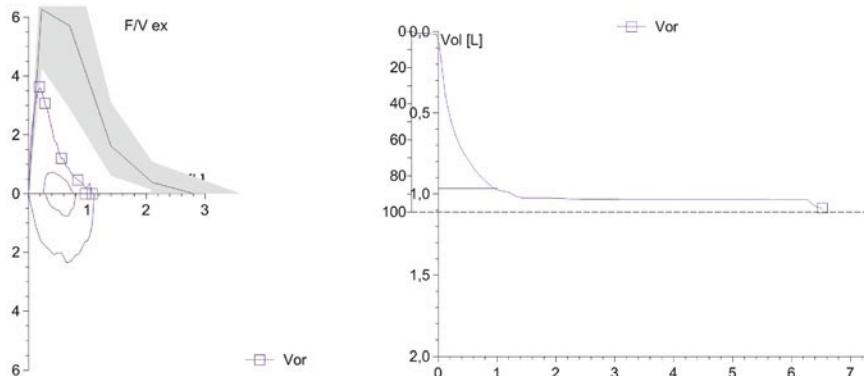
Eine fixierte – also von In- bzw. Expiration unabhängige – Stenosierung der großen Atemwege (z. B. durch eine Tumorkompression der Trachea) zeigt sich auch in einer kombinierten in- und exspiratorischen Flusslimitierung (☞ Abb. 3.16).

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 7

79 Jahre, männlich, 155 cm, 59 kg, 25 kg/m²

Dieses Fallbeispiel zeigt den spirometrischen Befund eines Mannes mit leichter Dyspnoe und radiologisch narbigen Veränderungen der Lungen sowie pleuralen Verschwielenungen beidseits.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3 -2 -1 Z-Score 1 2 3	Author
VC MAX	L	2.80	2.02	1.11	39.7	Quanjer GLI (2012)
FVC	L	2.80	2.02	1.08	38.5	Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	2.13	1.48	0.97	45.4	Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	76.34	61.29	89.56	117.3	Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	6.27	4.28	3.63	57.9	ECCS (1993)
FEF 25	L/s	5.70	2.89	3.14	55.0	ECCS (1993)
FEF 50	L/s	1.62	0.62	1.26	78.0	Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.38	0.13	0.52	137.5	Quanjer GLI (2012)
PIF	L/s			2.39		

Abb. 3.17 Spirometrie Fallbeispiel 7

?

Lässt sich bei dem Patienten eine Ventilationsstörung nachweisen?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven sprechen für eine gute Mitarbeit. Die Form der Fluss-Volumen-Kurve ist verschmälert, bei proportionalen Flussverminderungen. Die Verschmälerung ist Ausdruck einer deutlichen VC-Minderung (x-Achse). Tabellarisch bestätigt sich die mittel- bis schwergradige VC-Minderung. Die Einsekundenkapazität ist ebenfalls vermindert. In Relation zur verminderten VC ist die FEV₁ jedoch normal bzw. sogar erhöht – siehe relative Einsekundenkapazität (FEV₁/FVC in % vom Soll).

Zusammenfassend sprechen der typische Kurvenverlauf und die Werte für das Vorliegen einer mindestens mittelgradigen restriktiven Ventilationsstörung, die jedoch ohne ergänzende Bodyplethysmografie nicht direkt gezeigt werden kann. Eine obstruktive Ventilationsstörung liegt sicher nicht vor.

Der radiologische Befund spricht ebenfalls für eine Restriktion. Ergänzend sollten, wenn möglich, eine Bodyplethysmografie, eine Diffusionstestung und eine Blutgasanalyse durchgeführt werden.

➤ **Eine erniedrigte VC (<80 % vom Soll) zusammen mit einer normalen oder gar erhöhten relativen Einsekunden-**

kapazität spricht für das Vorliegen einer restriktiven Ventilationsstörung. Definiert ist die Restriktion jedoch durch eine TLC unterhalb der 5. Perzentile des Sollwertes (Tab. 3.3) bzw. entsprechend verminderten Z-Score. Den eigentlichen Nachweis einer Restriktion erhält man also nur über die zusätzliche bodyplethysmografische Messung der FRC und anschließende Berechnung der TLC (TLC = VC + RV, wobei RV = FRC – ERV).



Restriktive Ventilationsstörungen werden in parenchymal bzw. pulmonal und extraparenchymal bzw. extrapulmonal unterschieden.

- Typische parenchymale/pulmonale Ursachen sind: Lungenfibrose, Alveolitis, Pneumonie, Pneumonitis, Silikose, zystische Fibrose (Mukoviszidose), Linksherzinsuffizienz.
- Typische extraparenchymale/extrapulmonale Ursachen sind: Adipositas, Kyphoskoliose, Trichterbrust, Pleuraerguss, Pleuraverschwartung, Pneumothorax, Pleuramesotheliom, Zwerchfellparese, neuromuskuläre Erkrankungen, Myopathien.
- Ein Zustand nach Pneumektomie stellt zudem eine besondere Situation dar.

➤ **Tab. 3.3 Regressionsgleichung (EGKS-Werte) für die totale Lungenkapazität Erwachsener im Alter von 18–70 Jahren**

Geschlecht	Einheit	Mittelwert-Gleichung	1,64 × RSD
Männer	l	$7,99 \times \text{KL} - 7,08$	±1,15
Frauen	l	$6,60 \times \text{KL} - 5,79$	±0,99

KL Körperlänge in Metern

Bei Patienten zwischen 18 und 25 Jahren wird in der Gleichung das Alter 25 eingesetzt

Die 5. Perzentile errechnet sich durch die Subtraktion von $1,64 \times \text{RSD}$ (residuale Standardabweichung) vom errechneten Mittelwert

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 8

68 Jahre, männlich, 164 cm, 75 kg, 28 kg/m²

In diesem Fallbeispiel wird die Kontrolluntersuchung eines Patienten mit bekannter COPD (unter laufender Medikation) gezeigt. Ein Jahr zuvor war eine leichtgradige Obstruktion (FEV₁: 62 % vom Soll) gemessen worden.

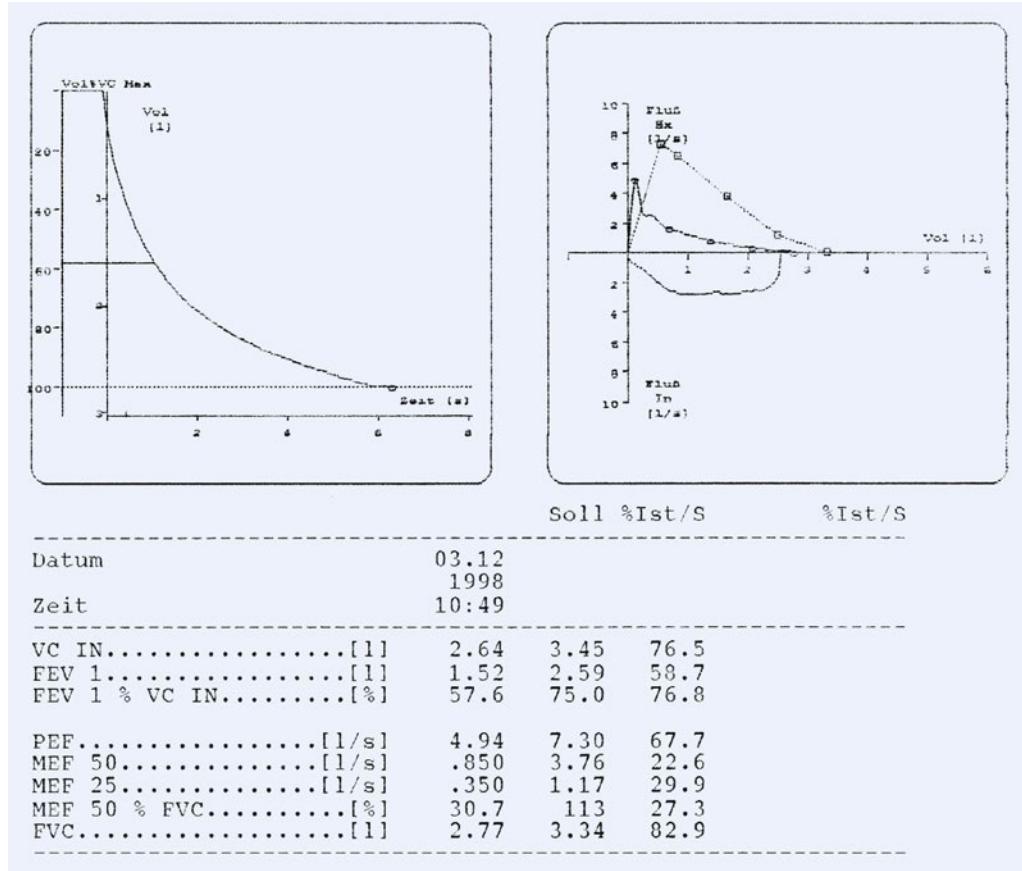


Abb. 3.18 Spirometrie Fallbeispiel 8

❓ Hat sich der Obstruktionsgrad im Vergleich zum Vorjahr verändert?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Fluss-Volumen-Kurve zeigt die typischen Merkmale einer Obstruktion mit konkaver Krümmung des abfallenden Schenkels der Exspirationskurve. In der Volumen-Zeit-Kurve ist außerdem ein verlängertes Exspirium erkennbar.

Bei der gezeigten Obstruktion sind die absolute und die relative Einsekundenkapazität entsprechend vermindert. Es ist jedoch zu beachten, dass die Vitalkapazität ebenfalls vermindert ist. Dies führt theoretisch zu einer Abmilderung des Obstruktionsgrades bei isolierter Betrachtung der relativen Einsekundenkapazität (FEV_1/VC). Zur Beurteilung des Obstruktionsgrades müssen deshalb neben der Kurvenform sämtliche Werte betrachtet werden.

Die kleine Differenz zwischen inspiratorischer (VC_{in}) und forcierte exspiratorische Vitalkapazität (FVC) ist durch die Mitarbeit begründet, da die FVC physiologischer- und pathophysiologischerweise eher kleiner, aber nicht größer sein kann als VC_{in} .

Zusammenfassend zeigt der Befund eine mittelgradige (postdilatatorische) Obstruktion mit zusätzlicher leichter VC-Minderung. Erfahrungsgemäß ist eine Verminderung der VC fast immer durch eine Lungenüberblähung bedingt, wenn die relative Einsekundenkapazität unter 55 % vermindert ist. Die relative Einsekundenkapazität beträgt hier 58 %. Obwohl die VC-Minderung am ehesten durch eine Lungenüberblähung begründet ist, könnte differenzialdiagnostisch aber auch eine zusätzliche restriktive Komponente vorliegen. Zur sicheren

Abklärung sollte deshalb, sofern nicht schon in Voruntersuchungen geschehen, eine ergänzende Bodyplethysmografie erfolgen.

Die COPD kann aktuell als mittelgradig bezeichnet werden und hat somit im Vergleich zum Vorjahr diskret zugenommen. Die isolierte Betrachtung der FEV_1 ist jedoch nicht maßgebend und sollte vermieden werden, da auch der Überblähungsgrad und klinische Parameter (Exazerbationen etc.) den Schweregrad bestimmen. Nach GOLD ergibt sich keine Änderung des Obstruktionsgrades, der weiterhin bei II liegt.

► Eine erniedrigte Vitalkapazität ist nicht mit einer Restriktion gleichzusetzen.

Insbesondere bei einer progredienten COPD liegt die Ursache meist in einer Überblähung mit erhöhtem Residualvolumen.

Häufig ist eine verminderte VC aber auch mitarbeitsbedingt. Eine Bodyplethysmografie – mit Bestimmung der TLC – ist zur sicheren Differenzierung unabdingbar.



Die Schweregradeinteilung der COPD (und auch des Asthma bronchiale) muss nicht mit der spirometrischen Schweregradeinteilung der Obstruktion übereinstimmen. Die Obstruktionswerte in der COPD-Schweregradklassifikation beziehen sich auf postdilatatorische Werte. Für die internationale Schweregradbestimmung werden zusätzlich blutgasanalytische Werte sowie die Symptomatik und die Exazerbationsfrequenz berücksichtigt (zur Einteilung □ Tab. 3.4).

■ **Tab. 3.4** Spirometrische Schweregradeinteilung der COPD nach GOLD. Werte postdilatatorisch und bei stabiler COPD

Schweregrad	FEV ₁ /FVC	FEV ₁ (% vom Soll)
I – leicht	<70 %	>80
II – mittel	<70 %	50–80
III – schwer	<70 %	30–50
IV – sehr schwer	<70 %	<30

3.4 • Fallbeispiele

Bezüglich der relativen Einsekundenkapazität sei angemerkt, dass in Deutschland bis vor einigen Jahren die VC_{in} in den Nenner gesetzt wurde, während im angloamerikanischen Raum zumeist die FVC genutzt wird. Bei ob-

struktiven Lungenerkrankungen kann die VC_{in} größer sein als die FVC, sodass es hier gewisse Differenzen geben kann. Im Zuge der internationalen Vereinheitlichung wird nun auch in Deutschland FEV_1/FVC angewandt.

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 9

49 Jahre, weiblich, 158 cm, 125 kg, 50 kg/m²

Das folgende Beispiel zeigt die Spirometrie einer Patientin mit geplanter Darmoperation. Anamnestisch ist ein Asthma bronchiale bekannt.

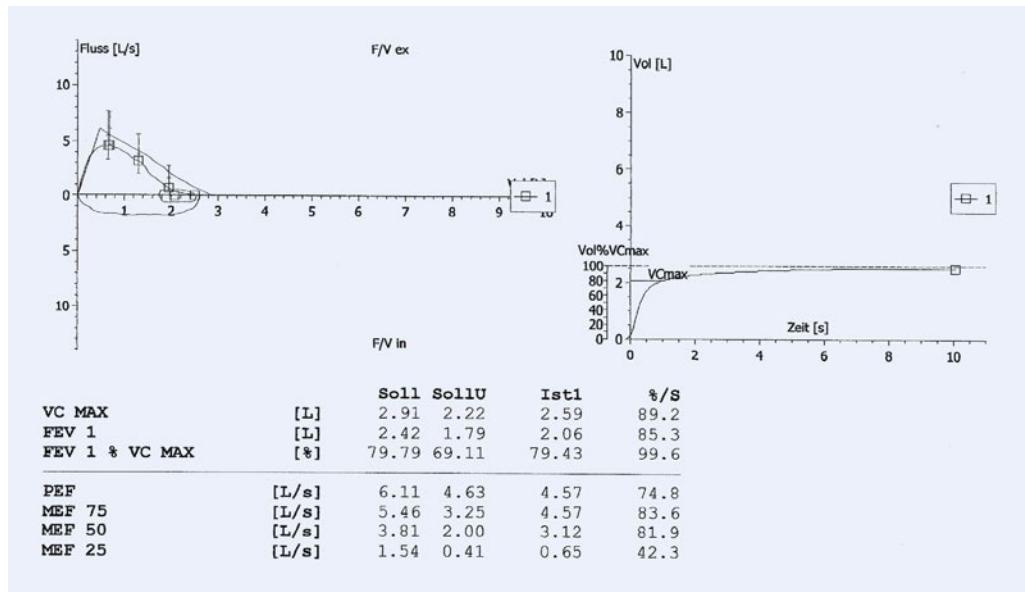


Abb. 3.19 Spirometrie Fallbeispiel 9

Wie ist die Untersuchung zu bewerten? Die Chirurgen fragen nach dem operativen Risiko.

■ Interpretation der Untersuchung

Die Mitarbeit bzw. Durchführung erscheint bei Betrachtung der Fluss-Volumen-Kurve diskret eingeschränkt, ist aber ausreichend gut. Keine Ventilationsstörung. Insbesondere keine Obstruktion bei vorbeschriebenem Asthma bronchiale. Die Werte liegen jeweils etwas unter dem Sollmittelwert, aber noch vollständig im Bereich der Norm (d. h. über Soll-Untergrenze „SollU“). Vermutlich adipositasbedingte Minderung der Werte (BMI 50 kg/m²).

☞ **Die Befundung der Ergebnisse sollte immer unter Berücksichtigung der Umstände geschehen. Je mehr Informationen über den Patienten bekannt sind, desto genauer kann die Befundung erfolgen bzw. aus den Kurven und Werten herausgelesen werden.**



Spirometrie in der allgemein präoperativen Vorbereitung

Für die Einschätzung der Operabilität, der Beatmungsmöglichkeit und insbesondere des Risikos postoperativer Atemstörungen (Ateminsuffizienz, Pneumonie etc.) muss zwischen den verschiedenen Eingriffen unterscheiden werden. Für allgemeinchirurgische Operationen gilt im Allgemeinen eine Risikostratifikation, die sich nach der FVC und der FEV₁ richtet (☞ Tab. 3.5). Die präoperative Kenntnis einer restriktiven oder obstruktiven Ventilationsstörung und die Prüfung einer etwaigen Funktionsverbesserung sind sicher hilfreich. Neben der

Lungenfunktion gibt es noch vielfältige weitere Prädiktoren komplizierter postoperativer Verläufe. Dies muss für die verschiedenen Operationen jedoch unterschiedlich bewertet werden insofern, als dass insbesondere Thorax- und Abdomenoperationen ein ungleich höheres Risiko beinhalten. Risikofaktoren sind im Wesentlichen ein hohes Alter, Herzinsuffizienz, COPD, aktiver Raucherstatus und eine Kachexie (Gewichtsverlust mit BMI <18,5 kg/m²). Die Adipositas als solche ist nicht zwangsläufig mit einem erhöhten Risiko verbunden und wird nicht einheitlich bewertet.

Bei thoraxchirurgischen Eingriffen, Lungenteilresektionen etc. gelten höhere Risiken, sodass hier z. T. strengere Grenzwerte gesetzt werden müssen und zusätzlich zur Spirometrie bzw. Spirometrie/Bodyplethysmografie oft weitere präoperative Untersuchungen (z. B. BGA, Diffusionsmessung, Spiroergometrie, Lungenszintigrafie) notwendig sind. Neben den präoperativen Werten spielen die prädiktiven postoperativen Werte (ausgehend vom geplanten Resektionsausmaß) eine besondere Rolle, um die Verträglichkeit der Resektion belüfteter Lungenabschnitte einzuschätzen (auf die entsprechenden Empfehlungen sei hier verwiesen). Nach Resektion größerer bullöser Areale im Rahmen einer operativen Versorgung einer schwergradigen Emphysemlelung kann die Vitalkapazität postoperativ jedoch auch steigen und sich die Lungenfunktion bessern.

Die in ☞ Tab. 3.5 angegebenen Werte gelten für normgewichtige Patienten. Bei adipösen Patienten sollte mit dem Normalgewicht nach Broca (Körpergröße in cm – 100) gerechnet werden.

☞ **Tab. 3.5 Vereinfachte Risikostratifikation anhand der FVC- und FEV₁-Werte**

Parameter	Kein erhöhtes Risiko	Erhöhtes Risiko
FVC	>50 % vom Soll	<50 % vom Soll
FEV ₁	>50 % vom Soll	<50 % vom Soll
	>2000 ml bzw. 20 ml/kgKG	<2000 ml bzw. 20 ml/kgKG

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 10

49 Jahre, weiblich, 154 cm, 41 kg, 17 kg/m²

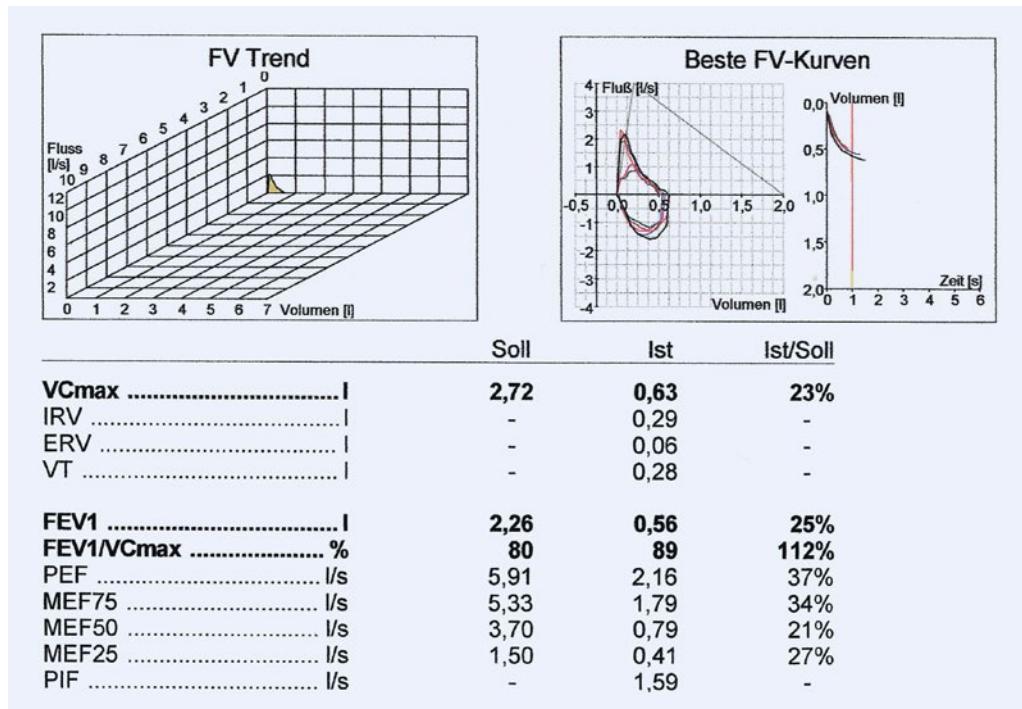
Das nachfolgende Beispiel zeigt die Untersuchung einer Patientin mit schwerer Thoraxdeformität (Kyphoskoliose, □ Abb. 3.20) und deutlicher Tachypnoe (Atemfrequenz 25/min).



?

Versuchen Sie, einen Befund zu formulieren, bevor Sie weiterlesen.

□ Abb. 3.20 Röntgen-Thorax-Seitaufnahme bei schwerer Kyphoskoliose



□ Abb. 3.21 Spirometrie Fallbeispiel 10

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. Vier nahezu deckungsgleich verlaufende, geschlossene Fluss-Volumen-Kurven mit gutem PEF und PIF.

Endexspiratorisch schmale und hohe Fluss-Volumen-Kurve. Von der Kurvenform ausgehend, handelt es sich um eine deutliche restriktive Ventilationsstörung.

VC und FEV₁ sind gleichermaßen schwergradig vermindert (23 bzw. 25 % vom Soll). Die relative Einsekundenkapazität beträgt entsprechend 112 % vom Soll. Sie ist somit hochnormal und neben der typischen Fluss-Volumen-Kurve suggestiv – aber nicht beweisend – für das Vorliegen einer Restriktion.

Zusammenfassend ergibt sich (auch ohne Bodyplethysmografie) der Befund einer schweren Restriktion bei schwerer Kyphoskoliose.

☞ **Die Körpergröße hat einen wesentlichen Einfluss auf die Sollwertberechnung und muss daher vor Durchführung einer Lungenfunktionsprüfung (mindestens einmalig) gemessen werden. Die Angaben sind insbesondere bei älteren Patienten**

häufig nicht zutreffend und können die Interpretation der Lungenfunktions-
testung relevant verfälschen. Falls eine klassische Messung mit Messlatte an der Wand nicht möglich ist – wie in unserem Beispiel – kann hilfstechnisch auch die Armspannweite ermittelt werden, da sie recht gut mit der Körpergröße korreliert.



Die Einteilung des Schweregrades einer Restriktion erfolgt über die Vitalkapazität und setzt die Verminderung der TLC (<5. Perzentile) voraus (☞ Tab. 3.6).

☞ **Tab. 3.6 Schweregradeinteilung der Restriktion**

Schweregrad	FVC (IVC) (in % vom Soll)
I – leicht	>60
II – mittelschwer	60–40
III – schwer	<40

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 11

54 Jahre, männlich, 180 cm, 83 kg, 26 kg/m²

In diesem Fallbeispiel ist die Untersuchung eines Leukämie-Patienten mit zunehmender Leistungsminderung und geplanter Chemotherapie dargestellt.

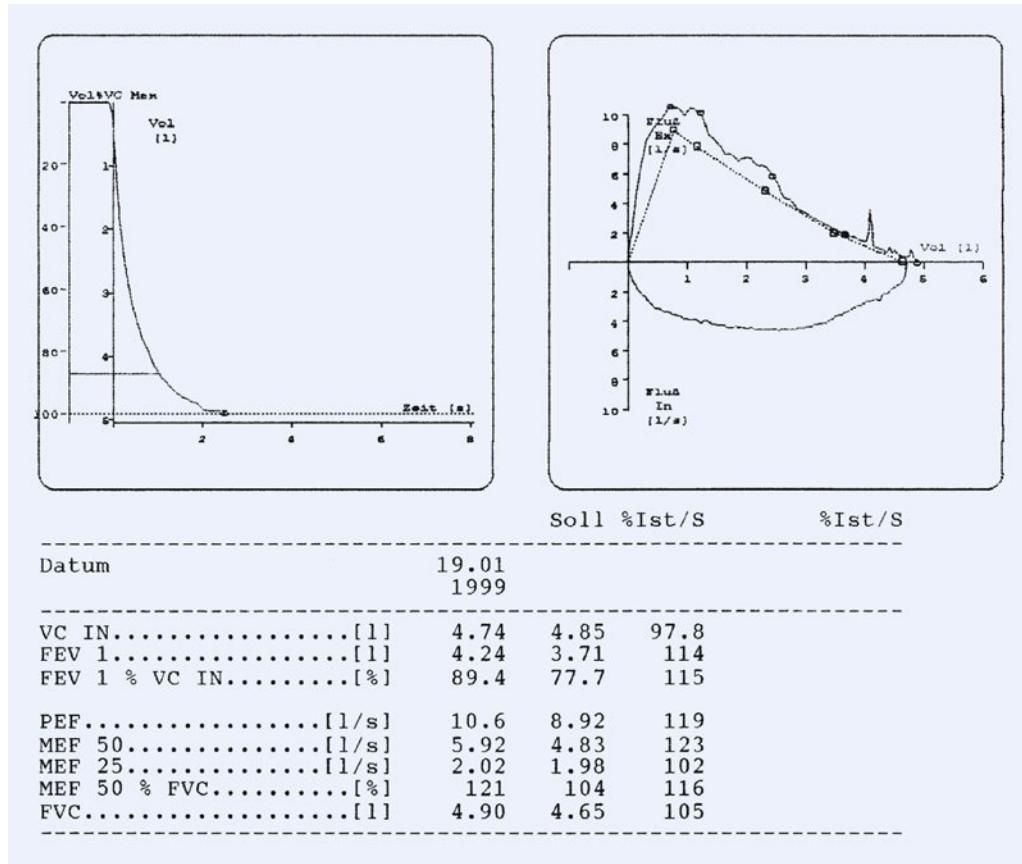


Abb. 3.22 Spirometrie Fallbeispiel 11

- ?
- Gibt es Anhaltspunkte in der Spirometrie, die gegen den Beginn einer potenziell lungentoxischen Chemotherapie bei dem Patienten sprechen?

■ Interpretation der Untersuchung

Versuchen Sie, sich bei der Befundung und Interpretation ein festes Schema anzugewöhnen. Folgende Punkte sind dabei zu berücksichtigen:

- Was ist über den Patienten bekannt – was ist im Befund zu erwarten?
- Wie ist die Mitarbeit – ist der Befund valide?
- Wie verlaufen die Kurven?
- Wie passen die einzelnen Messwerte und die Kurven zusammen?
- Wie lautet Ihre zusammenfassende Beurteilung? Ggf. ist ein Bezug zu klinischen Angaben notwendig.
- Empfehlen Sie weitere Untersuchungen?

Die Punkte können im vorliegenden Beispiel wie folgt umgesetzt werden:

- Aus der Vorgeschichte ergibt sich kein Anhalt für eine spezifische Ventilationsstörung. Die Leistungsminderung könnte jedoch durch eine pulmonale Funktionsstörung (mit)begründet sein.
- Das Untersuchungsergebnis lässt auf eine gute Mitarbeit schließen. Ein kleiner endexspiratorischer Hustenstoß ist ohne Relevanz.
- Es handelt sich um eine geschlossene Kurve mit normgerechter Form. Sämtliche erhobenen Parameter bewegen sich im oberen Bereich der Norm.

■ Zusammenfassend ergibt sich aktuell kein Anhaltspunkt für eine Ventilationsstörung.

■ Bei der speziellen Fragestellung (Verabreichung potenziell lungentoxischer Chemotherapeutika) im vorliegenden Fall empfiehlt sich zur Abklärung einer Gasaustauschstörung ergänzend die Durchführung einer Diffusionstestung, die bezüglich des Erkennens einer parenchymalen Vorschädigung bzw. Störung deutlich sensitiver ist als die Spirometrie.

Es kann berichtet werden, dass die anschließend bei dem Patienten durchgeführte Diffusionstestung ebenfalls einen unauffälligen Befund erbrachte.

➤ Ein fester logischer Ablauf bei der Befundung von Lungenfunktionstests ist empfehlenswert und hilft, sämtliche Befunde zu erfassen, einzelne Informationen gegeneinander zu prüfen und sinnvoll zusammenzufügen. Versuchen Sie stets, alle Informationen bei Ihrem Befund zu berücksichtigen und die einzelnen Ergebnisse in das klinische Gefüge zu integrieren. Sie müssen jedoch auch die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Tests kennen und ggf. ergänzende Untersuchungen empfehlen, damit die eigentliche Frage auch beantwortet werden kann.

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 12

91 Jahre, weiblich, 159 cm, 60 kg, 24 kg/m²

Das nachstehende Fallbeispiel zeigt die Untersuchung einer hochbetagten, aber rüstigen Patientin mit einer großen Struma.

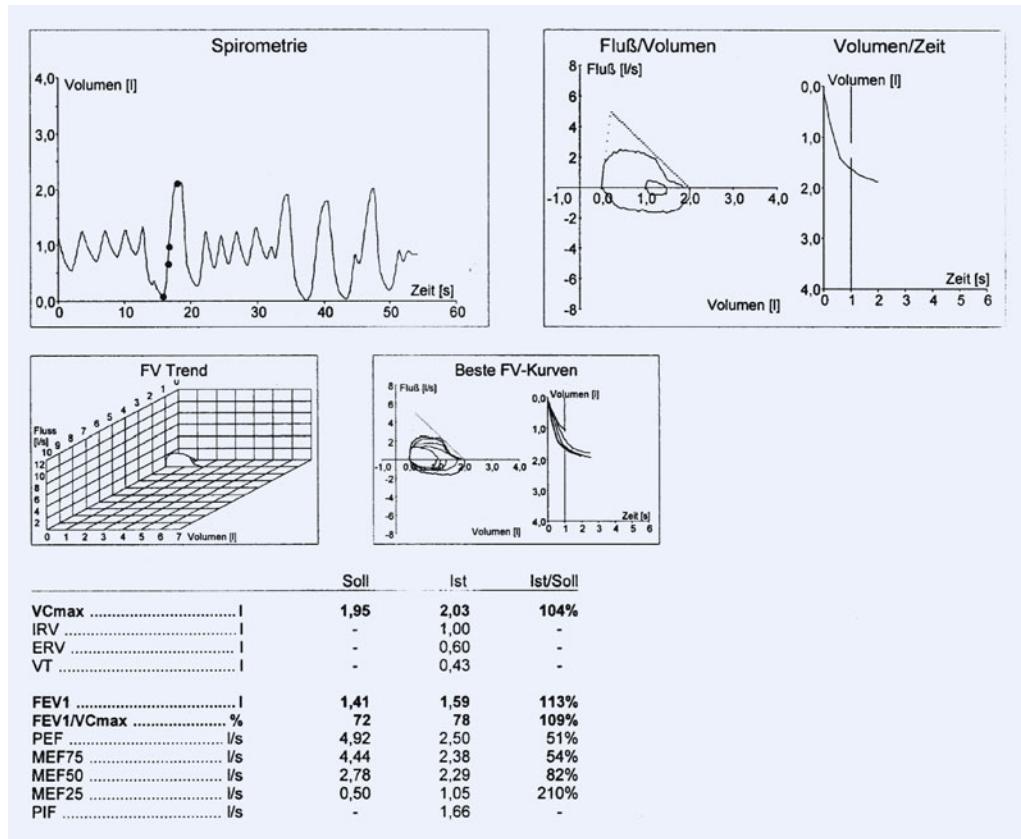


Abb. 3.23 Spirometrie Fallbeispiel 12

7 Versuchen Sie erneut, eine Befundung unter Berücksichtigung der einzelnen Punkte aus dem vorherigen Beispiel zu formulieren, bevor Sie weiterlesen.

■ Interpretation der Untersuchung

Ausreichend gute Mitarbeit. Die unterschiedliche Höhe des exspiratorischen Flussabschnitts der einzelnen Manöver in der Übersicht („Beste FV-Kurven“) deutet an, dass die Umsetzung für die Patientin nicht ganz einfach war. Auch der Ablauf der Untersuchung (Grafik „Spirometric“ oben links) deutet auf leichte Schwierigkeiten bei der optimalen Durchführung hin. In Anbetracht des Alters ist jedoch nicht mehr zu erwarten, und die Mitarbeit kann für das Erheben relevanter Befunde als ausreichend bewertet werden.

Die Fluss-Volumen-Kurve trägt die typischen Zeichen einer fixen Stenose der großen Atemwege (Trachea). PEF und PIF sind (bei forcierter durchgeführter In- und Expiration) um ca. 50 % vermindert. In- und exspiratorisch deutet sich ein Plateau an. Von diesem Befund abgesehen, zeigt die Spirometrie eine normale Ventilationsfunktion mit Werten (VC, FEV₁) oberhalb der angegebenen Sollmittelwerte.

Zusammenfassend besteht der Verdacht auf eine fixe Stenose im Bereich der Trachea, am ehesten im Rahmen einer Tumorkompression. Eine ergänzende Bildgebung und ggf. eine Bronchoskopie sollten durchgeführt werden (zum Vergleich s. auch □ Abb. 3.16).

Tatsächlich bestätigte sich in einer später durchgeführten CT-Untersuchung der Halsregion eine Tracheakompression bei sehr großer Struma.

➊ **Die Normalwerte bzw. Sollwerte sind abhängig von Größe, Alter und Geschlecht. In Deutschland weit verbreitet sind die zuletzt 1993 überprüften und veröffentlichten Werte der Kommission der Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl (EGKS), die auf einem untersuchten Kollektiv von Menschen zwischen 18 und 70 Jahren beruhen. Über die Hälfte der stationären Patienten ist jedoch älter und somit über die Sollwertformeln gar nicht abgedeckt. Hier sind die Sollwerte lediglich interpoliert.**

Im Vergleich zu anderen Sollwertformeln fallen die EGKS-Werte eher zu niedrig aus. Für die tägliche Arbeit empfiehlt sich deshalb neben einer Plausibilitätskontrolle des für die Sollwertberechnung eingegebenen Alters, Geschlechts und der Körpermaße die Berücksichtigung der Gesamtumstände beim Vergleich der Ist- mit den Sollwerten.

Seit einigen Jahren gibt es jedoch mit den GLI-Werten deutlich valide Sollwerte, die auch hochbetagte Patienten einschließen und daher unbedingt zu bevorzugen sind. Im Zuge der Erneuerung oder auch Modernisierung von Lungenfunktionsgeräten werden die GLI-Werte zunehmend Verbreitung erfahren. Die Angabe der Referenz hilft die Validität der Werte besser einzuschätzen (□ Abb. 3.7, 3.12, 3.17). Zudem muss beim Vergleich von Untersuchungen bedacht werden, dass die relativen Werte, d. h. „% vom Soll“ nicht unmittelbar vergleichbar sind – es müssen die absoluten Messwerte verglichen werden.



Referenzwerte: Was ist normal?

Über die richtigen Sollwertformeln wird noch heute kontrovers diskutiert. Es gibt je nach Fachgesellschaft teils deutliche Unterschiede bezüglich der Normalwerte und folglich der Interpretation der entsprechenden Lungenfunktion. Ursache hierfür sind die Unterschiede im jeweils zugrundeliegenden Kollektiv der Referenzpersonen (Altersverteilung, Konstitution, Raucherstatus etc.). Bei deutlichen Mittelwertabweichungen wird deshalb vereinzelt auch die Anwendung eines Referenzintervalls empfohlen. Mit zunehmendem Alter steigt die Streuung der als normal zu bewertenden Werte stark an. Die Anwendung eines fixen Intervalls ist somit kritisch. Die Entwicklung des Z-Scores ist daher zu begrüßen und seine Anwendung heute eindeutig zu favorisieren. Dies geschieht zunehmend im Zuge der Implementation der internationalen GLI-Referenzwerte von 2012.

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 13

85 Jahre, weiblich, 168 cm, 78 kg, 28 kg/m²

Dieses spirometrische Fallbeispiel zeigt die Untersuchung einer älteren Patientin, die in der neurologischen Klinik stationär behandelt wurde. Nähere klinische Angaben wurden leider nicht übermittelt. Es sei noch erwähnt, dass die Mitarbeit von der durchführenden MTA als gut dokumentiert wurde.

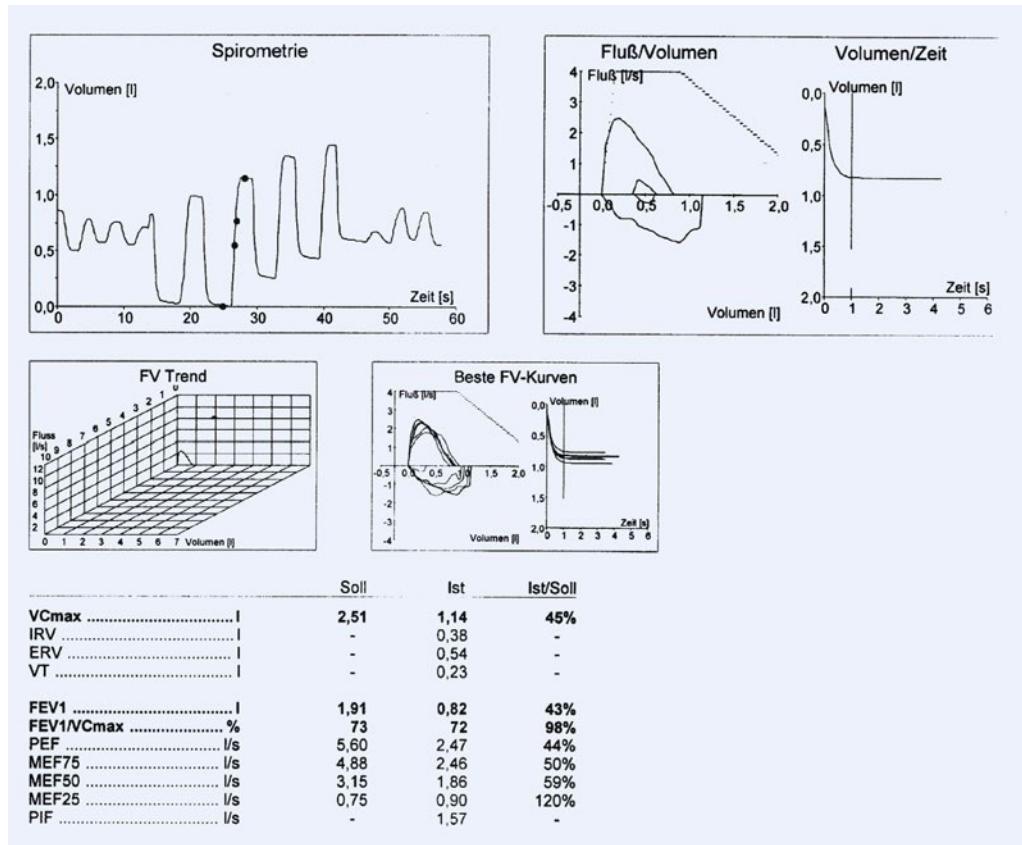


Abb. 3.24 Spirometrie Fallbeispiel 13

Wie lautet Ihr Befund der dargestellten Untersuchung?

■ Interpretation der Untersuchung

Bei neurologischen Patienten mit Atemproblemen handelt es sich häufig um neuromuskuläre Erkrankungen mit Schwäche bzw. Einschränkung der Atemmuskulatur.

Die Mitarbeit kann als gut beurteilt werden. Die offene Fluss-Volumen Kurve mit vorzeitigem Abbruch der Expiration zeigt sich in der Übersicht der Kurven („Beste FV-Kurven“) ausreichend kongruent und ist eher nicht auf eine mangelnde Mitarbeit zurückzuführen.

Der Fluss ist homogen eingeschränkt (FEV₁, PEF, PIF) bei verminderter VC mit normaler relativer Einsekundenkapazität. Die Kurvenform spricht ebenfalls für eine Restriktion mit vorzeitigem Abbruch der Expiration als Zeichen der muskulären Schwäche. Kein Anhalt für eine Obstruktion (Kurvenform und normale relative Einsekundenkapazität). Die deutliche VC-Minderung ist am ehesten als Zeichen der schweren Restriktion zu werten.

Zusammenfassend lässt sich die Spirometrie folgendermaßen befunden: schwergradige Restriktion, die durch eine ausgeprägte (atm) muskuläre Schwäche bedingt sein könnte. Eine Bodyplethysmografie, eine Mundverschlussdruckmessung und eine BGA sollten wenn möglich ergänzend durchgeführt werden.

Auf Nachfrage bei dem behandelnden Neurologen bestätigte sich der beschriebene Befund bei vorliegender langjähriger Myasthenia gravis. Klinisch beklagte die Patientin eine Dyspnoe und rasche Erschöpfung bei mittlerer Belastung.

➤ **Bei fehlenden Angaben zum Patienten zögern Sie nicht, diese nachzufordern bzw. zu erfragen. Für die sichere Beurteilung eines pathologischen Befundes sind klinische und anamnestische Angaben mitunter hilfreich oder gar unerlässlich.**

3.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 14

65 Jahre, männlich, 179 cm, 102 kg, 32 kg/m^2

Das letzte spirometrische Beispiel zeigt die Bettuntersuchung – mittels portablen Messgerät – eines Patienten mit schwergradiger COPD, zusätzlichem Adipositas-Hypoventilationssyndrom („obesity hypoventilation syndrome“, OHS) und allgemeiner Multimorbidität. Nach erster klinischer Besserung wurde eine lungenfunktionelle Messung zur Orientierung bei weiterhin bestehender Immobilität angestrebt. Die Messung wurde halbsitzend durchgeführt und die Mitarbeit als gut dokumentiert.

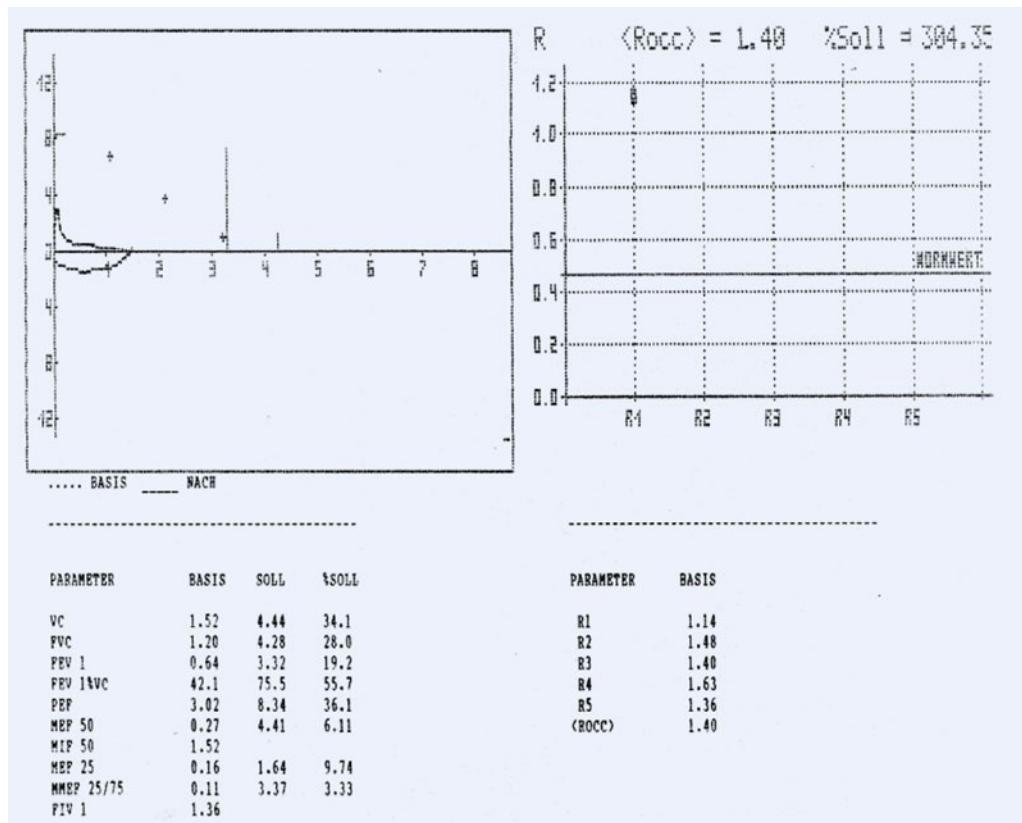


Abb. 3.25 Spirometrie Fallbeispiel 14

Wie beurteilen Sie die pulmonale Funktionslage?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Validität ist angesichts der „Bettmessung“ trotz guter Mitarbeit des Patienten leicht eingeschränkt. Der Kurvenverlauf der Fluss-Volumen-Kurve sowie die Flow-Werte sprechen für eine sehr schwere Obstruktion. Zudem liegt eine VC-Minderung vor als Ausdruck einer stark eingeschränkten Reserve, am ehesten im Rahmen einer Hyperinflation, die jedoch ohne Bodyplethysmografie nicht direkt nachzuweisen ist. Bei vorliegender Adipositas wäre auch eine zusätzliche restriktive Komponente denkbar.

Darüber hinaus wurde eine Messreihe des Atemwegswiderstandes nach der Okklusionsmethode (R_{occ}) durchgeführt. In unserem Beispiel liegen die Werte zwischen 1,14 und 1,63 (im Mittel $1,40 \text{ kPa} \times \text{s/l}$, entsprechend 304 % vom Soll) und sind somit deutlich erhöht.

☞ Eine „Bettmessung“ mit mobilem Spirometer ist eine Behelfsmethode, andererseits jedoch eine sinnvolle Alternative für schwerkrane, immobile Patienten. Die Messwerte sind nicht sicher valide und nicht uneingeschränkt mit Messergebnissen aus einer regulären Spirometrie im Sitzen vergleichbar. Daher ergibt sich die Empfehlung, eine „Bettmessung“ nur dann durchzuführen, wenn eine reguläre Spirometrie unter standardisierten Bedingungen nicht möglich ist.



Die Okklusions- oder Unterbrechermethode ist eine relativ einfache Methode der Atemwegswiderstandsmessung.

Hierbei wird der Atemfluss für einen Bruchteil von Sekunden verschlossen – ohne die Atmung dabei relevant zu behindern – und der Widerstand über das Verhältnis Munddruck zu Atemfluss ermittelt. Diese Methode ist zwar, wie die Bodyplethysmografie, weitestgehend mitarbeitsunabhängig, jedoch etwas weniger präzise und nur eingeschränkt valide in ihrer Aussagekraft. Werte im mittleren Bereich korrelieren recht gut mit denen der Bodyplethysmografie. Die Bodyplethysmografie ermöglicht jedoch über die Atemschleife und eine Reihe weiterer

Messparameter weitaus differenziertere Aussagen zur Lungenfunktion. Aufgrund ihrer Vorteile wird sie gern bei der Untersuchung kleinerer Kinder eingesetzt.

Weiterführende Literatur

- Bösch D (2009a) Die Fluss-Volumen-Kurve – das zentrale Element der Spirometrie. Atemw Lungenkrkh 35:173–175
- Bösch D (2009b) Möglichkeiten und Grenzen der Spirometrie. Atemw Lungenkrkh 35:96–98
- Cooper BG (2011) An update on contraindications for lung function testing. Thorax 66:714–723
- Criée CP et al (2006) Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga zur Spirometrie. Pneumologie 60:576–584
- Criée CP et al (2015) Leitlinie zur Spirometrie der Deutschen Atemwegsliga/Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin. Pneumologie 69:147–164
- Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease (GOLD) (2019) Global strategy for the diagnosis, management, and prevention of chronic obstructive pulmonary disease. Updated. <http://www.goldcopd.org>. Zugegriffen: 8. Apr. 2019
- Miller MR et al (2005) Series „ATS/ERS Task Force: standardisation of lung function testing“: standardisation of spirometry. Eur Respir J 26:319–338
- Miller MR et al (2011) Interpreting lung function data using 80 % predicted and fixed thresholds misclassifies more than 20 % of patients. Chest 139:52–59
- Quanjer PH et al (2012) Multi-ethnic reference values for spirometry for the 3–95 year age range: the global lung function 2012 equations. Eur Respir J 40:1324–1343



Bodyplethysmografie

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

4.1 Einleitung und Messprinzip – 58

4.2 Durchführung der Untersuchung – 62

4.3 Fallbeispiele – 63

Weiterführende Literatur – 103

4.1 Einleitung und Messprinzip

Die heutige Form der Bodyplethysmografie (Ganzkörperplethysmografie) geht auf die Einführung der Methode durch DuBois (USA) im Jahr 1956 zurück. In den 60er-Jahren wurde die Methode in Deutschland von W. T. Ulmer etabliert und seither maßgeblich weiterentwickelt. Heute gilt die kombinierte Spirometrie/Bodyplethysmografie als Basismethode der Lungenfunktionsprüfung in der ambulanten und stationären pneumologischen Fachversorgung.

Ergänzend zur Spirometrie ermöglicht sie im Wesentlichen die Erfassung des spezifischen Atemwegswiderstandes während der Ruheatmung sowie des mit der Spirometrie nicht unmittelbar messbaren statischen Lungenvolumens (FRC). Aus diesen Messgrößen ergeben sich indirekt weitere Parameter (RV, TLC, R_{aw} etc.), die es ermöglichen, auch komplexe oder kombinierte Ventilationsstörungen aufzuschlüsseln und zu beschreiben. Dabei sind die Messungen während der Bodyplethysmografie weitestgehend mitarbeitsunabhängig und frei von körperlicher Belastung für den Patienten, abgesehen von gewissen klaustrophobischen Problemen einiger weniger Patienten beim Verschluss der Glaskabine. Der zeitliche Mehraufwand der Untersuchung ist mit 5–10 min eher gering. Der (im Vergleich zur einfachen Spirometrie) deutlich erhöhte apparative Aufwand erklärt die eingeschränkte Verbreitung außerhalb der pneumologischen Fachversorgung. Moderne Bodyplethysmografen vereinen sämtliche Untersuchungsmethoden (Spirometrie, Diffusion etc.) an einem Messplatz. Die □ Abb. 4.1 zeigt einen Bodyplethysmografen mit zugehöriger Computereinheit.

Die Bodyplethysmografie wird bei Ruheatmung und verschlossener Kabine durchgeführt. Der Patient sitzt in der Kabine und atmet durch ein Mundstück mit Pneumotachograf. Folgende Untersuchungsschritte werden hierbei vorgenommen:

1. Erfassung der Atmungsschleife (auch Atemschleife) mit Bestimmung des spezifischen Atemwegswiderstandes (sR_{aw}),

2. Bestimmung des Lungenvolumens zum Ende der normalen Ausatmung (FRC_{pleth}) mittels Verschlussdruckmanöver (auch als Shuttermanöver bezeichnet),
3. Messung spirometrischer Parameter in Ruhe und bei forciertter Exspiration, sogenanntes „verbundenes Manöver“. Im Anschluss kann die Kabine geöffnet werden, um weitere Manöver der forcierten Spirometrie durchzuführen.

Die physikalischen Hintergründe der Methode sind recht komplex, andererseits ist ein gewisses Grundverständnis für eine profunde Interpretation der Messung unerlässlich. Im Folgenden sollen die wesentlichen Aspekte daher vereinfacht erläutert werden.

Während eines Atemzyklus atmen wir ein und aus. Bei der Einatmung wird das Thoraxvolumen durch Kontraktion der Atemmuskulatur vergrößert. Die muskuläre Abflachung/Senkung der beiden Zwerchfellkuppeln spielt hierbei eine besondere Rolle. Bei unveränderter Luftmenge, jedoch steigendem Lungenvolumen kommt es zu einer Abnahme des Drucks bzw. zu einer Druckdifferenz im Vergleich zur Umgebung. Dieser negative Druck (Sog) führt zu einem (unmittelbaren) inspiratorischen Atemstrom. Die initierende Volumenbewegung bzw. antreibende Kraft nennt man auch Verschiebevolumen (nicht zu verwechseln mit Atemzugvolumen). Für die Ausatmung gilt das Gleiche bei jedoch umgekehrtem Vorzeichen. Logisch ist, dass die druckerzeugende Änderung des Lungenvolumens mit steigendem Atemwegswiderstand steigen muss. Der Widerstand variiert (insbesondere bei obstruktiven Atemwegserkrankungen) zudem im Laufe eines Atemzyklus. In der Atmungsschleife lässt sich nun der spezifische Atemwegswiderstand als Ausdruck des Verhältnisses aus Atemstrom und jeweiligem Verschiebevolumen zu jedem Zeitpunkt des Atemzyklus ablesen (□ Abb. 4.2). Die Atmungsschleife wird bei verschlossener Kabine während Ruheatmung fortlaufend aufgezeichnet. Hierzu wird zum einen der Atemstrom am Mund, zum anderen das Kabinendrucksignal gemessen (□ Abb. 4.3). Bei luftdicht

4.1 • Einleitung und Messprinzip

■ Abb. 4.1 Arbeitsplatz eines Bodyplethysmografen mit Computereinheit. (Mit freundlicher Genehmigung der Fa. Vyaire Medical GmbH)



verschlossener und volumenkonstanter Kabine ergeben sich aufgrund der Thoraxexkursionen spiegelbildliche Veränderungen des Drucks bzw. der Verschiebevolumina, die dann mit umgekehrtem Vorzeichen auf die Lunge übertragen werden können.

➤ **Das Verschiebevolumen ist also letztlich die in Kompression und Dekompression umgesetzte Thoraxbewegung und beschreibt eine den Alveolardruck erzeugende und den Atemfluss antreibende Volumenbewegung. Der spezifische Atemwegswiderstand resultiert aus dem Verhältnis zwischen Atemstromstärke (Atemfluss) und Verschiebevolumen.**

Der spezifische Atemwegswiderstand sR_{aw} beinhaltet jedoch nicht nur Informationen über den eigentlichen Atemwegswiderstand, sondern wird auch durch das Lungenvolumen (FRC) bestimmt. Das absolute Lungenvolumen selbst wird jedoch erst im Anschluss an die Aufzeichnung der Atmungsschleifen über das Verschlussdruck-

manöver (FRC_{pleth}) ermittelt und der eigentliche Atemwegswiderstand (R_{aw}) dann mit Hilfe der FRC berechnet ($R_{aw} = sR_{aw}/FRC$) (s. auch ► Abschn. 2.4). Der in der Atmungsschleife gezeigte spezifische Atemwegswiderstand ist somit kein Strömungswiderstand im engeren Sinne, sondern vielmehr ein Ausdruck der Atemarbeit. Je flacher der Verlauf der Atmungsschleife, desto größer ist das benötigte Verschiebevolumen in Relation zum Atemfluss. Der Wert von sR_{aw} ist reziprok zur Steilheit der Atmungsschleife.

Zur Auswertung der Atmungsschleife haben sich zwei Methoden etabliert (zur Berechnung s. auch ► Abschn. 2.4):

- Die Berechnung des sogenannten totalen spezifischen Atemwegswiderstand (sR_{tot}) nach Ulmer. Der sR_{tot} beschreibt einen Mittelwert über eine Gerade zwischen dem maximalen in- und expiratorischen Druckpunkt der Atmungsschleife. Der totale Atemwegswiderstand (R_{tot}) bewertet sowohl die großen als auch die kleinen Atemwege, was ihn auch für leichte Veränderungen sensiv macht, andererseits jedoch auch

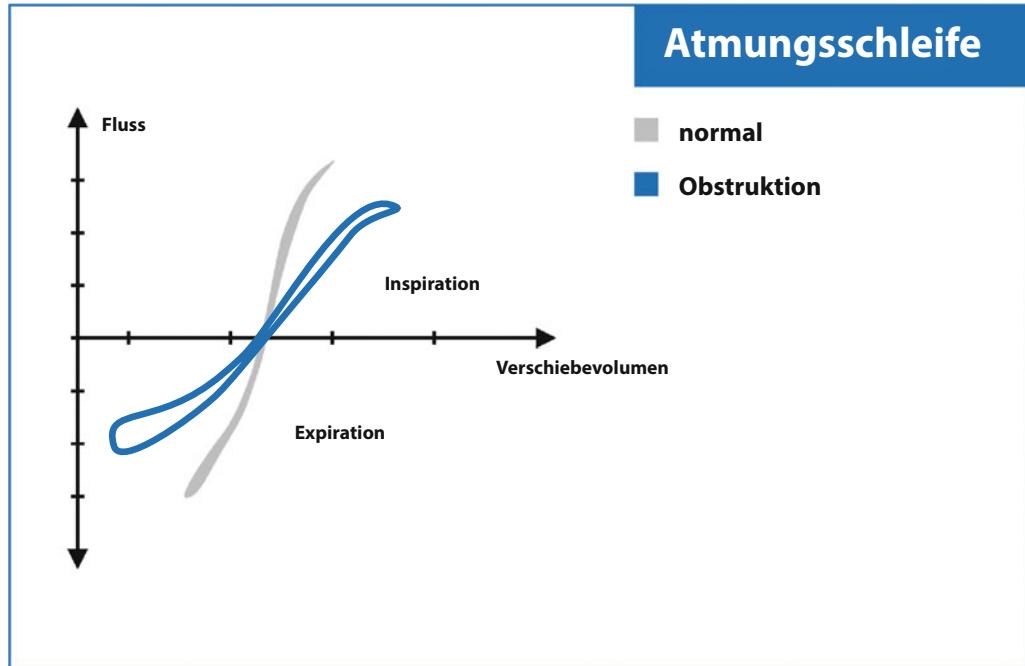
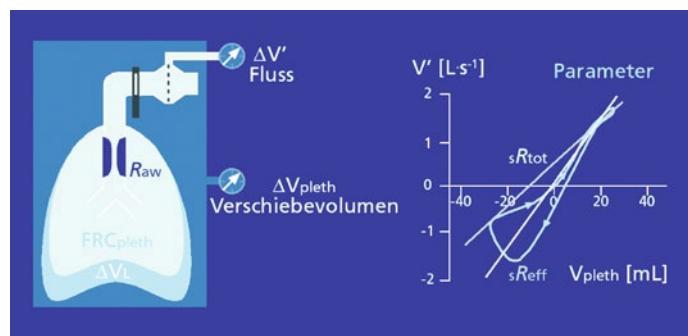


Abb. 4.2 Atmungsschleife ohne und mit Obstruktion

Abb. 4.3 Bestimmung des spezifischen Atemwegswiderstandes sR_{aw} . Das Verschiebevolumen (V_{pleth}) wird als Kammerdruck gemessen. sR_{eff} und sR_{tot} sind unterschiedliche Auswertverfahren der Atmungsschleifen. (Aus Criée et al. 2009, mit freundlicher Genehmigung)



etwas störanfälliger, was sich in einer gewissen Streuung der Messdaten ausdrückt.

- Die Berechnung des sogenannten effektiven spezifischen Atemwegswiderstandes (sR_{eff}) nach Matthys. Der sR_{eff} bewertet vornehmlich die großen Atemwege und ist relativ stabil, da sein Wert aus der gesamten Fläche der Atmungsschleife bestimmt wird und nicht nur aus der Ableitung aus zwei Druckpunkten der Schleife (so wie bei der Berechnung nach Ulmer).

Theoretisch kann die Atmung selbst Störeinflüsse auf die Messung ausüben, da bei der Ausatmung die Luft abkühlt und Feuchtigkeit verliert und so physikalisch bedingt Volumendifferenzen auftreten, die den Verlauf der Atmungsschleife beeinflussen können. Heutzutage verfügen bodyplethysmografische Messplätze jedoch über eine elektronische Kompensation dieser BTPS-Bedingungen, sodass dieses Problem nur bei Fehlkompensationen zu beobachten ist.

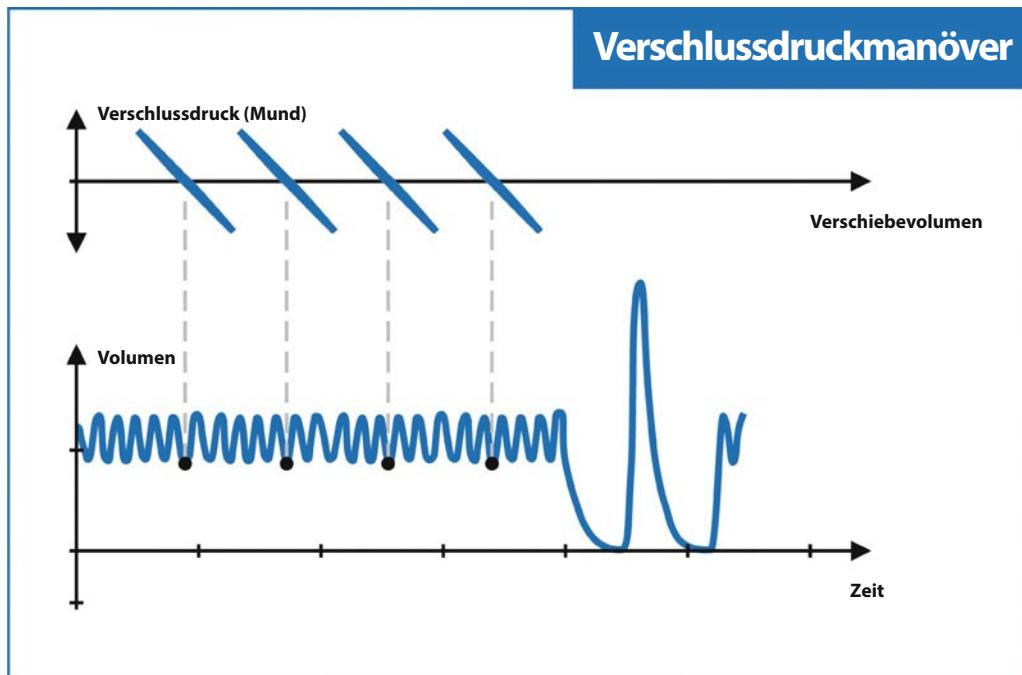


Abb. 4.4 Spirogramm mit Verschlussdruckmanövern. (PM Druck am Mund, PB Druck in der Kabine)

Die im Weiteren durchgeführte Messung des Lungenvolumens zum Ende der normalen Ausatmung (FRC_{pleth}) beruht auf dem physikalischen Gesetz von Boyle und Mariotte, nach dem das Produkt aus Druck (P) und Volumen (V) konstant ist, also: $P \times V = P \times V$. Da das Volumen der Kabine bekannt ist und der Druck in der Kabine sowie am Mund des Patienten gemessen werden kann, lässt sich so das Lungenvolumen zu einer bestimmten Zeit des Atemzyklus errechnen:

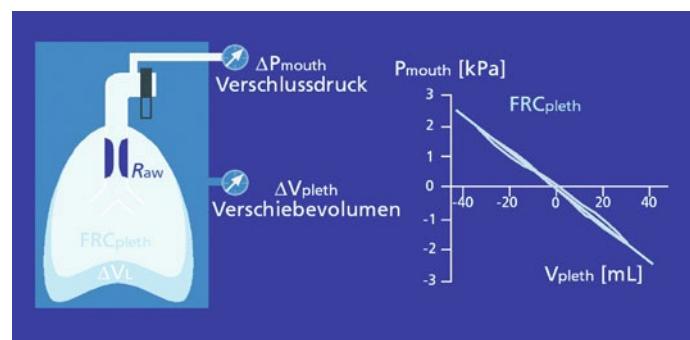
$$\text{Lungenvolumen} = \text{Kabinenvolumen} \times \frac{\Delta \text{ Kabinendruck}}{\Delta \text{ Alveolardruck}}$$

Definitionsgemäß wird das Lungenvolumen am Ende der normalen Ausatmung bestimmt und somit die FRC_{pleth} gemessen. In der Vergangenheit wurde dieser Wert auch als TGV oder ITGV (thorakales Gasvolumen bzw. intrathorakales Gasvolumen) bezeichnet – gemeint ist jedoch stets die funktionelle Residualkapazität

(FRC). Die Bestimmung geschieht, indem am endexspiratorischen Scheitel der Ruheatmung für kurze Zeit automatisch ein Verschluss (Shutter) vorgeschaltet wird (Abb. 4.4). Während der Patient ohne vermehrte Kraftanstrengung lockere Atemzüge gegen den Verschluss durchführt, werden die Druckverhältnisse am Mund und in der Kabine synchron gemessen. Die in- und exspiratorischen Atembemühungen bleiben dabei frustriert, d. h. es kommt zu keinem Atemfluss. Eine Einatembewegung führt jedoch zu einem Anstieg des Thoraxvolumens und in gleichem Maße zu einer Kompression der Luft der Kabine außerhalb des Körpers. Es ergeben sich demnach zwei gleich große, aber gegenläufige Volumenverschiebungen (Druckänderungen). Die Steilheit des Verschlussdruckwinkels entspricht dann der FRC_{pleth} (Abb. 4.5). Je flacher, d. h. je kleiner die Munddruckänderung im Verhältnis zur Kabinendruckänderung, desto größer ist das Lungenvolumen zum Zeitpunkt des Verschlusses. Um die Validität der FRC-Messung

■ Abb. 4.5 Prinzip der Verschlussdruckmessung. Das Verschiebevolumen (V_{pleth}) wird über den Kammerdruck gemessen. Durch die Beziehung zwischen Munddruck und Verschiebevolumen wird die $\text{FRC}_{\text{pleth}}$ bestimmt. (Aus Criée et al. 2009c, mit freundlicher Genehmigung)

4



beurteilen zu können, wird das Manöver einige Male wiederholt (► Abschn. 4.2).

Die FRC entspricht der Atemruhelage und ist ein diagnostisch wertvoller Parameter, aus dem in Verbindung mit der Spirometrie weitere Volumenparameter, aber auch der Atemwegswiderstand berechnet werden können. Die $\text{FRC}_{\text{pleth}}$ umfasst im Gegensatz zu anderen Methoden, z. B. der Heliumverdünnung, auch die nicht oder schlecht ventilierten Bereiche. Die Diskrepanz beschreibt die Verteilungsstörung (s. auch ► Kap. 6).

In einem dritten Schritt werden in einem sogenannten verbundenen Manöver im direkten Anschluss an die FRC-Bestimmung die spirometrischen Parameter ermittelt. Um die Reproduktivität des forcierten Exspirationsmanövers zu überprüfen, werden zudem weitere Manöver – vorzugsweise bei geöffneter Kabinetür – durchgeführt.

Die Spirometrie und die Bodyplethysmografie sind sich ergänzende Methoden, die die Ventilationsfunktion mit ihren verschiedenen Komponenten in unterschiedlichen Ventilationsphasen und aus unterschiedlichem Blickwinkel heraus analysieren und so einen differenzierten Einblick in die Physiologie bzw. Pathophysiologie der Atemmechanik ermöglichen.

4.2 Durchführung der Untersuchung

Für die Durchführung einer erfolgreichen und aussagekräftigen Untersuchung sollten,

ergänzend zu den obigen Ausführungen (► Abschn. 3.2), einige Dinge beachtet werden.

- Alle Messungen werden über die Atmung durch ein Mundstück durchgeführt. Hierbei werden die oberen Atemwege durch das Tragen einer Nasenklemme verschlossen. Undichtigkeiten am Mundstück führen zu Fehlbestimmungen, die meist an typischen Kurvenabweichungen erkennbar sind.
- Für die Bodyplethysmografie nimmt der Patient in der Kabine Platz, die für die Untersuchung über einen elektromagnetischen Schalter luftdicht verschlossen wird.
- Nach kurzer Adaptationszeit, in der das Gerät sich den Gegebenheiten (Temperatur etc.) anpasst, werden die Atemschleifen aufgezeichnet. Hierzu atmet der Patient spontan. So ist gewährleistet, dass die Atmung bzw. die mechanische Belastung unter Normalbedingungen erfasst wird. In den meisten Fällen atmet der Patient jedoch etwas zu langsam, um gut verwertbare Schleifen zu erzielen. Damit die Signalgüte verbessert wird, sollte man deshalb die Patienten ggf. etwas schneller atmen lassen. Die Flussgeschwindigkeit während der Ruheatmung beträgt ca. 1 l/s und sollte möglichst nicht beeinflusst werden. Lediglich bei Verdacht auf das Vorliegen einer zentralen Stenosierung kann es sinnvoll sein, eine etwas kräftigere Atmung (um 2 l/s) einzufordern, da sich hierdurch mitunter die Obstruktion schon während der Ruheatmung erkennen lässt.

4.3 • Fallbeispiele

- Bevor im Weiteren die Verschlussdruckmessungen durchgeführt werden, muss der Patient unbedingt unbeeinflusst spontan atmen, damit die Atemmittellage nicht artefiziell verändert ist. Die Verschlussdruckmessung wird durch Betätigung des Shutters (Verschlusses) vorgenommen. Das Gerät verschließt den Atemstrom hierzu für kurze Zeit automatisch nach Erreichen des endexspiratorischen Scheitels der Ruheatmung (sog. dFRC-Niveau). Während dieser Zeit versucht der Patient (gegen den Widerstand) ein- und auszuatmen. Nach ca. 3 s öffnet sich der Verschluss automatisch.
- Wurden 3–5 „brauchbare“ Verschlussdruckkurven aufgezeichnet, schließt sich zum Ende mindestens ein langsames Manöver zur Bestimmung der Vitalkapazität an – d. h. maximale Expiration, gefolgt von maximaler Inspiration (sog. verbundenes Manöver).
- Im Anschluss erfolgt bei geöffneter Tür – wie oben beschrieben – die Spirometrie mit wiederholten forcierten Exspirationsmanövern. Abschließend werden die beiden Messungen in der Software zu einer Untersuchung kombiniert und im Protokoll zusammengefügt.

4.3 Fallbeispiele

Nachfolgend sind 16 Fallbeispiele gezeigt, die Sie in die Interpretation und Befundung von Spirometrie/Bodyplethysmografie-Untersuchungen einführen und Ihre Fähigkeiten trainieren sollen. Es sind sowohl einfache Funktionsstörungen als auch komplexere Fälle dargestellt.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 15

50 Jahre, weiblich, 168 cm, 79 kg, 28 kg/m²

Im ersten bodyplethysmografischen Beispiel ist die Untersuchung einer 50-jährigen Patientin gezeigt, die zur Abklärung eines chronischen Hustens vorgestellt wurde.

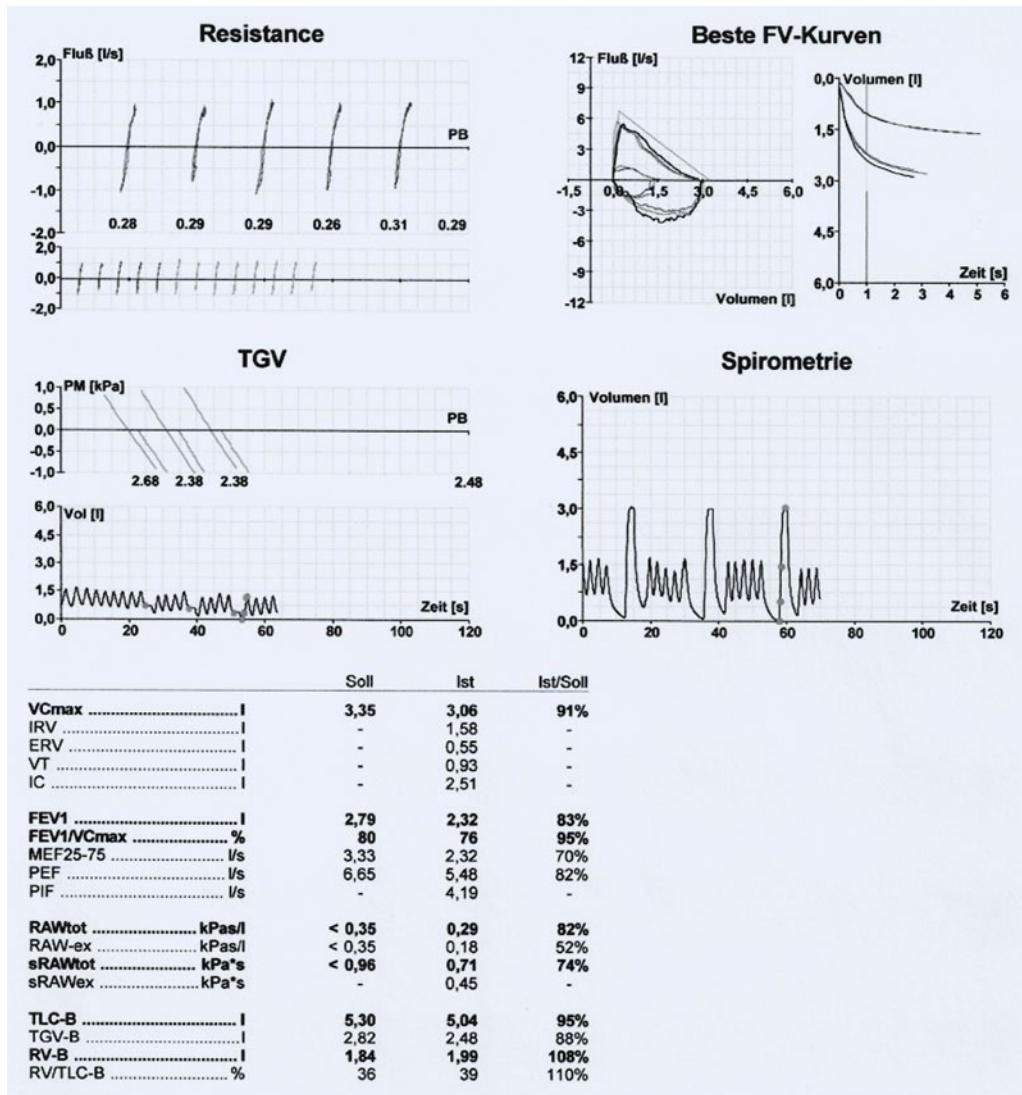


Abb. 4.6 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 15

Auf der linken Seite sind die Ergebnisse der Bodyplethysmografie (Atemschleifen, FRC_{pleth}-Messung – hier bezeichnet als „Resistance“ bzw. „TGV“) mit den entsprechenden Messwerten

im unteren Block der Wertetabelle und auf der rechten Seite die Ergebnisse der Spirometrie (gemäß ► Kap. 3) dargestellt.

■ Interpretation der Untersuchung

Die Atemschleifen sind geschlossen und haben einen steilen und gleichförmigen Verlauf bei einer angemessenen Flussgeschwindigkeit der Ruheatmung. Die 3 FRC_{pleth}-Messungen stimmen gut überein und zeigen einen gleichmäßigen in- und exspiratorischen Ausschlag. Die Fluss-Volumen-Kurven der 3 Tiffeneau-Manöver verlaufen nahezu kongruent, sind geschlossen und weisen einen normgerechten Verlauf auf. Die exspiratorischen Flüsse liegen dabei gleichmäßig etwas unter den Sollmittelwerten.

Insgesamt ergibt sich das Bild einer guten Mitarbeit. Die Kurvenverläufe sprechen für einen unauffälligen Befund. Bei Betrachtung der Messwerte bestätigt sich der Normalbefund. Basis sind die Regressionsgleichungen der EGKS mit den entsprechenden fixen Referenzintervallen, die im Beispiel nicht ausgegeben werden (► Kap. 3). Die relative Einsekundenkapazität ist mit 76 % im Referenzintervall (Mittelwert $\pm 10,7\%$), die VC ist ebenfalls normal und stimmt zur TLC. Das im Vergleich zur TLC diskret erhöhte RV spricht für eine leichte Verschiebung der Atemmittellage, was hier ohne Bedeutung bleibt.

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung einen unauffälligen Befund. Aktuell lässt sich keine Ventilationsstörung nachweisen. Ein Asthma bronchiale als mögliche Ursache für einen chronischen Husten kann hiermit nicht bestätigt, aber auch nicht ausgeschlossen werden. Hier sollte ggf. ein unspezifischer inhalativer Provokationstest durchgeführt werden.

➤ Bodyplethysmografischer Normalbefund

Die Ruhe-Atmungsschleifen sind homogen und weisen einen ausreichenden Fluss (um 1 l/s) der Ruheatmung auf. Der Verlauf ist geradlinig, steil gestellt und die Schleife weicht nicht nennenswert

auseinander. Hierzu passend, sind die Parameter der spezifischen Atemwegswiderstände (sR_{tot} und sR_{eff}) normwertig. Der effektive spezifische Atemwegswiderstand ist wenig störanfällig und daher ein guter Globalparameter. Eine Erhöhung ist Ausdruck einer erhöhten Volumenarbeit infolge eines erhöhten Atemwegswiderstandes und/oder eine erhöhte FRC infolge einer Überblähung.

Zusätzlich müssen verwertbare Verschlussdruckkurven in der FRC-Messung aufgezeichnet sein, die normalerweise gerade verlaufen und sowohl in- als auch exspiratorische Druckausschläge haben sollten. Hierbei sollte ein minimaler Wechseldruck von ± 1 kPa erreicht werden. Entsprechend einem normalen Verschlussdruckwinkel findet sich hierzu passend eine FRC (syn. TGV) im Normbereich. Abzüglich des ERV ergibt sich dann rechnerisch das RV und im Weiteren die TLC (RV + VC).



Bei der Bodyplethysmografie ist auf typische Fehler zu achten. Die Messung ist sehr empfindlich, und die ermittelten Werte sind schnell unbrauchbar. Fehlerquellen sind etwa:

- Mundstück ist nicht fest umschlossen, Atem entweicht.
- Weiches Mundstück wird mit den Zähnen zusammengedrückt.
- Mundstück wird von Zunge teilverlegt.
- Es liegt eine stressbedingte Änderung des Atemmusters mit Verschiebung der Atemmittellage vor.
- Der Patient ist hektisch und atmet nicht gleichmäßig.
- Der Patient erschrickt und stoppt den Atem bei Verschlussdruckmessung (klackendes Geräusch).

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 16

79 Jahre, männlich, 174 cm, 67 kg, 22 kg/m²

Das 16. Fallbeispiel zeigt die Untersuchung eines 79-jährigen Patienten, der mit progredientem Pleuramesotheliom und zunehmender Belastungsdyspnoe vorstellig wurde. In der CT wurde eine massive Ausdehnung mit ausgedehnter Ummauerung der rechten Lunge beschrieben.

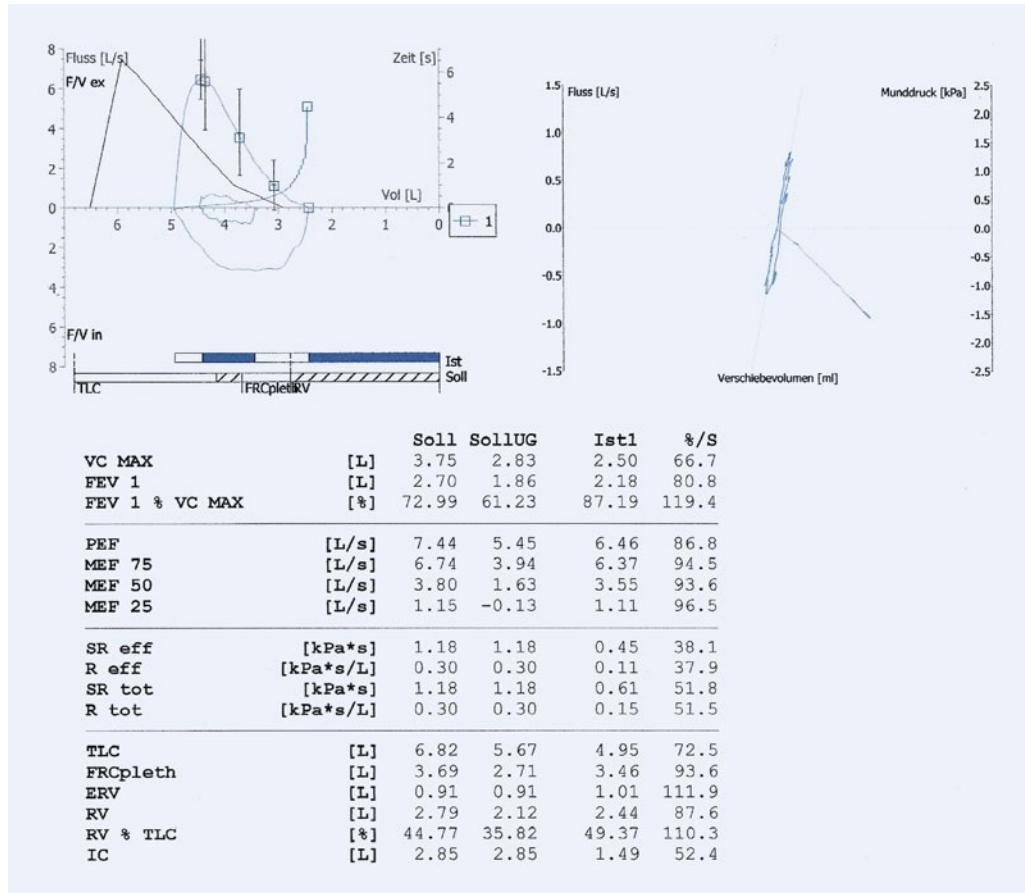


Abb. 4.7 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 16

- Was ist aufgrund der Bildgebung zu erwarten? Sind entsprechende funktionelle Veränderungen in der Untersuchung nachweisbar?

■ Interpretation der Untersuchung

Aufgrund der Anamnese ist mit einer Einschränkung der Lungenausdehnung zu rechnen – entsprechend einer Restriktion mit Verminderung der Vitalkapazität.

Es zeigt sich eine gute Mitarbeit bei der dargestellten Untersuchung. Deutlich zu erkennen sind eine VC- und eine TLC-Minderung im Sinne einer leichtgradigen Restriktion ($VC < LLN$ – hier „SollUG“ –, aber $>60\%$ vom Soll). Kein Nachweis einer zusätzlichen Obstruktion. Die diskrete Minderung der FEV_1 und der MEF-Werte ist nur eine Auswirkung der VC-Einschränkung und im Vergleich zur VC-Minderung sogar unterproportional, was sich in einer hochnormalen relativen Einsekundenkapazität (119 % vom Soll) ausdrückt. Die Fluss-Volumen-Kurve ist entsprechend der VC-Minderung verschmälert und frei von Eindellungen. Die Rechtsverschiebung der Kurve zeigt auf den ersten Blick die Restriktion, entsprechend der Verminderung der Volumina im Balkendiagramm unterhalb der Fluss-Volumen-Kurve.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer leichtgradigen Restriktion bei gesichertem malignem Plauramesotheliom.

➤ Bei einer bodyplethysmografisch gesicherten restriktiven Ventilationsstörung ist zur Differenzierung einer intra- oder extrapulmonalen Ursache neben einer geeigneten Bildgebung die Durchführung einer Diffusionstestung sinnvoll. Manchmal kann man bereits aus der Kurvenform und der Konstellation der einzelnen Messparameter erste Anhaltspunkte auf eine intra- oder extrapulmonale Ursache finden. Dies ist jedoch sehr vage.



Bei der Beurteilung der Restriktion sollte auch die Konstellation der einzelnen Parameter (VC, FRC, RV, TLC) beachtet werden.

Eine isolierte Verkleinerung der FRC kann sich z. B. bei Adipositas, Aszites oder Schwangerschaft zeigen. Eine isolierte Verminderung der RV wird nicht als pathologisch angesehen.

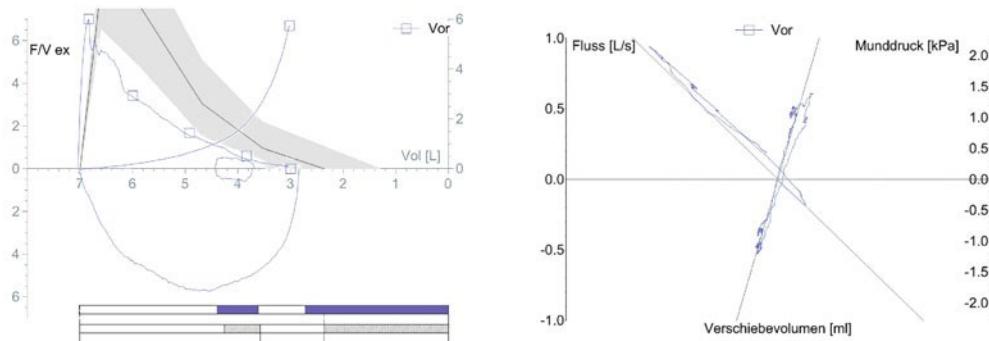
Zur Diagnosestellung und Schweregradbestimmung der Restriktion s. auch Fallbeispiele 7 und 10.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 17

58 Jahre, männlich, 177 cm, 96 kg, 31 kg/m²

Nachfolgend ist die Untersuchung eines Patienten dargestellt, bei dem ein Asthma bronchiale bekannt war. Es wurde über Monate mit einem inhalativen Kortikoid behandelt. Seit einigen Wochen zeigte sich nun eine leichte klinische Verschlechterung mit Beklemmungsgefühl.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1 Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	4.64	3.55	4.30	92.5						Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.64	3.55	4.03	86.9						Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.60	2.73	2.56	71.2						Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	77.75	65.91	63.54	81.7						Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	8.52	6.53	7.01	82.3						ECCS (1993)
FEF 25	L/s	7.51	4.70	3.43	45.6						ECCS (1993)
FEF 50	L/s	3.05	1.52	1.69	55.4						Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.95	0.39	0.61	64.2						Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	0.79	67.0						ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.20	65.6						ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	1.06	89.9						ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.26	88.0						ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	1.27	149.2						ECCS (1983)
G eff	(L/s)/kPa	3.33	3.33	5.08	152.3						ECCS calculated (1983)
TLC	L	7.06	5.91	7.02	99.4						ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.57	2.59	3.62	101.2						ECCS (1993)
ERV	L	1.21	1.21	0.89	73.5						ECCS calculated (1993)
RV	L	2.36	1.69	2.73	115.3						ECCS (1993)
IC	L	3.31	3.31	3.41	102.8						ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	36.58	27.60	38.83	106.1						ECCS (1993)

Abb. 4.8 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 17

Welche Funktionsstörung lässt sich aus der Untersuchung nachweisen?

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit, die Ergebnisse sind frei von Störeinflüssen. Es zeigt sich eine leichtgradige, periphere Obstruktion. Die Obstruktion ist während der Ruheatmung über die Atmungsschleife mit der spezifischen Resistance bzw. dem Atemwegswiderstand nicht erkennbar. Erst durch die forcierte Exspiration demaskiert sich die Obstruktion über die Flusslimitationen von FEV_1 , FEF_{50} etc. Zudem deutet die Diskrepanz zwischen dem totalen und dem effektiven spezifischen Atemwegswiderstand (sR_{tot} und sR_{eff}) auf die periphere Lokalisation hin. Die beginnende (formal noch nicht zu befundende) Überblähung (RV im oberen Normbereich, VC im unteren Normbereich) spricht ebenfalls für eine periphere Obstruktion und ist mitunter das einzige diskrete Zeichen, noch vor Beeinträchtigung des FEV_1 .

Zusammenfassender Befund: prädilatatorische, leichtgradige und peripher lokalisierte Obstruktion. In Anbetracht der Vorgeschichte bzw. Klinik empfiehlt sich eine Bronchospasmolyse oder auch Kontrolle nach Einleitung einer zusätzlichen antiobstruktiven Therapie.

⌚ Anhand der Kurvenverläufe und der Werte lässt sich manchmal orientierend der Schwerpunkt der Obstruktion lokalisieren. Eine Obstruktion der zentralen, großen Atemwege (bis ungefähr zur 8. Generation des Bronchialbaums) zeigt sich spirometrisch insbesondere an Veränderungen des PEF und FEF_{25} , eine periphere Obstruktion (kleine Atemwege jenseits der 8. Generation) durch Einschränkungen von FEV_1 , FEF_{50} und FEF_{75} . Der allgemeine Schweregrad der Obstruktion wird anhand der FEV_1 -Einschränkung beurteilt (s. auch □ Tab. 3.2, ▶ Kap. 3). Die

spezifische Resistance beinhaltet sowohl Informationen über den Atemwegswiderstand (Obstruktion) als auch über die FRC (Überblähung). Im Vergleich zu sR_{eff} berücksichtigt sR_{tot} das endexspiratorische Verhalten der kleinen Atemwege etwas besser und ist daher bei einer peripher betonten Obstruktion typischerweise etwas höher. Im vorliegenden Beispiel erkennt man die Differenz, obwohl beide Werte noch im allgemeinen Referenzintervall liegen. Mitunter zeigt sich eine (relative) Erhöhung der Resistance erst in einem intraindividuellen Vergleich vor und nach Spasmolyse.



Der Normalwert des Atemwegswiderstandes für Erwachsene beträgt ca. $0,20 \text{ kPa} \times \text{s/l}$. Es sind hierbei nur wenige und ältere Daten verfügbar. Ein oberer Grenzwert wird bei $0,3 \text{ kPa} \times \text{s/l}$ definiert. Der normale spezifische Atemwegswiderstand liegt bei Erwachsenen unter $1,2 \text{ kPa} \times \text{s}$ bzw. bei Kindern unter $1,0 \text{ kPa} \times \text{s}$. Der Wert des Atemwegswiderstandes bzw. des spezifischen Atemwegswiderstandes ist weitestgehend unabhängig von Alter, Geschlecht, Größe oder Gewicht. Der Schweregrad der Obstruktion wird daher meist anhand der absoluten Werte bestimmt (□ Tab. 4.1).

□ Tab. 4.1 Schweregradeinteilung der Obstruktion mittels Atemwegswiderstand (für Erwachsene)

Schweregrad	R_{tot} und R_{eff} ($\text{kPa} \times \text{s/l}$)
Leicht	$0,3\text{--}0,5$
Mittel	$0,5\text{--}1,0$
Schwer	$>1,0$

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 18

68 Jahre, männlich, 164 cm, 75 kg, 28 kg/m²

Nachfolgend ist die 5 Tage später durchgeführte Kontrolluntersuchung des aus Fallbeispiel 8 bekannten COPD-Patienten gezeigt.

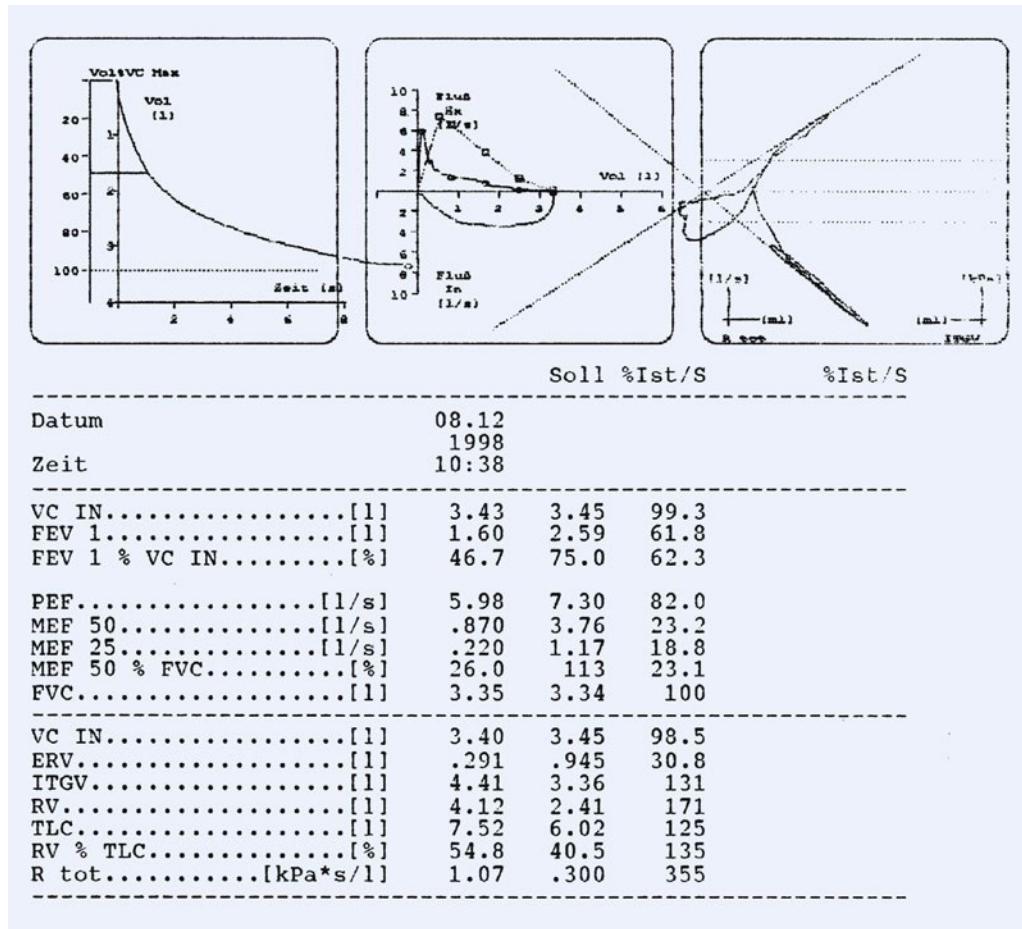


Abb. 4.9 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 18

- ?
- Es sei angemerkt, dass die Untersuchung schon 20 Jahre zurück liegt und trotz der technisch guten Messung die Möglichkeiten und Erkenntnisse damals andere waren – Angaben zu LLN oder X-Score sind daher nicht enthalten. Versuchen Sie bitte, einen vollständigen Befund nach aktuellen Maßstäben zu formulieren.

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven sprechen für eine gute Mitarbeit. In der Volumen-Zeit-Darstellung erkennt man ein stark verlängertes Exspirium von ca. 10 s des Exspirationsmanövers. Die Form der Fluss-Volumen-Kurve zeigt den typischen Verlauf einer schweren COPD mit biphasischer Exspiration (frühexspiratorischer Knick) als Hinweis auf einen (stark flusslimitierenden) exspiratorischen Bronchialkollaps. Rechts werden die Atmungsschleife und die Verschlussdruckkurve dargestellt. Dem golfschlägerförmigen Verlauf der Atmungsschleife kann eine (bronchialkollapsbedingte) inhomogene Obstruktion mit zusätzlichem deutlichem Phasen displacement (Öffnung) als Hinweis auf ein Air Trapping entnommen werden. Unter zusätzlicher Beachtung der Messwerte ist zusammenfassend folgender Befund zu erheben:

Typischer COPD-Aspekt mit exspiratorischem Bronchialkollaps und zentral betonter, mindestens leichtgradiger Obstruktion sowie leicht- bis mittelgradiger Überblähung bzw. Air Trapping bei erhaltener Vitalkapazität.

Zum Schweregrad der Obstruktion ist ergänzend zu erläutern, dass die FEV₁ zwar nur leichtgradig eingeschränkt ist, der Fluss-Volumen-Kurvenverlauf, die MEF₅₀ und die

Atmungsschleife (mit sR_{tot} bzw. R_{tot}) aber eher einer schweren Obstruktion entsprechen.

➤ **Die typischen Kennzeichen einer COPD mit Emphysem und instabilem Bronchialsystem sind neben einem verlängerten Exspirium in der Volumen-Zeit-Kurve eine biphasische Exspirationskurve in der Fluss-Volumen-Darstellung mit früh-exspiratorischem Knick (Abb. 4.10) und entsprechender Golfschläger- oder auch Keulenform in der Atmungsschleife (Abb. 4.11).**



Der Schweregrad der Überblähung wird vornehmlich anhand der RV und des Verhältnisses RV zu TLC (RV/TLC) bestimmt (Tab. 4.2). Üblicherweise steigt zunächst das RV, gefolgt von der FRC und zuletzt der TLC. Ist die TLC nicht erhöht, spricht man auch von einer relativen Überblähung, bei erhöhter TLC von einer absoluten Überblähung. Die Überblähung kann dabei sowohl durch dynamische – also potenziell reversible (obstruktionsbedingte) – als auch durch strukturelle Veränderungen (Emphysem) begründet sein. Gewisse Bedeutung hat auch die inspiratorische Kapazität (IC), die sich mit zunehmender Überblähung konsekutiv vermindert, gut mit der Belastungs-

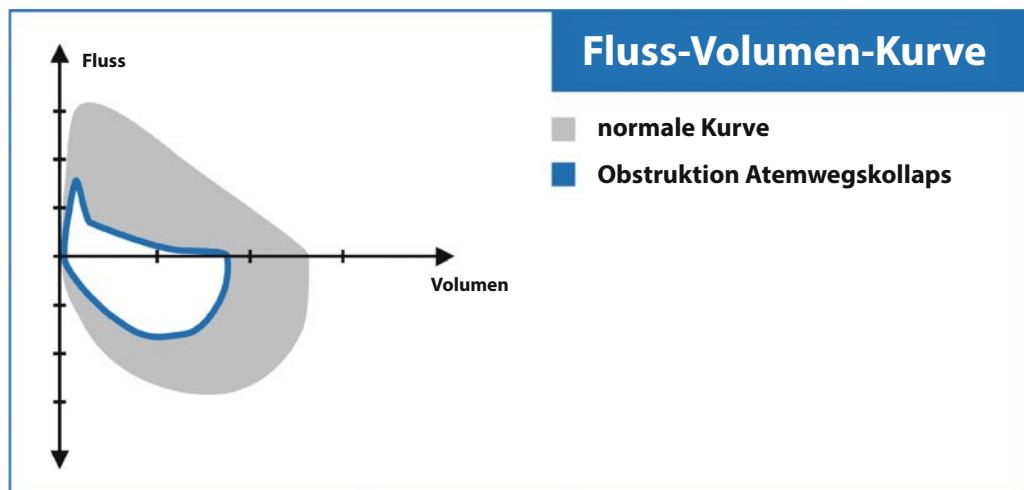


Abb. 4.10 Fluss-Volumen-Kurve mit Zeichen des Atemwegskollaps

4.3 • Fallbeispiele

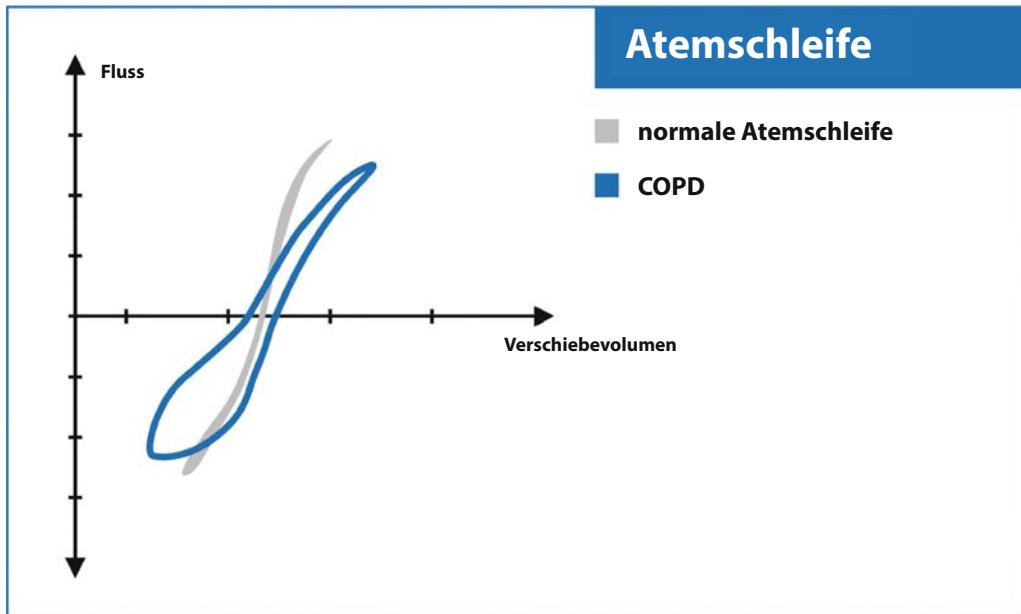


Abb. 4.11 Atemschleife bei COPD

dyspnoe korreliert und als IC/TLC zudem prognostische Aussagekraft hat.

Die Erhöhung des Quotienten RV/TLC kann sich auch bei restriktiven Ventilationsstörungen nachweisen lassen. In diesen Fällen liegt eine überproportionale Abnahme der VC im Verhältnis zu RV zugrunde. Der Befund ist nicht mit einer Überblähung zu verwechseln.

Tab. 4.2 Schweregradeinteilung der Überblähung

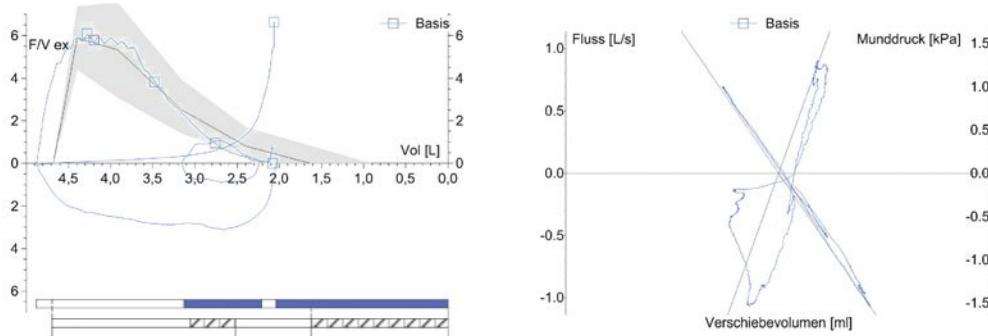
Schweregrad	RV (in % vom Soll)	RV/TLC (in % vom Soll)
Leicht	<140	<140
Mittel	140–170	140–170
Schwer	>170	>170

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 19

51 Jahre, weiblich, 155 cm, 75 kg, BMI 31 kg/m²

In diesem Beispiel ist die Untersuchung einer älteren Patientin mit leichter Belastungsdyspnoe und Zustand nach Nikotinabusus dargestellt.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	3.08	2.40	92.4				●				Quanjer GLI (2012)
FVC	L	3.08	2.40	91.3				●				Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	2.48	1.93	95.0				●				Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	80.82	69.55	83.76	103.6			●				Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	5.88	4.40	6.10	103.7			●				ECCS (1993)
FEF 25	L/s	5.32	3.10	5.78	108.7			●				ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.51	1.40	3.83	152.7				●			Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.80	0.34	0.96	120.0			●				Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	0.96	0.96	1.16	120.5							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.43	144.7							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	0.96	0.96	1.59	164.9							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.59	197.9							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	1.04	1.04	0.86	83.0							ECCS (1983)
G eff	(L/s)/kPa	3.33	3.33	2.30	69.1							ECCS calculated (1983)
TLC	L	4.44	3.45	4.88	110.0			●				ECCS (1993)
FRCpleth	L	2.52	1.70	2.21	87.6			●				ECCS (1993)
ERV	L	0.90	0.90	0.17	18.5							ECCS calculated (1993)
RV	L	1.62	1.05	2.04	126.0			●				ECCS (1993)
IC	L	1.82	1.82	2.67	147.1							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	36.30	26.71	41.83	115.2			●				ECCS (1993)

Abb. 4.12 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 19

? Handelt es sich hier – im Vergleich zum Vorbefund – ebenfalls um eine COPD?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurvenverläufe lassen auf eine ausreichend gute Mitarbeit schließen. Der Verlauf der Fluss-Volumen-Kurve sowie die spirometrischen Werte zeigen einen Normalbefund. Einzig auffällig ist das sehr kleine ERV, das mit einer Rechtsverschiebung der kleinen Ruheschleife innerhalb des forcierten Manövers (in der Fluss-Volumen-Kurve) einhergeht.

Die Atmungsschleife zeigt einen plötzlichen frühexspiratorischen Knick (V-Form) bzw. eine dreieckförmige Verformung des exspiratorischen Anteils. Parallel dazu finden sich entsprechend stark erhöhte Resistance-werte. R_{tot} ist hierbei deutlich höher als R_{eff} – entsprechend einem vornehmlich peripheren Geschehen. Hierzu passend sind das RV und die TLC im oberen Normbereich, während die VC unterhalb des Sollmittelwertes liegt. Dies deutet auf ein diskretes Air Trapping hin. Als Besonderheit liegt die FRC hier ebenfalls unterhalb des Sollmittelwertes.

Zusammenfassend wird folgender Befund erhoben: Eine Ventilationsstörung kann ausgeschlossen werden. Es zeigen sich jedoch Adipositas-assoziierte Veränderungen mit ERV-Minderung, relativ niedrignormaler FRC und diskretem Air Trapping mit bzw. bei sogenanntem „endexspiratorischem Closing“, d. h. exspiratorischem Verschluss der kleinen Atemwege zum Ende der Ausatmung (während der Ruheatmung).

Eine COPD lässt sich nicht nachweisen.

☞ Bei Vorliegen einer Adipositas lassen sich meist folgende Veränderungen nachweisen (s. auch ▶ Kap. 12): Mit steigendem BMI fällt das ERV und die FRC, während das RV und die TLC meist unverändert bleiben. Eine schwere Adipositas kann zu einer restriktiven Ventilationsstörung führen. Oft lässt sich auch eine Erhöhung des sogenannten Closing Volume mit Entwicklung eines „endexspiratorischen Closing“ nachweisen (s. auch nachfolgender Exkurs)



Das Closing Volume (CV) bzw. Verschlussvolumen ist das Lungenvolumen, bei dem sich während der Expiration die peripheren Bronchiolen verschließen. Prinzipiell kommt es zum Verschluss, wenn der extraluminale Druck den endobronchialen Druck übersteigt. Unter physiologischen Bedingungen liegt jedoch die sogenannte Verschlusskapazität (CC), die sich aus $CV + RV$ zusammensetzt, unter der FRC, sodass es bei normaler Atemlage im Rahmen der Ruheatmung nicht zum Verschluss kommt. Bei Verkleinerung der FRC bzw. Vergrößerung der CC verschließen sich jedoch die kleinen Atemwege zum Ende der normalen Ausatmung (sog. endexspiratorisches Closing), wenn $CC > FRC$. Ursache sind zum einen Verminderungen der FRC, z. B. durch lokale Belüftungsstörungen, meist in den dorsobasalen Lungenabschnitten und begünstigt z. B. bei Rückenlage oder Adipositas. Eine andere Ursache ist eine erhöhte CC bei COPD oder im höheren Alter bei damit einhergehender RV-Erhöhung. Physiologischerweise nähert sich die CC um das 70. Lebensjahr der FRC auch in aufrechter Position des Patienten stark an.

Das „endexspiratorische Closing“ ist erkennbar an typisch deformierten Atmungsschleifen (Fallbeispiel 19), die in Unkenntnis leicht mit COPD-bedingten Veränderungen verwechselt werden können.

In einem Hyperinflationstest (Abb. 4.13) kann dies geklärt werden. Hierzu wird die Atemmittellage (FRC) mittels Kommandoatmung erhöht und letztlich über das Niveau der Verschlusskapazität gesteigert. Die Atmungsschleifen normalisieren sich entsprechend. Bei COPD hingegen würde bei vorliegender Überblähung die Schleifendeformierung weiter zunehmen.

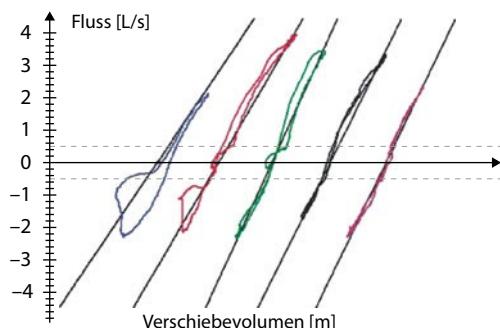


Abb. 4.13 Hyperinflationstest bei „endexspiratorischem Closing“

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 20

57 Jahre, männlich, 176 cm, 82 kg, BMI 27 kg/m²

Die folgende Bodyplethysmografie wurde bei einem Patienten durchgeführt, der langjähriger Zigarettenraucher war und bei dem vor einer Woche eine COPD neu diagnostiziert wurde. Mittlerweile wurde eine antioberstruktive Therapie eingeleitet, und der Patient berichtet über eine zwischenzeitliche Beschwerdebesserung.

Der Vorbefund der Lungenfunktionsprüfung vor einer Woche lautete:

- Zigarettenrauchen, keine vorbekannte Atemwegserkrankung, keine pulmonale Vormedikation.
- Gute Mitarbeit. Typischer Kurvenverlauf einer schweren COPD mit Zeichen eines expiratorischen Bronchialkollapses und sehr schwerer (prädilatatorischer) Obstruktion (FEV1 29 % des Sollwertes) und mindestens mittelgradiger absoluter Überblähung (TLC 110 % des Sollwertes, RV 165 % des Sollwertes).

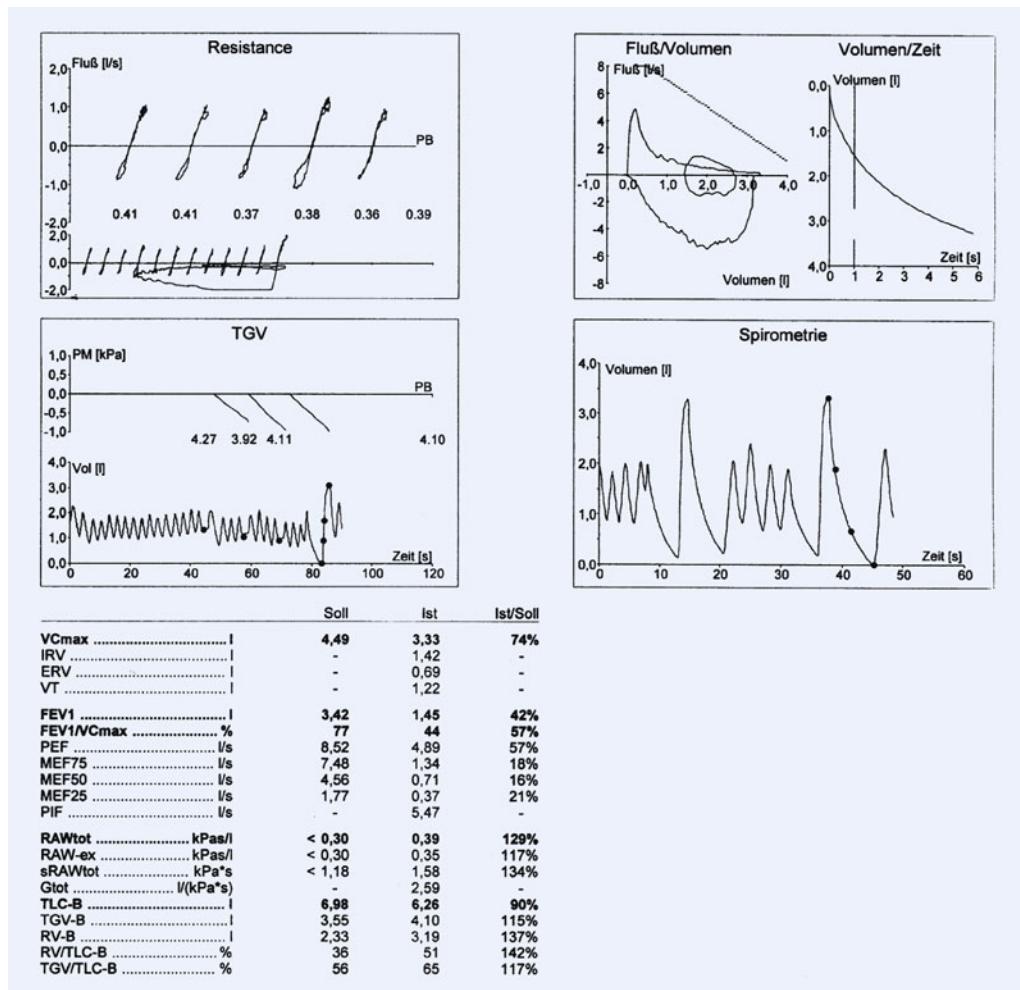


Abb. 4.14 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 20

Wie ist der aktuelle Befund im Vergleich zum beschriebenen Vorbefund zu werten?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Untersuchung deutet auf eine ausreichend gute Mitarbeit hin. Die Exspirationsphasen der Tiffeneau-Manöver scheinen jeweils etwas verkürzt zu sein. Ein beginnendes Plateau ist weder in der Volumen-Zeit-Kurve noch in der Volumen-Fluss-Kurve zu erkennen. Dadurch wird die VC und somit die TLC eventuell diskret schlechter gemessen.

Es zeigt sich ein typischer COPD-Aspekt mit leicht verlängertem Exspirium, entsprechenden Veränderungen der Fluss-Volumen-Kurve und der Atmungsschleife. In der Fluss-Volumen-Darstellung kann man ferner eine exspiratorische Flusslimitierung durch Instabilität bei der forcierten Exspiration erkennen, d. h., der Fluss der forcierten Exspiration ist bei gleichem Lungenfüllungsstand (s. bei 2 l) kleiner als der des exspiratorischen Ruhe-Atemflusses. Die FEV₁- und MEF-Einschränkungen deuten zusammen mit der nur leichten R_{tot}-Erhöhung (hier Bezeichnung RAW_{tot}) auf eine mittelgradige Obstruktion mit Betonung der peripheren Atemwege hin. Die Atmungsschleifen zeigen die leichte Inhomogenität der Obstruktion und die leichte Überblähung an.

Die Überblähung ist bei leicht erhöhtem RV und RV/TLC als leichtgradig und bei normaler TLC als zudem relativ zu beurteilen. Die entsprechende Einschränkung der Reserve (VC) ist jedoch deutlich. Eine gewisse zusätzliche restriktive Komponente ist hier nicht sicher auszuschließen, neben der bereits oben angesprochenen leichten Schwäche bei der Mitarbeit. Formal (LLN bzw. 5. Perzentile) liegt die TLC im Normbereich. Eine gegensätzliche Beeinflussung der TLC (restriktive Komponente und Air Trapping bzw. Überblähung) muss dann anhand der weiteren Werte und weiterer Unter-

suchungsergebnisse (Bildgebung etc.) vermutet bzw. dargestellt werden.

Insgesamt bestätigt sich der Befund einer COPD, die sich unter laufender Medikation in der Kontrolle deutlich gebessert und nun nur noch als mittelgradig bzw. GOLD 3 darstellt. Die Obstruktion ist zurückgegangen, deutlich peripher betont und aktuell als (postdilatatorisch) mittelgradig einzustufen. Die Überblähung ist ebenfalls deutlich zurückgegangen und erklärt zusätzlich die deutliche klinische Besserung des Patienten.

➤ **Die Beurteilung des COPD-Schweregrades erfolgt stets unter stabilen klinischen Verhältnissen und unter laufender Medikation bzw. postdilatatorisch. Ferner ist zu beachten, dass auch die Klinik und zusätzliche Untersuchungen (BGA, Diffusion etc.) maßgebend für die Gesamtbeurteilung sind.**



Nachfolgend sind die Regressionsgleichungen (EGKS) für Lungenvolumina für Patienten im Alter von 18–70 Jahren aufgeführt (► Tab. 4.3). Hiermit wird das LLN bestimmt. Der untere (bzw. obere) Grenzwert wird durch Subtraktion bzw. Addition des 1,65-fachen der residuellen Standardabweichung ($1,65 \times \text{RSD}$) ermittelt. Der Wert ist fix. Da die Streuung der Normwerte in den Altersgruppen jedoch sehr unterschiedlich ist, wurde diese Methode mittlerweile im Zuge der Einführung der neuen Referenzwerte (GLI) durch den Z-Score abgelöst (s. auch ► Kap. 2). Da man im klinischen Alltag jedoch weiterhin regelmäßig mit Befunden älterer Systeme konfrontiert ist, sollte man mit dem alten Prinzip und dessen Nachteilen dennoch vertraut sein.

4.3 • Fallbeispiele

Tab. 4.3 Regressionsgleichungen (EGKS) für Lungenvolumina im Alter von 18–70 Jahren

Geschlecht	Parameter	Einheit	Mittelwert-Gleichung	1,64 × RSD
Männer	TLC	l	7,99 KL – 7,08	±1,15
	RV	l	1,31 KL + 0,022 A – 1,23	±0,67
	FRC _{pleth}	l	2,34 KL + 0,009 A – 1,09	±0,99
	RV/TLC	%	0,39 A + 13,96	±9,0
Frauen	TLC	l	6,60 KL – 5,79	±0,99
	RV	l	1,81 KL + 0,016 A – 2,0	±0,58
	FRC _{pleth}	l	2,24 KL + 0,001 A – 1,0	±0,82
	RV/TLC	%	0,34 A + 18,96	±9,6

KL Körperlänge in Metern, A Alter in Jahren

Zwischen 18 und 25 Jahren wird in die Gleichung das Alter 25 eingesetzt

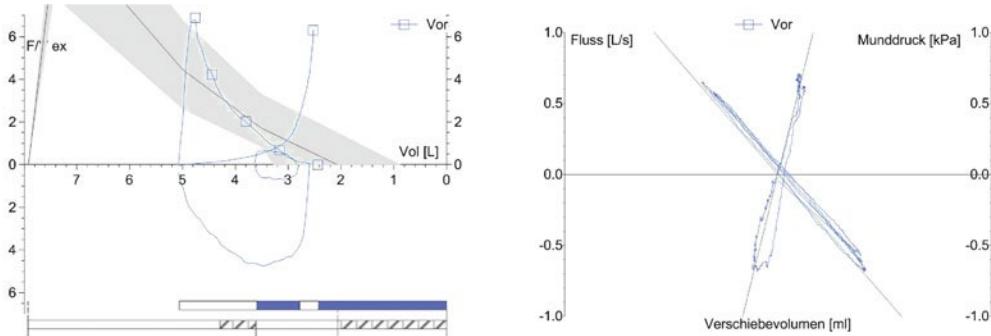
Die 5. Perzentile errechnet sich durch die Subtraktion von $1,64 \times \text{RSD}$ vom errechneten Mittelwert

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 21

39 Jahre, männlich, 186 cm, 95 kg, BMI 27 kg/m²

Nachfolgend ist die Untersuchung eines Patienten mit beidseitiger Zwerchfellschwäche im Rahmen einer autoimmunologischen Neuroradikulitis dargestellt.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	5.86	4.67	2.63	44.9	●						Quanjer GLI (2012)
FVC	L	5.86	4.67	2.63	44.9	●						Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	4.68	3.71	2.14	45.8	●						Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	80.24	69.85	81.36	101.4			●				Quanjer GLI (2012)
PEF	l/s	9.89	7.90	6.89	69.6	●						ECCS (1993)
FEF 25	l/s	8.55	5.74	4.23	49.4	●						ECCS (1993)
FEF 50	l/s	4.45	2.60	2.03	45.6	●						Quanjer GLI (2012)
FEF 75	l/s	1.73	0.84	0.68	39.6	●						Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	0.60	51.1							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.19	62.9							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	0.87	74.2							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.27	91.3							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	1.66	195.6							ECCS (1983)
G eff	(L/s)/kPa	3.33	3.33	5.30	159.0							ECCS calculated (1983)
TLC	L	7.78	6.63	5.06	65.1	●						ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.61	2.63	2.78	77.0		●					ECCS (1993)
ERV	L	1.55	1.55	0.35	22.9							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.06	1.39	2.43	117.6			●				ECCS (1993)
IC	L	4.06	4.06	2.28	56.2							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	29.17	20.19	47.98	164.5			●				ECCS (1993)

Abb. 4.15 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 21

- ?) Versuchen Sie, eine Interpretation der Untersuchung und einen abschließenden Befund zu formulieren.

■ Interpretation der Untersuchung

Die Mitarbeit kann als gut bewertet werden. Die dargestellte Fluss-Volumen-Kurve (Form und Rechtsverschiebung) deutet auf eine Restriktion hin. Die verminderte TLC bestätigt die Restriktion, und anhand der VC-Verminderung kann die Restriktion als mittelgradig eingestuft werden.

Die Minderung der VC ist deutlich stärker als die der TLC (TLC % vom Soll – FVC % vom Soll = 20). Somit liegt eine sogenannte komplexe Restriktion vor. Ursächlich ist eine Erhöhung des RV (118 % vom Soll). Die relative Überblähung (s. auch erhöhte RV/TLC) ist am ehesten durch eine Entleerungsstörung bei muskulärer Schwäche bedingt. Es ergibt sich anhand der Kurvenform und der übrigen Werte kein Hinweis auf eine zusätzliche obstruktive Ventilationsstörung.

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung den Befund einer komplexen Restriktion mit mittelgradiger Restriktion und leichter relativer Überblähung, am ehesten bei Entleerungsstörung im Rahmen der neuromuskulären Grundkrankung.

☞ Zur Differenzierung restriktiver Funktionsstörungen wurde die Einteilung in einfache, komplexe und gemischte Restriktion vorgeschlagen.

Die häufigste Form (über 50 %) ist die einfache Restriktion. Bei ihr sind TLC, FVC und FEV₁ in gleicher Weise bzw. proportional vermindert.

Bei der komplexen Restriktion ist die FVC disproportional zur TLC vermindert, d. h. TLC % vom Soll – FVC % vom Soll >10 %.

Ursächlich liegt eine unvollständige Lungenentleerung mit erhöhtem RV zugrunde. Sie lässt sich bei über einem Drittel der restriktiven Ventilationsstörungen darstellen.

Seltener ist eine Restriktion auch neben einer obstruktiven Ventilationsstörung nachzuweisen – es handelt sich dann um eine gemischte Restriktion bzw. eine gemischte Ventilationsstörung.



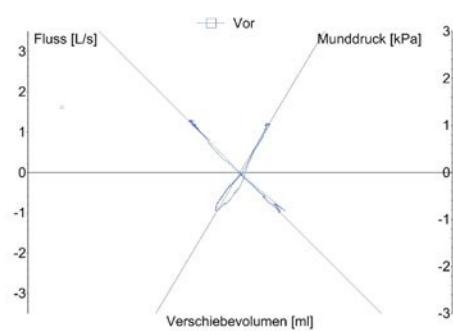
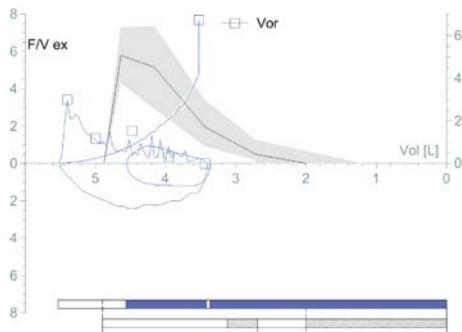
Das Modell der komplexen Restriktion geht von einer restriktiven Ventilationsstörung mit zusätzlicher Entleerungsstörung der Lunge aus. Die Entleerungsstörung zeigt sich in einem erhöhten RV, das durch verschiedene Pathomechanismen bedingt sein kann: Air Trapping bei okkulter peripherer Obstruktion oder Unvermögen der Lungenentleerung bei neuromuskulärer Schwäche oder Thoraxwandveränderungen (z. B. Adipositas).

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 22

67 Jahre, weiblich, 162 cm, 60 kg, BMI 23 kg/m²

Dieses Beispiel zeigt die Lungenfunktionsprüfung einer Patientin, die über Belastungsdyspnoe und starken Reizhusten klagte.



		Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	2.90	2.13	2.15	74.4								Quanjer GLI (2012)
FVC	L	2.90	2.13	2.07	71.3								Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	2.26	1.66	1.11	49.3								Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	78.43	65.45	53.85	68.7								Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	5.79	4.31	3.42	59.1	●							ECCS (1993)
FEF 25	L/s	5.14	2.92	1.33	25.8	●							ECCS (1993)
FEF 50	L/s	1.94	0.92	1.73	89.2								Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.49	0.18	0.33	66.1								Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	0.96	0.96	1.97	205.2								ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.49	164.7								ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	0.96	0.96	2.12	220.9								ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.53	177.4								ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	1.04	1.04	0.51	48.7								ECCS (1983)
G eff	(L/s)/kPa	3.33	3.33	2.02	60.7								ECCS calculated (1983)
TLC	L	4.90	3.91	5.53	112.9					●			ECCS (1993)
FRCpleth	L	2.70	1.87	3.42	126.8					●			ECCS (1993)
ERV	L	0.69	0.69	«	5.8								ECCS calculated (1993)
RV	L	2.00	1.43	3.38	168.5					●			ECCS (1993)
IC	L	1.97	1.97	2.12	107.4								ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	41.74	32.15	61.04	146.3					●			ECCS (1993)

Abb. 4.16 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 22

?) Lässt sich die Symptomatik durch die gezeigte Lungenfunktionsprüfung erklären?

■ Interpretation der Untersuchung

Den Kurven lässt sich prinzipiell eine gute Mitarbeit entnehmen. Die hahnenkammartigen, zackenförmigen Ausläufer des abfallenden Expirationsschenkels der Fluss-Volumen-Kurve entsprechen Hustenartefakten, die bei einem starken Reizhusten fast unvermeidlich sind.

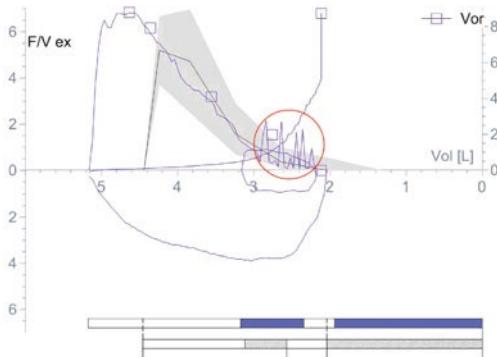
Des Weiteren zeigen sich die Manifestationen einer Obstruktion und Überblähung, die gemäß der Werte als jeweils mittelgradig einzustufen sind.

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung eine mittelgradige Obstruktion und Überblähung sowie deutliche Hustenartefakte. Der Befund ist insofern passend zur Klinik aus Belastungsdyspnoe und Reizhusten.

Die Genese der Ventilationsstörung sowie des Reizhustens ist indes weiterhin unklar. In Abhängigkeit von der Anamnese bzw. Klinik wäre ggf. noch eine Bronchospasmolyse bzw. eine Verlaufskontrolle sinnvoll.

❶ **Hustenartefakte (Abb. 4.17) zeigen sich relativ häufig und sind meist Ausdruck eines starken Reizhustens bzw. einer bronchialen Hyperreagibilität. Sie lassen sich oft nicht vollständig unterdrücken, da die forcierte Expiration, insbesondere wiederholte Manöver, einen eigenen Reiz bedeuten. Zuweilen entwickelt sich unter wiederholter forciertter Expiration sogar eine leichte Obstruktion: das Spirometer-Asthma.**

Manchmal lässt sich der Reizhusten durch Anfeuchten der Mund-/Rachenschleimhaut bzw. Trinken etwas bessern. Bei starker Störung der Messung ist ggf. eine Wiederholung am Folgetag sinnvoll.



■ Abb. 4.17 Hustenartefakt in der Fluss-Volumen-Kurve (roter Kreis)



Neben dem typischen Hustenartefakt sollte man weitere Fehlerzeichen der Fluss-Volumen-Kurve kennen.

Ein fehlender steiler Anstieg der Expiration bei zögerlichem Start der Ausatmung sowie eine abgerundete obere Spitze ohne typische Spitze (Peak Flow) als Zeichen der submaximalen Anstrengung sind nicht akzeptabel, müssen erkannt werden und zur Wiederholung führen (s. auch Abb. 3.11, ▶ Kap. 3).

Eine unvollständige Ausatmung bzw. ein frühzeitiger Abbruch der forcierten Expiration kann ebenfalls zu falschen Werten führen. Gefordert ist eine mindestens 6-sekündige forcierte Expiration bzw. eine erreichte minimale Flussänderung (25 ml über mindestens 1 s) – entsprechend einem beginnenden Plateau – bei längerer Expiration im Rahmen einer schweren Obstruktion bzw. eines expiratorischen Atemwegskollaps (s. auch Abb. 3.13, ▶ Kap. 3).

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 23

67 Jahre, männlich, 185 cm, 116 kg, BMI 34 kg/m²

Nachfolgend ist die Bodyplethysmografie eines 67-jährigen Patienten dargestellt, der mit seit 2 Wochen zunehmender Dyspnoe und beidseitigen Infiltrationen im Röntgen-Thorax stationär behandelt wurde. Eine Lungenfunktion vor 9 Jahren hatte einen Normalbefund gezeigt.

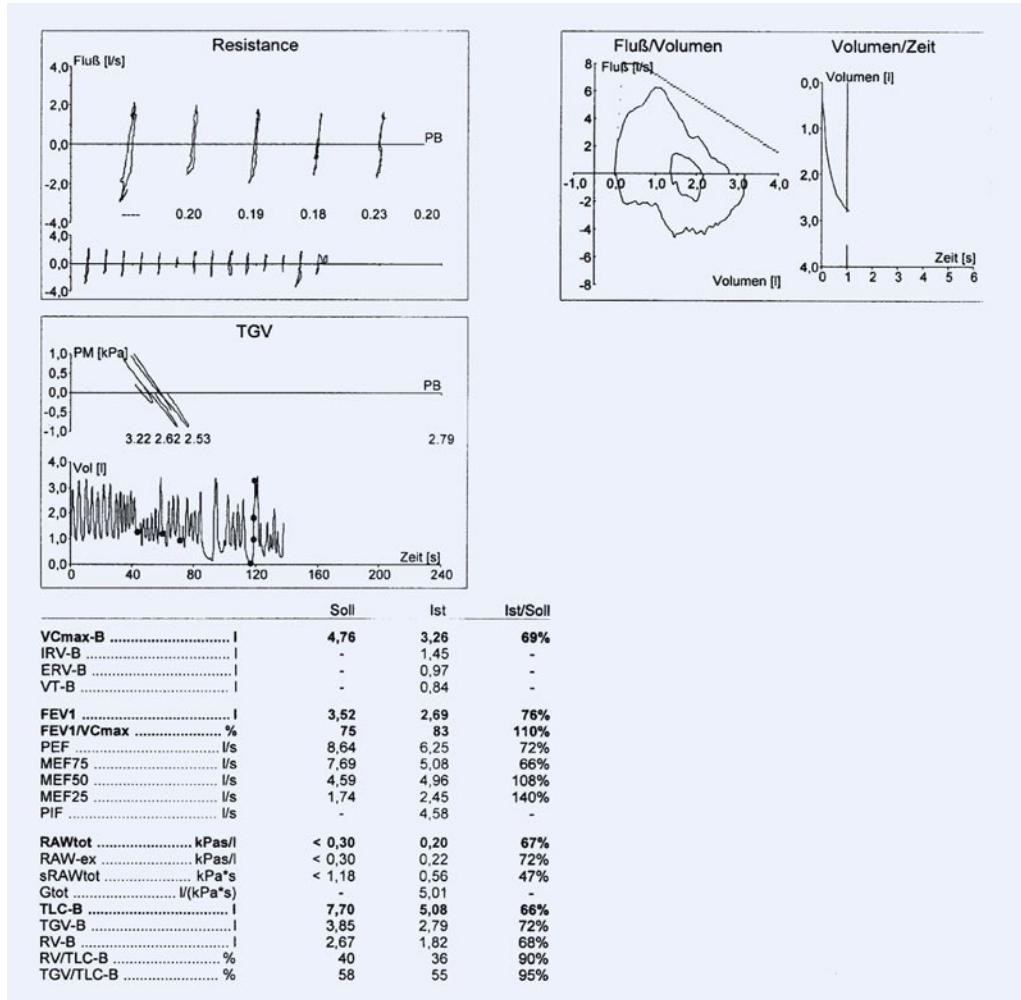


Abb. 4.18 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 23

?

Versuchen Sie, einen Befund zu formulieren. Die Mitarbeit seitens der MFA wurde als gut beschrieben. Zusätzlich wurde angemerkt, dass der Patient schwere Luftnot hatte.

■ Interpretation der Untersuchung

Ein etwas unruhiger Untersuchungsablauf und eine leicht unregelmäßige Fluss-Volumen-Kurve mit frühzeitigem exspiratorischem Abbruch deuten auf eine deutlich erhöhte Anstrengung des Patienten hin. Die Qualität der Untersuchung ist aber ausreichend gut.

4

Es zeigt sich eine leichtgradige (einfache) restriktive Ventilationsstörung mit entsprechender Minderung von VC, TLC, FRC_{pleth} und RV. Die Atemflüsse sind unbeeinträchtigt und sogar erstaunlich gut. Das Bild passt zu einer interstitiellen Erkrankung mit zusätzlicher Adipositas.

Zusammenfassend ergibt sich eine leichtgradige Restriktion, keine Obstruktion. Im Weiteren wurden ergänzend eine Diffusionstestung und eine BGA durchgeführt: Die Diffusionstestung und die BGA zeigten eine mittelgradige Einschränkung und erklärten damit die ausgeprägten Beschwerden des Patienten.

Der weitere Verlauf erbrachte den Nachweis einer kryptogen organisierenden Pneumonie (COP) bei dem Patienten.

☞ Bei einer COP oder bei anderen interstitiellen Lungenerkrankungen zeigt

sich typischerweise eine restriktive Ventilationsstörung mit zusätzlicher Einschränkung der Transferleistung und entsprechender Hypoxämie.

Seltener gibt es auch einen „Overlap“ mit einer obstruktiven Komponente, insbesondere bei Rauchern. Eine Obstruktion zeigt sich zudem auch öfter im Rahmen einer Sarkoidose der Lunge.



Sämtliche Tests in der Lungenfunktionsdiagnostik prüfen lediglich Teilespekte der Lungenfunktion. Die Auswahl des geeigneten Funktionstests ist daher sehr wichtig. Oftmals ist es sinnvoll, mehrere Tests durchzuführen.

In unserem Beispiel würde die isolierte Spirometrie/Bodyplethysmografie mit Nachweis einer lediglich leichtgradigen Restriktion nicht ausreichen, um die Dyspnoe des Patienten zu erklären. Erst die Diffusionstestung zeigte das Ausmaß und die Auswirkungen der Infiltrationen und führte zusammen mit der Ventilationsstörung zu einer entsprechenden Einschränkung der Blutgaswerte und den Beschwerden des Patienten, die zudem durch die Adipositas begünstigt waren.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 24

45 Jahre, weiblich, 162 cm, 62 kg, BMI 24 kg/m²

Das folgende Beispiel zeigt das Untersuchungsergebnis einer Patientin mit Husten und Dyspnoe.

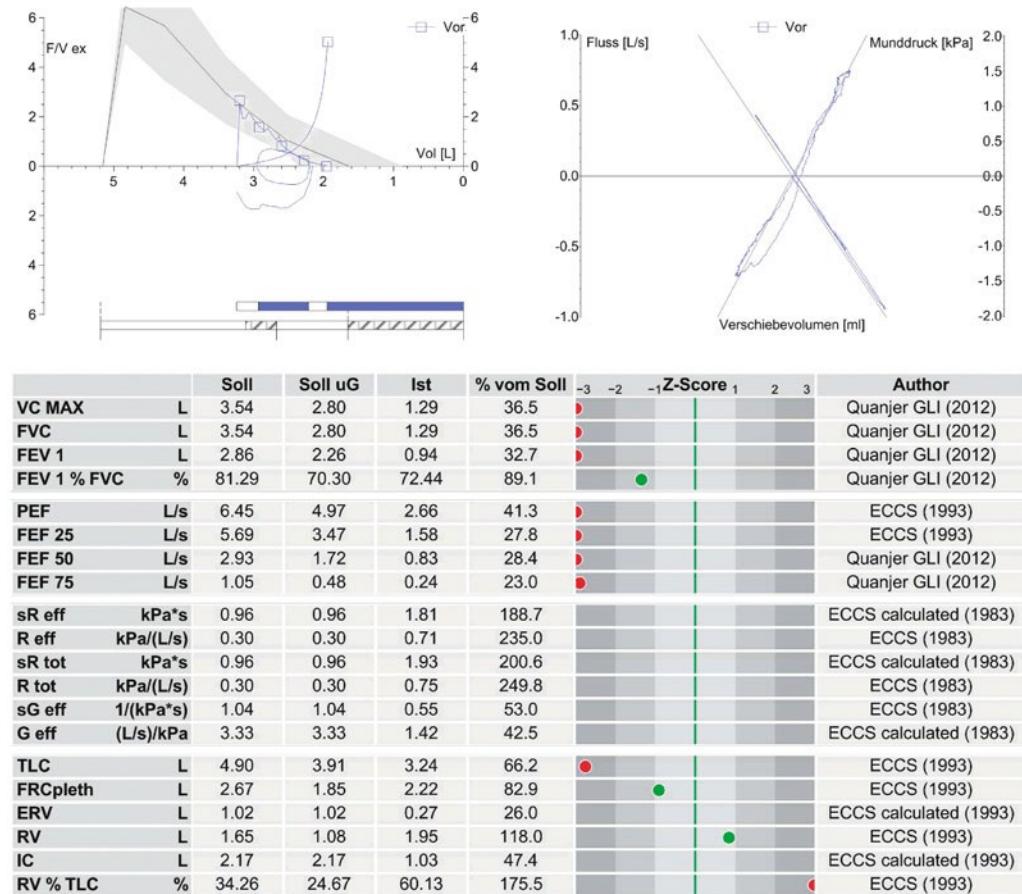


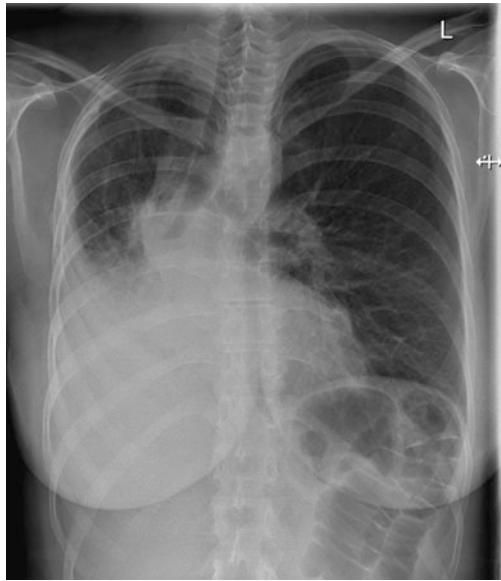
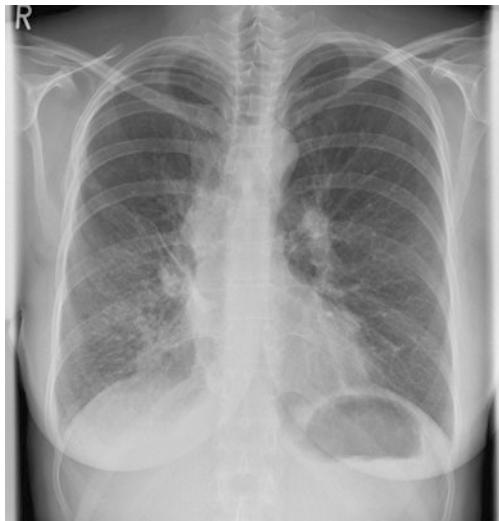
Abb. 4.19 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 24

?

Gibt es eine Lungenfunktionseinschränkung als mögliche Ursache für die Beschwerden?



■ Abb. 4.20 Bronchoskopie mit Nachweis eines Schleimpfropfs im rechten Hauptbronchus (Pfeil)



■ Abb. 4.21 Röntgen-Thorax (p.-a.) mit Nachweis einer Verschattung (bei Belüftungsstörung, Infiltrat und Randwinkelkollaps) im rechten Unterfeld mit Mediastinalshift nach rechts

■ Interpretation der Untersuchung

Die Fluss-Volumen-Kurve ist etwas unregelmäßig und nicht vollständig geschlossen, sie ist in Anbetracht der Schwere der Einschränkungen aber akzeptabel. Die Bodyplethysmografie (mit Atmungsschleife und FRC-Messung) zeigt eine gute Mitarbeit.

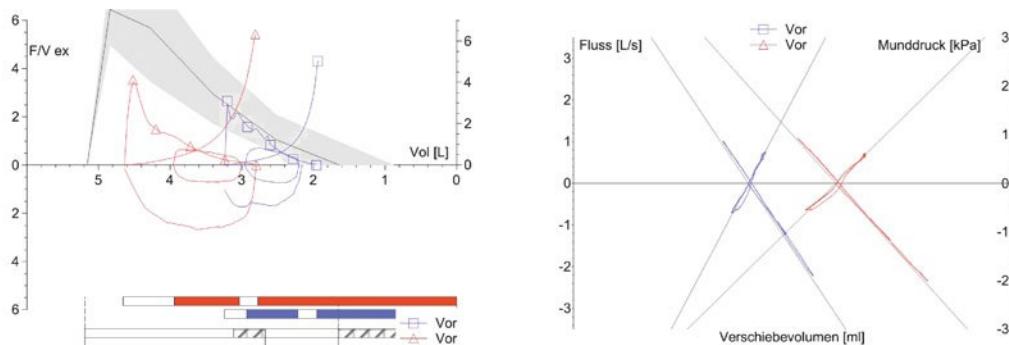
■ Abb. 4.22 Röntgen-Thorax (p.-a.) mit Rückverlagerung des Mediastinums sowie weitestgehender Rückbildung der Verschattung: nur noch leichte flickförmige Infiltrationen im rechten Unterfeld. Zudem Darstellung bronchiektasierdächtiger Bronchialstrukturen beidseits

Die Fluss-Volumen-Kurve ist rechtsverschoben und verschmälert und deutet auf eine schwere Restriktion hin. Die Atmungsschleife ist hingegen rechtsgedreht und exspiratorisch leicht geöffnet als Ausdruck einer Obstruktion. Den Werten lässt sich eine mindestens mittelgradige Restriktion entnehmen (VC und TLC). Zudem Nachweis einer zentralen Obstruktion (R_{eff} und R_{tot} mittelgradig erhöht bei normaler FEV_1/FVC) mit leichter relativer Überblähung, erkennbar an dem deutlich erhöhten RV im Vergleich zur verminderten TLC (RV/TLC). Durch die zusätzliche Überblähung wird das Ausmaß der Restriktion anhand der TLC eher unterschätzt, während es anhand der VC eher überschätzt wird, da die Überblähung die TLC eher etwas anhebt, während sie die VC weiter verkleinert.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer gemischten Ventilationsstörung mit mittelgradiger Restriktion und mittelgradiger zentraler Obstruktion mit leichter relativer Überblähung.

Die weitere Diagnostik erbrachte den Befund einer Teilatelektase rechts bei Schleim-

4.3 • Fallbeispiele



	Soll	LLN	Ist 1	% vS	Ist 2	% vS	% 2 zu 1	
VC MAX	L	3.54	2.80	1.29	36.5	1.88	53.2	45.6
FVC	L	3.54	2.80	1.29	36.5	1.82	51.4	40.8
FEV 1	L	2.86	2.26	0.94	32.7	1.15	40.1	22.6
FEV 1 % FVC	%	81.29	70.30	72.44	89.1	63.10	77.6	-12.9
PEF	L/s	6.45	4.97	2.66	41.3	3.53	54.8	32.8
FEF 25	L/s	5.69	3.47	1.58	27.8	1.48	26.1	-6.2
FEF 50	L/s	2.93	1.72	0.83	28.4	0.78	26.7	-5.9
FEF 75	L/s	1.05	0.48	0.24	23.0	0.21	20.1	-12.8
sR eff	kPa*s	0.96	0.96	1.81	188.7	3.60	374.5	98.5
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.71	235.0	1.03	344.1	46.4
sR tot	kPa*s	0.96	0.96	1.93	200.6	3.89	404.7	101.8
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.75	249.8	1.12	371.9	48.8
TLC	L	4.90	3.91	3.24	66.2	4.66	95.0	43.6
FRCpleth	L	2.67	1.85	2.22	82.9	3.03	113.5	36.9
ERV	L	1.02	1.02	0.27	26.0	0.26	25.5	-2.3
RV	L	1.65	1.08	1.95	118.0	2.77	167.9	42.3
IC	L	2.17	2.17	1.03	47.4	1.62	74.9	58.0
RV % TLC	%	34.26	24.67	60.13	175.5	59.57	173.9	-0.9

Abb. 4.23 Spirometrie/Bodyplethysmografie im Verlauf: bei Aufnahme (blau) und 4 h nach Bronchialtoilette am Folgetag (rot)

verlegung des rechten Hauptbronchus und anatomischer Veränderung des rechten zentralen Bronchialsystems bei Z. n. Oberlappenresektion im Kleinkindalter und konsekutiver chronischer Bronchitis mit Bronchiektasie (Abb. 4.20 und 4.21).

Nach endoskopischer Bronchialtoilette besserten sich der radiologische Befund (Abb. 4.22) und die Lungenfunktion deutlich (Abb. 4.23). Die Restriktion hatte sich komplett zurückgebildet. Übrig blieb eine mindestens mittelgradige Obstruktion sowie mittelgradige Überblähung, welche sich einige Tage später ebenfalls deutlich besserten.

Die Atmungsschleifen zeigen die Atemmechanik während der Ruheatmung und beinhalten sowohl Informationen über den Atemwegswiderstand als auch über das Lungenvolumen. Der Atemwegswiderstand der Ruheatmung wird in überwiegendem Maße durch die zentralen großen Atemwege beeinflusst. Ruhe-Atmungsschleifen (der Bodyplethysmografie) und forcierte Exspirationsmanöver (der Spirometrie) erlauben zusammen einen differenzierten Blick auf eine vorliegende Atemwegsobstruktion.



4 Gemischte Ventilationsstörungen bedeuten einen Overlap aus Obstruktion und Restriktion. Da die beiden Ventilationsstörungen die verschiedenen Parameter unterschiedlich beeinflussen, können die einfachen Graduierungen nicht ohne Weiteres angewandt werden. Die FEV₁ fällt beispielsweise nicht nur durch eine Obstruktion, sondern auch proportional zur VC-Minderung im Rahmen einer Restriktion. In diesem Fall ist die Beachtung der Verminderung des Tiffeneau-Index hilfreich, da das Verhältnis von FEV₁ zu FVC bei der Restriktion ungefähr gleich bleibt, also ca. 100 % vom Soll. Zusätzliche Sicherheit geben die Kurvenanalyse

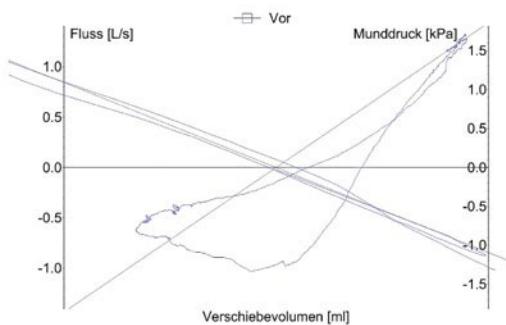
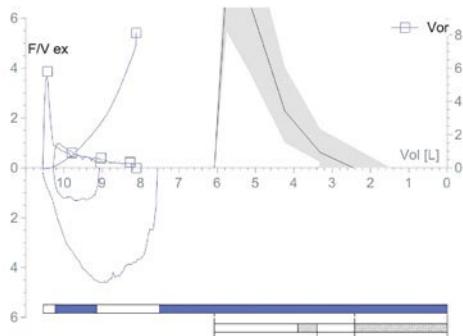
sowie die Betrachtung der Atmungsschleife und der Atemwegswiderstände. Noch komplexer wird es allerdings, wenn die Obstruktion mit einer zusätzlichen Überblähung einhergeht. Bei gleichzeitiger Restriktion bzw. Verminderung der TLC handelt es sich um eine relative Überblähung. Die Überblähung hat wiederum Einfluss auf die TLC und kann die Schwere der Restriktion maskieren und zudem (wie die Restriktion auch) die VC vermindern und so indirekt auch die Aussagekraft des Tiffeneau-Index abschwächen. In solchen Fällen ist es unabdingbar, sich die gesamte Untersuchung sorgfältig anzusehen und die Pathophysiologie zu gut wie möglich herauszulesen.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 25

67 Jahre, männlich, 166 cm, 71 kg, BMI 26 kg/m²

Dieses Beispiel zeigt die Untersuchung eines COPD-Patienten mit klinischer Exazerbation.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	3.67	2.74	3.04	82.7							Quanjer GLI (2012)
FVC	L	3.67	2.74	2.43	66.2							Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	2.83	2.06	0.87	30.9							Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	77.13	63.89	36.00	46.7							Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	7.46	5.47	3.87	51.9							ECCS (1993)
FEF 25	L/s	6.65	3.84	0.60	9.1							ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.27	1.02	0.41	17.9							Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.62	0.23	0.23	37.0							Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	4.87	414.1							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.50	167.6							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	6.09	517.4							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.63	209.4							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	0.21	24.1							ECCS (1983)
G eff	(L/s)/kPa	3.33	3.33	1.99	59.7							ECCS calculated (1983)
TLC	L	6.18	5.03	10.55	170.6							ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.40	2.41	9.14	269.1							ECCS (1993)
ERV	L	0.98	0.98	1.63	166.5							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.42	1.74	7.51	310.6							ECCS (1993)
IC	L	2.62	2.62	1.41	53.6							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	40.09	31.11	71.22	177.7							ECCS (1993)

Abb. 4.24 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 25

?

Versuchen Sie, einen Befund zu formulieren und die Obstruktion zu charakterisieren.

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit/Durchführung der Untersuchung.

Die Atemschleife deutet bereits in Ruhe auf eine Obstruktion und inhomogene Belüftung hin. Die Fluss-Volumen-Kurve zeigt bei der forcierten Exspiration ebenfalls einen typischen COPD-Aspekt mit Zeichen einer ausgeprägten bronchialen Instabilität und schwerer Obstruktion.

Die Obstruktion ist schwergradig und peripher betont, erkennbar an einer im Vergleich zu den mittelgradig erhöhten Atemwegswiderständen stark erhöhtem FEV_1 . R_{tot} beschreibt die Peripherie zudem etwas besser als R_{eff} und ist entsprechend größer im Vergleich. Die spezifischen Atemwegswiderstände beinhalten auch das Lungenvolumen (FRC) und sind daher deutlich stärker erhöht als die Widerstände, da sich der spezifische Atemwegswiderstand aus Widerstand und FRC zusammensetzt. Es liegt eine schwergradige Überblähung vor, entsprechend einer peripheren Obstruktion mit ausgeprägtem Air Trapping.

Zusammenfassend ergibt sich ein COPD-typischer Aspekt mit schwerer Obstruktion und schwerer Überblähung.

► Die FEV_1 ist ein wichtiger Prognosefaktor bei der COPD. Isoliert und als Teil von multidimensionalen Score-Systemen (z. B. BODE-Index) korreliert die Einsekundenkapazität gut mit dem Überleben der Patienten und ist somit ein wichtiger Verlaufsparameter. Bei fortgeschrittener COPD ist der 6-Minuten-Gehtest jedoch gegenüber der FEV_1 weitaus aussagekräftiger, da er im Ergebnis über die Obstruktion hinaus jegliche systemischen, leistungslimitierenden Komponenten widerspiegelt. Die FEV_1 ist gut reproduzierbar, tritt aber heute gegenüber anderen Merkmalen wie zum Beispiel der Klinik oder auch der Exazerbationsrate zunehmend in den Hintergrund (siehe neue GOLD-Klassifikation seit einigen Jahren).



Ein weiterer Prognosefaktor ist das Verhältnis der inspiratorischen Kapazität (IC) zur TLC. Ein IC/TLC-Wert <25 % geht mit einer klinisch bedeutsamen Überblähung und einer erhöhten Mortalität einher. Verglichen mit der isolierten FEV_1 ist IC/TLC als Mortalitätsprädiktor noch aussagekräftiger.

In unserem Beispiel ergibt sich ein IC/TLC von 13 %.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 26

14 Jahre, männlich, 172 cm, 44 kg, BMI 15 kg/m²

Nachfolgend ist die Spirometrie/Bodyplethysmografie eines asymptomatischen Jungen mit bekanntem Asthma dargestellt. Beim Hausarzt war eine unklare Einschränkung der Spirometrie festgestellt worden. Asthmatische Beschwerden traten zuletzt vor mehreren Monaten auf.

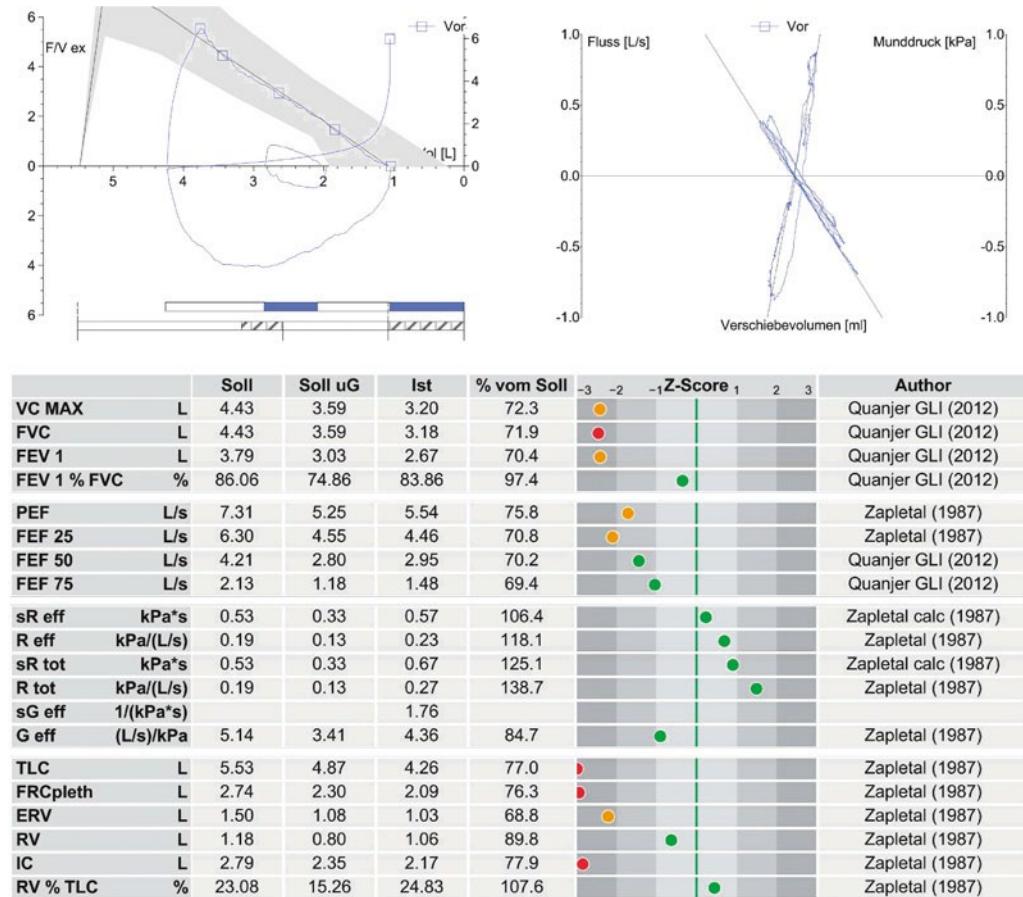


Abb. 4.25 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 26

Wie ist die Lungenfunktion zu beurteilen?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Darstellung spricht für eine gute Mitarbeit. Das Lungenvolumen (TLC und VC) ist vermindert im Sinne einer leichtgradigen Restriktion. Eine obstruktive Ventilationsstörung lässt sich nicht nachweisen. Die Fluss-Volumen-Kurve ist verschmälert, aber ohne Zeichen einer Atemflussbehinderung (konkave Deformierung des abfallenden Schenkels der exspiratorischen Kurve). Die Atemschleife mit dem spezifischen Atemwegswiderstand ist ebenfalls unauffällig (oberer Grenzwert für sR_{eff} [bei Kindern] 1,0 kPa × s und für R_{eff} 0,3 kPa × s/l).

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer leichtgradigen restriktiven Ventilationsstörung.

Durch eine ergänzende Diffusionsmessung mit hochnormalen Werten (>100 % vom Soll) konnte eine Transferstörung ausgeschlossen werden. Eine körperliche Inspektion ergab

einen schlanken Körperbau mit leichter Trichterbrust. Somit ist der Befund dem Körperbau zuzuschreiben, zumal keinerlei klinische Einschränkung vorliegt.

► **Die klinischen Umstände sind für die Beurteilung der Untersuchungen sehr wichtig und stets zu berücksichtigen. Ferner sollten wenn möglich weitere Untersuchungen ergänzt werden, um unklare Befunde besser eingrenzen und abschließend evaluieren zu können.**



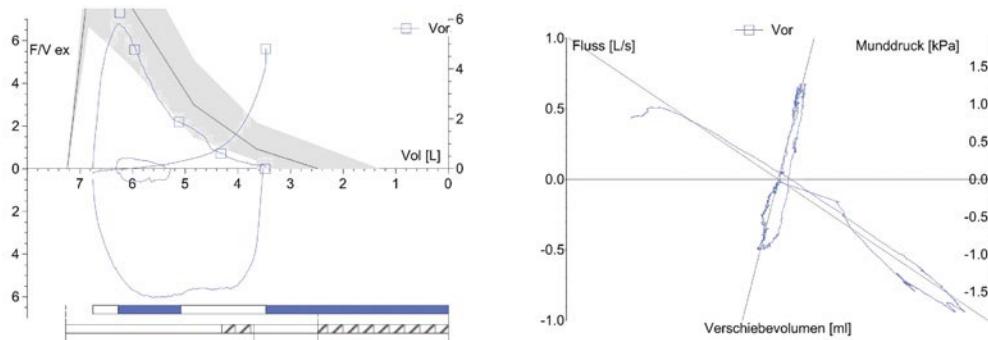
Eine Trichterbrust (Pectus excavatum) geht häufig mit leicht verminderten Lungenvolumina einher und kann die Belastbarkeit entsprechend leicht einschränken, zumal auch das Herz leicht eingeschränkt sein kann. Im Grunde hat sie keinen Krankheitswert und ist vielmehr als Anomalie zu werten.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 27

61 Jahre, männlich, 181 cm, 86 kg, BMI 26 kg/m²

Dieses Beispiel zeigt einen Patienten, der vor geplanter Entfernung eines Lungenrundherdes präoperativ untersucht wurde.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	4.79	3.64	3.28	68.6			●				Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.79	3.64	3.28	68.6			●				Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.68	2.76	2.46	66.8			●				Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	77.04	64.89	74.84	97.1			●				Quanjer GLI (2012)
PEF	L/s	8.64	6.65	7.30	84.4			●				ECCS (1993)
FEF 25	L/s	7.64	4.83	5.58	73.0			●				ECCS (1993)
FEF 50	L/s	3.00	1.45	2.19	73.2			●				Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.91	0.36	0.71	77.8			●				Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	0.38	32.3							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.07	22.3							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	0.72	61.4							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.13	42.4							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	2.64	310.0							ECCS (1983)
G eff	(L/s)/kPa	3.33	3.33	14.97	449.0							ECCS calculated (1983)
TLC	L	7.38	6.23	6.75	91.5			●				ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.69	2.71	5.08	137.6							ECCS (1993)
ERV	L	1.21	1.21	1.62	133.3							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.48	1.81	3.47	139.7							ECCS (1993)
IC	L	3.47	3.47	1.67	48.0							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	37.75	28.77	51.38	136.1							ECCS (1993)

Abb. 4.26 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 27

Wie beurteilen Sie die Untersuchung?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Mitarbeit des Patienten kann als gut bewertet werden. Die Fluss-Volumen-Kurve ist etwas verschmälert und zeigt eine diskrete konkave Krümmung im abfallenden Schenkel der Exspirationskurve. Die Atmungsschleife ist leicht geöffnet, aber ansonsten unauffällig.

Den Werten ist zu entnehmen, dass sowohl die VC als auch die FEV₁ leicht vermindert sind. Gleichzeitig sind jedoch der Tiffeneau-Index sowie die TLC normwertig. Somit ist formal sowohl eine Obstruktion als auch eine Restriktion ausgeschlossen. Eine Erhöhung von FRC und RC (bei normaler TLC) entsprechen einer relativen Überblähung.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund eines „nonspecific pattern“ bei isolierter relativer Überblähung, ohne Nachweis einer obstruktiven oder relativen Ventilationsstörung.

☞ **Der Begriff „nonspecific pattern“ (NSP) bezeichnet die typische Konstellation von verminderter FEV₁ und VC und gleichzeitig normaler FEV₁/FVC (lässt Obstruktion ausschließen) und TLC (lässt Restriktion ausschließen) charakterisiert. Meist sind FRC, RV und RV/TLC zudem erhöht.**

Ein NSP kommt regelmäßig vor. Der Anteil unter größeren Untersuchungskollektiven beträgt 5–10 %. Oftmals sind übergewichtige bzw. adipöse Patienten mit bronchialer Hyperreagibilität und chronischen Atemwegserkrankungen (v. a. Asthma, seltener beginnende COPD/Emphysem) davon betroffen. In kleinerem Umfang findet sich ein NSP auch bei Patienten mit Thoraxwandveränderungen oder Muskelschwäche und gewisser Entleerungsstörung ohne eigentliche Atemwegsveränderungen. Zuweilen wird bei einem NSP auch von einem „Small Airways Obstruction Syndrome“ gesprochen.



Das „Small Airways Obstruction Syndrome“ geht von einer gewissen okkulten Obstruktion peripherer Bronchien mit entsprechender Entleerungsstörung (Air Trapping) und nachfolgender Überblähung aus. Die VC-Minderung sowie die proportionale FEV₁-Verminderung sind Folge der Entleerungsstörung und gehen mit entsprechend normaler FEV₁/FVC einher.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 28

50 Jahre, männlich, 174 cm, 72 kg, BMI 24 kg/m²

Die nachfolgende Untersuchung zeigt das Ergebnis eines Patienten mit Verdacht auf eine Sarkoidose bei radiologischem Nachweis einer bilären Adenopathie. Der Patient verneinte jegliche Atembeschwerden und gab an, stets viel Sport betrieben zu haben.

		Soll	Ist1	Ist1/Soll
VC MAX	[L]	4.56	5.32	116.5
FEV 1	[L]	3.54	3.86	109.0
FEV 1 % VC MAX	[%]	78.21	72.65	92.9
FVC	[L]	4.38	5.03	114.7
PEF	[L/s]	8.68	10.82	124.6
MEF 50	[L/s]	4.69	3.62	77.2
MEF 25	[L/s]	1.90	1.09	57.4
VC MAX	[L]	4.56	5.32	116.5
ERV	[L]	1.28	1.93	150.4
TLC	[L]	6.82	7.24	106.1
RV	[L]	2.15	1.92	89.4
RV % TLC	[%]	33.46	26.54	79.3
ITGV	[L]	3.43	3.85	112.2
R tot	[kPa*s/L]	0.30	0.16	52.2
R eff	[kPa*s/L]	0.30	0.13	44.8
SR tot	[kPa*s]	1.18	0.71	60.4
SR eff	[kPa*s]	1.18	0.61	51.9
SG tot	[1/(kPa*s)]	0.85	1.41	165.5

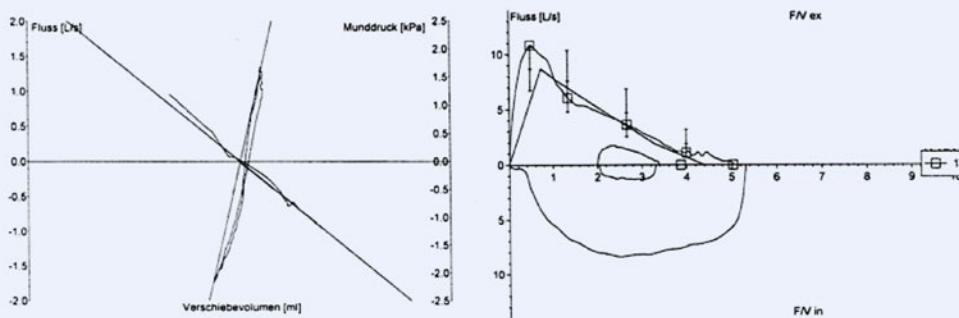


Abb. 4.27 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 28

Wie beurteilen Sie das Untersuchungsergebnis?

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. In der Fluss-Volumen-Kurve zeigt sich ein überschießender initialer exspiratorischer Atemfluss mit recht hohem Peak Flow. Der abfallende Schenkel der Exspirationskurve knickt zunächst etwas ein und verläuft insgesamt etwas unregelmäßig. Im Vergleich zu den Sollmittelwerten zeigt sich eine leicht erhöhte VC und ein deutlich erhöhter PEF. Während MEF₅₀ und MEF₂₅ vermindert sind, liegt die FEV₁ jedoch im oberen Normbereich. Die Atemschleife verläuft normal, die Atemwegswiderstände sind (entsprechend den großen Lungenvolumina) im unteren Normbereich.

Zusammenfassend ergibt sich ein Normalbefund bei großer Lunge. Aufgrund des verstärkten initialen Exspirationsflusses kommt es im weiteren Flussverlauf zunächst zu einer leichten Verminderung des Flusses, da initial bereits größere Teile der VC ausgeatmet wurden. Der mittlere Kurvenverlauf darf nicht fälschlicherweise mit den ersten Anzeichen einer peripheren Obstruktion (im Sinne einer „small airways disease“) verwechselt werden. Ein ähnlicher Flussverlauf wurde bereits in Fallbeispiel 1 gezeigt.

Ergänzend lässt sich dem Befund hinzufügen, dass eine Spiroergometrie durch-

geführt wurde, die eine überdurchschnittlich gute Lungenfunktion bestätigte. Die maximale Sauerstoffaufnahme betrug 156 % vom Soll, und die erreichte Leistung (Watt) lag mit 180 % vom Soll ebenfalls deutlich über dem Sollmittelwert.

➤ Ein großer, kräftiger Lungenfunktionsapparat zeigt manchmal einen überschießenden initialen Exspirationsverlauf. Der weitere, leicht alterierte Flow-Verlauf darf nicht mit dem einer beginnenden peripheren Obstruktion verwechselt werden. Der insgesamt leicht veränderte Kurvenverlauf ist nicht Ausdruck einer Pathologie, sondern einer besonderen anatomischen und funktionellen Kapazität der Lunge.



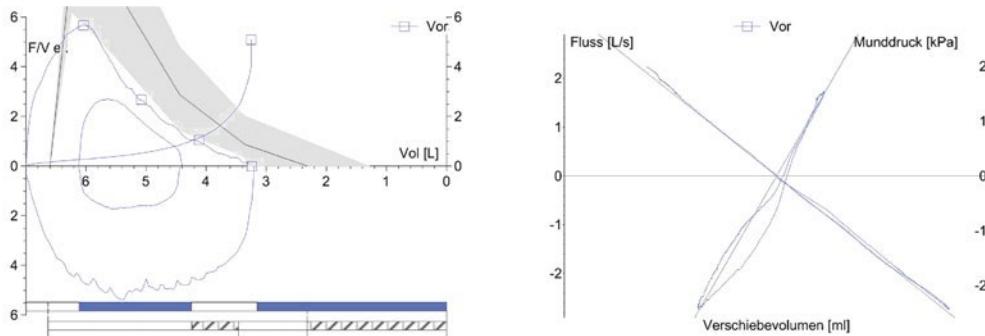
Unplausibel erscheinende Werte sollten stets hinterfragt werden. Passt das Ergebnis zu den Kurven, korreliert es mit der Klinik bzw. den weiteren Untersuchungsergebnissen? Wird z. B. die Körpergröße zu klein ermittelt bzw. im System eingetragen, fallen die Werte zu gut aus. Erhebliche Abweichungen gibt es auch bei falsch eingegebenem Geschlecht oder Alter.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 29

59 Jahre, männlich, 172 cm, 108 kg, BMI 37 kg/m²

Das folgende Beispiel zeigt die Untersuchung eines Patienten mit präoperativer Lungenfunktions-
testung bei geplanter Herz-OP.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	4.31	3.30	3.84	89.1				●			Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.31	3.30	3.74	86.8				●			Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.36	2.54	2.84	84.6				●			Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	76.59	64.80	75.91	99.1				●			ECCS (1993)
PEF	L/s	8.17	6.18	7.84	95.9				●			ECCS (1993)
FEF 25	L/s	7.21	4.40	5.67	78.7				●			ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.87	1.42	2.68	93.4				●			Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.88	0.36	1.06	120.4				●			Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	1.71	145.6							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.33	110.3							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	1.74	148.3							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.34	112.3							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	0.58	68.7							ECCS (1983)
G eff	(L/s)/kPa	3.33	3.33	3.02	90.7							ECCS calculated (1983)
TLC	L	6.66	5.51	7.00	105.0				●			ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.47	2.48	4.25	122.5				●			ECCS (1993)
ERV	L	1.14	1.14	1.09	95.3							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.32	1.65	3.15	135.9				●			ECCS (1993)
IC	L	3.05	3.05	2.75	90.4							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	36.97	27.99	45.07	121.9				●			ECCS (1993)

Abb. 4.28 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 29

Wie lautet der Befund?

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. Leicht geöffnete Atmungsschleife im Expirationsteil und leichte Rechtsdrehung der Schleife bei isolierter leichtgradiger Überblähung (TLC-, RV-Erhöhung, Linksverschiebung der Fluss-Volumen-Kurve). Der Atemwegswiderstand ist allenfalls diskret erhöht. Eine eigentliche Ventilationsstörung (Obstruktion oder Restriktion) liegt nicht vor. Sämtliche spirometrischen Werte liegen im Normbereich. Die Genese der Überblähung liegt – bei okkulter Obstruktion – am ehesten in der Lungenperipherie. Ein endexspiratorisches Closing im Rahmen der Adipositas ist bei erhöhter FRC eher unwahrscheinlich (zum Vergleich auch Fall 19).

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer isolierten leichtgradigen Überblähung, ohne Nachweis einer eigentlichen Ventilationsstörung.

➤ **Während der vollständigen Exspiration steigt der Atemwegswiderstand mit fallendem Lungenvolumen überproportional an, bis er schließlich unendliche**

Höhe erreicht. An diesem Punkt liegt das RV, und es gibt es keinen weiteren Austrittsfluss. Ein steigendes RV ist mitunter das erste Zeichen einer beginnenden Erkrankung der kleinen peripheren Atemwege.



Die Atemwegsconductance (G_{eff}) ist reziprok zur Resistance ($G_{eff} = 1/R_{eff}$) und proportional zum Lungenvolumen. Daher steigt sie linear mit dem Lungenvolumen an. Die sG_{eff} ist der Kehrwert der sR_{eff} ($sG_{eff} = 1/sR_{eff}$ bzw. $= 1/R_{eff}/FRC$) und unabhängig vom Lungenvolumen. In ihrer Sensitivität in Hinblick auf den Nachweis von Atemflussbehinderungen ist die spezifische Atemwegsconductance vergleichbar mit der FEV₁. Im Gegensatz zur FEV₁ wird sie jedoch während der Ruheatmung ermittelt und kann insbesondere bei bronchialen Provokationstests oder bei vermindertem Lungenvolumen Vorteile bieten. Im Allgemeinen wird ein unterer Grenzwert von 0,80 1/kPa × s empfohlen. Einige Autoren sehen die Grenze eher bei 0,63 1/kPa × s, bei deren Überschreitung von einer Beeinträchtigung der Leitfähigkeit auszugehen ist.

4.3 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 30

57 Jahre, weiblich, 171 cm, 99 kg, BMI 34 kg/m²

Das letzte Beispiel dieses Kapitels zeigt die Untersuchung einer Patientin mit exzidiertem Asthma vor und 48 h nach Einleitung einer Therapie.

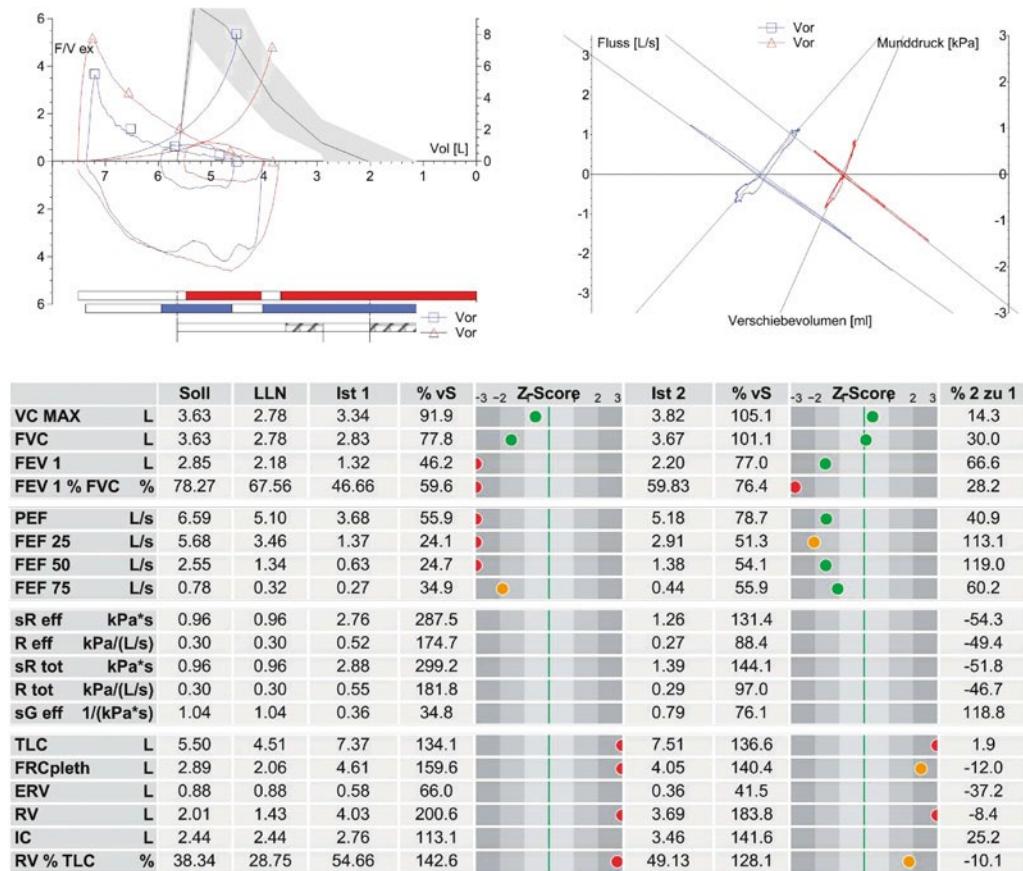


Abb. 4.29 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 30

Wie beurteilen Sie den Verlauf?

■ Interpretation der Untersuchungen

Gute Mitarbeit in den beiden Untersuchungen. Es ist eine deutliche Besserung zu erkennen (erste Untersuchung blau, Kontrolluntersuchung rot). Die Rechtsrotation der Atemschleife ist rückläufig, die Schleife nur noch diskret geöffnet. Vergleicht man die Fluss-Volumen-Kurven, so zeigt sich eine Vergrößerung der Flüsse sowie der VC.

Es ergibt sich eine Verbesserung des FEV₁ um 67 % und eine Abnahme der Resistance um fast 50 %. Somit liegt nach initial mittelgradiger Obstruktion aktuell formal keine Obstruktion mehr vor. Die Überblähung hat sich jedoch nur diskret zurückgebildet und lässt sich weiterhin schwergradig nachweisen (RV-Rückgang um 8 % von 200 auf 184 % vom Soll). Dies ist als Ausdruck einer persistierenden, rein peripheren Obstruktion zu werten und sollte sich im weiteren Verlauf weiter zurückbilden.

Zusammenfassend ergibt sich nach initial mittelgradiger Obstruktion und schwergradiger Überblähung im Verlauf eine deutliche Besserung der Obstruktion mit jedoch noch persistierender, weiterhin schwergradiger Überblähung.

 **Eine absolute Überblähung ist nicht gleichzusetzen mit dem Vorhandensein eines Emphysems, bei dem die Überblähung vornehmlich strukturelle Ursachen hat.**

Die obstruktionsbedingte Überblähung

ist prinzipiell reversibel und regelhaft im Rahmen verschiedenster obstruktiver Atemwegserkrankungen nachzuweisen.

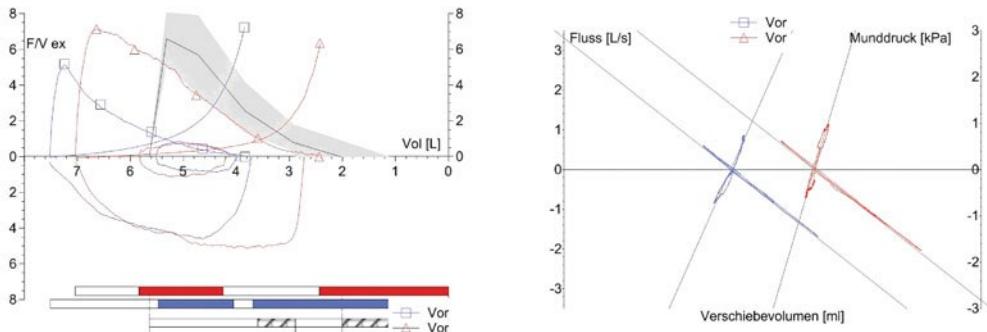


Die Durchführung einer Diffusionsmessung kann hinsichtlich der Klärung des Vorliegens einer COPD in Abgrenzung zum Asthma oft hilfreich sein, da der Parenchymshoden eines Emphysems mit einer korrelierenden Transferstörung einhergeht, während die Transferleistung bei Asthma meist normale oder auch hochnormale Werte ergibt.

Letztlich ergab sich bei der Patientin der Nachweis eines therapierefraktären Asthma bronchiale, und es wurde eine Immuntherapie mit einem Anti-IL-5-Antikörper begonnen. Die Abb. 4.30 zeigt den Verlauf 3 Monate nach Einleitung der Immuntherapie im Vergleich zum Ausgangsbefund nach Besserung der Exazerbation (Abb. 4.29).

Die Funktion normalisierte sich im Verlauf komplett. Die Obstruktion bildete sich vollständig zurück. Es ist wichtig zu bemerken, dass die hohen Werte von TLC und RV nicht der Ausdruck einer Überblähung sind, sondern der Nachweis einer großen Lunge, da auch die spirometrischen Werte (VC etc.) deutlich über 100 % vom Soll liegen. Retrospektiv ist die schwergradige Überblähung in der Kontrolluntersuchung aus Abb. 4.29 eher als mittelgradig zu werten.

Weiterführende Literatur



	Soll	LLN	Ist 1	% vS	-3 -2	Z-Score	2 3	Ist 2	% vS	-3 -2	Z-Score	2 3	% 2 zu 1
VC MAX	L	3.63	2.78	3.82	105.1		●	4.61	127.1		●	20.6	
FVC	L	3.63	2.78	3.67	101.1		●	4.61	127.1		●	25.4	
FEV 1	L	2.85	2.18	2.20	77.0		●	3.45	121.3		●	57.0	
FEV 1 % FVC	%	78.27	67.56	59.83	76.4	●		74.92	95.7	●	●	25.2	
PEF	L/s	6.59	5.10	5.18	78.7	●		7.13	108.3	●	●	37.5	
FEF 25	L/s	5.68	3.46	2.91	51.3	●		5.98	105.3	●	●	105.5	
FEF 50	L/s	2.55	1.34	1.38	54.1	●		3.44	135.4	●	●	148.6	
FEF 75	L/s	0.78	0.32	0.44	55.9	●		1.02	131.7	●	●	133.0	
sR eff	kPa*s	0.96	0.96	1.26	131.4			0.73	75.8			-42.3	
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.27	88.4			0.14	48.2			-45.5	
sR tot	kPa*s	0.96	0.96	1.39	144.1			0.85	88.5			-38.6	
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.29	97.0			0.17	56.3			-42.0	
sG eff	1/(kPa*s)	1.04	1.04	0.79	76.1			1.37	131.9			73.2	
TLC	L	5.50	4.51	7.51	136.6		●	7.04	128.1		●	-6.2	
FRCpleth	L	2.89	2.06	4.05	140.4		●	4.25	147.2		●	4.9	
ERV	L	0.88	0.88	0.36	41.5			1.82	206.3			397.5	
RV	L	2.01	1.43	3.69	183.8		●	2.44	121.3		●	-34.0	
IC	L	2.44	2.44	3.46	141.6			2.79	114.3			-19.2	
RV % TLC	%	38.34	28.75	49.13	128.1	●		34.58	90.2	●	●	-29.6	

Abb. 4.30 Spirometrie/Bodyplethysmografie im Verlauf Fallbeispiel 30

Weiterführende Literatur

- Bösch D (2010) Die Bodyplethysmografie – ein unverzichtbares Element in der differenzierten Lungenfunktionsanalyse. Atemw Lungenkrh 36:460–462
- Clay RD et al (2017) The Complex Restrictive Pulmonary Function Pattern. Chest 152:1258–1265
- Criée CP et al (2009) Empfehlungen zur Ganzkörperplethysmographie. Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga und der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin. Dustri, München, Orlando
- Goldman MD, Smith HJ, Ulmer WT (2005) Whole-body plethysmography. Eur Respir Mon 31:15–43
- Hyatt RE et al (2009) Conditions associated with an abnormal nonspecific pattern of pulmonary function tests. Chest 135:419–424
- Stanescu D (1999) Small airways obstruction syndrome. Chest 116:231–233

Topalovic M et al (2015) Airways resistance and specific conductance for the diagnosis of obstructive airways diseases. Respir Res 16:88

Wanger J et al (2005) Series „ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing“: Standardisation of the measurement of lung volumes. Respir J 26:511–522



Bronchospasmolysetestung und Provokationstestung

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

- 5.1 Einleitung – 106
- 5.2 Bronchospasmolysetestung – 106
- 5.3 Provokationstestung – 106
- 5.4 Fallbeispiele – 109
- Weiterführende Literatur – 124

5.1 Einleitung

Ergänzend zur Spirometrie bzw. Bodyplethysmografie ist es manchmal sinnvoll, eine Bronchospasmolyse- oder Provokationstestung durchzuführen. Der Wert der Bronchospasmolysetestung liegt in der Überprüfung der Reversibilität und damit der Differenzierung einer unklaren obstruktiven Ventilationsstörung. Aufgrund der Rückbildungstendenzen einer Obstruktion auf ein Bronchospasmolytikum kann insbesondere zwischen einem Asthma bronchiale und einer COPD unterschieden werden. Andererseits kann mittels inhalativer Provokation eine bronchiale Hyperreagibilität ermittelt werden.

5.2 Bronchospasmolysetestung

In der Bronchospasmolysetestung wird die Reversibilität einer Obstruktion durch Bronchospasmolytika (β_2 -Sympathomimetika, Anticholinergika) überprüft. Der Test wird daher synonym auch als Bronchodilatationstest bezeichnet. Die Reversibilität der Obstruktion ist bei verschiedenen obstruktiven Atemwegserkrankungen unterschiedlich ausgeprägt. Neben einer vollständigen Reversibilität kann auch eine Teilreversibilität vorliegen. Die Bronchospasmolyse ist daher oft eine Hilfe in der Differenzialdiagnostik.

Nach erfolgtem Nachweis einer obstruktiven Ventilationsstörung mittels Spirometrie und ggf. Bodyplethysmografie wird ein Bronchospasmolytikum (► Tab. 5.1) inhaliert. Nach ausreichend hoher Dosis und genügend langer Wirkzeit wird dann der vorherige Lungenfunktionstest wiederholt und die Rückbildung bzw. Reversibilität der Obstruktion beurteilt.

Für eine effektive Durchführung sei darauf hingewiesen, dass das Vermögen der einzelnen Patienten, inhalative Applikationssysteme richtig anzuwenden, sehr unterschiedlich ist und die Wirkung der Medikamente ganz entscheidend von der korrekten bzw. effektiven Anwendung der inhalativen Systeme abhängt. Eine etwaige

► Tab. 5.1 Bronchospasmolytika

Substanz	Wirkeintritt (minimale Wartezeit in min)
Salbutamol	10
Formoterol	10
Ipratropiumbromid	30

pulmonale Vormedikation muss zudem ausreichend lange pausiert sein, um eine valide Bronchospasmolysetestung durchführen zu können.

Es sei zudem angemerkt, dass bei Patienten mit exspiratorischem Bronchialkollaps die Änderungen des FEV₁ geringer ausfallen können als der Abfall der spezifischen Resistance oder des FRC_{pleth} oder RV. Insofern ist die Aussagekraft einer kombinierten Spirometrie-Bodyplethysmografie höher als die einer Bronchospasmolysetestung mittels isolierter Spirometrie.

5.3 Provokationstestung

Bis zu einem gewissen Grad ist die Reaktion der bronchialen Muskulatur auf inhalative Reize normal und physiologisch sinnvoll. Eine Hyperreakтивität kann jedoch unangenehme Funktionsstörungen und Symptome zur Folge haben. Der inhalative, unspezifische Provokationstest dient dem Nachweis einer bronchialen Hyperreakтивität. Typisch ist dies z. B. bei einem Asthma bronchiale. Es sei jedoch angemerkt, dass es auch andere Erkrankungen gibt, die mit einer erhöhten bronchialen Hyperreakтивität einhergehen (Sarkoidose etc.) und dass auch Atemwegsgesunde oder Patienten nach einem Atemwegsinfekt mitunter ein pathologisches Testergebnis zeigen können.

Beim unspezifischen inhalativen Provokationstest wird spirometrisch (und wenn möglich ergänzend bodyplethysmografisch) die Reaktion auf eine standardisierte Inhalation eines Aerosols einer chemischen Substanz (meist Methacholin) ermittelt. Durchgeführt wird der Einkonzentra-

5.3 • Provokationstestung

tionstest (mit z. B. 0,25 % Methacholin) oder der Mehrkonzentrationstest (mit ansteigender Dosis oder Konzentration, z. B. Methacholin 0,25 % – 0,5 % – 1,0 % – 2,0 % – 3,0 %). Im Einkonzentrationstest wird die Reaktivität auf eine feste niedrige Dosis anhand der Reaktionsstärke beurteilt. Genauer ist jedoch eine serielle Messreihe mit Inhalation einer steigenden Menge einer fixen Konzentrationslösung. Die Dosis der Konzentrationslösung wird dabei stufenweise gesteigert und so die Reagibilität quantitativ ermittelt und als Provokationsdosis ausgedrückt, bei der die FEV_1 um mindestens 20 % abnimmt – die sogenannte PD 20. Im Mehrkonzentrationstest wird die Reaktion durch die ansteigende Konzentration erfasst und als Provokationskonzentration – sprich PC 20 – bezeichnet.

Neben dieser direkten Provokationsmethode gibt es noch die indirekte Methode, bei der die Reaktion durch Ausschüttung von Mediatoren indirekt provoziert wird, z. B. durch körperliche Belastung bzw. Hyperventilation oder Mannitol etc.

Bei der Durchführung einer direkten Provokationstestung sollten – ergänzend zu den Einschränkungen bei der Durchführung der Spirometrie – folgende relative Kontraindikationen berücksichtigt werden:

- vorliegende Atemwegsobstruktion mit $FEV_1 < 60$ vom Soll (Erwachsene und Kinder) bzw. 1,5 l (Erwachsene),
- schwere Hypoxämie,

- vorliegende schwerwiegende kardiovaskuläre Erkrankungen, insbesondere bradykarde Herzrhythmusstörungen, Zustand nach frischem Herzinfarkt, Schlaganfall, Aneurysma etc.,
- vorliegende Schwangerschaft.

Ferner sollte berücksichtigt werden, dass eine bronchodilatatorische Medikation gemäß Wirkdauer im Vorfeld ausreichend lange pausiert ist. Antihistaminika oder Leukotrienantagonisten sollen einige Tage zuvor pausiert werden. Die Bewertung des Einflusses von systemischen oder inhalativen Kortikoiden auf die direkten Provokationstests ist nicht einheitlich. Wenn möglich, sollten diese mindestens 2 Wochen zuvor abgesetzt werden. Sollte der Test unter einem Kortikoid bzw. einer kürzeren Abstinenzphase durchgeführt werden, so ist die Stärke der etwaigen Hyperreagibilitätsreaktion nur eingeschränkt beurteilbar und im Falle einer ausbleibenden Reaktion eine Hyperreagibilität nicht sicher ausgeschlossen.

Der Patient muss auf das eventuelle Auftreten einer schweren Atemwegsobstruktion hingewiesen werden, und entsprechende Behandlungsmöglichkeiten (Antioobstruktiva) müssen bei der Durchführung des Tests einsatzbereit sein.

Die nachfolgenden Beispiele zeigen die verschiedenen Hyperreagibilitätstests eingebettet in den jeweiligen klinischen Kontext.

5.4 Fallbeispiele

Fallbeispiel 31

24 Jahre, weiblich, 170 cm, 54 kg, BMI 19 kg/m²

Das erste Beispiel zeigt die Untersuchung einer jungen Frau, die mit Atemnot und Verdacht auf ein Asthma bronchiale vorstellig wurde.

Dargestellt ist die Lungenfunktionsprüfung vor und 11 min nach Inhalation von 0,4 mg Salbutamol.

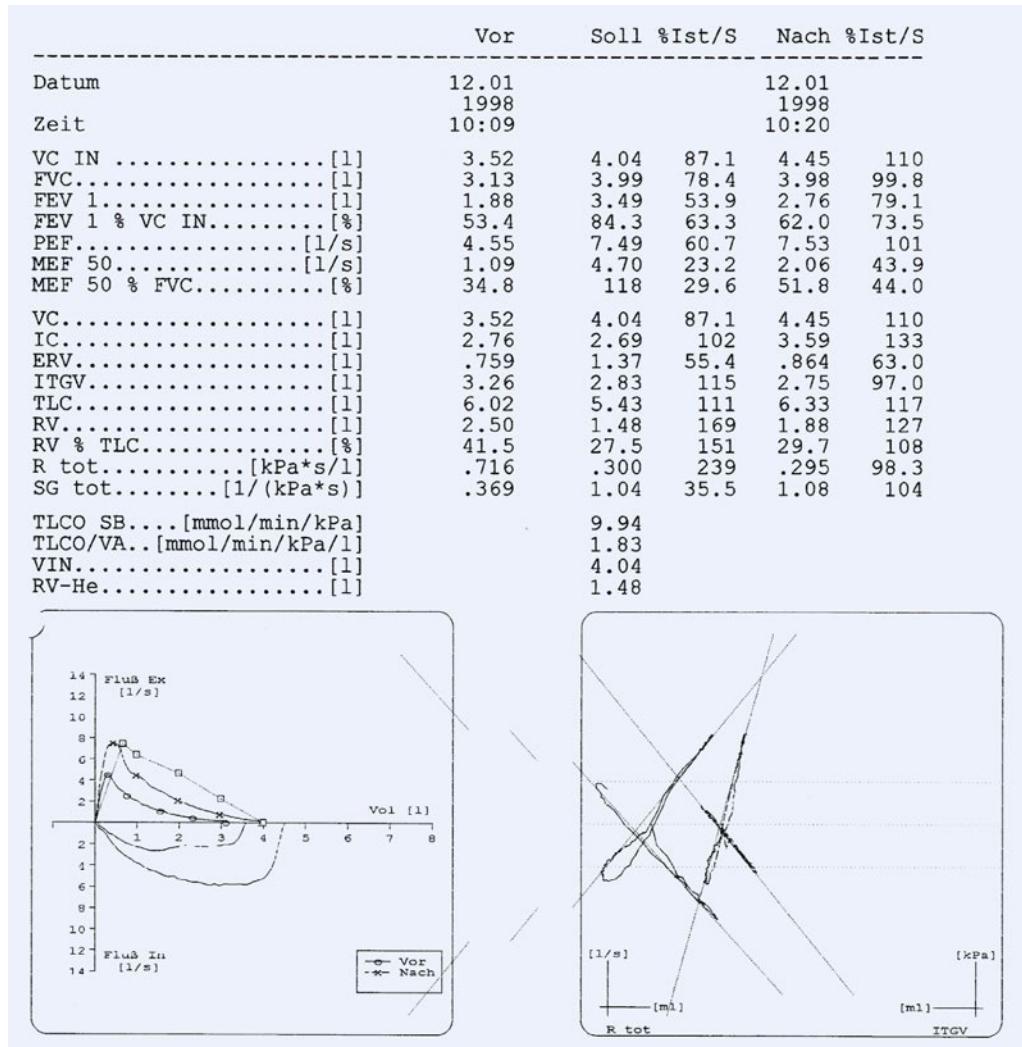


Abb. 5.1 Bronchospasmolysetest Fallbeispiel 31

- Wie ist die Basismessung zu befinden, und welche Veränderungen sind nach Bronchospasmolyse zu erkennen?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven sprechen für eine gute Mitarbeit der Patientin. In der ersten Untersuchung zeigen sich eine mittelgradige Obstruktion sowie eine mittelgradige Überblähung.

Nach Inhalation des schnell wirksamen β_2 -Sympathomimetikums zeigt sich eine Zunahme der FEV₁ um 880 ml bzw. 47 % (die prozentuale Veränderung von 1 zu 2 ist im Protokoll nicht abgebildet). Die Obstruktion ist nach signifikantem Rückgang weiterhin leichtgradig nachzuweisen (s. FEV₁, Fluss-Volumen-Kurve) und betrifft hauptsächlich die peripheren Bronchialabschnitte (R_{tot} jetzt normal). Die Überblähung hat sich ebenfalls deutlich zurückgebildet und ist nur noch diskret nachweisbar. Beachtlich ist in diesem Zusammenhang auch die Rückbildung/Normalisierung der Atemschleife.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund eines positiven Bronchospasmolysetests mit guter Teilreversibilität einer mittelgradigen Obstruktion im Rahmen eines Asthmaanfalls.

► **Die Reversibilität wird primär anhand der FEV₁-Veränderung bestimmt. Eine Zunahme um >12 % des Ausgangswertes und ein Anstieg um mindestens 200 ml werden als sicher positive Reaktion bewertet.**

Die vorherige Definition einer Zunahme um mindestens 15 % wurde vor einigen Jahren zugunsten einer international einheitlichen Bewertung aufgegeben.

Bei einer positiven Reaktion kann zudem zwischen einer partiellen und einer kompletten Reversibilität der Obstruktion differenziert werden.



Eine verminderte oder fehlende Reversibilität kann an der Art der Obstruktion (fixierte Obstruktion) oder auch an der Durchführung der Bronchospasmolyse (richtige Inhalation, Dosis, Wartezeit) liegen.

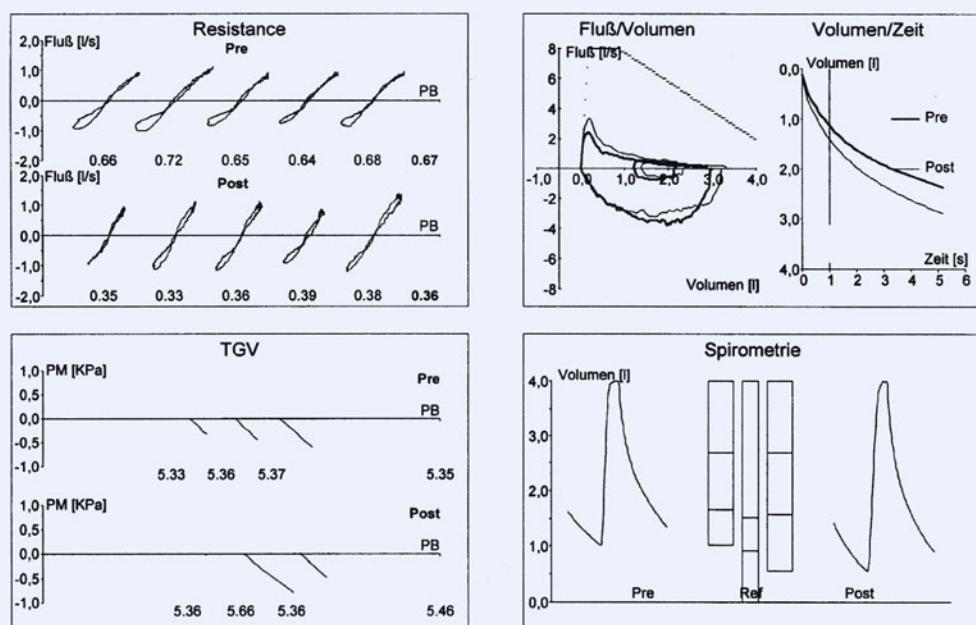
Für den gezeigten Fall sei angemerkt, dass die Wartezeit für das Ausmaß der Obstruktion etwas knapp ist. Es kann spekuliert werden, ob die restliche Obstruktion nach weiteren 5 min vielleicht komplett reversibel gewesen wäre. Andererseits ist kaum zu erwarten, dass ein Asthmaanfall trotz guten Ansprechens auf β_2 -Sympathomimetika nach einmaliger Inhalation 10 min später vollständig reversibel ist.

5.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 32

44 Jahre, männlich, 178 cm, 72 kg, BMI 23 kg/m²

Nachfolgend ist die Untersuchung eines Patienten dargestellt, der initial mit schwerer Dyspnoe im Rahmen einer Bronchitis stationär aufgenommen wurde. Bei anamnestisch länger bestehenden bronchitischen Beschwerden wurden nach klinischer Besserung die Antibstruktriva pausiert und eine Spirometrie/Bodyplethysmografie mit nachfolgender Bronchospasmolysetestung (0,4 mg Salbutamol, 15 min Wartezeit) durchgeführt.



	Soll	Pre	Pre/Soll	Post	Post/Soll	Diff.
VCmax	4,98	2,99	60%	3,44	69%	15%
IRV	-	1,31	-	1,32	-	1%
ERV	-	0,63	-	1,00	-	57%
VT	-	1,05	-	1,12	-	7%
FEV1	3,89	1,07	27%	1,33	34%	25%
FEV1/VCmax	%	79	45%	39	49%	9%
PEF	l/s	9,20	2,41	3,35	36%	39%
MEF75	l/s	7,97	0,92	11%	1,18	15%
MEF50	l/s	5,04	0,42	8%	0,59	12%
MEF25	l/s	2,16	0,22	10%	0,27	13%
PIF	l/s	-	3,77	-	3,24	-14%
RAWtot	kPas/l	< 0,30	0,67	223%	0,36	121%
RAW-ex	kPas/l	< 0,30	0,69	231%	0,36	119%
sRAWtot	kPa's	< 1,18	3,59	304%	1,98	168%
Gtot	l/(kPa's)	-	1,49	-	2,75	84%
TLC-B	l	7,14	7,45	104%	8,13	114%
TGV-B	l	3,48	5,35	154%	5,46	157%
RV-B	l	2,07	4,57	221%	4,52	219%
RV/TLC-B	%	31	61	199%	56	181%
TGV/TLC-B	%	53	72	135%	67	127%

Abb. 5.2 Bronchospasmolysetest Fallbeispiel 32

Welcher Befund ist zu erheben?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven sprechen für eine gute Mitarbeit des Patienten. In der ersten Untersuchung zeigen sich eine schwergradige, peripher betonte Obstruktion sowie eine schwergradige Überblähung mit deutlicher Einschränkung der VC. Die Fluss-Volumen-Kurve und die Atemschleife zeigen diskrete Zeichen der bronchialen Instabilität.

Nach Inhalation des schnell wirksamen β_2 -Sympathomimetikums zeigt sich eine Zunahme der FEV₁ um 260 ml bzw. 25 %. Die schwergradige Obstruktion ist nach signifikantem Rückgang postdilatatorisch weiterhin nachzuweisen (FEV₁, Fluss-Volumen-Kurve) und betrifft bei deutlichem Rückgang der Resistance (um 46 %) hauptsächlich die peripheren Bronchialabschnitte. Die Überblähung hat sich bodyplethysmografisch dementsprechend nicht wesentlich verändert, obwohl die VC um 15 % bzw. 441 ml gestiegen und nun nur noch leichtgradig vermindert ist.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund eines positiven Bronchospasmolysetests mit partieller Reversibilität einer schwergradigen Obstruktion, die jedoch weiterhin schwergradig nachgewiesen werden kann, und mit einer ebenfalls schwergradigen, kaum reversiblen Überblähung verbunden ist. Der Befund spricht am ehesten für das Vorliegen einer COPD.

Hierzu ist anzumerken, dass die 25-prozentige Reversibilität für eine gewisse Hyperreakтивität (mit entsprechender Reversibilität) spricht, die bei einer COPD durchaus vorliegen kann, in diesem Fall aber auch Folge des abklingenden Atemwegsinfektes sein könnte. Für eine COPD (insbesondere in dem Ausmaß) ist der Patient sehr jung. Zur weiteren Abgrenzung eines Asthma bronchiale sollte unbedingt eine Verlaufskontrolle und ergänzend noch eine Diffusionstestung durchgeführt werden. Bei einem vorliegenden Emphysem ist der Transferfaktor (DL_{CO}) erniedrigt, während der Transferfaktor bei einem reinen Asthma bronchiale normal oder sogar erhöht ist.

Der Befund einer COPD bestätigte sich im Weiteren. Ferner wurde bei dem Patienten ein α_1 -Antitrypsinmangel festgestellt, was das junge Manifestationsalter erklärt.

► **Anhand der Reversibilitätsreaktion der Obstruktion durch inhalative Antioberstruktiva kann man häufig zwischen einem Asthma bronchiale und einer COPD unterscheiden. Während beim Asthma bronchiale die Reversibilität meist nahezu vollständig ist, ist sie bei der COPD häufig nicht als positiv zu bewerten (d. h. Zunahme der FEV₁ >12 % und mindestens 200 ml). Hierbei muss das primäre Ausmaß der Obstruktion berücksichtigt werden. In unserem Beispiel beträgt die Reversibilität zwar 25 %, für die Schwere der Obstruktion ist sie aber eher gering. Die absolute Veränderung um 7 % (von 27 auf 34 % vom Soll) ist eher marginal.**



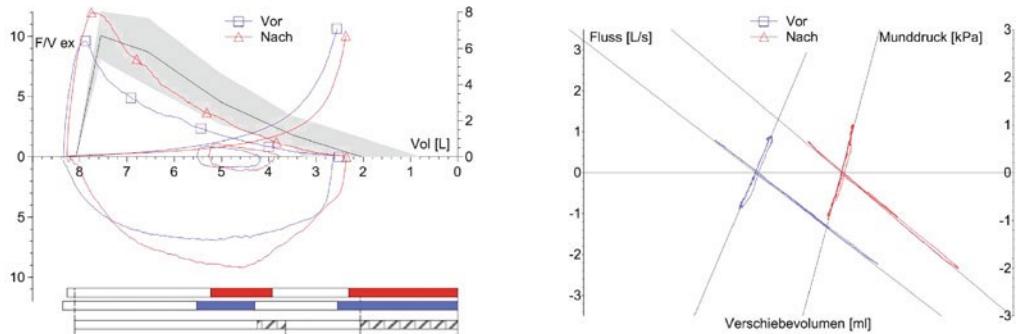
Insbesondere bei der COPD ist die positive Reaktion auf ein Antioberstruktivum nicht unbedingt nur an der FEV₁ ablesbar. Häufig ist hier jedoch ein deutlicher Rückgang der Resistance nachweisbar. Wegen der bronchialen Instabilität (Bronchialkollaps) ist die FEV₁ bei einer COPD häufig wenig aussagekräftig, und es sollte neben der Resistance unbedingt auch das Ausmaß der Überblähung mitbeurteilt werden. Einige Effekte zeigen sich auch erst nach regelmäßiger wochenlanger Anwendung (z. B. Rückgang der Überblähung). Ein negativer Bronchospasmolysetest darf nicht mit einer Wirkungslosigkeit der verwendeten Substanz verwechselt werden und erlaubt keine Aussage über das Ansprechen der Medikation im weiteren Verlauf. Zudem ist das Ziel einer Therapie mit langwirksamen Bronchodilatatoren nicht nur die Lungenfunktionsverbesserung (mit Besserung der Symptomatik und der Lebensqualität), sondern auch die Reduktion des Exazerbationsrisikos.

5.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 33

38 Jahre, männlich, 188 cm, 84 kg, BMI 24 kg/m²

Das nächste Beispiel zeigt die Bronchospasmolysetestung eines Patienten mit aktuell leichtem thorakalem Beklemmungsgefühl und dem Verdacht auf das Vorliegen eines Asthma bronchiale.



Substanz	Soll	Soll uG	Vor	% vS	Nach	% vS	-3	-Z-Score Nach ₂	3	% Nach/Vor
VC MAX	L	6.05	4.82	5.82	96.2	5.96	98.5	●	●	2.4
FVC	L	6.05	4.82	5.82	96.2	5.91	97.8	●	●	1.6
FEV 1	L	4.83	3.83	3.62	74.9	4.36	90.3	●	●	20.6
FEV 1 % FVC %	80.37	68.58	62.18	77.4	73.80	91.8	●	●	●	18.7
PEF	L/s	10.06	8.07	9.64	95.8	11.99	119.2	●	●	24.4
FEF 25	L/s	8.69	5.88	4.89	56.2	8.10	93.1	●	●	65.6
FEF 50	L/s	4.60	2.71	2.37	51.6	3.66	79.5	●	●	54.2
FEF 75	L/s	1.81	0.90	0.85	46.9	1.19	65.9	●	●	40.3
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	1.24	105.8	0.69	58.3	●	●	-44.9
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.25	84.5	0.15	50.0	●	●	-40.8
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	1.56	132.8	0.78	66.1	●	●	-50.2
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.32	106.0	0.17	56.6	●	●	-46.6
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	0.80	94.5	1.46	171.4	●	●	81.4
TLC	L	7.94	6.79	8.37	105.4	8.27	104.1	●	●	-1.3
FRCpleth	L	3.65	2.66	4.30	117.8	3.92	107.5	●	●	-8.7
ERV	L	1.58	1.58	1.75	110.6	1.62	102.2	●	●	-7.6
RV	L	2.07	1.39	2.55	123.3	2.31	111.5	●	●	-9.5
IC	L	4.17	4.17	4.07	97.6	4.34	104.1	●	●	6.7
RV % TLC	%	28.78	19.80	30.47	105.9	27.91	97.0	●	●	-8.4

Abb. 5.3 Bronchospasmolysetest Fallbeispiel 33

Passat der Befund zu einem Asthma bronchiale?

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit des Patienten. In der Basismessung Zeichen einer leichtgradigen Obstruktion und diskrete Verschiebung der Atemmittellage im Sinne einer beginnenden Überblähung.

Postdilatativ komplette Normalisierung mit FEV_1 -Zunahme um 21 % bzw. 740 ml und Abnahme der spezifischen Resistance um 45 % (bei Abnahme der Resistance und der FRC).

Somit zusammenfassend komplette Reversibilität einer leichtgradigen Obstruktion im Bronchospasmolysetest im Sinne einer positiven Lysereaktion. Der Befund spricht für das Vorliegen eines Asthma bronchiale.

5

➤ Bei Asthma-typischen Beschwerden in der Anamnese sichert der Nachweis einer Obstruktion mit vollständiger Rückbildung durch eine Bronchospasmolyse die Diagnose eines Asthma bronchiale. Bei positiver Reaktion, aber Teilreversibilität gilt die Diagnose als wahrscheinlich und muss über den weiteren Verlauf (Therapieansprache etc.) gesichert werden.



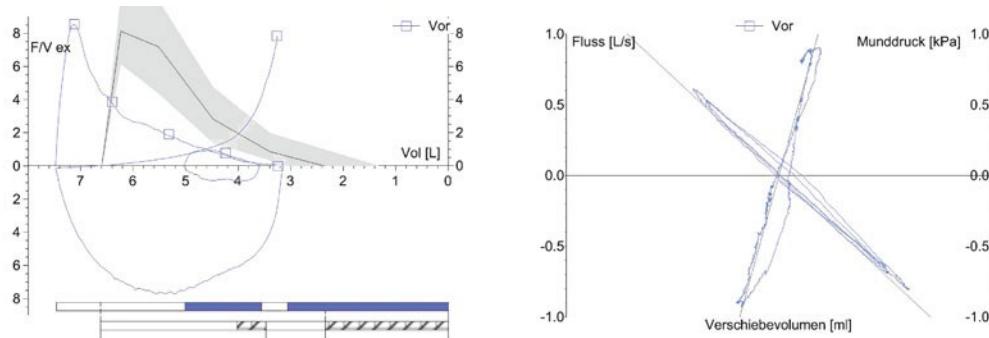
Seit einigen Jahren wird auch der Begriff eines Asthma-COPD-Overlap diskutiert. Hierbei überlappen sich die klinischen Merkmale beider Pathomechanismen, zum Beispiel bei rauchenden Asthmatikern. Der Anteil unter den COPD-Patienten wird je nach Definition auf ca. 10 % geschätzt.

5.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 34

60 Jahre, männlich, 172 cm, 77 kg, BMI 26 kg/m²

Das nächste Beispiel zeigt die Spirometrie/Bodyplethysmografie eines Patienten mit rezidivierendem thorakalem Beklemmungsgefühl.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	4.28	3.26	4.40	102.9			●	●			Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.28	3.26	4.24	99.1			●	●			Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.33	2.51	2.90	87.3			●	●			Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	76.41	64.62	68.47	89.6			●	●			ECCS (1993)
PEF	L/s	8.13	6.14	8.56	105.2				●			ECCS (1993)
FEF 25	L/s	7.18	4.37	3.86	53.8		●		●			ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.82	1.38	1.91	67.8		●		●			Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.85	0.34	0.79	92.7		●		●			Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	0.73	62.3							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.17	57.1							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	0.90	76.3							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.21	69.8							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	1.36	160.4							ECCS (1983)
TLC	L	6.66	5.51	7.46	112.0				●			ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.47	2.49	3.56	102.3		●		●			ECCS (1993)
ERV	L	1.13	1.13	0.50	43.9							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.34	1.67	3.06	130.5					●		ECCS (1993)
IC	L	3.03	3.03	3.91	128.9							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	37.36	28.38	40.99	109.7				●			ECCS (1993)

Abb. 5.4 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 34

Wie ist die Untersuchung zu werten?

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit des Patienten. Keine Ventilationsstörung, d. h. weder Obstruktion noch Restriktion.

Das leicht erhöhte RV ist in Anbetracht der hohen VC nicht als Überblähung zu werten, sondern vielmehr als leichte Verschiebung der Atemmittellage.

Auf den zweiten Blick fällt auf, dass das FEV₁ in Anbetracht der ansonsten im hoch-

normalen Bereich liegenden Volumenwerte relativ niedrig (normal) ist.

Eine Bronchospasmolyse sollte in Anbetracht der Fragestellung eines möglichen Asthma bronchiale durchgeführt werden (Abb. 5.5).

?

Befunden Sie die Spasmolyse und interpretieren Sie die Untersuchung.

5

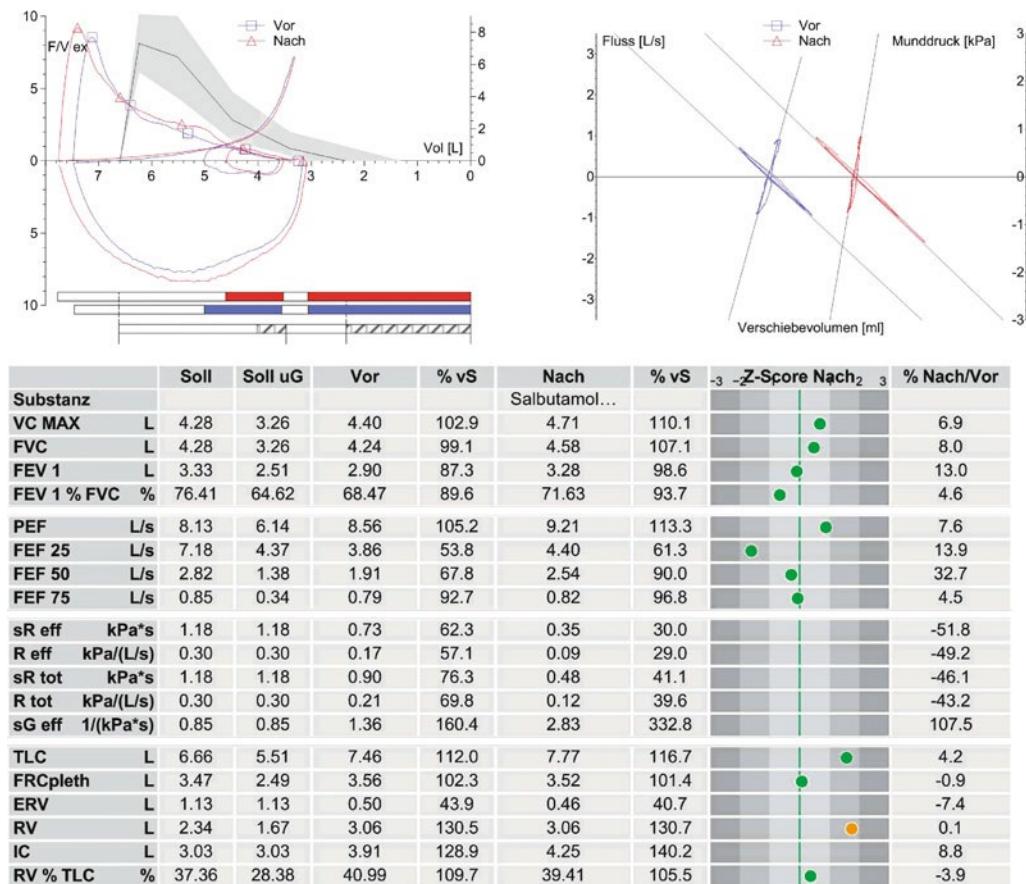


Abb. 5.5 Bronchospasmolysetest Fallbeispiel 34

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. Bei per definitionem fehlender Ventilationsstörung in der Basismessung kommt es nach Bronchodilatation zu einer deutlichen Besserung der Werte. Die Spasmylysekriterien sind allesamt positiv. Die FEV₁ nimmt um 13 % bzw. 380 ml zu, die spezifische Resistance um 52 % ab.

Der Befund spricht in Anbetracht der Klinik für das Vorliegen eines Asthma bronchiale.

- Bei ca. 3 % der Patienten mit normaler Spirometrie lässt sich eine Besserung im Sinne einer positiven Reversibilität nachweisen. Bei den Patienten mit einer FEV₁ zwischen LLN und <90 % vom Soll liegt

der Anteil sogar bei knapp 7 %. Somit ist es, empfehlenswert bei entsprechendem Ergebnis eine ergänzende postdilatatorische Messung durchzuführen, um ein unerwartetes Asthma bronchiale erkennen zu können.



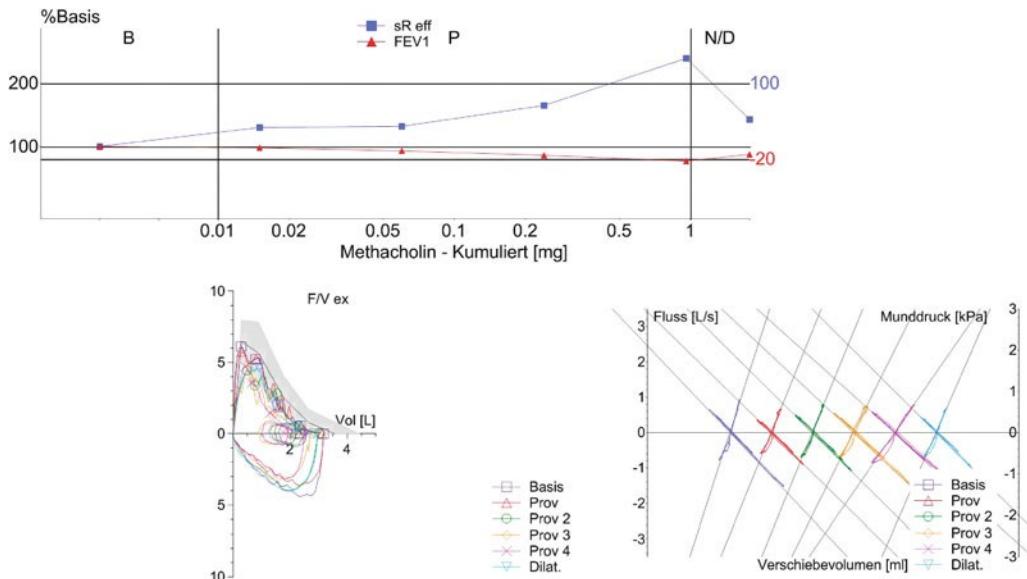
Nicht immer ist die FEV₁-Zunahme eindeutig. Um falsch negative Bronchodilatationstests zu vermeiden, sollte die spezifische Resistance mitberücksichtigt werden. Trotz fehlender einheitlicher Definition hinsichtlich einer positiven Reaktion darf bei einer mindestens 50-prozentigen Besserung sicher von einer Teilreversibilität ausgegangen werden.

5.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 35

58 Jahre, weiblich, 170 cm, 60 kg, BMI 21 kg/m²

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Provokationsuntersuchung einer Patientin mit rezidivierender Dyspnoe und wiederholtem Reizhusten.



	Soll	Basis	Prov	Prov 2	Prov 3	Prov 4	Dilat.
Substanz	Soll	–	Methacholin	Methacholin	Methacholin	Methacholin	Salbutamol
Dosis			0.015	0.045	0.180	0.720	2.000
Kum. Dosis			0.015	0.060	0.240	0.960	2.000
Konz [%]	0.0000	16.0000	16.0000	16.0000	16.0000	16.0000	0.0000
sR eff [kPa*s]	0.96	0.97	1.26	1.28	1.60	2.32	1.38
sR eff%Änd/Basis [%]	0.0	30.4	32.2	65.1	139.7	42.9	
FEV1 [L]	2.79	2.36	2.31	2.20	2.03	1.81	2.06
FEV1%Änd/Basis [%]	0.0	-2.1	-6.8	-14.0	-23.1	-12.6	
Testzeit		16:03	16:17	16:22	16:27	16:33	16:39

	Soll	Basis	% vom Soll
sR eff kPa*s	0.96	0.97	101 %
R eff kPa/(L/s)	0.30	0.25	84 %
FEV 1 L	2.79	2.36	85 %

PD/PC[+100] sR eff Kumuliert: = 0.459mg

Methacholin

PD/PC[-20] FEV1 Kumuliert: = 0.601mg

Methacholin

Abb. 5.6 Provokationstest Fallbeispiel 35

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven und der Verlauf sprechen für eine gute Mitarbeit der Patientin. In der Basismessung vor Provokationsbeginn ergibt sich ein grenzwertiger Befund mit niedrignormaler FEV₁ und grenzwertig hoher spezifischer Resistance (siehe Spalte „Basis“ und gesonderte kleine Tabelle unten).

Mit steigender Methacholindosis steigt auch die spezifische Resistance und das FEV₁ fällt (s. Kurvenverlauf sowie Haupttabelle). Das Zielkriterium für sR_{eff} sowie FEV₁ wird jeweils zwischen der 3. und 4. Stufe erreicht, entsprechend einer (interpolierten) Kumulativdosis von 0,46 bzw. 0,60. Dies entspricht einer leichtgradigen positiven Reaktion.

Nach Gabe des schnellwirksamen Betamimetikums Salbutamol bildet sich die Obstruktion weitestgehend zurück. Kritisch muss angemerkt werden, dass die Wartezeit mit 6 min (s. unterste Spalte in der Haupttabelle) etwas zu kurz ist. Vermutlich wäre die Reversibilität nach einer adäquaten Wartezeit von 10–15 min vollständig gewesen.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer positiven unspezifischen Provokationstestung mit Nachweis einer leichtgradigen Hyperreagibilität, die die vermutete Diagnose eines Asthma bronchiale bestätigt.

► Die Zielkriterien eines positiven Provokationstestes sind eine Abnahme der FEV₁ um mindestens 20 % und/oder ein Anstieg der sR_{eff} um 100 % auf mindestens 2,0 kPa × s.



Die Festlegung des Schweregrades der bronchialen Hyperreagibilität ist willkürlich und wurde in diversen Publikationen unterschiedlich vorgeschlagen. Eine Graduierung, die sich in der Praxis bewährt hat, ist in □ Tab. 5.2 dargestellt.

□ Tab. 5.2 Graduierung der bronchialen Hyperreagibilität entsprechend der kumulativen Dosis (Methacholin in mg) bei Erreichen eines Zielkriteriums

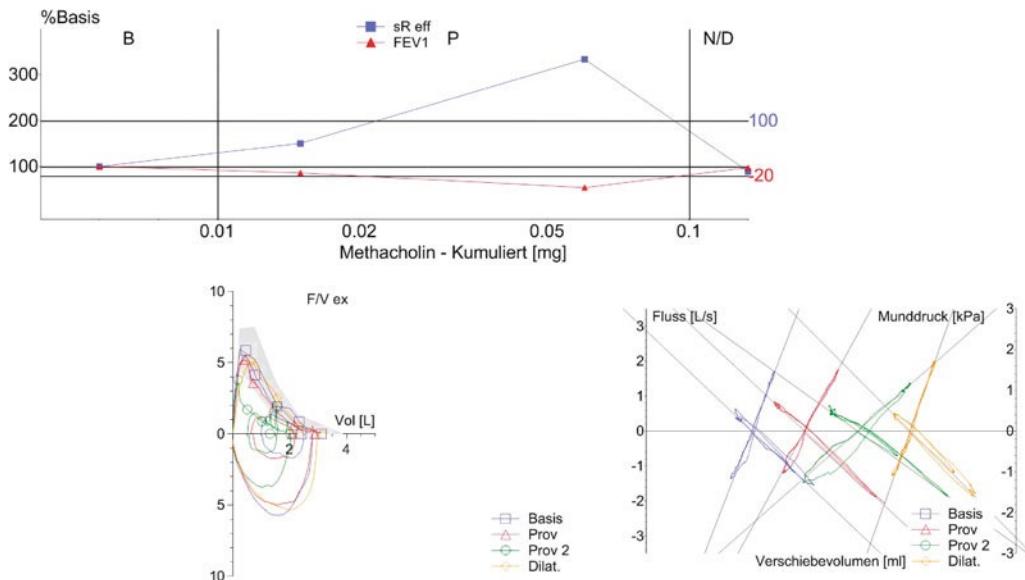
Schweregrad bronchiale Hyperreagibilität	Kumulative MCH-Dosis in mg
Schwer	<0,05
Mittel	0,05–0,2
Leicht	0,2–0,60
Grenzwertig	0,6–0,9
Keine	>0,9

5.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 36

64 Jahre, weiblich, 163 cm, 78 kg, BMI 29 kg/m²

Im folgenden Beispiel ist der Befund einer Patientin dargestellt, die seit Monaten an rezidivierenden asthmatischen Beschwerden leidet.



Substanz	Soll	Basis	Prov	Prov 2	Dilat.
Dosis			0.015	0.045	2.000
Kum. Dosis			0.015	0.060	2.000
Konz [%]	0.0000	16.0000	16.0000	16.0000	0.0000
sR eff [kPa*s]	0.96	1.13	1.69	3.76	1.00
sR eff%Änd/Basis [%]	0.0	50.4	233.3	-11.1	
FEV1 [L]	2.39	2.41	2.07	1.30	2.34
FEV1%Änd/Basis [%]	0.0	-14.1	-45.9	-2.8	
Testzeit	15:41	15:49	15:52	15:57	

	Soll	Basis	% vom Soll
sR eff kPa*s	0.96	1.13	117 %
R eff kPa/(L/s)	0.30	0.27	91 %
FEV 1 L	2.39	2.41	101 %

PD/PC[+100] sR eff Kumuliert: = 0.022 mg

Methacholin

PD/PC[-20] FEV1 Kumuliert: = 0.019 mg

Methacholin

Abb. 5.7 Provokationstest Fallbeispiel 36

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. In der Basismessung normale Resistance und FEV_1 .

Bereits nach der ersten Methacholindosis leichter Anstieg der sR_{eff} und Abfall des FEV_1 . Weitere deutliche Reaktion nach der zweiten Dosis, entsprechend einer Kumulativdosis von ca. 0,02. Das Zielkriterium wird für sR_{eff} und FEV_1 nahezu zeitgleich erreicht. Die Hyperreagibilität kann als schwergradig eingestuft werden.

Nach Gabe von Salbutamol rasche Rückbildung der (mittelgradigen) Obstruktion.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer positiven unspezifischen Provokations- testung mit Nachweis einer schwergradigen Hyperreagibilität, passend zu der vermuteten Diagnose eines Asthma bronchiale.

☞ Wenn eine schwere bronchiale Hyperreagibilität vermutet wird oder der Patient den Test zum ersten Mal durchführt, wird

die Durchführung einer vorherigen Teststufe mit Vernebelung der Trägerlösung bzw. NaCl 0,9 % aus verschiedenen Gründen (Lerneffekt, Sicherheit etc.) empfohlen. Einige Patienten reagieren bereits deutlich auf die Inhalation mit isotoner Kochsalzlösung. Bei einer FEV_1 -Minderung um 10–20 % wird die Teststufe wiederholt. Bei einem Abfall $\geq 20\%$ wird der weitere Test abgebrochen und die Reaktion als schwergradig eingestuft. Dies ist bei ca. 1 % der Provokations- messungen der Fall.



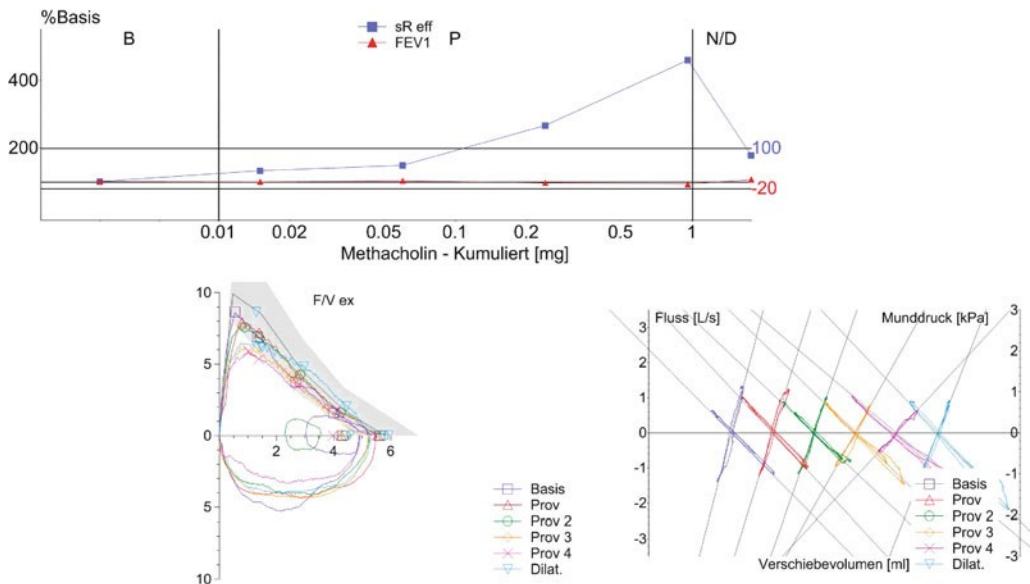
Im Rahmen des Zeitdrucks werden vielerorts die empfohlenen Protokolle weiter gekürzt und 1–3 Stufentests durchgeführt. In den meisten Fällen mag dies praktikabel sein. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass dies zu einer Einbuße in der Quantifizierung der Reaktion und vor allem der Sicherheit geht.

5.4 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 37

36 Jahre, männlich, 184 cm, 95 kg, BMI 28 kg/m²

Die Provokationstestung des letzten Beispiels wurde bei einem Patienten mit Verdacht auf das Vorliegen eines Asthma bronchiale durchgeführt.



Substanz	Soll	Basis	Prov	Prov 2	Prov 3	Prov 4	Dilat.
Dosis		--		Methacholin	Methacholin	Methacholin	
Kum. Dosis			0.015	0.045	0.180	0.720	2.000
Konz [%]	0.0000		0.015	0.060	0.240	0.960	2.000
sR eff [kPa*s]	1.18	0.65	0.86	0.96	1.73	2.99	1.15
sR eff%Änd/Basis [%]	0.0		31.8	48.3	166.6	360.3	77.6
FEV1 [L]	4.66	4.31	4.26	4.41	4.14	3.96	4.56
FEV1%Änd/Basis [%]	0.0		-1.0	2.5	-3.9	-8.1	5.8
Testzeit		15:25	15:41	15:46	15:52	15:58	16:27

	Soll	Basis	% vom Soll
sR eff kPa*s	1.18	0.65	55 %
R eff kPa/(L/s)	0.30	0.16	52 %
FEV 1 L	4.66	4.31	92 %

PD/PC[+100] sR eff Kumuliert: = 0.149 mg

Methacholin

PD/PC[-20] FEV1 Kumuliert: nicht erreicht

Abb. 5.8 Provokationstest Fallbeispiel 37

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. In der Basismessung kein Hinweis auf Obstruktion. Mit steigender Provokationsdosis zunehmender Anstieg der spezifischen Resistance, die bei einer Kumulativdosis von 0,15 mg Methacholin das Zielkriterium erreicht. Die Dosis ist interpoliert und liegt zwischen der 2. und 3. Provokationsstufe. Die FEV₁ fällt im Verlauf nur diskret und erreicht bis zum Ende (4. Provokationsstufe) nicht das Zielkriterium.

In der Dilatationsstufe (nach inhalativer Gabe von Salbutamol 4 × 0,1 mg) nahezu vollständige Rückbildung des sR_{eff}-Anstiegs und Verbesserung des FEV₁ über das Niveau der Basismessung hinaus.

Zusammenfassend Nachweis einer mittelgradigen unspezifischen bronchialen Hyperreagibilität.

Die zusätzliche Durchführung einer Bodyplethysmografie mit Bestimmung der spezifischen Resistance erhöht die Sensitivität von 45 auf 95 % und somit die Sicherheit zum Ausschluss eines Asthma bronchiale bei ausbleibender Reaktion. Andererseits wird die Spezifität durch die zusätzliche Evaluation der sR_{eff} etwas schlechter (sie fällt von 91 auf 82 %), und damit steigt die Gefahr falsch positiver Befunde hinsichtlich des Vorliegens eines Asthma bronchiale.



Im Gegensatz zur FEV₁ wird die sR_{eff} vor allem durch die großen Atemwege (bis zur 8. Generation) und zudem durch die FRC (Erhöhung als indirektes Maß der Obstruktion) determiniert.

Weiterführende Literatur

- Baur X (2011) Bronchiale Provokationsteste. Pneumologie 65:340–346
- Brand PLP et al (1992) Interpretation of bronchodilator response in patients with obstructive airways disease. Thorax 47:429–436
- Buhl R et al (2017) S2k-Leitlinie zur Diagnostik und Therapie von Patienten mit Asthma. Pneumologie 71:849–919
- Crapo RO et al (2000) Guidelines for methacholine and exercise challenge testing – 1999. This official statement of the American Thoracic Society was adopted by the ATS Board of Directors, July 1999. Am J Respir Crit Care Med 161:309–329
- Criée CP et al (2009) Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga zur Ganzkörperbodyplethysmografie (Bodyplethysmografie), Teil 2. Atemw Lungenkrkh 35(8):349–370
- Global Initiative for Asthma (GINA) (2011) Global Strategy for Asthma Management and Prevention. www.ginasthma.org. Zugegriffen: 10. März 2019
- Merget R (2010) Bronchiale Provokation. Atemw Lungenkrkh 36:189–192
- Hegewald MJ et al (2012) Bronchodilator response in patients with normal baseline spirometry. Respir Care 57:1564–1570
- Schneider A et al (2015) Ganzkörperplethysmographen bei Verdacht auf Asthma bronchiale. Dtsch Arztbl Int 112:405–411
- Spector S (2010) Use of mannitol inhalation challenge in assessment of cough. Am J Physiol 188(S1):S99–S103



Diffusionsmessung

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

6.1 Einleitung – 126

6.2 Fallbeispiele – 129

Weiterführende Literatur – 149

6.1 Einleitung

Die Diffusionsmessung ist eine ergänzende Untersuchungsmethode, die wertvolle Informationen liefert und in den letzten Jahren zunehmende Bedeutung fand. Erste Messungen wurden von Marie und August Kroch Anfang des 20. Jahrhunderts durchgeführt. Die heutige modifizierte Form wurde erstmals 1957 von Ogilvie beschrieben.

Die Indikation zur Diffusionsmessung besteht vorrangig in der Erstdiagnose und der Verlaufskontrolle von interstitiellen Lungenerkrankungen und dem Lungenemphysem. Sie wird zudem zur Abklärung einer Dyspnoe, einer obstruktiven Atemwegserkrankung sowie einer restriktiven Ventilationsstörung eingesetzt.

Als Testgas wird Kohlenmonoxid (CO) verwendet, da es ähnliche Diffusionseigenschaften wie O_2 hat, eine sehr starke Affinität zum Hämoglobin aufweist und zudem in der natürlichen Atmosphäre und somit (außer bei Rauchern) auch im Blut praktisch nicht vorkommt.

Der Gastransfer wird jedoch nicht nur durch die Diffusionseigenschaften determiniert. Neben der Membrankomponente (Oberfläche und Dicke), welche die eigentlichen Diffusionseigenschaften der alveolokapillären Membran widerspiegelt und im Folgenden als D_M abgekürzt wird, ist der Gastransfer durch die Blutkomponente bestimmt. Die Blutkomponente bildet sich aus dem Produkt der chemischen Reaktionsrate des CO-Hämoglobins (*) und dem pulmonalen kapillären Blutvolumen (VC) und wird im Weitern als $*V_c$ bezeichnet. Daher handelt es sich bei der sogenannten Diffusionsmessung eigentlich um eine Messung des Gastransfers mit seinen verschiedenen Einzelkomponenten.

Die Einatemzugmethode (oder Single-Breath-Methode) hat sich wegen ihrer guten Praktikabilität gegenüber anderen Methoden weitestgehend durchgesetzt. Hierbei wird ein Gasgemisch aus ca. 0,3 % Kohlenmonoxid, Helium (He) und Luft (d. h. O_2 und N_2) in sitzender Position – bei mit Nasenklammer verschlossener Nase – über ein Mundstück nach vorheriger kompletter Expiration zügig eingeadmet. Während einer Atemhaltezeit

diffundiert es anschließend ins Blut (CO) bzw. verteilt sich in der Lunge (He). Danach atmet der Patient komplett aus, und das ausgeatmete Gasgemisch wird – nach Auswaschen des Totraumvolumens – in seinen Konzentrationen (CO, He) analysiert und rechnerisch mit den Ausgangswerten verglichen. Als inertes Tracergas wird neben He seit einigen Jahren auch zunehmend Methan (CH_4) genutzt, welches in seinem Verteilungsverhalten dem CO etwas mehr ähnelt.

Im Vergleich zu CO (welches bereits eine deutlich höhere Affinität zu Hämoglobin hat als O_2) ist die Reaktionsrate von Stickstoffmonoxid (NO) mit Hämoglobin noch wesentlich größer. Bei ähnlichen Diffusionseigenschaften von NO und CO ist die DL_{NO} somit unabhängig vom Kapillarvolumen und repräsentiert damit fast ausschließlich die Membrankomponente. So mit sind durch die simultane Bestimmung von DL_{NO} und DL_{CO} die Membrankomponente und die Blutbindungskomponente differenziert abschätzbar. Diese Technik wird jedoch bis heute nur selten vorgehalten.

Wichtig sind eine rasche Inspiration des Testgasgemisches (<4 s) sowie eine vollständige Einatmung vom RV-Niveau bis auf das TLC-Niveau. Das V_{in} sollte für eine valide Beurteilbarkeit mindestens 90 % der spirometrisch ermittelten VC_{max} betragen. Die erforderliche Atemhaltezeit liegt bei 10 s (± 2 s) und stellt für ältere oder Patienten mit Luftnot mitunter eine gewisse Herausforderung dar. Für einen ungestörten Gastransfer ist es zudem erforderlich, während der Atemhaltezeit weder In- noch Exspirationsbemühungen gegen die verschlossenen Atemwege auszuüben und möglichst einen atmosphärischen intrapulmonalen Druck zu halten. Leckagen sind ebenfalls zu vermeiden, und die Expiration sollte zügig, aber nicht forciert erfolgen sowie möglichst unter 4 s Dauer bleiben.

Es sollen mindestens 2 Messungen durchgeführt werden, die in der DL_{CO} um nicht mehr als 10 % bzw. $0,67 \text{ mmol} \times \text{min}^{-1} \times \text{kPa}^{-1}$ differieren sollten. Die Diffusionsleistung wird dann als Mittelwert beider Messungen ausgedrückt. Bei wiederholter Messung sollen mindestens

6.1 • Einleitung

■ Tab. 6.1 TL_{CO} -Erhöhung

$\uparrow *V_c$	Polyzythämie, Links-Rechts-Shunt, Lungenhämorrhagie, Asthma, körperliche Anstrengung, Adipositas
-----------------	--

5 min zwischen den Untersuchungen liegen, damit das CO zwischenzeitlich weitestgehend abgeatmet werden kann.

Primäre Messgrößen sind der Krogh-Faktor (K_{CO}) und das Alveolarvolumen (V_A). Der K_{CO} wird auch Transferkoeffizient (TL_{CO}/V_A) oder Diffusionskoeffizient (DL_{CO}/V_A) genannt. Der K_{CO} beschreibt die CO-Aufnahme der Lunge als Konzentrationsabfall pro Zeiteinheit und in Abhängigkeit der alveolokapillären Druckdifferenz des CO. Der Konzentrationsabfall während der ca. 10-sekündigen Atemanhaltezeit wird hierbei auf 1 min hochgerechnet.

Das V_A (TLC abzüglich Totraumvolumen) wird mittels Heliumdilutionsmethode ermittelt. Es wird nicht nur durch die Inspirationstiefe, sondern auch durch die Gasverteilung beeinflusst. Der Transferfaktor TL_{CO} wird häufig auch Diffusionskapazität bzw. DL_{CO} genannt und ist das Produkt aus K_{CO} und V_A . Er beschreibt die Gesamtaufnahme von CO durch die Lunge bei maximalem Lungenvolumen bzw. nach vollständiger Einatmung – also dem TLC-Niveau.

In ■ Tab. 6.1 und 6.2 sind die einzelnen physiologischen und pathophysiologischen Mechanismen der TL_{CO} -Erhöhung bzw. -Erniedrigung aufgelistet.

Bei der Betrachtung von TL_{CO} und TL_{CO}/V_A bzw. K_{CO} ist es wichtig zu verstehen, dass die Beziehung zwischen diesen Werten nicht proportional ist, da der K_{CO} im Gegensatz zur TL_{CO} mit einer V_A -Reduktion exponentiell steigt. Somit lässt sich der TL_{CO} mit dem K_{CO} auch nicht volumenkorrigiert darstellen. Wenn also die TL_{CO} durch eine reine (extraparenchymal begründete) V_A -Minderung eingeschränkt ist, sollte der K_{CO} nicht 100 % vom Soll, sondern deutlich über 100 % vom Soll liegen.

Die Sollwertberechnung ist international uneinheitlich und beruht zum Teil auf sehr alten Daten (EGKS, zuletzt publiziert von

■ Tab. 6.2 TL_{CO} -Erniedrigung

$\downarrow VA, D_M$	Atemmuskelstörung, Thoraxdeformierung
$\downarrow *V_c$	Anämie, Lungenembolie
$\downarrow D_m$ und $*V_c$	Lungenresektion, Emphysem, Lungengerüst-erkrankung, Lungenödem, Vaskulitis, pulmonale Hypertonie

Cotes (1993) für Patienten zwischen 25 und 70 Jahren; ■ Tab. 6.3). 2017 wurden jedoch aus den GLI-Daten Referenzwerte für kaukasische Menschen zwischen 5 und 85 Jahren für TL_{CO} und TL_{CO}/V_A sowie V_A abgeleitet und publiziert. Im Vergleich zu aktuell genutzten Referenzkollektiven lagen die GLI-Sollwerte etwas niedriger. Bis heute wurden die Daten jedoch noch nicht in die gängigen Systeme bzw. in die Klinik implementiert.

Ausgehend von dem Modell des LLN (5. Perzentile) liegt der untere Sollgrenzwert für TL_{CO} bei 75–80 % vom Sollmittelwert (Sollmittelwert abzüglich residueller Standardabweichung von 0,92). Bei uneinheitlichen Referenzgleichungen gibt es bis heute jedoch keine einheitliche Bewertung.

Die verschiedenen Erkrankungen führen zu bestimmten Konstellationen zwischen TL_{CO} , K_{CO} und V_A . Hierbei werden die Werte zum Teil durch verschiedene Störfaktoren beeinflusst. Die typischen Befunde und Stör-einflüsse werden Ihnen exemplarisch in den nachfolgenden Beispielen dargestellt. Die pathophysiologischen Hintergründe werden dabei in den einzelnen Untersuchungen erläutert.

■ Tab. 6.3 DL_{CO} - bzw. TL_{CO} -Sollwertformel. Körperlänge (KL) in Metern, Alter (A) in Jahren. (EGKS; Cotes et al. 1993)

Männer	$(11,11 \times KL) - (0,066 \times A) - 6,03 \pm 2,32$
Frauen	$(8,18 \times KL) - (0,049 \times A) - 2,47 \pm 1,92$

6.2 Fallbeispiele

Fallbeispiel 38

39 Jahre, männlich, 178 cm, 81 kg, BMI 25 kg/m²

Das folgende Beispiel zeigt die Diffusionsmessung eines Patienten, der wegen eines Lymphoms eine potenziell lungentoxische Chemotherapie erhalten soll. Eine vorherige Spirometrie zeigte einen unauffälligen Befund des langjährigen Rauchers.

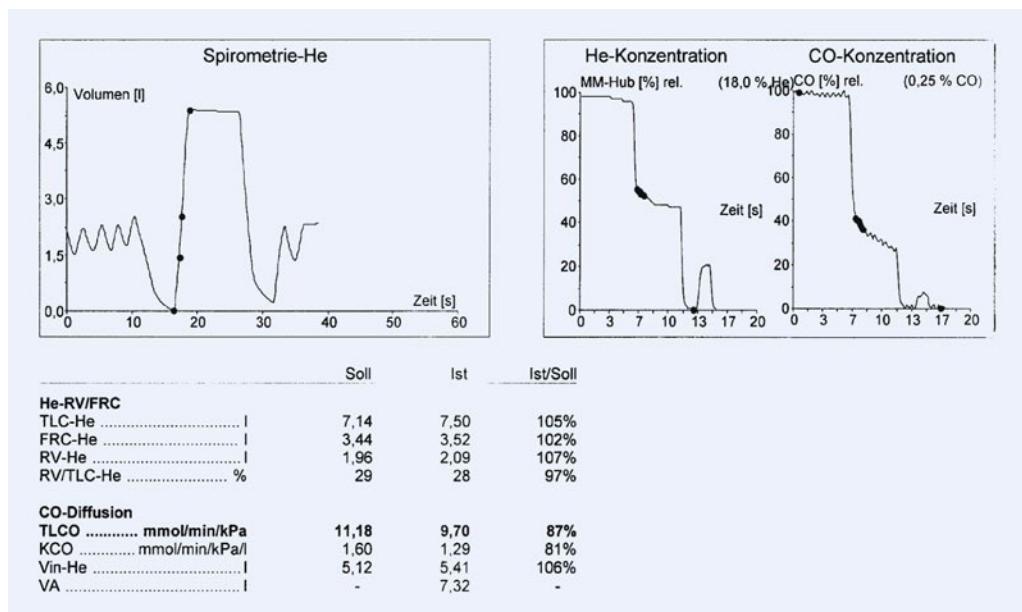


Abb. 6.1 Diffusionstestung Fallbeispiel 38

❓ Kann die Chemotherapie ohne Bedenken begonnen werden?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurvenformen sowie das hohe V_{in} sprechen für eine gute Mitarbeit des Patienten.

Die Heliumdilution zeigt Werte im Normbereich. Hinweise für eine relevante Restriktion oder Überblähung ergeben sich somit nicht.

Der Transferfaktor (TL_{CO}) und der Krogh-Faktor (K_{CO}) zeigen Werte im unteren Normbereich (Tab. 6.4) als mögliches Frühzeichen einer beginnenden parenchymalen Schädigung. Das Alveolarvolumen (V_A) ist normal.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer noch normalen Diffusion bzw. Transferleistung. Die Werte im unteren Normbereich

sind möglicherweise als Zeichen einer beginnenden Parenchymenschädigung bei unauffälliger Ventilationsfunktion zu deuten.

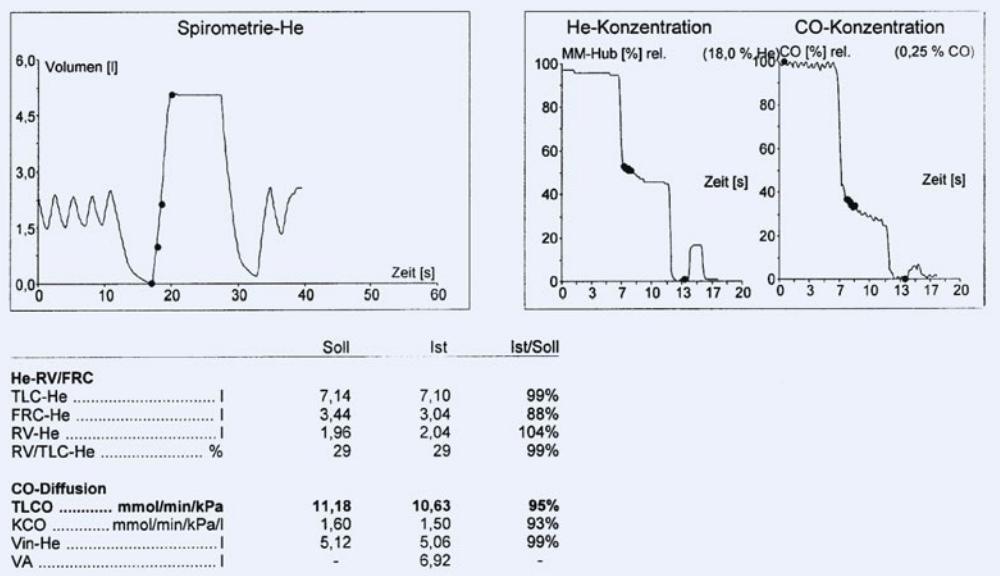
Der Befund wurde unter der Prämisse eines normalen Hämoglobinwertes und einer mehrstündigen Rauchabstinentz bzw. einem normalen CO-Hb erhoben! Auf Nachfrage hatte der Patient jedoch 15 min vor der Untersuchung geraucht. Die Untersuchung wurde wiederholt (Abb. 6.2), und nach einer 4-stündigen Rauchabstinentz zeigte sich ein Normalbefund. Die Chemotherapie kann ohne Bedenken begonnen werden.

6

■ Tab. 6.4 Veränderungen von K_{CO} und V_A bei vergleichbarer DL_{CO} -Verminderung.

DL_{CO}	K_{CO}	V_A	Ätiologie	Anmerkung
↓↓	↓	↓	Interstitielle Lungenerkrankung	Restriktion
↓↓	↓↓	n	Lungenemphysem	Obstruktion/Überblähung
↓↓	↓↓	n	Pulmonale Hypertonie (primär)	Keine Ventilationsstörung
↓↓	↑	↓↓	Muskelschwäche	Restriktion
↓↓	↑	↓↓	Pneumektomie	Restriktion

DL_{CO} Diffusionskapazität, K_{CO} Krogh-Faktor, V_A Alveolarvolumen



■ Abb. 6.2 Diffusionstestung Fallbeispiel 38 – Wiederholung nach 4 h und Rauchabstinentz

Der aktuelle Hämoglobinwert und der aktuelle Raucherstatus bzw. der zeitliche Abstand zur zuletzt gerauchten Zigarette müssen bei jeder Untersuchung vermerkt werden, da sie die Messwerte maßgeblich beeinflussen bzw. verfälschen. In Abhängigkeit von der Menge der gerauchten Zigaretten (Hb_{CO} -Wert) wird eine Abstinenzphase von mindestens 4–6 h empfohlen, um die Messwerte nicht zu verfälschen. Diffusionswerte nach Zigarettenrauchen sind falsch niedrig. Pro Prozentpunkt Hb_{CO} über dem Normwert von 1–2 % fällt der TL_{CO} -Sollwert um ca. 2 %. Bei einem Hb_{CO} von 6 % würde der korrigierte Sollmittelwert um ca. 8 % niedriger liegen, und somit wäre der tatsächliche Messwert in Prozent vom Sollmittelwert entsprechend höher ($4 \times 2 = 8$). In unserem Beispiel liegt der TL_{CO} -Sollmittelwert in der ersten Unter-

suchung bei 11,2. Bei einem angenommenen Hb_{CO} von 6 % (bzw. 4 über Obergrenze von 2 %) wäre der korrigierte Sollmittelwert nicht mehr 11,2, sondern nur noch 10,3 (92 %, da 100 % – 8 %), entsprechend einem relativen Wert von 94 % vom Sollmittelwert (bzw. 9,7 von 10,3). Dies entspricht in etwa dem Wert der 2. Untersuchung nach vermeintlicher Normalisierung des Hb_{CO} .



Als weitere beeinflussende Faktoren wurden Tageszeit, Menstruationszyklus, Alkoholkonsum, stärkere Bronchodilatatormedikation und körperliche Anstrengung (bzw. Herzzeitvolumen) identifiziert. Der Test sollte deshalb möglichst unter standardisierten Bedingungen, z. B. morgens, in Ruhe, nach Medikation, vor der ersten Zigarette und möglichst mindestens 10 min nach Beendigung einer Sauerstoffgabe durchgeführt werden.

6.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 16

63 Jahre, männlich, 191 cm, 93 kg, BMI 25 kg/m²

Die nachfolgende Diffusionsmessung wurde bei einem Patienten mit etwas untypischer asthmatischer Klinik durchgeführt. Vorherige Spirometrie: VC 5,1 l bzw. 97 % vom Soll; FEV1 2,5 l bzw. 65 % vom Soll.

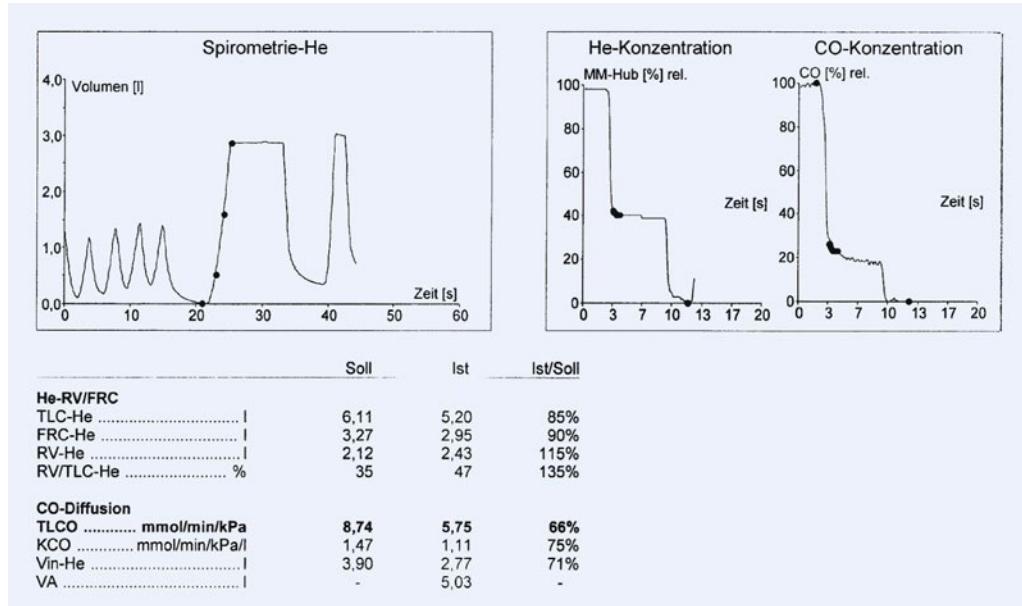


Abb. 6.3 Diffusionstestung Fallbeispiel 39

- ?) Finden sich Hinweise für das Vorliegen einer Parenchymenschädigung, z. B. im Rahmen einer COPD o. Ä.?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurvenformen sowie das V_{in} (hier mit ca. 5 l aus der Volumen-Zeit-Kurve zu lesen und mit der VC der Voruntersuchung zu vergleichen) sprechen für eine ausreichend gute Mitarbeit des Patienten. Die Exspiration nach der Atemanhaltephase wurde etwas frühzeitig abgebrochen (Plateau in der Volumen-Zeit-Kurve etwa von Sekunde 15 bis 23, entsprechend 8 s).

Die Heliumdilution zeigt Werte im Normbereich. Ein Hinweis auf eine relevante Restriktion oder Überblähung liegt nicht vor.

Der Transferfaktor und der Krogh-Faktor zeigen Werte im hochnormalen Bereich. Das Alveolarvolumen ist ebenfalls normal.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer normalen Diffusionsmessung mit Werten im oberen Normbereich, passend zu einem Asthma bronchiale. Es ergibt sich kein Anhalt für eine fortgeschrittene chronisch obstruktive Lungenerkrankung mit Emphysemanteil.

➤ Bei Asthma bronchiale, Adipositas, Polyzithämie, Links-Rechts-Shunt, körperlicher Belastung vor Untersuchung oder Lungenhämmorrhagie zeigen sich in der Regel leicht erhöhte Werte.

In den meisten Fällen kann mittels Diffusionsmessung zwischen einem Asthma (normale oder hochnormale Werte) und einer COPD mit Emphysemanteil und entsprechend erniedrigten Werten unterschieden werden.



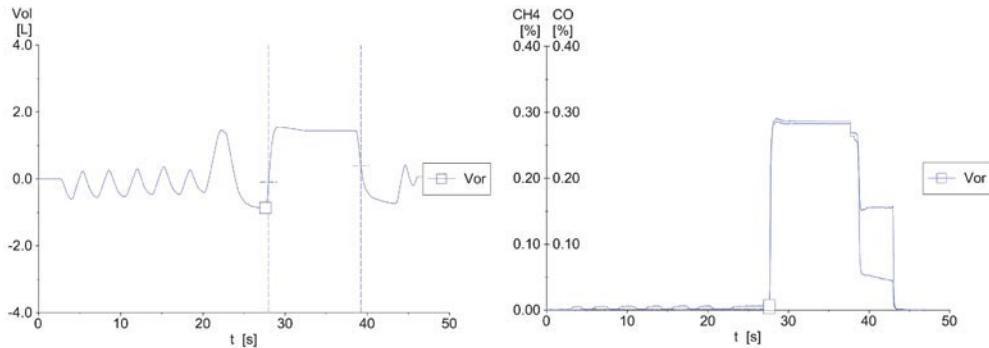
Auch bei der Diffusionsmessung entscheidet die Mitarbeit ganz grundlegend über das Ergebnis der Untersuchung. Es sollten nur Werte interpretiert werden, die den Anforderungen einer möglichst störungsfreien und korrekt durchgeföhrten Messung entsprechen. Sollte eine Wiederholung der Untersuchung durchgeföhrzt bzw. notwendig werden, ist zu beachten, dass hierzu mindestens 5 min (bei obstruktiven Ventilationsstörungen 10 min) gewartet werden muss, bis das CO weitestgehend abgeatmet ist.

6.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 40

39 Jahre, männlich, 186 cm, 95 kg, BMI 27 kg/m²

Die nachfolgende Diffusionsmessung wurde bei dem Patienten mit beidseitiger Zwerchfellparese durchgeführt – Fallbeispiel 21, VC 2,6 l bzw. 45 % vom Soll; FEV1/VC 101 % vom Soll; TLC 5,1 l bzw. 65 % vom Soll.



	Soll	Soll uG	Ist	% vS	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	12.06	9.74	7.97	66.0	●				ECCS (1993)
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.55	1.17	2.10	135.7		●			ECCS (1993)
VA_SB	L	7.63	7.63	3.79	49.6			●		JAEGER (1994)
VIN_SB	L	5.60	4.68	2.42	43.2	●				ECCS (1993)
TA	s			11.2						
TLC_SB	L	7.78	6.63	4.00	51.4	●				ECCS (1993)
FRC_SB	L	3.61	2.63	2.00	55.4	●				ECCS (1993)
RV_SB	L	2.06	1.39	1.58	76.4		●			ECCS (1993)
RV%RV_PL	%			64.9						
Hb	g(Hb)/dL			16.20						
%COHb	%			0.00						
DLCOcSB	mmol/(min*kPa)	12.06	9.74	7.64	63.4	●				ECCS (1993)
KCOc_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.55	1.17	2.02	130.2		●			ECCS (1993)

Abb. 6.4 Diffusionstestung Fallbeispiel 40

Was ist aufgrund der Vorinformationen zu erwarten? Bestätigt sich die Funktionsstörung?

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit (korrekter Untersuchungsablauf, VC_{in} 92 % der VC). Der Transferfaktor (DL_{CO}) ist leichtgradig vermindert und der Transferkoeffizient bzw. Krogh-Faktor (K_{CO}) leichtgradig erhöht. Zudem ist das V_A deutlich vermindert. Diese Konstellation spricht für eine Transferstörung im Rahmen einer starken V_A -Minderung ohne eigentliche Parenchymstörung, also eine rein extraparenchymale Restriktion. Die vorbekannte Restriktion bestätigt sich bei deutlich verminderter TLC_{SB} und FRC_{SB} .

Der Befund ist sehr gut mit der beidseitigen Zwerchfellparese im Rahmen einer neuromuskulären Erkrankung ohne eigentliche Lungenparenchymschädigung vereinbar.

☞ **Die Diffusionsmessung ist eine wichtige Untersuchung zur weiteren Differenzierung einer Restriktion und der Unterscheidung einer parenchymalen von einer extraparenchymalen Ursache (Übersicht Fallbeispiel 7).**

Anhand der Konstellation von V_A , K_{CO} und DL_{CO} lassen sich systematisch einige pathophysiologische Hintergründe beschreiben und somit kann die zugrundeliegende Erkrankung weiter eingegrenzt werden. Zudem kann die Funktionsstörung in gewissem Maße quantitativ eingeschätzt und beschrieben werden.

■ **Tab. 6.5** Schweregradeinteilung der Transferstörung. (In Anlehnung an Pellegrino et al. 2005)

Schweregrad	DL_{CO} (bzw. TL_{CO}) in % vom Soll
Leicht	>60
Mittel	40–60
Schwer	<40



Die Schweregradeinteilung der Transferstörung erfolgt mittels DL_{CO} (■ Tab. 6.5). Eine valide Aussage setzt jedoch eine gute Mitarbeit voraus, d. h. ein korrekt durchgeführtes Manöver und V_{in} von mindestens 90 % der spirometrischen VC_{max} .

Für die Einschränkungen des V_A gibt es derzeit keine allgemein akzeptierten Referenzwerte oder empfohlene Schweregradeinteilung. Das V_A entspricht der TLC abzüglich des Totraumvolumens (ca. 150 ml). Ein Wert >80 % des Sollmittelwertes darf sicher als normal angesehen werden.

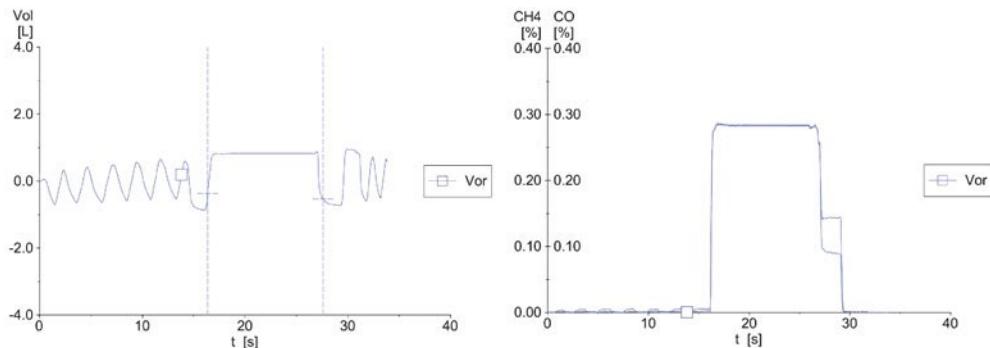
Da der K_{CO} mit fallendem V_A exponentiell steigt, ist eine Beurteilung und Einteilung nur unter Betrachtung der anderen Parameter möglich. Bei rein extraparenchymaler V_A -Verminderung beträgt die DL_{CO} beispielsweise 100 % vom Soll, und der normale K_{CO} liegt dann deutlich über 100 % vom Soll. Ein Krogh-Faktor von 100 % würde bei dieser Konstellation bereits eine Verminderung bedeuten, was für eine zusätzliche parenchymale Konstellation sprechen würde.

6.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 41

69 Jahre, männlich, 170 cm, 90 kg, BMI 31 kg/m²

Dieses Beispiel zeigt die Diffusionsmessung eines Patienten mit progredienter Dyspnoe und etwas trockenem Husten. In der Spirometrie/Bodyplethysmografie Nachweis einer Restriktion, VC 1,7 l bzw. 44 % vom Soll; TLC 2,8 l bzw. 43 % vom Soll.



		Soll	Soll uG	Ist	% vS	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	8.30	5.98	2.37	28.5	●					ECCS (1993)
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.28	0.85	0.89	69.8		●				ECCS (1993)
VA_SB	L	6.35	6.35	2.66	41.8						JAEGER (1994)
VIN_SB	L	3.79	2.87	1.69	44.7	●					ECCS (1993)
TA	s			11.2							
TLC_SB	L	6.50	5.35	2.81	43.2	●					ECCS (1993)
FRC_SB	L	3.51	2.52	1.42	40.3	●					ECCS (1993)
RV_SB	L	2.52	1.84	1.12	44.4	●					ECCS (1993)
RV%RV_PL	%			100.1							
Hb	g(Hb)/dL			18.80							
%COHb	%			0.00							
DLCOcSB	mmol/(min*kPa)	8.30	5.98	2.15	25.9	●					ECCS (1993)
KCOc_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.28	0.85	0.81	63.4	●					ECCS (1993)

Abb. 6.5 Diffusionstestung Fallbeispiel 41

- ?) Versuchen Sie, unter Berücksichtigung der Spirometrie/Bodyplethysmografie einen Befund zu erstellen.

■ Interpretation der Untersuchung

Gute Mitarbeit. Der Transferfaktor ist stark vermindert. Der Krogh-Faktor ist leichtgradig vermindert. Das Alveolarvolumen ist stark vermindert. Eine Polyglobulie (Hb von 18,8 g/dl) spricht für eine chronische Hypoxämie und verfälscht die parenchymale Transferleistung. Die Hb-Korrektur demaskiert die Schwere der Transferstörung weiter (DL_{CO} 26 % vom Soll im Vergleich zu 29 % vom Soll – realer Wert unter Polyglobulie).

Die Messung spricht sowohl für eine eingeschränkte Ausdehnung mit vermindertem V_A als auch für einen schweren Parenchymsschaden im Sinne einer Fibrosierung. Darüber hinaus wäre eine zusätzliche (sekundäre) pulmonale Hypertonie denkbar. Die leichte Adipositas könnte neben der zu vermutenden interstitiellen Lungenerkrankung ebenfalls die Restriktion begünstigen.

Ergänzend sei angemerkt, dass sich im weiteren Verlauf bei dem Patienten ursächlich eine

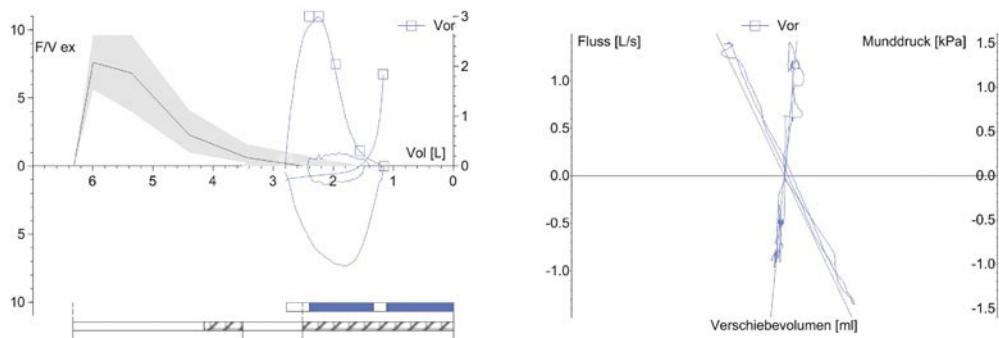
interstitielle Lungenerkrankung zeigte. Die vorausgehende Spirometrie/Bodyplethysmografie ist in □ Abb. 6.6 gezeigt.

► **Die Minderung des Transferfaktors (DL_{CO}) ist ein globaler Ausdruck der Transferstörung mit all den Einzelkomponenten. Die ergänzende Betrachtung der Konstellation von K_{CO} und V_A gibt wichtige Hinweise auf die Ätiologie (□ Tab. 6.5).**



Einschränkungen sind nicht selten multifaktoriell bzw. komplex, die Befunde daher nicht immer eindeutig und möglichst unter Berücksichtigung weiterer Informationen (Voruntersuchungen, ergänzende Funktionstests, Klinik, Bildgebung etc.) zu interpretieren. In unserem Beispiel kamen ILD („interstitial lung disease“), Adipositas und pulmonale Hypertonie zusammen. Zudem war eine Polyglobulie zu berücksichtigen.

6.2 • Fallbeispiele



		Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	3.82	2.84	1.67	43.7	●							Quanjer GLI (2012)
FVC	L	3.82	2.84	1.62	42.5	●							Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	2.92	2.11	1.54	52.9	●							Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	74.79	63.00	94.97	127.0								ECCS (1993)
PEF	L/s	7.62	5.63	11.01	144.5					●			ECCS (1993)
FEF 25	L/s	6.81	4.00	11.01	161.6					●			ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.27	0.99	7.50	329.6					●			Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.61	0.22	1.12	183.9					●			Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	«	12.3								ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.08	25.8								ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	0.55	46.7								ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.29	98.2								ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	»	813.2								ECCS (1983)
TLC	L	6.50	5.35	2.78	42.8	●							ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.51	2.52	1.34	38.0	●							ECCS (1993)
ERV	L	0.99	0.99	0.22	21.9								ECCS calculated (1993)
RV	L	2.52	1.84	1.12	44.4	●							ECCS (1993)
IC	L	2.79	2.79	1.45	51.9								ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	40.87	31.89	40.12	98.2					●			ECCS (1993)

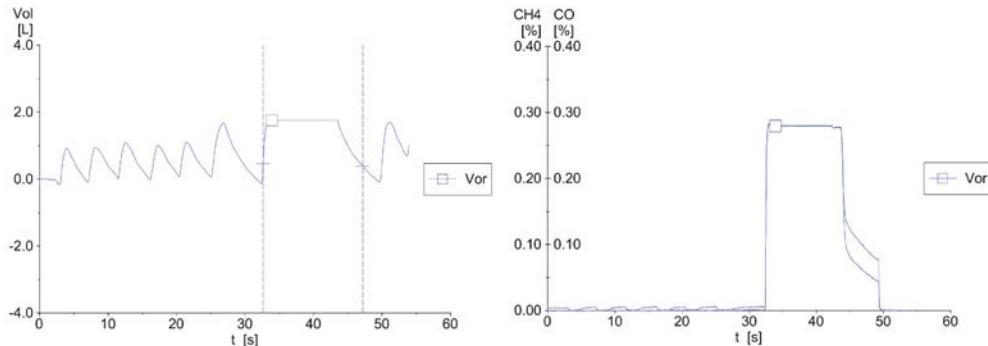
Abb. 6.6 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 41

6.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 42

42 Jahre, männlich, 181 cm, 65 kg, BMI 20 kg/m²

Nachstehend wird die Untersuchung eines jungen Patienten mit schwergradiger COPD gezeigt. Der Patient hat einen nachgewiesenen (mittlerweile substituierten) Alpha-1-Antitrypsinmangel und ist seit einem halben Jahr Nichtraucher. Sein Hb-Wert liegt aktuell bei 15,8 g/dl.



		Soll	Soll uG	Ist	% vS	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	11.31	8.99	3.48	30.7	●					ECCS (1993)
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.53	1.14	0.77	50.2	●					ECCS (1993)
VA_SB	L	7.23	7.23	4.52	62.5						JAEGER (1994)
VIN_SB	L	5.21	4.29	1.90	36.4	●					ECCS (1993)
TA	s			14.5							
TLC_SB	L	7.38	6.23	4.66	63.1	●					ECCS (1993)
FRC_SB	L	3.52	2.54	2.93	83.3		●				ECCS (1993)
RV_SB	L	2.07	1.39	2.76	133.8			●			ECCS (1993)
RV%RV_PL	%			«							
Hb	g(Hb)/dL			15.80							
%COHb	%			0.00							
DLCOcSB	mmol/(min*kPa)	11.31	8.99	3.37	29.8	●					ECCS (1993)
KCOc_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.53	1.14	0.75	48.7	●					ECCS (1993)

Abb. 6.7 Diffusionstest Fallbeispiel 42

Wie bewerten Sie die Untersuchung des Patienten?

■ Interpretation der Untersuchung

Der Kurvenverlauf/Untersuchungsablauf ist re-gelrecht. Die niedrige V_{in} entspricht zu 100 % der VC aus der Spirometrie (Abb. 6.8). Somit hat der Patient gut mitgearbeitet.

Der TL_{CO} ist schwer, der K_{CO} mittelgradig vermindert, während das V_A nur leicht vermin-dert ist. Die Hb-korrigierten Werte weichen nur geringfügig ab. Die Transferparameter entspre-chen einem ausgeprägten Parenchymenschaden bei Emphysem.

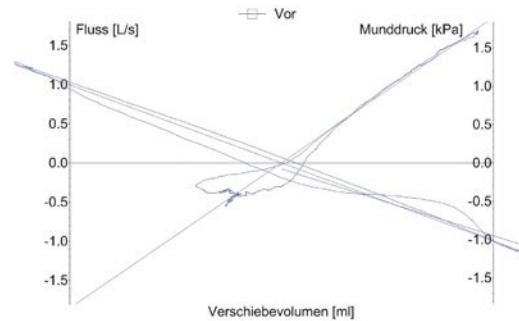
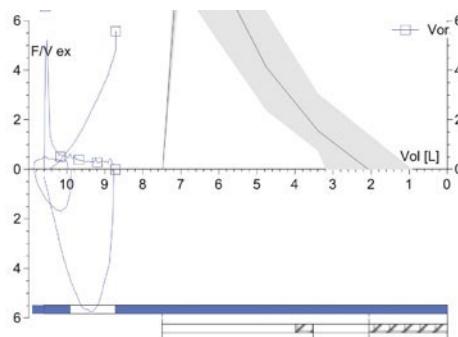
Die Minderung des V_A sowie der anderen Volumenparameter (CH_4 -Dilution) korrelieren nicht mit denen der Bodyplethysmografie (Abb. 6.8).

Die fortgeschrittene Parenchymenschädi-gung und die Obstruktion haben eine inho-mogene Ventilation sowie Verteilungsstörung

zur Folge. Das CH_4 kann nicht frei an- und ab-fluten und führt so zu verminderten Volumen-werten. Der Quotient aus RV der Diffusion (SB) zu RV der Plethysmografie (PL) ist Aus-druck dieser Verteilungsstörung. Der $RV\% / RV_{PL}$ ist mit 32 deutlich vermindert („<<“ bei Werten <50).

Die Abb. 6.8 zeigt die Spirometrie/Body-plethysmografie des Patienten unmittelbar vor Diffusionsmessung. Es wird eine ausgeprägte Obstruktion und Überblähung deutlich.

► **Die Diffusionsmessung ist eine sensitive Methode, um die strukturellen, parenchymalen Schädigungen bei einer COPD (Emphysemannteil) im Verlauf zu erfassen. Die Diffusionsmessung korreliert auch mit der Gesamtprognose.**



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	5.43	4.31	1.88	34.6	●	●	●	●	●	●	Quanjer GLI (2012)
FVC	L	5.43	4.31	1.88	34.6	●	●	●	●	●	●	Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	4.33	3.43	0.75	17.3	●	●	●	●	●	●	Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	79.65	67.86	39.91	50.1	●	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
PEF	L/s	9.46	7.47	6.58	69.6	●	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
FEF 25	L/s	8.19	5.38	0.50	6.1	●	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
FEF 50	L/s	4.13	2.38	0.39	9.3	●	●	●	●	●	●	Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	1.55	0.74	0.28	18.0	●	●	●	●	●	●	Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	4.78	406.0	●	●	●	●	●	●	ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.46	153.0	●	●	●	●	●	●	ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	6.08	516.8	●	●	●	●	●	●	ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.58	194.8	●	●	●	●	●	●	ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	0.21	24.6	●	●	●	●	●	●	ECCS (1983)
TLC	L	7.38	6.23	10.61	143.7	●	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.52	2.54	9.91	281.3	●	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
ERV	L	1.46	1.46	1.18	81.2	●	●	●	●	●	●	ECCS calculated (1993)
RV	L	2.07	1.39	8.73	422.6	●	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
IC	L	3.76	3.76	0.69	18.5	●	●	●	●	●	●	ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	30.34	21.36	82.29	271.2	●	●	●	●	●	●	ECCS (1993)

Abb. 6.8 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 42

6.2 • Fallbeispiele

Andererseits gehen Atemflussbehinderungen mit einer inhomogenen Ventilation und somit einer gewissen Transportstörung der Testgase einher. Das V_A ist darum bei Patienten mit COPD und einem Air Trapping bei der kurzen Atemanhaltezeit häufig deutlich niedriger als die bodyplethysmografisch ermittelte TLC, da es u. a. zu einer unvollständigen Mischung mit dem RV kommt. Dies kann den TL_{CO} und den K_{CO} verfälschen, zumal die schlecht ventilierten Anteile häufig parenchymal stärker betroffen sind.



Eine im Vergleich zur bodyplethysmografisch ermittelten FRC erniedrigte FRC-He bzw. -CH₄ deutet mitunter auch auf das Vorhandensein von thorakalen Gaseinschlüssen (z. B. Bullae) hin. Mit der FRC wird das gesamte Volumen, mit der FRC-He bzw. -CH₄ nur das tatsächlich ventilierte Volumen erfasst.

6.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 43

67 Jahre, weiblich, 168 cm, 89 kg, BMI 32 kg/m²

Dieses Beispiel zeigt die Untersuchung einer Patientin mit Lungenvolumina im unteren Normbereich (VC 82 % vom Soll und TLC 92 % v S) bei leichter Adipositas. Zudem ist eine schwere pulmonale Hypertonie bekannt. Der aktuelle Hb betrug 9,2 g/dl, die letzte Zigarette hatte die Patientin 3 h zuvor geraucht, bei einem Konsum von ca. 10 Zigaretten täglich.

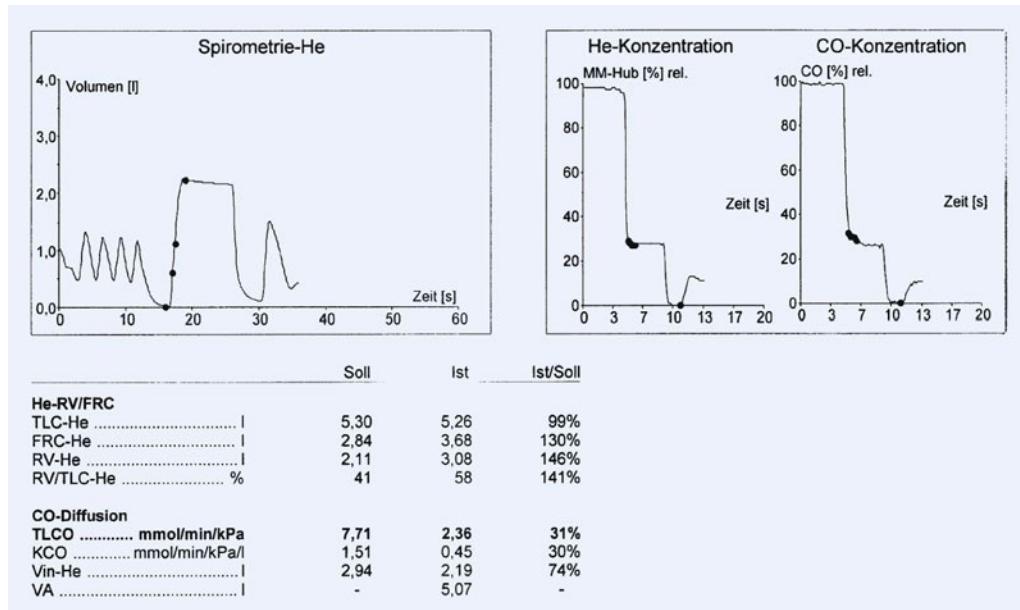


Abb. 6.9 Diffusionstestung Fallbeispiel 43

Wie beurteilen Sie die Transferleistung, und welche Rolle spielt die Anämie?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Mitarbeit kann als gut bewertet werden. Der Transferfaktor und der Transferkoeffizient sind schwergradig erniedrigt. Bei verminderter Hb ergibt sich ein korrigierter TL_{CO} -Sollwert von 6,49 bzw. ein Ist/Soll von 36 % (zuvor 31 % vom Soll). Das V_A ist normal.

Der Zigarettenraucheneinfluss ist bei vergleichsweise geringem Gesamtkonsum in diesem Fall – nach 3 h Abstinenz – vernachlässigbar.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer schwergradigen Transferstörung bei schwerer pulmonaler Hypertonie. Das Beispiel zeigt die typische Konstellation bei pulmonalen vaskulären Erkrankungen. Während die V_A normal ist, sind K_{CO} und TL_{CO} in etwa gleichem Maße eingeschränkt.

Da die Spirometrie/Bodyplethysmografie normal ist, scheidet ein schweres Emphysem als Differenzialdiagnose bei dieser Konstellation aus und es bleibt eine pulmonalvaskuläre Ursache, die hier durch die Anämie weiter verstärkt wird.

➤ **Die Hämoglobinbindung ist ein wichtiger Faktor für den CO-Transfer (s. oben). Bei**

erniedrigtem Hb muss daher der Referenz-Transferfaktor korrigiert werden. Die Korrekturformel (Tab. 6.6) ergibt den korrigierten Sollwert des Transferfaktors für den jeweiligen Hb-Wert. Für die Referenz wird normalerweise ein Hb von 14,6 g/dl (Männer) bzw. 13,4 g/dl (Frauen) vorausgesetzt.



Da die Transferleistung auch vom alveolären O_2 -Partialdruck (P_{AO_2}) abhängig ist, sollte eine supraleitere O_2 -Gabe möglichst mindestens 10 min vor der Untersuchung pausiert werden.

Die TL_{CO} fällt um ca. 0,35 % pro 1 mmHg P_{AO_2} -Erhöhung bzw. steigt entsprechend bei P_{AO_2} -Verminde rung (zu beachten z. B. bei Messung in Regionen 1000–2000 m über dem Meeresspiegel).

Gegebenenfalls kann mithilfe der nachfolgenden Formel der Einfluss näherungsweise korrigiert werden:

TL_{CO} Soll (korrig.)

$$= \frac{TL_{CO} \text{ Soll}}{1 + 0,0035 \times (P_{AO_2} - 100)}$$

Dabei gilt:

$$P_{AO_2} = F_i O_2 \times (PB - 47)$$

■ **Tab. 6.6** Korrigierter Referenz-Transferfaktor bzw. Diffusionskapazität (TL_{CO} bzw. DL_{CO})

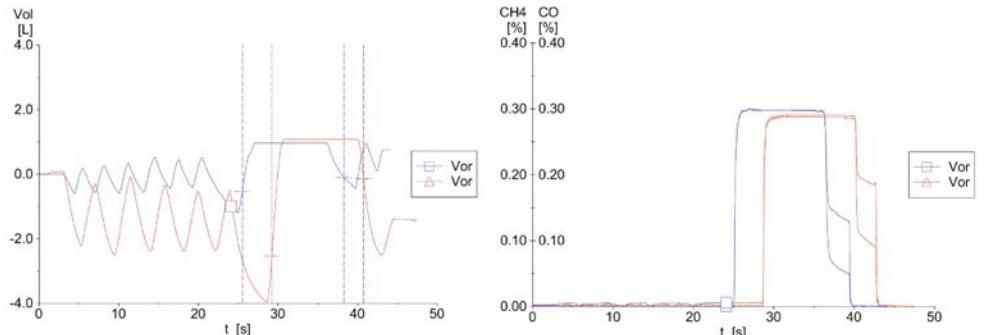
Männer und männliche Jugendliche >15 Jahre	TL_{CO} Soll (korrig.) = TL_{CO} Soll $\times \frac{1,7 \times Hb}{10,22 + Hb}$
Frauen, weibliche Jugendliche und Kinder <15 Jahre (w/m)	TL_{CO} Soll (korrig.) = TL_{CO} Soll $\times \frac{1,7 \times Hb}{9,38 + Hb}$
Hb in g/dl	

6.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 44

27 Jahre, männlich, 173 cm, 67 kg, BMI 22 kg/m²

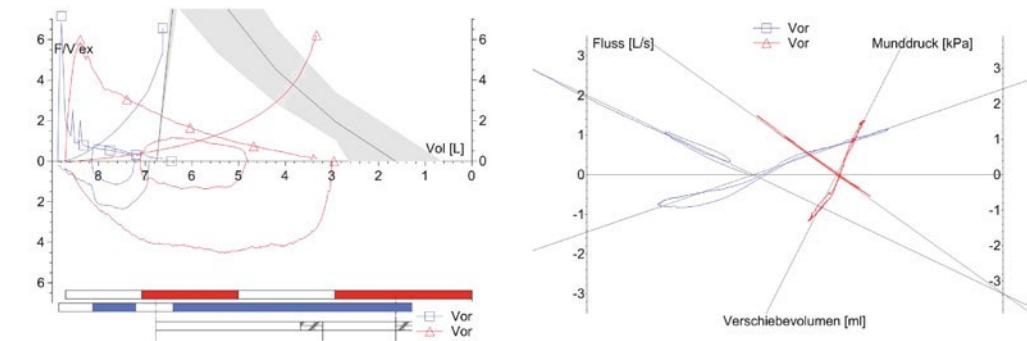
Das letzte Beispiel dieses Kapitels zeigt die Diffusionsmessung eines Patienten mit schwer exazerbiertem Asthma bronchiale am Tag der Aufnahme (Ist 1) und in der Kontrolle 4 Tage später (Ist 2). Ergänzend wird die Spirometrie/Bodyplethysmografie gezeigt.



		Soll	Soll uG	Ist 1	% vS	Ist 2	% vS	% 2 zu 1	-3 Z-Score - Ist 2	-3 Z-Score - Ist 2
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	11.41	9.09	6.37	55.8	8.05	70.6	26.4	●	●
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.69	1.24	1.61	95.3	1.15	68.2	-28.5	●	●
VA_SB	L	6.59	6.59	3.95	59.9	6.98	105.8	76.7	●	●
VIN_SB	L	5.15	4.23	2.17	42.1	5.04	98.0	132.6	●	●
TA	s			12.7		11.5		-9.4		
TLC_SB	L	6.74	5.59	4.10	60.7	7.12	105.6	74.0	●	●
FRC_SB	L	3.20	2.21	2.65	82.6	3.65	114.0	38.0	●	●
RV_SB	L	1.63	0.96	1.93	118.2	2.08	127.6	8.0	●	●
RV%RV_PL	%			«		70.9		135.7		
Hb	g(Hb)/dL			17.40		17.30		-0.6		
%COHb	%			0.00		0.00				
DLCoSB	mmol/(min*kPa)	11.41	9.09	5.95	52.1	7.53	66.0	26.7	●	●
KCoSB	mmol/(min*kPa*L)	1.69	1.24	1.51	89.0	1.08	63.8	-28.3	●	●

Abb. 6.10 Diffusionstestung Fallbeispiel 44

- ?) Befunden Sie die erste Untersuchung und bewerten Sie die Funktionsstörung im Verlauf vor dem Hintergrund des bekannten Asthma bronchiale. Beachten Sie zudem die ergänzende Spirometrie/Bodyplethysmografie, die jeweils am gleichen Tag durchgeführt wurde (Abb. 6.11).



	Soll	LLN	Ist 1	% vS	-3 -2	Z-Score	2 3	Ist 2	% vS	-3 -2	Z-Score	2 3	% 2 zu 1
VC MAX	L	5.15	4.16	2.45	47.6			5.77	112.1				135.3
FVC	L	5.15	4.16	2.45	47.6			5.77	112.1				135.3
FEV 1	L	4.30	3.44	0.97	22.5	●		3.25	75.6	●			236.1
FEV 1 % FVC	%	82.35	70.56	39.38	47.8	●		56.25	68.3	●			42.8
PEF	L/s	9.61	7.62	7.15	74.4	●		5.98	62.2	●			-16.4
FEF 25	L/s	8.19	5.38	0.78	9.5	●		3.04	37.1	●			289.9
FEF 50	L/s	4.50	2.84	0.53	11.8	●		1.63	36.2	●			206.8
FEF 75	L/s	1.93	1.03	0.31	15.9	●		0.72	37.5	●			135.6
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	10.12	859.9			1.50	127.7				-85.2
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	1.32	439.5			0.25	82.8				-81.2
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	10.83	920.9			1.75	148.5				-83.9
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	1.41	470.8			0.29	96.3				-79.5
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	0.10	11.6			0.67	78.3				573.4
TLC	L	6.74	5.59	8.86	131.4	●		8.71	129.2	●			-1.7
FRCpleth	L	3.20	2.21	7.21	225.3	●		5.01	156.5	●			-30.5
ERV	L	1.57	1.57	0.80	51.1			2.07	132.0				158.2
RV	L	1.63	0.96	6.41	393.1	●		2.94	180.2	●			-54.2
IC	L	3.58	3.58	1.65	46.1			3.70	103.4				124.2
RV % TLC	%	24.49	15.51	72.32	295.3	●		33.72	137.7	●			-53.4

Abb. 6.11 Spirometrie/Bodyplethysmografie Fallbeispiel 44

■ Interpretation der Untersuchung

Ausreichend gute Mitarbeit. Die V_{in} liegt jeweils knapp unterhalb der 90 % der VC.

In der ersten Untersuchung ist der TL_{CO} ist mittelgradig vermindert, während der K_{CO} im Normbereich ist bei deutlich verminderter V_A . Die Volumenwerte der CH_4 -Dilution sind allesamt deutlich vermindert und korrelieren nicht mit den stark erhöhten Werten der Bodyplethysmografie.

Der Index $RV \%RV_PL$ bringt dies mit einem Wert von 30 % (, << bei Werten <50) zum Ausdruck – s. auch Fallbeispiel 42.

Diese Konstellation spricht für das Vorliegen einer schweren Verteilungsstörung und nicht für eine Transferstörung im eigentlichen Sinne. Der Verlauf bestätigt dies. Mit abnehmender Obstruktion und Überblähung steigen

die Volumenwerte, und der $RV \%RV_PL$ steigt um 136 % auf einen Wert von 71 %.

Während der TL_{CO} sich ebenfalls bessert und nur noch leichtgradig vermindert ist, fällt der K_{CO} aufgrund des gestiegenen V_A .

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer schweren Verteilungsstörung, die sich mit Abnahme einer schweren Obstruktion und Überblähung im Verlauf bessert. Ergänzend sei erwähnt, dass eine Kontrolluntersuchung 4 Wochen später einen völlig normalen Befund der Diffusion sowie Spirometrie/Bodyplethysmografie zeigte.

► **Eine Verteilungsstörung kann Ursache für eine Verminderung des Transferfaktors sein und sollte differenzialdiagnostisch von den eigentlichen Ursachen**

einer Transferstörung abgegrenzt werden.

Der Quotient „RV %RV_PL“ (Anteil von RV-He bzw. CH₄ im Verhältnis zu RV-Bodyplethysmografie in Prozent) wurde als Interpretationshilfe in der Differenzierung vorgeschlagen. Bei verminderter TL_{CO} spricht ein Quotient von >0,8 bzw. 80 % für eine Transferstörung im eigentlichen Sinne, während ein Index <0,5 (50 %) ein sicherer Hinweis auf das Vorliegen einer Verteilungsstörung ist. Fließende Übergänge mit kombinierter Transfer- und Verteilungsstörung sind jedoch nicht selten. Hier hilft die Berücksichtigung des Ausmaßes der TL_{CO}-Einschränkung in Korrelation zur Verminderung des RV %RV_PL bei der Abschätzung der Zuordnung. Während eine TL_{CO} von 50 % vom Soll bei einem RV %RV_PL von 0,3 für eine reine Verteilungsstörung spricht, deutet eine TL_{CO} von 30 % vom Soll bei einem RV %RV_PL von 0,5 auf eine kombinierte Pathogenese hin.



Limitationen des Atemflusses sowie ein erhöhtes Closing Volume führen zu einer regionalen Hypoventilation der Lunge mit gewissem Mismatch zur Perfusion. Die Verteilungsstörung führt in der Diffusionsmessung zu einer gestörten Ausbreitung des Tracer-gases (He bzw. CH₄) sowie des CO mit einer entsprechenden Verminderung des gemessenen V_A und der Diffusionskapazität (DL_{CO} bzw. TL_{CO}). Diese Verteilungsstörung ist nicht mit den Einschränkungen der Transferleistung im eigentlichen Sinne zu verwechseln. Erschwerend kommt bei inhomogener Belüftung hinzu, dass das Ausbreitungsverhalten der verschiedenen Testgase etwas unterschiedlich ist und so zusätzliche Verzerrungen der Verhältnisse auftreten können. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse bedacht werden.

Weiterführende Literatur

Verwendete Literatur

Cotes JE et al (1993) Standardization of the measurement of transfer factor (diffusing capacity). Eur Respir J 6:41–52

Pellegrino R, Viegi G, Brusasco V et al (2005) Interpretative strategies for lung function tests. Series „ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing“. Eur Resp J 26:948–968. <https://doi.org/10.1183/09031936.05.00035205>

Weiterführende Literatur

Artemann F et al (2009) Die Diffusionskapazität in der täglichen Praxis. Atemw Lungenkrkh 35:10–17

Bösch D (2010) Diffusionstestung – sensitivs Element der Lungenfunktionsprüfung. Atemw Lungenkrkh 36:257–259

Garcia-Rio F et al (2012) Prediction equations for single-breath diffusing capacity in subjects aged 65 to 85 years. Chest 142:175–184

Graham BL et al (2017) 2017 ERS/ATS standards for single-breath carbon monoxide uptake in the lung. Eur Respir J 49:pii 1600016

Guazzi M (2003) Alveolar-capillary membrane dysfunction in heart failure: evidence of a pathophysiologic role. Chest 124:1090–1102

Hughes JMB, van der Lee I (2013) The TL,NO/TLC ratio in pulmonary function test interpretation. Eur Respir J 41:453–461

Hughes JMB, Pride NB (2012) Examination of the DLCO in relation to its KCO und VA components. Am J Respir Crit Care Med 186:132–139

Johnson DC (2000) Importance of adjusting carbon monoxide diffusing capacity (DLCO) and carbon monoxide transfer coefficient (KCO) for alveolar volume. Respir Med 94:28–37

MacIntyre N et al (2005) Series ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing: Standardsituation of the singlebreath determination of carbon monoxide uptake in the lung. Eur Respir J 26:720–735

Stanojevic S et al (2017) Official ERS technical standards: Global Lung Function Initiative reference values for the carbon monoxide transfer factor for Caucasians. Eur Respir J 50:pii 1700010



Mundverschlussdruckmessung

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

7.1 Einleitung – 152

7.2 Fallbeispiele – 155

Weiterführende Literatur – 162

7.1 Einleitung

Die Ventilation der Lunge wird durch die Kraft der Atempumpe ausgeübt, die sich aus Atemzentrum, Nerven, Atemmuskulatur und dem knöchernen Thorax zusammensetzt. Mittels Mundverschlussdruckmessungen lassen sich die maximale Atemmuskulatkraft sowie die aktuelle Beanspruchung ermitteln. Wie die Skelettmuskulatur auch, ist die Inspirationsmuskulatur bei Überbeanspruchung ermüdbar, und es kann zu einem myogenen Pumpversagen kommen. Andererseits kann die Kapazität aufgrund verschiedener Ursachen auch primär vermindert sein (muskuläre/neuromuskuläre Schwäche), ohne dass eine Lungenerkrankung vorliegt.

Die Bestimmung der Atemmuskulatkraft erfolgt über die Messung des Druckes am Mund bei verschlossenem Atemventil unter verschiedenen Atemmanövern. Zur Messung der aktuellen Last der Atemmuskulatur wird der Mundverschlussdruck ($P_{0,1}$) 0,1 s während spontaner Ruheatmung nach Inspirationsbeginn an einem für 100 ms verschlossenen Ventil ermittelt. Der gemessene Druck ist proportional zum Inspirationsdruck bzw. Pleuradruck. Neben der Last ist der $P_{0,1}$ auch ein Parameter für den zentralen Atemantrieb. Der Verschluss ist mit 100 ms so kurz, dass die weitere Ruheatmung nicht beeinflusst wird. Es wird ein Median aus mindestens 5 Messungen ermittelt. Um den Patienten nicht zu stimulieren, seine Atmung bewusst zu beeinflussen, sollten die Verschlüsse unregelmäßig über einen Zeitraum von ca. 90 s gesetzt werden. Modernere Messprogramme machen dies automatisch.

Die maximale Inspirationskraft (MIP oder auch PI_{max}) wird bei forciertem Inspirationsmanöver nach vorheriger Exspiration auf Residualvolumenniveau gegen ein für 2 s verschlossenes Ventil gemessen. Einige Messprogramme haben eine flexible Verschlussdauer zwischen 1 und 5 s und öffnen nach Erreichen eines Peaks.

Die Bestimmung des maximalen Inspirationsdrucks 0,1 s nach Inspirationsbeginn

($P_{0,1max}$) ist bei geringer Reproduzierbarkeit und höheren Standardabweichungen von untergeordneter Relevanz und wird daher nur selten durchgeführt.

Die Durchführung der Messungen erfordert insgesamt etwas Erfahrung. Für die $P_{0,1}$ -Messung werden mehrere Manöver mit dem Patienten durchgeführt, um über die Medianwertbildung valide Ergebnisse zu erhalten. Bei der PI_{max} -Messung wird der Maximalwert aus mehreren Versuchen ausgewählt. Bei relativ stabilen intraindividuellen Ergebnissen ist die Methode gut zur Verlaufsbeurteilung, aber bei größeren interindividuellen Abweichungen (insbesondere bei Patienten über 60 Jahren) nur bedingt zur Bestimmung allgemeiner Schweregrade geeignet.

Mit der Mundverschlussdruckmessung lassen sich Einschränkungen der maximalen Inspirationskraft (Kapazität) sowie eine erhöhte Last der Inspirationsmuskulatur erkennen. Die Belastung oder auch Beanspruchung der Atempumpe ist Ausdruck der Last im Verhältnis zur Kapazität. Ursächlich für Einschränkungen sind sowohl chronische als auch akute Erkrankungen mit verminderter maximaler Inspirationskraft bzw. Überbeanspruchung der Inspirationsmuskulatur durch eine erhöhte Last (► Tab. 7.1). Die nachfolgenden Befunde zeigen exemplarische Beispiele der typischen Einschränkungen.

■ Tab. 7.1 Ätiologie der Atemmuskelerschöpfung

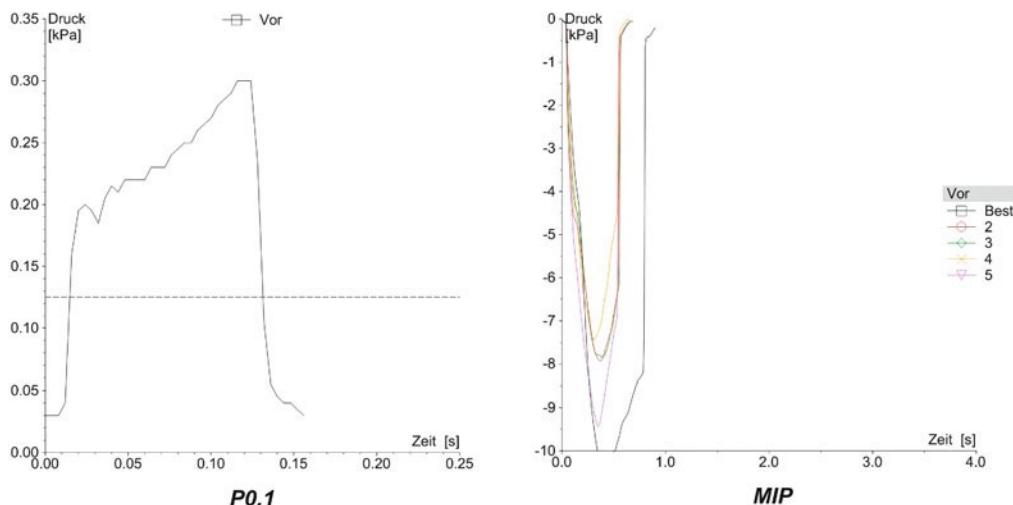
Erhöhung der Last	Verminderung der Kapazität (Muskel schwäche)
Erkrankungen mit obstruktiver Ventilationsstörung: z. B. Asthma bronchiale, COPD, Trachealstenose, Stimmbandparese, Tubusatmung	Erkrankungen mit muskulärer Funktionseinschränkung: z. B. Muskeldystrophien, Myopathien, Kollagenosen, Sarkoidose, Polymyositis, Dermatomyositis, Hyper-/Hypothyreose, Myopathie bei Elektrolytstörungen, Steroid- und Alkoholmyopathie, M. Addison
Erkrankungen mit restriktiver Ventilationsstörung: z. B. Pneumonie, Lungengerüsterkrankungen, ARDS, pulmonale Stauung, Adipositas	Erkrankungen mit neuraler Funktionseinschränkung: z. B. amyotrophe Lateralsklerose, spinale Muskeldystrophie, Poliomyelitis, Post-Polio-Syndrom, multiple Sklerose, Guillain-Barré-Syndrom
Erkrankungen mit Übertragungsstörungen von Kraft in Inspirationsdruck: z. B. Lungenüberblähung, Thoraxdeformitäten, Rippenserienfraktur	Erkrankungen mit neuromuskulärer Funktionseinschränkung: z. B. Myasthenia gravis

7.2 Fallbeispiele

Fallbeispiel 24

46 Jahre, männlich, 189 cm, 96 kg, BMI 27 kg/m²

Das Beispiel zeigt die Untersuchung eines Asthmapatienten bei aktueller Beschwerdefreiheit.



	Soll	Soll uG	Soll oG	Best	% vS	1	2	3	4	5	Author
VT_P0.1 L	0.69	0.69	0.69	0.71	103	0.71					JAEGER (1994)
BF_P0.1 1/min	20	20	20	19	96	19					JAEGER (1994)
P0.1 kPa	0.13	0.03	0.30	0.10	76	0.10					JAEGER (1994)
MIP kPa	9.41	4.47	14.34	10.05	107	10.05	6.89	6.80	4.94	7.25	Karvonen (1994)
P0.1/MIP	0.03	0.03	0.03	0.01	37						JAEGER (1994)

Abb. 7.1 Mundverschlussdruckmessung Fallbeispiel 45

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven deuten auf eine regelrechte Durchführung und gute Mitarbeit hin.

Die Atemfrequenz (BF) ist normal, das Tidalvolumen (VT) physiologisch. Der $P_{0,1}$ liegt im unteren Normbereich, entsprechend einer normalen Last der Atempumpe.

Die PI_{max} -Manöver zeigen inhomogene Spitzenwerte zwischen -5 und -10 kPa. Der maximale inspiratorische Druck (MIP bzw. PI_{max}) liegt etwas oberhalb des Sollmittelwertes. Die Kapazität der Atempumpe ist somit unbeeinträchtigt.

Daraus ergibt sich eine normale Beanspruchung der Atempumpe ($P_{0,1}/PI_{max}$) von $0,01$ bzw. 1% (unterer Normbereich).

Zusammenfassend ergibt sich ein unauffälliger Befund mit normaler Last, normaler Kapazität und somit auch normaler Beanspruchung der Atempumpe.

☞ **Insbesondere bei schwankenden $P_{0,1}$ -Messwerten wird eine ausreichende Anzahl an Wiederholungen (mindestens 5) erforderlich, um über eine Medianwertbestimmung valide Ergebnisse zu erhalten. Der Sollmittelwert liegt zwischen $0,1$ und $0,2$ kPa. Werte $<0,3$ kPa werden bei Frauen und Männern nicht als pathologisch gewertet.**

■ **Tab. 7.2** Maximaler statischer Inspirationsdruck (MIP bzw. PI_{max})

MIP bzw. PI_{max} (16–60 Jahre)	Frauen	Männer
Mittelwert	8,5	11,5
Unterer Grenzwert	4,0	5,5
Ausschluss relevanter Muskelschwäche	>7,0	>8,0

Werte jeweils in kPa



Der höchste PI_{max} wird häufig erst im 4.–6. Versuch erreicht, daher sollten mindestens 5–7 Versuche durchgeführt werden. Zwischen den Versuchen sollten mindestens 15 s Pause eingehalten werden, und die besten 2 Messungen sollten weniger als 10 % voneinander differieren. Zudem ist auf einen steilen Kurvenanstieg zu achten. Ein Wert von 7 kPa bei Frauen und von 8 kPa bei Männern gilt als unterer Grenzwert, oberhalb dessen eine relevante Muskelschwäche ausgeschlossen ist.

Aufgrund hoher interindividueller Abweichungen des PI_{max} ist die Bewertung der PI_{max} -Messwerte nicht unproblematisch. Die ■ Tab. 7.2 gibt einen Anhalt für die Beurteilung. Als intra-individueller Verlaufsparameter ist der Wert gut geeignet. Bei älteren Patienten werden aufgrund einer sehr hohen Standardabweichung keine Empfehlungen gegeben. Am ehesten ist dies auf die suboptimale Durchführung und weniger auf die eigentliche Leistung zurückzuführen.

7.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 46

40 Jahre, weiblich, 160 cm, 66 kg, BMI 26 kg/m²

Das nachfolgende Beispiel zeigt die Untersuchung einer Patientin mit langjähriger Anamnese einer Myasthenia gravis und rezidivierender schwerer Belastungsdyspnoe. Bei Beginn der Untersuchung ist die Patientin beschwerdefrei.

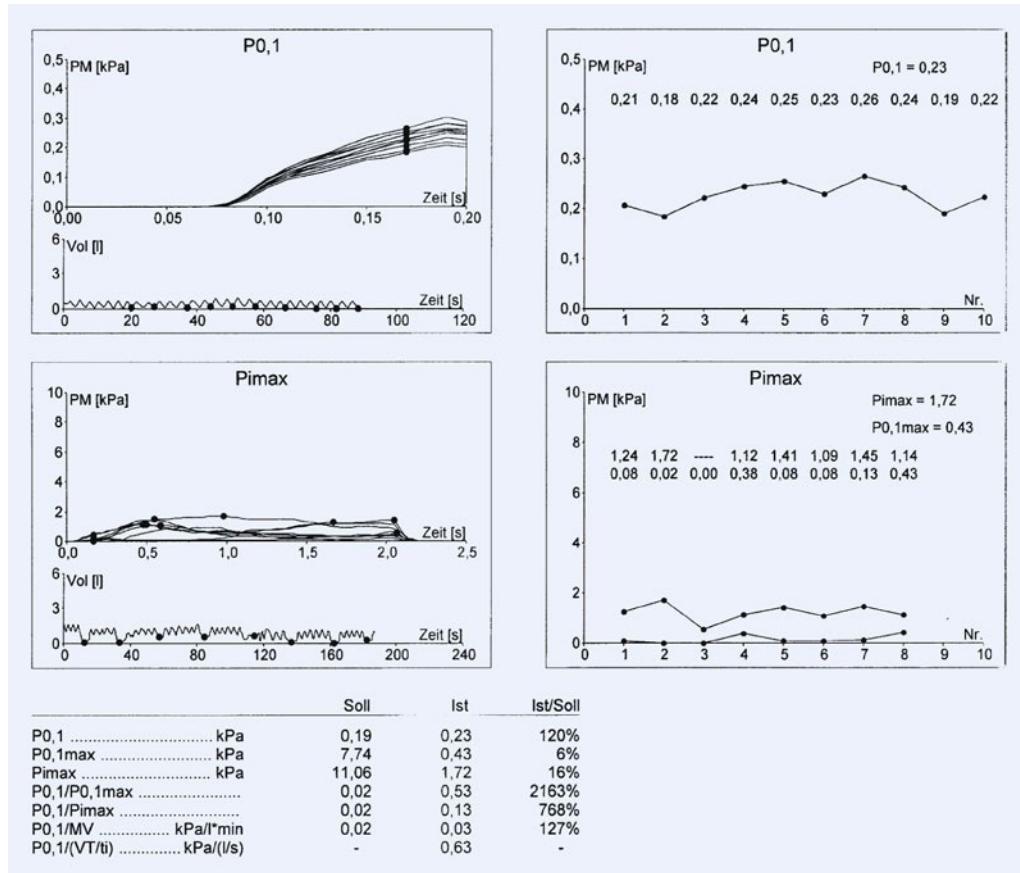


Abb. 7.2 Mundverschlussdruckmessung Fallbeispiel 46

?

Lässt sich bei der Patientin eine Störung der Atempumpe nachweisen?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven deuten auf eine gute Mitarbeit hin. Rechts sind die einzelnen Versuche mit den jeweiligen Werten im Punktdiagramm dargestellt, links dazu die Kurvenverläufe der Messungen.

Die Messung der $P_{0,1}$ -Werte zeigt homogene Werte im oberen Normbereich.

Der PI_{max} -Wert ist mit 1,72 kPa (16 % vom Soll) stark erniedrigt. Bei flachem Anstieg der maximalen Inspirationskraft wird der Peak (um den Zeitpunkt von 0,5 s) recht früh erreicht. Dies liegt aber nur an der deutlich eingeschränkten Höhe des Maximalwertes. Der maximale Sog fällt jeweils schnell ab und kann nicht länger als 2 s gehalten werden.

Das Verhältnis $P_{0,1}/PI_{max}$ ist mit 13 % (768 % des Solls) deutlich erhöht und zeigt die gesteigerte Beanspruchung der Atemmuskulatur unter Ruheatmung an, was auf eine schwere Einschränkung der Reserve hindeutet.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer normalen Last, jedoch einer schwergradig eingeschränkten Kapazität mit entsprechend mittelgradig erhöhter Beanspruchung der

Atempumpe im Rahmen der bekannten neuromuskulären Grunderkrankung.

➤ **Die Belastung der Atempumpe wird insbesondere durch das Verhältnis $P_{0,1}$ zu PI_{max} angezeigt. Der obere Grenzwert liegt bei 4,5 %. Quotienten oberhalb des Grenzwertes sprechen sicher für eine erhöhte Beanspruchung der Atemmuskulatur. Die Erschöpfungsgrenze der Inspirationsmuskulatur liegt bei einem $P_{0,1}/PI_{max}$ von etwa 20–25 %. □ Tab. 7.3 zeigt eine praktikable Einteilung der Beanspruchung bzw. Belastung der Atempumpe.**

□ **Tab. 7.3 Beurteilung der Beanspruchung ($P_{0,1}/PI_{max}$)**

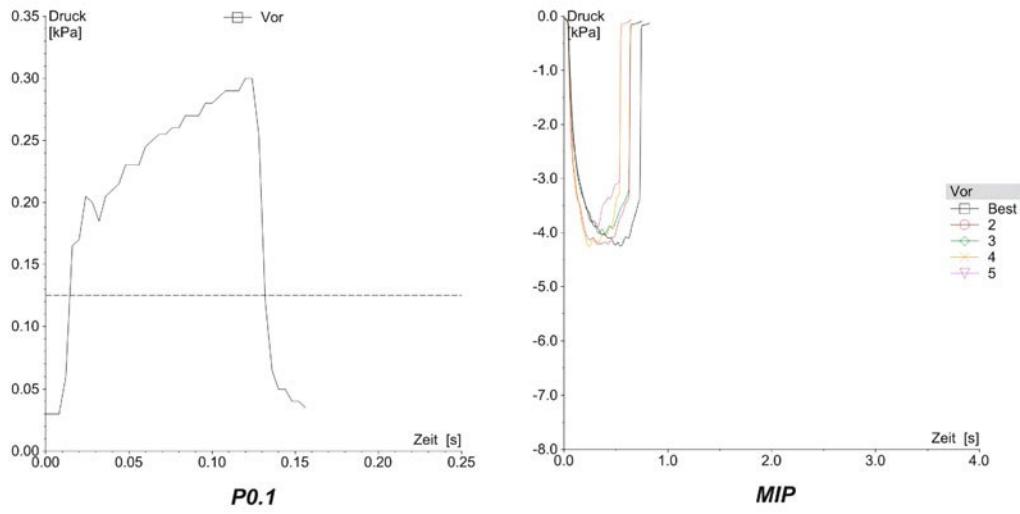
Leichtgradig	4,5–10 %
Mittelgradig	10–20 %
Hochgradig	>20 %

7.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 47

39 Jahre, männlich, 186 cm, 95 kg, BMI 27 kg/m²

Die nachfolgende Mundverschlussdruckmessung wurde bei dem Patienten mit beidseitiger Zwerchfellparese durchgeführt – Patient aus Fallbeispiel 21 bzw. 40.



	Soll	Soll uG	Soll oG	Best	% vS	1	2	3	4	5	Author
VT_P0.1 L	0.68	0.68	0.68	0.73	107	0.73					JAEGER (1994)
BF_P0.1 1/min	20	20	20	22	110	22					JAEGER (1994)
P0.1 kPa	0.13	0.03	0.30	0.12	97	0.12					JAEGER (1994)
MIP kPa	9.81	4.97	14.65	4.25	43	4.25	3.96	3.76	3.38	3.10	Karvonen (1994)
P0.1/MIP	0.03	0.03	0.03	0.03	114	0.03					JAEGER (1994)

Abb. 7.3 Mundverschlussdruckmessung Fallbeispiel 47

❓ Passt der Befund zu der zu erwartenden Störung?

■ Interpretation der Untersuchung

Die Kurven deuten auf eine gute Mitarbeit hin. Die Messung von $P_{0,1}$ spricht für eine normale Last der Atempumpe unter Ruheatmung.

Während das Tidalvolumen (VT) normal ist, liegt eine leichte Tachypnoe vor (AF 22/min). Dies kann bereits auf eine Insuffizienz hindeuten.

Der MIP (PI_{max}) ist mit 4,3 kPa (43 % vom Soll) deutlich erniedrigt. Der maximale Sog kann zudem nur kurz gehalten werden.

Bei normaler Last ist die Beanspruchung der Atempumpe – trotz stark eingeschränkter Kapazität – unter Ruhebedingungen mit 0,03 bzw. 3 % noch normal.

Dies korreliert mit der klinischen Einschränkung in Form einer leichten Belastungsdyspnoe bei mittel- bis schwergradiger körperlicher Beanspruchung.

☞ **Der maximale inspiratorische Mundverschlussdruck (PI_{max} bzw. MIP) nimmt physiologischerweise mit dem Alter leicht ab (ca. 20 % Verlust zwischen 20 und 75 Jahren). Zudem liegen die Werte**

bei Frauen ca. 30 % niedriger als bei Männern. Uneinheitliche Referenzgleichungen führen zu eingeschränkter Vergleichbarkeit zwischen den Patienten und Schwierigkeiten bei einer allgemein gültigen Quantifizierung.



Die Beteiligung der Atemmuskulatur bei neuromuskulären Erkrankungen führt regelmäßig zu einer Husteninsuffizienz. Dies kann anhand des maximalen exspiratorischen Mundverschlussdrucks (PE_{max}) untersucht werden. Normale Werte für PE_{max} liegen in etwa doppelt so hoch wie die Werte von PI_{max} . Ein effektiver Hustenstoß ist bei einem PE_{max} von unter 4 kPa nicht mehr möglich. Vereinfacht kann dies auch mit einem in der Asthmadiagnostik üblichen Peak-Flow-Meter untersucht werden. Hustenspitzenflüsse (Peak Cough Flow, PCF) sollten möglichst unter Verwendung einer Nasenklemme ermittelt werden. Werte über 400 l/min werden bei Erwachsenen als normal gewertet. Ein PCF von <270 l/min gilt als sicher pathologisch. Für einen effektiven Hustenstoß werden mindestens 200 l/min benötigt.

7.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 48

42 Jahre, männlich, 181 cm, 65 kg, BMI 20 kg/m²

Im letzten Beispiel dieses Kapitels ist die Untersuchung eines Patienten mit schwergradiger stabiler COPD gezeigt – es ist der Patient aus Fallbeispiel 42.

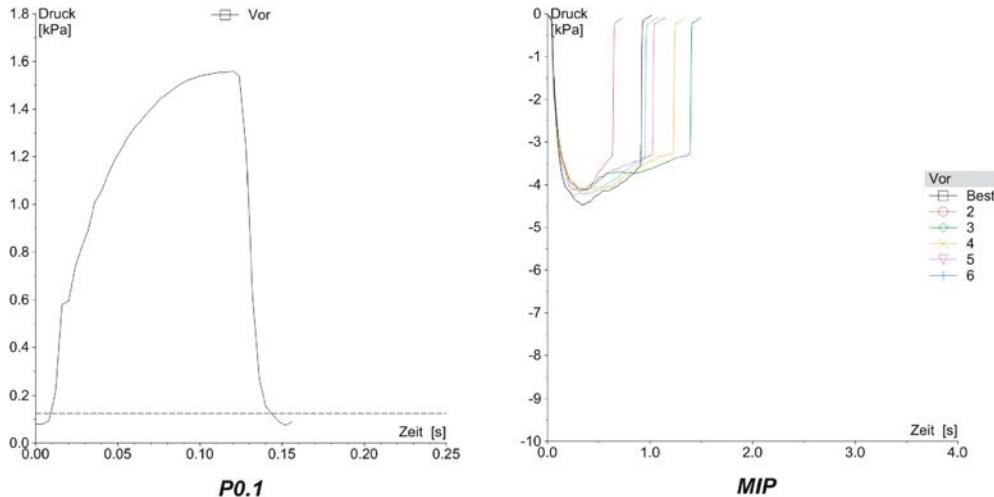


Abb. 7.4 Mundverschlussdruckmessung Fallbeispiel 48

■ Interpretation der Untersuchung

Den Kurven lässt sich eine gute Durchführung bzw. Mitarbeit entnehmen.

VT und BF sprechen für eine relativ ruhige und tiefe Atmung (obstruktives Muster).

Der mediane $P_{0,1}$ -Wert zeigt einen deutlich erhöhten Wert als Zeichen einer stark erhöhten Last.

Die PI_{max} -Werte liegen eng beieinander. Der beste Wert ist deutlich vermindert und zeigt die eingeschränkte Kapazität der Atempumpe.

Das Verhältnis $P_{0,1}/PI_{max}$ ist mit 0,2 bzw. 20 % hochgradig erhöht – ein Maß für die schwere Beanspruchung der Atemmuskulatur. Ab 20 % ist die Atempumpe kritisch beansprucht im Sinne einer drohenden Erschöpfung.

Zusammenfassend ergibt sich der Befund einer deutlich erhöhten Last sowie einer eingeschränkten Kapazität mit konsekutiver hochgradiger Beanspruchung der Atempumpe.

Es sei angemerkt, dass der Patient seit Monaten eine O_2 -Langzeittherapie (LTOT) sowie eine intermittierende nichtinvasive Selbstbeatmung (NIV) durchführte. In der Blutgasanalyse fand sich korrelierend zu den anzunehmenden Einschränkungen zum Untersuchungszeitpunkt ein pCO_2 von 46 mmHg, entsprechend einer beginnenden Hyperkapnie.

 **Bei Interpretation der Maximaldrücke muss das Lungenvolumen als Index der Länge der Inspirationsmuskulatur eben-**

falls berücksichtigt werden. Bei Patienten mit Lungenüberblähung werden auch ohne das Vorliegen einer eigentlichen Kontraktilitätsstörung geringere Inspirationsdrücke erreicht. Je höher das Lungenvolumen bei Bestimmung PI_{max} ist, desto kürzer ist die Inspirationsmuskulatur und umso geringer ist der maximale Inspirationsdruck.



Neben einer pathophysiologischen Überblähung der Lunge führt auch die unvollständige Exspiration auf RV-Niveau vor Einleiten des PI_{max} -Manövers zu falsch niedrigen Werten des maximalen Inspirationsdrucks. Die korrekte Durchführung ist entsprechend wichtig. Eine unvollständige Entleerung vor Inspiration kann im isolierten Untersuchungsprotokoll im Nachhinein nicht erkannt werden und zu Fehlinterpretationen führen.

Weiterführende Literatur

-
- American Thoracic Society/European Respiratory Society. (Hrsg) (2002) ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing. Am J Respir Crit Care Med 166: 518–624
- Criée CP et al (2006) Lungenfunktion: Spirometrie, Atemmuskelfunktion; Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga. Dustri, München
- Kabitz HJ (2009) Diagnostik der Atemmuskelfunktion. Atemw Lungenkrkh 35:276–281
- Kafitz HJ et al (2014) Messung der Atemmuskelfunktion, 2. Aufl. Dustri, München



Peak-Flow-Messung

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

8.1 Einleitung – 164

8.2 Fallbeispiele – 165

Weiterführende Literatur – 172

8.1 Einleitung

Die Peak-Flow-Messung ist eine einfache Methode, um eine Atemflussbehinderung der vornehmlich großen Atemwege zu untersuchen. Hierbei können die Patienten den Verlauf ihrer obstruktiven Atemwegserkrankung selbstständig kontrollieren. Typischerweise werden die Patienten angeleitet, die Messung 2- bis 3-mal täglich durchzuführen und zu protokollieren. Anhand der Tagesschwankung (PEF-Variabilität) der Werte sowie der sich ergebenden Trends können Rückschlüsse sowohl auf den Schweregrad und den Verlauf der Erkrankung als auch auf das Ansprechen einer Therapie gezogen werden. Manchmal lässt sich auch eine drohende Exazerbation noch vor der klinischen Manifestation an fallenden Werten erkennen. Mittels Ampelschema bzw. zuvor definierten Schwellenwerten können Notfallmedikamenteneinnahmen mit dem Patienten vereinbart werden und die Therapiesteuerung für den Patienten nachvollziehbar dargestellt werden. Es sei jedoch angemerkt, dass die einfache Peak-Flow-Messung nicht die Spirometrie oder andere Lungenfunktionsprüfungen ersetzen kann. In den letzten Jahren hat der Stellenwert in der Primärdiagnostik des Asthma bronchiale, auch bei breiter Verfügbarkeit der unspezifischen bronchialen Provokation, deutlich abgenommen. Die Diagnose eines Asthma bronchiale sollte hierzulande heute nicht mehr ausschließlich durch die Anwendung der PEF-Messung gestellt werden.

Problematisch ist die Mitarbeitsabhängigkeit bzw. -anfälligkeit der Werte. Die Methode ist daher nur für den intraindividuellen Vergleich geeignet und bedarf vor Beginn der sorgfältigen Anleitung des Patienten, der die Messungen in standardisierter Form mit 2 Wiederholungen durchführt, um dann den jeweils besten Wert zu notieren. Das Tragen einer Nasenklemme ist nicht erforderlich. Der Patient

sollte die Messung stets in gleicher Position, am besten im Sitzen in gestreckter Haltung, durchführen.

Es gibt unterschiedliche Modelle von mechanisch arbeitenden Handgeräten bis zu modernen Geräten, die auf elektronischer Basis arbeiten und zusätzlich z. B. die Einsekundenkapazität und die Vitalkapazität messen und die Werte von mehreren Wochen speichern können.

2004 wurde für den europäischen Raum ein neuer Standard (EN 13826) definiert, der sich sowohl hinsichtlich der Skaleneinteilung als auch der messtechnischen Anforderungen von uneinheitlichen vorherigen Modellen unterscheidet. Insbesondere bei Patienten mit relevanter Atemflussbehinderung konnte der PEF mittels der älteren Geräte oft nicht korrekt erfasst und wiedergegeben werden. Daher sollten heute nur noch Geräte genutzt werden, die der neuen EU-Norm entsprechen.

Ergebnisse guter Geräte sind dabei mit denen einer herkömmlichen Spirometrie durchaus vergleichbar. Häufig werden die PEF-Ergebnisse der Spirometrie in l/s und die der PEF-Handgeräte in l/min angegeben. Der Wert unterscheidet sich (eine vergleichbare Qualität vorausgesetzt) lediglich hinsichtlich seiner Einheit, wobei $l/s \times 60 = l/min$. Der Vergleich mit spirometrisch gewonnenen Daten sollte jedoch, wie oben dargestellt, unter Vorbehalt erfolgen.

Das einfache Peak-Flow-Meter kann zudem auch in der orientierenden Diagnostik der Hustenstärke eingesetzt werden. Unter Verwendung der Nasenklemme hustet der Patient hierzu in das Peak-Flow-Meter, um den sogenannten Hustenspitzenfluss (Peak Cough Flow, PCF) zu ermitteln. Es wird ein Bestwert aus mindestens 2 Versuchen ermittelt. Ein PCF von <270 l/min gilt als sicher pathologisch. Für einen effektiven Hustenstoß werden mindestens 200 l/min benötigt.

Im Folgenden sind einige Beispiele zur Peak-Flow-Messung dargestellt.

8.2 Fallbeispiele

Fallbeispiel 49

45 Jahre, männlich, 178 cm, 65 kg, 20 kg/m²

Das folgende Beispiel zeigt das PEF-Protokoll eines Patienten, der mit mittelgradig persistierendem Asthma vorstellte und einen ausgeprägten Bronchodilatatorabusus betrieb. Die Aufzeichnung beginnt 2 Tage nach Beginn einer inhalativen Kortikoidmedikation. Mit dem Patienten wurde vereinbart, dass er einen Hub Salbutamol bei Unterschreiten von 400 l/min inhalieren soll.

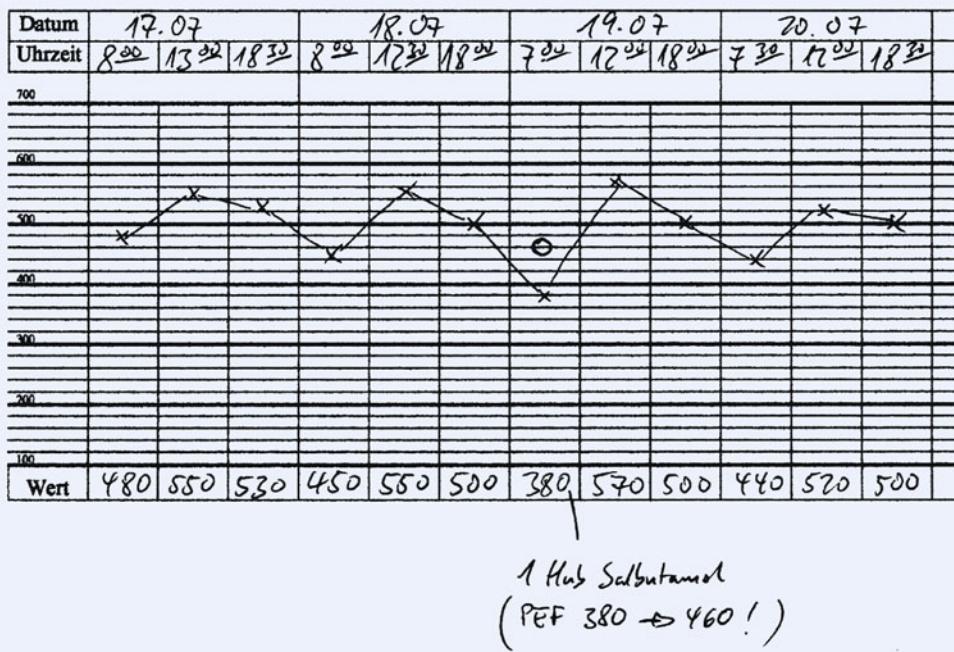


Abb. 8.1 Peak-Flow-Protokoll Fallbeispiel 49

■ Interpretation des Protokolls

Das Protokoll spricht für eine sorgfältige Durchführung der Messungen. Die PEF-Variabilität beträgt 33 % (Bestwert 570, geringster morgendlicher Wert 380). Am Morgen des 19.07. unterschreitet der Patient den vereinbarten Schwellenwert und inhaliert einen Hub Salbutamol, woraufhin sich der PEF auf 460 verbessert.

Zusammenfassend zeigt das Protokoll eine typische zirkadiane Variabilität (>30 %) mit morgendlichen Tiefstwerten („morning dip“), passend zu einem Asthma bronchiale. Die Compliance konnte verbessert werden. Das Salbutamol wurde in 4 Tagen einmal angewendet

– im Vergleich zu ca. 10-mal täglich vor Beginn des Protokolls.

➤ **Die zirkadiane PEF-Variabilität mit typischerweise morgendlichen Tiefstwerten ist ein klassisches Zeichen eines Asthma bronchiale. Die Stärke der Variabilität geht dabei mit dem Schweregrad des Asthmas einher. Eine Variabilität >10 % spricht bereits für ein Asthma. Ein Wert >20 % ist sicher pathologisch.**



Die Berechnung der PEF-Variabilität erfolgt über folgende Formel:

$$\text{PEF-Variabilität} = \frac{(\text{PEF-Tageshöchstwert} - \text{PEF-Tagestiefstwert})}{\text{PEF-Tageshöchstwert}} \times 100$$

8.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 50

31 Jahre, männlich, 189 cm, 88 kg, BMI 25 kg/m²

Im nachstehenden Protokoll sind die Werte eines Patienten mit teilkontrolliertem Asthma bronchiale dargestellt. Die Daten wurden über ein elektronisches Gerät erfasst und über eine Computersoftware ausgedruckt.

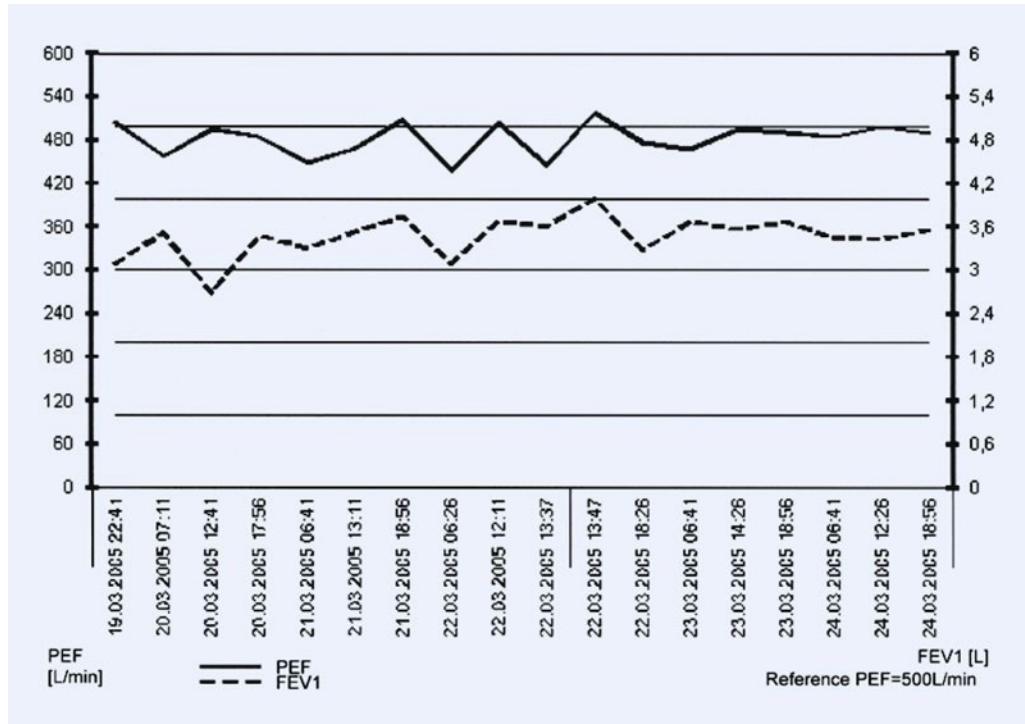


Abb. 8.2 Peak-Flow-Protokoll (Grafik) Fallbeispiel 50

Abb. 8.3 Peak-Flow-Protokoll
(Wertetabelle) Fallbeispiel 50

Date Time	PEF	FEV ₁	PEF/Ref %
19.03.2005 22:41:23	504	3,10	100,8%
20.03.2005 07:11:23	458	3,52	91,6%
20.03.2005 12:41:23	496	2,68	99,2%
20.03.2005 17:56:00	485	3,48	97,0%
21.03.2005 06:41:23	449	3,31	89,8%
21.03.2005 13:11:23	469	3,53	93,8%
21.03.2005 18:56:23	509	3,75	101,8%
22.03.2005 06:26:00	438	3,10	87,6%
22.03.2005 12:11:23	504	3,68	100,8%
22.03.2005 13:37:00	445	3,61	89,0%
Luftnot nach Fahrradfahren			
22.03.2005 13:47:00	519	4,00	103,8%
nach 1 Hub Salbutamol			
22.03.2005 18:26:00	477	3,28	95,4%
Beginn inhal. Cortison 0-0-1			
23.03.2005 06:41:23	468	3,68	93,6%
23.03.2005 14:26:23	496	3,57	99,2%
23.03.2005 18:56:23	491	3,67	98,2%
24.03.2005 06:41:23	485	3,45	97,0%
24.03.2005 12:26:23	499	3,43	99,8%
24.03.2005 18:56:00	490	3,56	98,0%

■ Interpretation des Protokolls

Das Protokoll zeigt die Werte über fünffeinhalb Tage. Die PEF-Variabilität der ersten 3 Tage beträgt durchschnittlich 11 %, die der nachfolgenden 2 Tage 4 %. Am 22.03. wird um 13:37 Uhr eine Messung bei belastungsinduzierter Atemnot durchgeführt. Der Wert von 445 l/min steigt durch Inhalation von Salbutamol auf 519 l/min (um 14 %) an. Am Abend des 22.03. wird die Medikation mit einem inhalativen Kortikoid begonnen.

Zusammenfassend zeigt das Protokoll einen typischen Verlauf eines teilkontrollierten Asthmas an. Die PEF-Variabilität liegt <20 %. Die Bronchospasmolysereaktion (14 %) entspricht einer guten Reversibilität bei hyperreagiblem Bronchialsystem. Die diskrete Bes-

serung der Mittelwerte sowie die Abnahme der PEF-Variabilität nach Beginn der inhalativen Kortikoidmedikation entsprechen ebenfalls einem typischen Verlauf.

➤ **Das Führen eines Peak-Flow-Protokolls ist ein wichtiges Instrument, um das Gefühl des Patienten für die Erkrankung und die Therapie und somit letztlich die Compliance zu fördern.**



Mit Hilfe eines Peak-Flow-Protokolls lässt sich das An sprechen von verschiedenen Therapiemaßnahmen objektivieren. Es lassen sich sowohl Trends der Mittelwerte, der Verlauf der PEF-Variabilität sowie die un mittelbare Reaktion auf Akutmaßnahmen darstellen.

8.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 51

64 Jahre, männlich, 178 cm, 75 kg, BMI 24 kg/m²

Das folgende Beispiel zeigt das Protokoll eines Patienten mit COPD (GOLD 2), der mit einer inhalativen antioberstruktiven Therapie eingestellt ist.

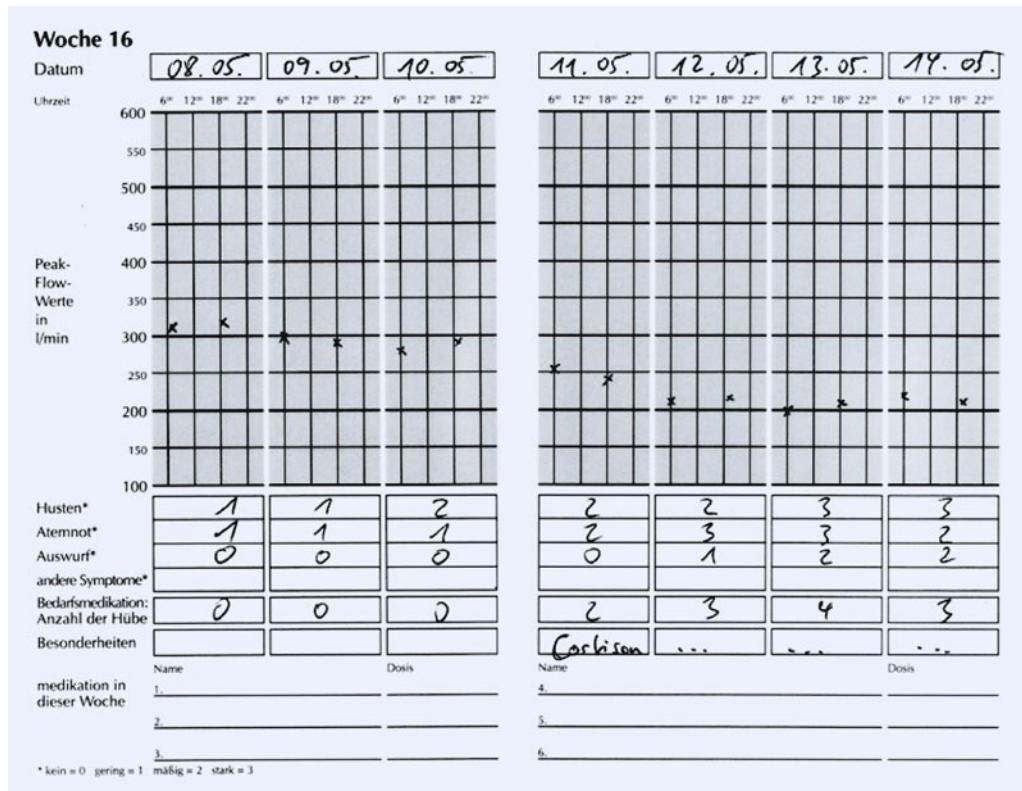


Abb. 8.4 Peak-Flow-Protokoll Fallbeispiel 51

■ Interpretation des Protokolls

Das Protokoll zeigt die Werte über eine Woche. Die Werte des 08. und 09.05. zeigen sich auf niedrigem Niveau relativ stabil (PEF-Variabilität <10 %).

Beginnend am 09.05. zeigen die Werte einen Abwärtstrend von ca. 300 auf 200 l/min an. Hierzu werden entsprechend Symptome einer Exazerbation und ein erhöhter Einsatz an Bedarfsmedikation protokolliert. Am 14.05. scheint eine Besserung der Werte zu beginnen.

Zusammenfassend zeigt das Protokoll einen typischen Verlauf einer COPD mit Entwicklung einer Exazerbation. Die Verschlechterung wird am 11.05. erkannt und mit einer zusätzlichen Kortikoidmedikation erfolgreich abgefangen.

8

Der typische Verlauf bei einer COPD zeigt relativ konstante Werte auf erniedrigtem Niveau. Der Wert der Peak-Flow-Protokollierung liegt in der Früherkennung von Exazerbationen. Bei einer COPD und noch besser bei einem Asthma bronchiale lassen sich Exazerbationen häufig noch vor dem Auftreten eindeutiger Symptome am Peak-Flow-Verlauf erkennen.



Besonders bei eingeschränkten Patienten mit relevanter Atemflussbehinderung sind die Werte – abgesehen von der problematischen Mitarbeitsabhängigkeit – auch hinsichtlich der messtechnischen Fähigkeit der korrekten Datenerfassung kritisch zu beurteilen und nicht überzubewerten. Zudem gibt es auch eine Reihe von COPD-Patienten mit gewisser Hyperreagibilität und entsprechender Variabilität in den Werten.

Weiterführende Literatur

Ärztliches Zentrum für Qualität in der Medizin (2018) Nationale Versorgungsleitlinie Asthma, 3. Aufl. www.asthma.versorgungsleitlinien.de

Buhl R et al (2017) S2k-Leitlinie zur Diagnostik und Therapie von Patienten mit Asthma. Pneumologie 71:849–919

Global Initiative for Asthma (GINA) (2018) Global Strategy for Asthma Management and Prevention. www.ginasthma.org. Zugegriffen: 10. März 2019

Hegewald MJ, Crapo RO, Jensen RL (1995) Intraindividual peak flow variability. Chest 107:156–161



Blutgasanalyse

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

9.1 Einleitung – 174

9.2 Fallbeispiele – 177

Weiterführende Literatur – 191

9.1 Einleitung

Die Hauptaufgabe der Lungen ist die Oxygenierung des Blutes zur Versorgung des Organismus mit Sauerstoff sowie die Elimination des Stoffwechselproduktes Kohlendioxid. Die Blutgasanalyse (BGA) stellt die Methode der Lungenfunktionsdiagnostik dar, in der letztlich das Endergebnis der einzelnen Lungenteilfunktionen erfasst wird, indem die Konstellation der Blutgase (Sauerstoff- und Kohlendioxidpartialdruck) dargestellt wird. Mit ihr kann der Wirkungsgrad der Lunge als Organ des Gasaustausches zwischen Außenwelt und Körper bewertet werden. Die Blutgasanalyse ist Ausdruck der Bilanz zwischen den pulmonalen Anforderungen des Stoffwechsels und der Leistungsfähigkeit des Atemapparates. Da die Lunge auch in die Regulation des Säure-Basen-Haushaltes eingebunden ist, können die Werte z. T. auch durch pathologische nichtpulmonal bedingte Faktoren beeinflusst werden (z. B. die Nierenfunktionsstörung).

Bei der Blutgasanalyse muss zwischen den verschiedenen Abnahmestellen der Blutproben unterschieden werden. Prinzipiell wird zwischen arteriellem, venösem und kapillärem Blut differenziert. Die arterielle BGA stellt hierbei den Goldstandard dar. Venöses Blut ist zur

Beurteilung der Lungenfunktion nicht geeignet, da die venösen Blutgase maßgeblich vom Stoffwechsel abhängig sind, schlecht mit den arteriellen Werten korrelieren und daher die Lungenfunktion unzureichend widerspiegeln. Ein Kompromiss zur arteriellen Blutgewinnung ist die Abnahme von arterialisiertem Kapillarblut aus dem Ohrläppchen. Dieses zeigt eine gute Korrelation zum pH, zum pO_2 und zum pCO_2 bei zugleich deutlich geringerer Invasivität der Abnahme. Daher ist die Gewinnung von arterialisiertem Kapillarblut für Routineuntersuchungen meist ausreichend. Ausnahmen stellen etwa Schockzustände mit verminderter peripherer Durchblutung dar.

Wichtig für die Validität der BGA ist jedoch auch die korrekte Entnahmetechnik des Blutes und der Umgang mit der Blutprobe bis zur Messung. Für alle Proben gilt, dass Luftbeimengungen vermieden werden müssen und dass das Blut umgehend untersucht werden sollte. Ferner muss beachtet werden, dass die Temperatur bei Abweichen von der normalen Körpertemperatur im BGA-Gerät eingegeben werden muss, damit eine Temperaturkorrektur erfolgen kann.

Bei Entnahme von Kapillarblut wird das Blut aus dem Ohrläppchen gewonnen. Vor Punktionsstelle wird das Ohrläppchen hierzu ausreichend lange



Abb. 9.1 a,b Punktions des hyperämisierten Ohrläppchens mit einer Lanzette (a) und Aufnehmen des frei abtropfenden Blutes mit einer heparinisierten Kapillare (b)

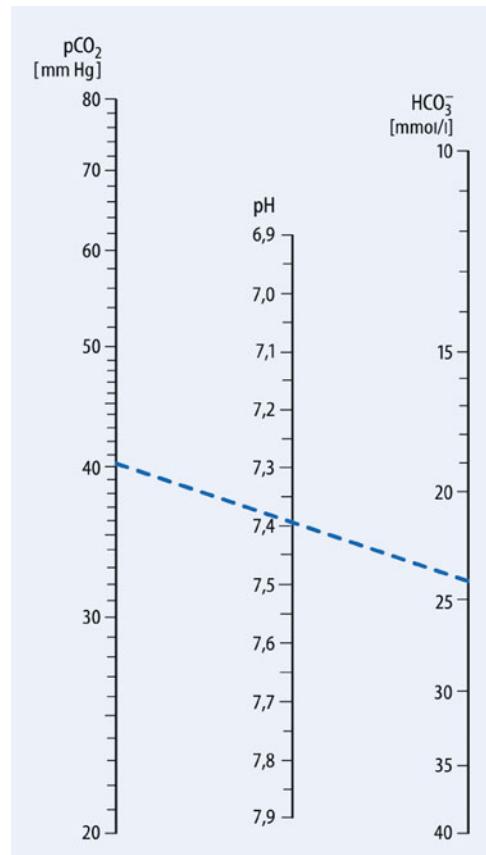
9.1 • Einleitung

hyperämisiert bzw. arterialisiert (vasodilatatorische Salbe für 10–15 min einwirken lassen). Nach der Punktionsstelle wird das Blut dann ohne Drücken und Quetschen des Ohrläppchens in eine Kapillare aufgefangen (☞ Abb. 9.1).

Die wesentlichen Parameter des Wirkungsgrades der Lungenfunktion sind der pO_2 , der pCO_2 sowie der pH. Zur Beurteilung des Säure-Basen-Haushaltes werden darüber hinaus noch das Bikarbonat (HCO_3^-) bzw. das Standardbikarbonat (also das auf normoventilatorische Verhältnisse – pCO_2 40 mmHg – standardisierte Bikarbonat) und der Basenüberschuss berechnet. Um die Sauerstoffversorgung beurteilen zu können, ist jedoch neben dem O_2 -Partialdruck auch die Kenntnis des Sauerstoffgehalts des Blutes (C_aO_2) wichtig. Zusammen mit der Herzleistung determiniert der C_aO_2 das O_2 -Angebot des Organismus. Der O_2 -Gehalt errechnet sich aus dem Hämoglobinwert, der Sättigung und der sogenannten Hüfner-Zahl.

Bei Kenntnis von pH und pCO_2 lässt sich mit Hilfe der Henderson-Hasselbalch-Gleichung die Konzentration des Bikarbonats (Plasmahydrogencarbonat) ermitteln. In einem Normogramm von pCO_2 , pH und HCO_3^- kann man bei zwei bekannten Größen den dritten Parameter ablesen (☞ Abb. 9.2).

Die folgenden Beispiele zeigen die verschiedenen Aspekte anhand praktischer Befunde.



☞ Abb. 9.2 Normogramm zur Ermittlung des CO_2 -Partialdrucks, des pH-Wertes und der Plasmahydrogencarbonat-Konzentration. (Aus Petrides 2007)

9.2 Fallbeispiele

Fallbeispiel 52

75 Jahre, männlich, 178 cm, 81 kg, 26 kg/m²

Das folgende Beispiel zeigt die BGA eines Mannes mit computertomografisch gesicherter, beidseitiger zentraler Lungenarterienembolie. Der Patient beklagte Ruhedyspnoe und wurde zum Blutabnahmezeitpunkt mit Sauerstoff (Flussrate: 3 l/min) versorgt. Kardiopulmonale Vorerkrankungen bestanden nicht.

Art der BGA	art.			
pH	7.470 +			7.37-7.43
pCO ₂	21.5 -	mmHg		35-45
pO ₂	78.0	mmHg		75-95
Referenzbereich arteriell:	71 - 104	mmHg		
	venös : 36 - 44	mmHg		
Bicarbonat	15.3 -	mmol/l		22-26
Std.-Bicarbonat	18.8 -	mmol/l		22-26
Basen-Abweichung	-6.9 -	mmol/l		-2.5-2.5
O ₂ -Gehalt	13.3 -	ml/dl		15-23
O ₂ -Sättigung	97.1	Vol%		92.0-98.5
Temperatur	37.0	°C		36-37
Hämoglobin (BGA)	9.7 -	g/dl		12-18
CO ₂ gesamt	16.0 -	mmol/l		23-28

Abb. 9.3 Blutgasanalyse Fallbeispiel 52

■ Interpretation der Untersuchung

Die Werte sind plausibel für eine arterielle Blutentnahme.

Der pO_2 liegt zwar im Normbereich, ist jedoch für die mit Sauerstoff angereicherte Atemluft und den erniedrigten pCO_2 viel zu niedrig. Es ergibt sich ein auf ein pCO_2 von 40 mmHg standardisierter pO_2 von 47,3 mmHg (unter zusätzlicher Sauerstoffgabe). Der pCO_2 ist im Rahmen einer Hyperventilation erniedrigt, der pH entsprechend alkalisch. Der negative BE und das verminderte Standardbikarbonat sprechen für eine metabolische Teilkompensation der respiratorischen Alkalose. Zudem besteht nebenbefindlich eine Anämie mit Veränderung des C_aO_2 trotz guter O_2 -Sättigung.

Zusammenfassend zeigt die BGA eine schwere Hypoxämie mit kompensatorischer Hyperventilation und konsekutiver teilkompensierter respiratorischer Alkalose. Der Befund passt gut zu einer schweren Lungenarterienembolie.

Bei Beurteilung des Sauerstoffpartialdrucks müssen das Alter, die Atemluft (Raumluft, Sauerstoffzufuhr) und die Atempumpleistung (pCO_2) berücksichtigt werden. Es ist zu beachten, dass der pO_2 physiologischerweise mit steigendem Alter sinkt. Ab 70 Jahren flacht der Trend deutlich ab, und es bildet sich ein Plateau: Bei Männern hat es einen Mittelwert von ca. 77 mmHg und einen unteren Grenzwert von 62 mmHg, bei Frauen liegt das Plateau bei ca. 74 mmHg mit einem unteren Grenzwert von 60 mmHg. Ermittelt wurden diese Zahlen aus einem Kollektiv von Personen zwischen 70 und 100 Jahren. Der jeweilige Referenzmittelwert (für Patienten zwischen 18 und 70 Jahren) lässt sich mit folgender Formel (mod. nach Woitowitz 1969) errechnen:

$$pO_2 \text{ Soll (mmHg)} = 102 - (0,33 \times \text{Alter})$$

Der jeweilige untere Grenzwert (LLN) ergibt sich durch Abzug von 10 mmHg ($1,65 \times SD$). Bedacht werden muss auch die Abnahme des Partialdrucks mit zuneh-

mender Höhe über dem Meeresspiegel, die in anderen Formeln berücksichtigt wird. Die modifizierte Referenzgleichung gilt für Messungen bei Luftdruck in Meereshöhe. Bei Messungen in 300 m Höhe sinkt der Sollwert z. B. um ca. 2 mmHg ab. In unserem Beispiel ist von einem Sollmittelwert von 77 mmHg bzw. LLN von 62 mmHg auszugehen. Der standardisierte pO_2 liegt mit 47 mmHg deutlich darunter, entsprechend einer schwergradigen Hypoxämie.

Die Klassifikation des hypoxämischen Schweregrades orientiert sich an der Abweichung vom unteren Grenzwert (LLN):

- leichtgradig: <5 mmHg unter LLN,
- mittelgradig: 5–10 mmHg unter LLN,
- schwergradig: >10 mmHg unter LLN.

Kompensatorisch wird die Atempumpleistung bzw. Ventilation bei Hypoxämie gesteigert. Bei erniedrigtem pCO_2 sollte der pO_2 mittels Umrechnungsformel vor der Beurteilung daher korrigiert bzw. auf einen mittleren pCO_2 von 40 mmHg standardisiert werden, um das Ausmaß der Hypoxämie besser beurteilen zu können.

Die Umrechnungsformel (nach Diekmann und Smidt 1984) lautet:

$$\begin{aligned} \text{Standardisierter } pO_2 \\ = pO_2 \text{ Ist} - 1,66 \times (40 - pCO_2) \end{aligned}$$



Die respiratorische Alkalose ist ein Ausdruck der alveolären Hyperventilation. Der pO_2 kann dabei variabel sein.

Mögliche Ursachen der respiratorischen Alkalose/ alveolären Hyperventilation sind:

- psychische Störung,
- Fieber,
- Hypoxämie,
- interstitielle Lungenerkrankung,
- Lungenarterienembolie,
- Höhenexposition,
- verminderte Sauerstoffkonzentration der Atemluft,
- Schwangerschaft,
- mechanische Überbeatmung.

9.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 53**58 Jahre, männlich, 172 cm, 89 kg, BMI 30 kg/m²**

Nachfolgend ist die BGA eines Patienten mit akut exazerbierter, langjährig bekannter COPD gezeigt. Der Patient hatte schwere Luftnot und war leicht bewusstseinsgetrübt. Abnahme der BGA unter O₂ mit 2 l/min.

Abb. 9.4 Blutgasanalyse Fallbeispiel 53

Blutgasanalyse			
art.	Art der BGA		
7.202-	pH	7.37-7.43	
87.5+	PCO ₂	35-45	mmHg
47.6-	PO ₂	75-95	mmHg
33.6+	Bicarbonat	22-26	mmol/l
25.1	Std.-Bicarbonat	22-26	mmol/l
1.4	Basen-Abweichung	-2.5-2.5	mmol/l
19.9	O ₂ -Gehalt	15-23	ml/dl
79.5-	O ₂ -Sättigung	92.0-98.5	Vol%
37.0	Temperatur	36-37	°C
18.9+	Hämoglobin (BGA)	12-18	g/dl
36.3+	CO ₂ gesamt	23-28	mmol/l

■ Interpretation der Untersuchung

Die gemessenen Werte sind plausibel für eine korrekte arterielle Abnahme.

Der pO_2 ist schwergradig erniedrigt (schwere Hypoxämie) und der pCO_2 schwergradig erhöht (schwere Hyperkapnie). Der pH ist entsprechend azidotisch. Der BE und das Standardbikarbonat liegen im Normbereich. Bei schwerer Hypoxämie liegt der O_2 -Gehalt (bei Polyglobulie) jedoch im Normbereich.

Zusammenfassend zeigt die BGA eine respiratorische Globalinsuffizienz (bzw. ventilatorische Insuffizienz entsprechend einer alveolären Hypoventilation) mit respiratorischer Azidose und (noch) fehlender metabolischer Kompensationsantwort. Dieser Befund passt zu einer akut exazerbierten schweren COPD mit Erschöpfung der Atempumpe und klinisch beginnender CO_2 -Narkose. Die Therapie mit supportiver Sauerstoffzufuhr ist bei schwer vermindertem pO_2 , jedoch normalem C_aO_2 aktuell ausreichend. Der hohe Sauerstoffgehalt ist in einem hohen Hb begründet, der auf eine chronische Hypoxämie hindeutet. Der Patient benötigt umgehend eine Beatmungstherapie.

☞ **Die isolierte Verminderung des pO_2 (Hypoxämie) wird als respiratorische Partialinsuffizienz oder auch pulmonale Insuf-**

fizienz bezeichnet. Eine Hypoxämie, die mit einem erhöhten pCO_2 (Hyperkapnie) kombiniert ist, wird als respiratorische Globalinsuffizienz oder auch ventilatorische Insuffizienz bezeichnet und ist Auswirkung einer alveolären Hypoventilation.



Mögliche Ursachen einer respiratorischen Azidose/alveolären Hypoventilation sind:

- zentrale Atemregulationsstörung,
- Versagen/Insuffizienz der Atemmuskulatur (nervat, muskulär),
- schwere Formen von Lungenkrankheiten mit Überlastung der Atempumpe,
- unzureichende mechanische Ventilation (Beatmung).

Der zeitliche Verlauf der Kompensationsmechanismen ist unterschiedlich: respiratorische Kompensation nach ca. 30–60 min, renale metabolische Kompensation nach 3–4 h.

Der Normwert des pCO_2 liegt zwischen 35 und 45 mmHg und ist vom Alter und Geschlecht weitestgehend unabhängig. Die Klassifikation der Hyperkapnie ist daher statisch:

- leichtgradig: 45–50 mmHg,
- mittelgradig: 50–60 mmHg,
- schwergradig: >60 mmHg.

9.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 54**68 Jahre, männlich, 184 cm, 86 kg, BMI 25 kg/m²**

Das nächste Beispiel zeigt die BGA eines Patienten, der mit hyperosmolar entgleistem Diabetes mellitus, Exsikkose und Nierenversagen aufgenommen wurde. Der Patient war bis auf eine leichte Tachypnoe und allgemeine Abgeschlagenheit asymptatisch. Kardiopulmonale Vorerkrankungen waren nicht bekannt.

Analyt	Ergebnis	Einheit	Referenzbereich
Art der BGA	art.		
pH	7.244 -		7.37-7.43
pCO ₂	36.7	mmHg	35-45
pO ₂	39.1 -	mmHg	75-95
	Referenzbereich arteriell: 71 - 104 mmHg		
	venös : 36 - 44 mmHg		
Bicarbonat	15.5 -	mmol/l	22-26
Std.-Bicarbonat	15.4 -	mmol/l	22-26
Basen-Abweichung	-10.9 -	mmol/l	-2.5-2.5
O ₂ -Gehalt	14.0 -	ml/dl	15-23
O ₂ -Sättigung	67.7 -	Vol%	92.0-98.5
Temperatur	37.0	°C	36-37
Hämoglobin (BGA)	14.9	g/dl	12-18
CO ₂ gesamt	16.6 -	mmol/l	23-28

Abb. 9.5 Blutgasanalyse Fallbeispiel 54

■ Interpretation der Untersuchung

Der pH ist im Sinne einer Azidose erniedrigt. Die Azidose ist metabolisch, da der BE und das Standardbikarbonat ebenfalls deutlich erniedrigt sind. Der pO_2 ist stark vermindert und in Anbetracht der lediglich leichten Tachypnoe wenig plausibel. Die BGA ist venös und (wie sich später bestätigte) fälschlicherweise als arteriell markiert worden. Dies erklärt auch den pCO_2 , der im Rahmen der Kompensation der metabolischen Azidose deutlich erniedrigt sein müsste und hier im Normbereich liegt. Da venöse pCO_2 -Werte im Vergleich zu arteriellen Werten stets höher gemessen werden, ist anzunehmen, dass der arterielle pCO_2 tatsächlich erniedrigt ist.

Zusammenfassend zeigt die venöse BGA eine metabolische, vermutlich respiratorisch teilkompensierte Azidose. Eine Aussage zur pulmonalen Situation bzw. Oxygenierung ist mit dieser BGA nicht möglich, in Anbetracht der klinischen Problematik jedoch auch nicht unbedingt nötig.

☞ **Die Interpretation einer BGA sollte immer mit der Überprüfung der Plausibilität der Messwerte beginnen. Die klinischen**

Umstände sollten immer in die Überlegungen einbezogen werden. Ist eine BGA (oder auch ein sonstiger Laborbefund) nicht plausibel, muss sie sofort wiederholt werden, um nicht eine unerwartete und klinisch unauffällige Notfallsituation zu übersehen.

Um valide Messergebnisse zu erhalten, ist ferner darauf zu achten, dass die Proben innerhalb von 20 min gemessen werden und keine Luftkontamination der Proben vorliegt, da die Werte sonst signifikant verfälscht werden.



Eine relevante Hyperkapnie kann im Rahmen einer Erstbeurteilung bei exazerbiertem COPD auch mit einer venösen BGA ausgeschlossen werden. Der pH liegt im venösen Blut um ca. 0,03 niedriger als im arteriellen und der pCO_2 im venösen Blut um ca. 6 mmHg höher als im arteriellen. Bei einem pH von >7,35 und einem pCO_2 von <50 mmHg kann eine relevante Hyperkapnie mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden. Bei grenzwertigen Befunden sollte aber immer eine arterielle BGA zur Verifizierung bzw. zur differenzierten Beurteilung ergänzt werden.

Fallbeispiel 55**76 Jahre, weiblich, 149 cm, 47 kg, BMI 21 kg/m²**

Nachfolgend ist die BGA einer älteren Patientin mit langjährig bekannter mittelgradiger COPD dargestellt. Zwei Tage zuvor wurden bereits folgende Blutgaswerte gemessen: pO₂ 62; pCO₂ 38 mmHg. Klinisch befand sich die Patientin momentan in einer stabilen Phase, es ging ihr nicht schlechter als am Vortag.

Abb. 9.6 Blutgasanalyse Fallbeispiel 55

Probentyp temp	Kapillär 37,0 °C
Blutgas Ergebnis	
pO ₂	54,1 mmHg [-]
pCO ₂	39,7 mmHg [36,0 - 44,0]
sO ₂	90,0 %
Säure Basen Status	
↑ pH	7,486 [7,360 - 7,440]
SBE _c	6,1 mmol/L
cHCO ₃ (P.st) _c	29,7 mmol/L
Oxymetrie Ergebnis	
FCOHb	1,4 % [0,0 - 2,0]

Wie bewerten Sie die vorliegende BGA, wie erklärt sich die Verschlechterung?

■ Interpretationsvorschlag

Der pO_2 ist deutlich vermindert bei normalem pCO_2 . Zudem sind pH , HCO_3 und BE erhöht.

Zusammenfassend ergibt sich eine mittelgradige Hypoxämie im Sinne einer pulmonalen Insuffizienz. Nebenbefindlich liegt eine leichte metabolische Alkalose vor. Der pCO_2 ist normwertig und im zu erwartenden Bereich. Einerseits gibt es seitens der Hypoxämie den Trigger zur Hyperventilation, andererseits seitens der metabolischen Alkalose den Trigger zur Hypoventilation – die Trigger sind gegensätzlich, sodass die kompensatorische Antwort jeweils abgeschwächt ist.

Die Diskrepanz zum Vorwert erklärte sich nur über die Kenntnis der Umstände. Auf Rückfrage ergab sich, dass die BGA unmittelbar nach 5-minütigem Fußmarsch zum BGA-Labor abgenommen wurde – also unter Belastungssituation. Ein Abfall von 5–10 mmHg ist somit erklärt. Eine weitere Kontrolle 15 min später ergab bereits wieder folgende Werte: pO_2 64; pCO_2 37,5 mmHg (unter Ruhebedingungen).

9

► Neben Alter, Atemluft und pCO_2 muss gerade bei Patienten mit respiratorischer Insuffizienz die körperliche Belastungssituation (Ruhe, leichte bis schwere Belastung) bei der Beurteilung der Blutgaswerte mitberücksichtigt werden. Im Zweifelsfall sollte die BGA wiederholt werden. In seltenen Fällen kommt es unter Belastung jedoch auch zum Anstieg des Sauerstoffpartialdrucks. Eine Erhöhung des pCO_2 kommt nicht nur physiologischerweise bei Lungengesunden vor, sondern auch bei Patienten mit schlechter Ohrläppchendurchblutung (verbesserte Arterialisierung) und/oder Verteilungsstörung (verbesserte Belüftung zum Beispiel bei Adipositas).



Ursachen einer Hypoxämie sind vielschichtig und liegen meist in Kombination vor. Hauptursachen einer Hypoxämie sind:

- alveoläre Hypoventilation,
- Transferstörung,
- Shunt,
- Ventilations-Perfusions-Mismatch.

9.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 56**70 Jahre, weiblich, 175 cm, 80 kg, BMI 26 kg/m²**

Dieses Fallbeispiel zeigt die BGA-Messung einer Patientin, die an einer schweren COPD leidet und seit Jahren eine Sauerstofflangzeittherapie (LTOT) durchführt. Die COPD ist aktuell klinisch stabil. Die Messungen wurden an 3 aufeinander folgenden Tagen durchgeführt.

kap.	kap.				kap.	Art der BGA
0	1				0	O2-Gabe
7.519	7.524				7.436	pH
Blutgasanalyse (Li.-Hep.)						
45.2 +	63.4 +			31.1 -	35-45	pCO2
Blutgasanalyse (Li.-Hep.)						
57.6 -	84.2			55.3 -	75-95	pO2
Blutgasanalyse (Li.-Hep.)						
36.0 ++	51.1 +			20.5 -	22-26	Bicarbonat
35.4 ++	50.0 ++			22.1	22-26	Std.-Bicarbonat
11.8 ++	25.6 +			-2.7 -	-2.5 bis +	Basen-Abweichung

■ Abb. 9.7 Fallbeispiel 56

?

Was für eine Störung liegt hier vor? Wären weitere klinische Informationen nützlich?

■ Interpretation der Untersuchung

Es liegen drei kapilläre Blutgasanalysen vor. Die zweite BGA erfolgte unter einer O₂-Gabe mit einem Fluss von 1 l/min, die erste und letzte BGA wurde jeweils unter Raumluft durchgeführt.

Es zeigt sich eine schwere Alkalose (s. pH-Wert), die sich zunächst noch verstärkt und dann an Tag 3 nahezu rückgebildet ist. Ursache ist eine metabolische Störung (s. Werte von HCO₃ und BE). Die metabolische Alkalose ist respiratorisch teilkompensiert (s. pCO₂-Wert). Die Frage ist, ob zusätzlich eine pulmonal bedingte ventilatorische Insuffizienz (bzw. Hypoventilation) als Ursache für die leichte CO₂-Retention vorliegt? Unter O₂-Gabe (und vorliegender chronischer Hypoxämie) steigt der pCO₂ an Tag 2 weiter an. Allerdings hatte sich die metabolische Störung ebenfalls weiter verschlechtert (s. Werte von HCO₃ und BE) und so eine gesteigerte kompensatorische Antwort hervorgerufen.

Berechnet man den zu erwartenden pCO₂-Bereich (s. unten), kann eine zusätzliche respiratorische Ursache des pCO₂-Anstiegs ausgeschlossen werden. Als Ursache für die respiratorisch teilkompensierte metabolische

9

Alkalose ergab sich rezidivierendes Erbrechen mit schwerer Hypokaliämie (bei gastroduodenalem Ulkus). Komplizierend kommt in diesem Beispiel die deutliche hypoxämische respiratorische Insuffizienz dazu, die an Tag 3 zunimmt und zu einer gewissen Hyperventilation führt. Wenn man den Sauerstoffpartialdruck von Tag 1 mit dem von Tag 3 vergleicht und die Werte zuvor auf einen pCO₂ von 40 mmHg normiert, fällt die deutliche Verschlechterung der Oxygenierung auf. Interessant wäre bei diesem Fall auch der Hb im Hinblick auf den Sauerstoffgehalt.

➤ Bei metabolischer Alkalose oder Azidose kann der Vergleich des pCO₂ mit dem zu erwartenden pCO₂ hilfreich sein, um zu überprüfen, ob eine zusätzliche respiratorische Störung vorliegt.

Zu erwartender pCO₂-Bereich = 0,9 × HCO₃ + (9 bis 16).

In unserem Beispiel ergibt sich für den 1. Tag ein zu erwartender pCO₂-Bereich von 41–48 mmHg, somit liegt der Wert von 45 mmHg genau im Intervall.

Fallbeispiel 57**70 Jahre, männlich, 178 cm, 82 kg, BMI 26 kg/m²**

Das nächste BGA-Beispiel zeigt die Werte eines Patienten, der wegen einer akuten Exazerbation einer COPD vor Kurzem stationär aufgenommen wurde. Die 3 Messungen wurden mit unterschiedlichen O₂-Flussraten innerhalb einer Stunde durchgeführt.

Abb. 9.8 Fallbeispiel 57

	30057	30057	
kap.	kap.	kap.	
0.0	2.0	1.0	
7.400	7.338	7.351	
46.4 +	55.4 +	47.8 +	35-45
41.7 -	72.6 -	54.1 -	75-95
28.1 +	29.1 +	25.9	22-26
26.5 +	26.4 +	24.2	22-26
2.7 +	2.2	-0.1	-2.5 bis +
12.5 -	15.1	13.4 -	15-23
79.9 -	93.7	87.6 -	92.0-98.5
12.2	12.5	11.9 -	12-18
	37	35	%
29.5 +	30.8 +	27.3	23-28
8.5 +	8.0 +	7.9 +	< 2.0
0.5	0.5	0.5	< 2.0
134.0 -	134.1 -	133.8 -	135-148
4.42	4.35	4.25	3.5-5.4
97	96	97	84-112
1.12 -	1.16	1.15	1.15-1.35
	100	94	

BGA-Gerätenummer
 Art der BGA
 O₂-Gabe
 pH
 pCO₂
 pO₂
 Bicarbonat
 Std.-Bicarbonat
 Basen-Abweichung
 O₂-Gehalt
 O₂-Sättigung
 Hämoglobin
 Hämatokrit
 CO₂ gesamt
 CO-Hämoglobin
 met-Hämoglobin
 Natrium
 Kalium
 Chlorid
 Calcium ion.
 Glucose

- ?
- Wie beurteilen Sie die Messreihe? Kann man aus der BGA ableiten, ob der Patient noch Raucher ist?

■ Interpretation der Untersuchung

Die erste Messung (links) zeigt eine schwere Hypoxämie und eine leichte Hyperkapnie bei normalem pH (metabolische Kompensation). Unter O₂-Gabe mit 2 l/min (2. Messung) steigt der pO₂ gut an. Der pCO₂ steigt bei chronischer Hypoxämie jedoch ebenfalls deutlich an und ist nunmehr mittelgradig erhöht. Der pH fällt entsprechend, und es entsteht eine leichte respiratorische Azidose. Eine metabolische Gegenkompensation ist kurzfristig nicht erkennbar. In der letzten Messung (unter O₂ mit Flussrate von 1 l/min) fällt der pO₂ in einen tolerablen Bereich zurück. Gleichzeitig bildet sich die Hyperkapnie auf einen leicht erhöhten pCO₂ zurück, der pH-Wert liegt nunmehr im unteren Grenzbereich. Die BGA zeigt eindrucksvoll die Gefahr der übersteuerten O₂-Gabe bei Patienten mit chronisch hypoxämisch-hyperkapnischer respiratorischer Insuffizienz und die Notwendigkeit der BGA-gesteuerten O₂-Titration. Bei unreflektierter O₂-Gabe droht ansonsten eine Minderung des Atemantriebs mit alveolärer Hypoventilation und CO₂-Retention mit Vigilanzstörung.

Der O₂-Gehalt zeigt analog zum pO₂ einen an- und absteigenden Wert. Mit 12,5 ist er deutlich zu niedrig. Zur Hypoxämie kommt hier noch eine leichte Anämie (Hb 12 g/dl) hinzu, die den Sauerstoffgehalt gleichfalls vermindert.

Zudem fällt auf, dass der Patient bei einem CO_{HB}-Anteil von 8 % weiterhin und trotz der Exazerbation starker Raucher zu sein scheint.

☞ **Der O₂-Partialdruck ist nur bedingt aussagekräftig. Die tatsächliche Sauerstoffversorgung (O₂-Angebot) wird durch den Sauerstoffgehalt des Blutes (C_aO₂) und die Durchblutung (Herzzeitvolumen) determiniert. Der C_aO₂ ist das Produkt aus Sauerstoffsättigung, Hämoglobin**

und Hüfner-Zahl (Sauerstoffvolumen, das von 1 g Hämoglobin maximal gebunden werden kann) und wird wie folgt berechnet:

$$C_aO_2 \text{ (ml O}_2/100 \text{ ml Blut)} = \frac{SO_2}{100} \times Hb \times 1,34$$

Der physikalisch gelöste Anteil

(pO₂ × 0,003) ist so gering, dass er vernachlässigt werden kann. Der O₂-Gehalt sollte bei der Beurteilung der O₂-Versorgungssituation stets mitberücksichtigt werden, da z. B. eine Polyglobulie eine Hypoxämie bei protektiver alveolärer Hypoventilation im Rahmen einer chronischen COPD etc. ausgleichen kann. Standardisierte Normwerte stehen leider nicht zur Verfügung und liegen ungefähr zwischen 16 und 22 ml/dl. Ein Wert unter 10 ml/dl wird allgemein als kritisch eingestuft (Abb. 9.9).

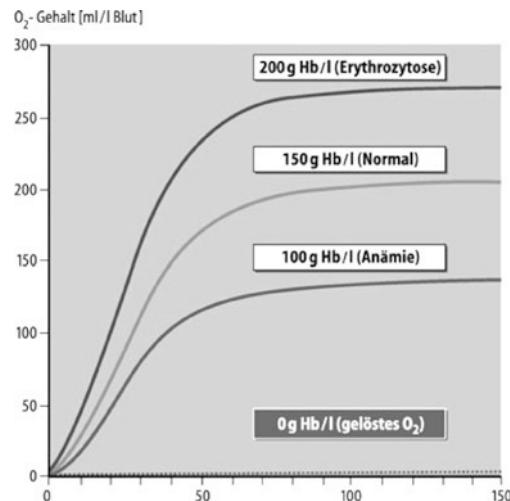


Abb. 9.9 O₂-Bindungskurve bei unterschiedlicher Hämoglobinkonzentration. (Aus Jelkmann 2011)

9.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 58

73 Jahre, männlich, 180 cm, 81 kg, BMI 25 kg/m²

Das letzte Beispiel dieses Kapitels zeigt die kapilläre BGA eines Patienten (unter Raumluft) mit akut exazerbierter COPD. Im Labor wird zudem ein erhöhter Kreatininwert von 1,6 mg/dl gemessen. Die Messung wurde in einem Krankenhaus in 400 m Höhe über dem Meeresspiegel durchgeführt.

SÄURE-BASE 37.0 °C		
pH	7.306	
pCO ₂	44.6	mmHg
pO ₂	55.5	mmHg
HCO ₃ ⁻ act	21.8	mmol/L
BE(B)	-4.6	mmol/L
ctCO ₂	23.1	mmol/L
CO-OXYMETRIE		
Hct	43	%
tHb	14.6	g/dL
sO ₂	88.2	%
FO ₂ Hb	87.1	%
FCO ₂ Hb	1.0	%
FMetHb	0.3	%
FHHb	11.6	%
SAUERSTOFFSTATUS 37.0 °C		
ctO ₂ (a)	17.9	mL/dL
ELEKTROLYTE		
Na ⁺	141.5	mmol/L
K ⁺	4.85	mmol/L
Ca ⁺⁺	1.26	mmol/L
Cl ⁻	109	mmol/L
AnGap	15.6	mmol/L
METABOLITE		
Olu	115	mg/dL
Lac	1.06	mmol/L
BENUTZERDEF. DATENKAT.		
KOMMENTAR		
RL		

Abb. 9.10 Fallbeispiel 58

Erstellen Sie einen umfassenden Befund. Welche Auswirkung hat die Messung in 400 m Höhe?

■ Interpretation der Untersuchung

Die BGA ergibt den Nachweis einer metabolischen Azidose mit fehlender respiratorischer Kompensation. Zudem liegt eine deutliche Hypoxämie mit drohender Hyperkapnie vor. Die Azidose ist am ehesten auf die laborchemisch gezeigte Niereninsuffizienz zurückzuführen. Der zu erwartende pCO_2 (Berechnung s. Beispiel 56) liegt um die 32 mmHg. Der tatsächliche Wert von 44,6 mmHg spricht – in Zusammensetzung mit der Hypoxämie – für das Vorliegen einer relativen ventilatorischen Insuffizienz bei Überlastung der Atempumpe im Rahmen der chronischen Lungenerkrankung. Es ist zu beachten, dass der O_2 -Gehalt noch im Normalbereich liegt, trotz verminderter SaO_2 und vermindertem pO_2 .

In einer Messhöhe von ca. 400 m ist der zu erwartende (Soll-Mittelwert) pO_2 etwa 3,5 mmHg niedriger als auf Meereshöhe. In unserem Beispiel also nicht 78, sondern 74,5 mmHg, was auch die Graduierung des Schweregrades der Hypoxämie etwas verändert. Bei einem pO_2 von 78 mmHg läge der untere Grenzwert bei 68 mmHg und die Veränderung wäre >10 mmHg, entsprechend einer schwergradigen Hypoxämie. Bei Berücksichtigung der Messhöhe von 400 m liegt der Soll-Mittelwert bei 74,5 bzw. die Schwelle zur schweren Hypoxämie bei 64,5 mmHg. Mit der tatsächlichen Veränderung von 9 mmHg (Soll-Mittelwert 74,5 minus Messwert von 55,5 mmHg) ergibt sich in unserem Beispiel somit (lediglich) eine mittelgradige Hypoxämie.

► **Der Normwert des pH im Blut liegt zwischen 7,35 und 7,45 und ist Ausdruck der H^+ -Konzentration. Bei einer Azidose kommt es zum Anstieg der H^+ -Ionen als Ausdruck erhöhter saurer Valenzen – der Ursache nach entsprechend als respiratorische oder als metabolische Azidose bezeichnet. Bei der Alkalose liegt hingegen eine verminderte H^+ -Konzentration vor.**

Die Bewertung des pH-Wertes bzw. des Säure-Basen-Haushaltes sollte unter Einbeziehung sämtlicher BGA-Werte erfolgen. Die □ Tab. 9.1 hilft bei der Orientierung. Je nach Ausprägung der kompensatorischen Antwort sind der pCO_2 bzw. BE normal bis – dem pathologischen pH gegenläufig – verändert, entsprechend einer zunehmenden Normalisierung des veränderten pH-Wertes.



Die Referenzwerte für den Sauerstoffpartialdruck wurden seinerzeit von Woitowitz (1969) in einer Höhe von ca. 280 m (P_B 737 mmHg) ermittelt und ergaben folgende Sollwertformel:

$$\text{pO}_2 \text{ Soll (mmHg)} = 100 - (0,33 \times \text{Alter})$$

Normiert man diese auf Meeressniveau, so ergibt sich die allgemein gültige (und weit verbreitete) Formel:

$$\text{pO}_2 \text{ Soll (mmHg)} = 102 - (0,33 \times \text{Alter})$$

Den mittleren Sollwert für Messungen, die vom Meeressniveau abweichen, kann man unter Berücksichti-

□ **Tab. 9.1** Störungen des Säure-Basen-Haushaltes. BE Base Excess

	pH	pCO_2	BE
Metabolische Azidose	Vermindert	Normal bis vermindert	Vermindert
Respiratorische Azidose	Vermindert	Erhöht	Normal bis erhöht
Metabolische Alkalose	Erhöht	Normal bis erhöht	Erhöht
Respiratorische Alkalose	Erhöht	Vermindert	Normal bis vermindert

Weiterführende Literatur

gung des aktuellen Barometerdrucks (in mmHg) mit folgender Formel ermitteln:

$$pO_2 \text{ Soll (mmHg)} = (100 - 0,33 \times \text{Alter}) \\ \times (P_B - 47) / 960$$

Daraus ergibt sich, dass der veränderte Luftdruck prinzipiell bis zu einer Höhe von ca. 300 m vernachlässiger ist, darüber hinaus aber berücksichtigt werden sollte. Die wetterbedingten Schwankungen von ± 10 mmHg sind hierbei zu vernachlässigen.

Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck ab, die Beziehung ist jedoch nicht linear. Auf Meeresspiegel beträgt der Luftdruck 1013 hPa, entsprechend 760 mmHg (1 hPa = 0,75 mmHg). Folgende Werte geben einen Anhalt:

- Höhe 0 m = 1013 hPa (760 mmHg),
- Höhe 100 m = 1000 hPa (750 mmHg),
- Höhe 500 m = 950 hPa (712 mmHg),
- Höhe 1000 m = 891 hPa (668 mmHg).

Basis für die Berechnung der verschiedenen Drücke ist die Alveolargasgleichung, mit deren Hilfe der alveoläre Sauerstoffpartialdruck in Abhängigkeit verschiedener Gegebenheiten (pCO_2 , Sauerstoffanteil, Einatemluft etc.) ermittelt werden kann.

Weiterführende Literatur

Bösch D (2010) Die Blutgasanalyse – Bilanz zwischen pulmonaler Anforderung und Leistungsfähigkeit. Atemw Lungenkrkh 36:128–130

Cräpö RO et al (1999) Arterial blood gas reference values for sea level and an altitude of 1,400 meters. Am J Respir Crit Care Med 160:1525–1531

Diekmann M, Smidt U (1984) Berechnung eines Standard-PaO₂ in Analogie zum Standard-Bikarbonat. Atemw Lungenkrkh 10:248–250

Hardie JA et al (2004) Reference values for arterial blood gases in the elderly. Chest 125:2053–2060

Jelkmann W (2011) Atemgastransport (Kap. 34). In: Schmidt, Lang, Heckmann (Hrsg) Physiologie des Menschen. Springer, Berlin Heidelberg

Köhler D (2005) CaO₂-Wert zur Beurteilung der Sauerstoff-Organversorgung. Dtsch Arztbl 102:A2026–2030

McKeever TM et al (2016) Using venous blood gas analysis in the assessment of COPD exacerbations: a prospective cohort study. Thorax 71:210–215

O'Connor TM (2011) Comparison of arterial and venous blood gases and the effects of analysis delay and air contamination on arterial samples in patients with chronic obstructive pulmonary disease and healthy controls. Respiration 81:18–25

Palange P, Ferrazza AM (2009) A simplified approach to the interpretation of arterial blood gas analysis. Breathe 6:15–22

Petrides PE (2007) Blut. In: Löffler, Petrides, Heinrich (Hrsg) Biochemie und Pathobiochemie. Springer, Berlin Heidelberg

Pitkin AD, Roberts CM, Wedzicha JA (1994) Arterialised earlobe blood gas analysis: an underused technique. Thorax 49:364–366

Woitowitz HJ, Szadkowski D, Lehnert G (1969) Feldstudie zum Normverhalten der arteriellen Blutgase und des pH berufstätiger Männer und Frauen vor und gegen Ende dosierter Belastung im Hinblick auf die Begutachtung. Basit Res Cardiol 58:36



Pulsoxymetrie

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

10.1 Einleitung – 194

10.2 Fallbeispiele – 195

Weiterführende Literatur – 198

10.1 Einleitung

Die pulsoxymetrische Messung der arteriellen Sauerstoffsättigung gibt einen schnellen und einfachen Überblick zu respiratorischen Problemen und ist daher seit Anfang der 1970er-Jahre weit verbreitet. Das Einsatzgebiet ist universell und erstreckt sich von ersten orientierenden Messungen, z. B. im Rettungsdienst, bis hin zum Monitoring in der Endoskopie oder auf der Intensivstation. In Praxen und Kliniken erfährt die Methode heute eine sehr vielfältige Verwendung. Bei aller Begeisterung müssen jedoch die Limitationen des Verfahrens bedacht werden, und es sollte klar sein, dass die Pulsoxymetrie die BGA nicht ersetzen kann.

Die Sauerstoffsättigung (SaO_2) ist definiert als der prozentuale Konzentrationsanteil des mit Sauerstoff beladenen (oxygenierten) Hämoglobins (Oxyhämoglobinfraktion). Physiologischerweise ist der Sauerstoff größtenteils an Hämoglobin gebunden. Die O_2 -Versorgung über direkt im Blut gelösten Sauerstoff ist vernachlässigbar gering. Unter Raumluftbedingungen ist das Hämoglobin physiologischerweise zu über 96 % gesättigt.

Der Sättigungsgrad ist an den O_2 -Partialdruck (pO_2) gekoppelt, und mit steigendem pO_2 nimmt die O_2 -Sättigung zu. Dieses Verhältnis ist jedoch nicht proportional, da die Affinität auch von der Anzahl bereits gebundener O_2 -Moleküle abhängt. Die O_2 -Bindungskurve des Blutes zeigt daher einen charakteristischen S-förmigen Verlauf. Bei einem pO_2 von 90–100 mmHg ist das Hämoglobin zu über 95 % mit O_2 gesättigt. Die O_2 -Affinität unterliegt dabei bestimmten Einflussfaktoren, die die Bindungskurve nach links oder rechts verlagern (Abb. 10.1).

Die Hämoglobin gesamtkonzentration wird von Oxyhämoglobin und Desoxyhämoglobin und von einem (physiologischerweise) zu vernachlässigenden Anteil an Methämoglobin und Carboxyhämoglobin gebildet. Die Messung der Sauerstoffsättigung, also dem Oxyhämoglobinanteil, macht sich das unterschiedliche Lichtabsorptionsspektrum von Oxyhämoglobin und Desoxyhämoglobin zunutze (Extinktionsverhalten).

Zur Messung wird ein Sensor an den Akren (vorzugsweise am Finger) angebracht. Er hat

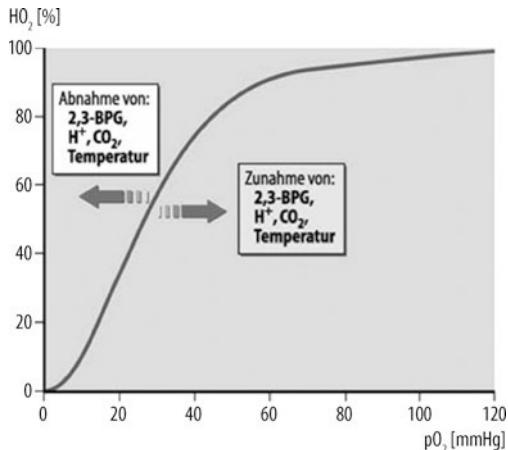


Abb. 10.1 O_2 -Bindungskurve – Parameter, die die O_2 -Affinität der Erythrozyten beeinflussen. (Aus Jelkmann 2011)

10

zwei lichtemittierende Dioden (Wellenlängen: rot 660 nm und Infrarot 940 nm), die das Gewebe durchstrahlen. Auf der Gegenseite wird mittels Photodetektor das Restlicht der beiden Wellenlängen erfasst und über einen Rechenalgorithmus die Absorptionseigenschaften des Blutes und somit die Sättigung pulsoxymetrisch (SpO_2) kontinuierlich ermittelt.

Zudem wird meist eine plethysmografische Pulskurve dargestellt. Sie hilft bei der Erkennung der Signalstärke und damit bei der Einschätzung der Validität der Sättigungswerte. Eine über mehrere Sekunden gemittelte Pulsfrequenz wird zusätzlich wiedergegeben und korreliert meist gut mit der tatsächlichen Herzfrequenz. Dies darf jedoch nicht dazu führen, die Pulsmessung im Rahmen der Basisuntersuchung gänzlich auszulassen.

Die meisten Pulsoxymeter besitzen eine gute Messgenauigkeit ($\pm 2\%$) im Bereich einer Sättigung von 70–100 %. Werte unterhalb von 70 % sollten daher stets mit Vorsicht interpretiert werden. Bestimmte Umstände bzw. Störfaktoren beeinflussen zudem die Qualität und Validität der Messung und können so die Messergebnisse relevant verfälschen. Abschließend ist zu bemerken, dass die Bewertung und Dokumentation der Werte immer unter Beachtung der Umgebungsluft (Raumluft bzw. O_2 -Gabe mit z. B. 1 l/min) erfolgen sollte.

10.2 Fallbeispiele

Fallbeispiel 59

47 Jahre, männlich, 182 cm, 85 kg, BMI 26 kg/m²

Das Beispiel zeigt die Messung eines Patienten, der über den Rettungsdienst in die Klinik eingeliefert wurde und berichtete, nach überwundener Erkältung vor einer Woche relativ plötzlich starke Dyspnoe und leichte rechtsthorakale Schmerzen bekommen zu haben. Die Atemfrequenz vor Ort betrug 24/min, die Pulsfrequenz 110/min, der Blutdruck 110/60 mmHg. Die erste Messung wurde unter Raumluft in häuslicher Umgebung, die zweite bei Aufnahme in der Klinik unter O₂-Gabe (mit 4 l/min) durchgeführt.

SpO₂: 79%
Puls: 115/min

SpO₂: 90%
Puls: 92/min

Abb. 10.2 Fallbeispiel 59: 1. Messung (links), 2. Messung (rechts)

❓ Wie beurteilen Sie die Werte? Haben Sie eine Verdachtsdiagnose?

Wie schätzen Sie den pO₂ ein?

■ Interpretation der Untersuchung

Die erste Messung zeigt eine schwere Sättigungseinschränkung bei gleichzeitiger Tachykardie und Tachypnoe.

Nach Sauerstoffgabe bessert sich die SpO₂ mäßig, die Herzfrequenz sinkt unter 100/min.

Im Verlauf konnte bei dem Patienten das Vorliegen einer Lungenarterienembolie nachgewiesen werden.

Während der pO₂ bei einer Sättigung von 79 % normalerweise bei ca. 45 mmHg liegt, kann der pO₂ bei gleichem SpO₂ und vorliegender hyperventilationsbedingter Alkalose (pH 7,5; pCO₂ 30 mmHg), wie im vorliegenden Fall, sogar bei nur 35 mmHg liegen.

☞ Aufgrund der multifaktoriellen Beeinflussbarkeit der O₂-Bindungseigenschaften des Hämoglobins (pH, CO₂ etc.) dürfen aus den SpO₂-Werten keine unreflektierten Rückschlüsse auf den zugrundeliegenden pO₂ gezogen werden. Zudem ist letztlich der Sauerstoffgehalt

(unter Berücksichtigung des Hb) entscheidend für die Organversorgung.

Andererseits beeinflussen pCO₂, pO₂, vasoaktive Substanzen etc. die Genauigkeit und Verlässlichkeit der SpO₂ im Vergleich zur SaO₂. Die tatsächliche SaO₂ wird z. B. durch die SpO₂ mit steigendem pCO₂ (Hyperkapnie) tendenziell überschätzt. Im Mittel divergieren die Werte um 1 %. Bei Patienten auf der Intensivstation kann die Differenz mitunter ±10 % betragen.



Die SpO₂ gibt zudem keinen direkten Hinweis auf die Ventilation der Lunge, und eine gute Sättigung ist nicht mit einer guten alveolären Ventilation gleichzusetzen. Im Fall einer hypoventilationsbedingten Hypoxämie kann eine suffiziente Sauerstoffsupplementation zu normalen SpO₂-Werten führen und so eine lebensbedrohliche Situation mit schwerer CO₂-Retention und drohendem Atempumpversagen verschleieren.

Fallbeispiel 60**56 Jahre, weiblich, 168 cm, 59 kg, BMI 21 kg/m²**

Das zweite Beispiel zeigt das Monitoring einer sedierten Patientin während einer endoskopischen Prozedur. Um 9:15 Uhr wurde (wegen eines bestimmten Umstandes) der Sensor vom Finger zum Ohrläppchen gewechselt.

Zeit	9:12	9:20	9:26	9:31
SpO ₂	93	97	96	96
HF	84	86	83	80
O ₂	0	0	0	0

Abb. 10.3 Fallbeispiel 60

Was geschieht nach Wechsel der Messposition, und was könnte der Grund gewesen sein?

■ Interpretation der Untersuchung

Zu Beginn des Monitorings zeigt sich ein leicht vermindertes Sättigungs niveau (93 %), das sich nach Wechsel vom Finger zum Ohrläppchen – auch ohne O₂-Gabe – normalisiert. Aus den Aufzeichnungen geht hervor, dass die Patientin einen dunklen Nagellack trug. Da die Fehlerquelle bemerkt wurde, konnte eine Fehlinterpretation vermieden werden.

 **Dunkle Nagellacke (insbesondere schwarze, blaue und grüne) können die Messung beeinflussen und führen tendenziell zu falsch niedrigen Werten (Verminderung der Absolutwerte um 3–6 Prozentpunkte). Roter Nagellack beeinflusst die Messung hingegen nicht. Künstliche Fingernägel können die Messung ebenfalls verfälschen und sollte gemieden bzw. wenn möglich entfernt werden.**

10



Bei erhöhten Dyshämoglobinwerten (v. a. CO-Hb und Met-Hb) kommt es zu Messfehlern der SpO₂, da die Pulsoxymeter die Dyshämoglobine nicht als solche erkennen.

Mit steigendem Anteil von Carboxyhämoglobin überschätzt die SpO₂ die tatsächliche Fraktion von Oxyhämoglobin. Die SpO₂ liegt meist über 90 %, auch im Fall lebensbedrohlich hoher CO-Hb-Konzentrationen von 20–30 % und entsprechend niedrigem Oxyhämoglobin. Selbst CO-Hb-Werte um 10 % (etwa bei starken Rauchern) führen zur Überschätzung der tatsächlichen SaO₂.

Mit steigendem Methämoglobinanteil fällt die SpO₂ bis zu einem Plateau von ca. 85 % (bei einem Met-Hb von ca. 30–35 %). Die SaO₂ wird im Fall erhöhter Met-Hb-Werte mit der Pulsoxymetrie überschätzt und sollte mit Vorsicht interpretiert werden.

Neuere Geräte sind heute in der Lage, die Dyshämoglobine über mehrere (bis zu 12) Wellenlängen zu erfassen – ein großer Fortschritt, denn die bisher üblichen konventionellen Geräte arbeiten nur mit 2 Wellenlängen.

Weiterführende Literatur

Verwendete Literatur

Jelkmann W (2011) Atemgastransport (Kap. 34). In: Schmidt, Lang, Heckmann (Hrsg) Physiologie des Menschen. Springer, Berlin Heidelberg

Weiterführende Literatur

- Barker SJ, Badal JJ (2008) The measurement of dyshemoglobins and total hemoglobin by pulse oxymetry. *Curr Opin Anaesthesiol* 21:805–810
- Barker SJ, Tremper KK (1987) The effect of carbon monoxide inhalation on pulse oxymetry and transcutaneous PO₂. *Anesthesiology* 66:677–679
- Barker SJ, Tremper KK, Hyatt JBS (1989) Effects of methemoglobinemia on pulse oxymetry and mixed venous oxymetry. *Anesthesiology* 70:112–117
- Bösch D (2009) Pulsoxymetrie – Anwendungsgebiete und Aussagekraft. *Atemw Lungenkrkh* 35:328–330
- Coté CJ et al (1988) The effect of nail polish on pulse oxymetry. *Anaeth Analg* 67:683–686
- Munoz X et al (2008) Accuracy and reliability of pulse oxymetry at different arterial carbon dioxide pressure levels. *Eur Respir J* 32:1053–1059



6-Minuten-Gehtest

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

11.1 Einleitung und Messprinzip – 200

11.2 Fallbeispiele – 200

Weiterführende Literatur – 204

11.1 Einleitung und Messprinzip

Der 6-Minuten-Gehtest wird meist als 6MWT oder 6MWD („6-min walk test“ bzw. „6-min walking distance“) bezeichnet. Dieser einfache Belastungstest hat in den letzten Jahren vor allem bei der Evaluation chronischer Lungenkrankung zunehmende Beachtung gefunden. Der 6MWD hat sich als verlässlich, einfach, kostengünstig und sicher erwiesen. Er korreliert gut mit der Morbidität und hat auch prognostische Aussagekraft.

Bei dem Test ist der Patient angehalten, innerhalb von 6 min die größtmögliche Strecke auf einem definierten Korridor (durch Hin- und Herlaufen zwischen 2 Pylonen) zurückzulegen. Neben der Gehstrecke werden hierbei pulsoxymetrische Daten aufgezeichnet und die Symptomatik abgefragt.

Die ATS hat 2002 die erste Leitlinie hierzu veröffentlicht. Hierbei wird eine 30 m lange Bahn (1 Runde 60 m) empfohlen und ein standardisiertes Verfahren mit regelmäßiger und vereinheitlichter Ansprache vorgegeben. Ein abweichendes Vorgehen mit zwischenzeitlichem „Anfeuern“ oder eine Laufbahn von deutlich anderer Länge etc. können die Messergebnisse beeinflussen und sollten daher vermieden werden. Ein späteres gemeinsames Positionspapier der ATS und ERS hat die vorherige Leitlinie der ATS im Wesentlichen bestätigt und um aktuelle Erkenntnisse ergänzt.

Weit verbreitet sind die Sollwerte von Enright und Trostes (aus den Jahren 1998 bzw. 1999), die für Frauen und Männer zwischen 40 und 80

bzw. 50 und 85 Jahren Gültigkeit haben. Es folgen diverse weitere Sollwertuntersuchungen mit recht unterschiedlichen Ergebnissen, sodass die Verwendung entsprechender Referenzwerte nicht unproblematisch und ein Vergleich mit Vorsicht zu interpretieren ist. Metaanalysen ergeben für Männer und Frauen zwischen 40 und 80 Jahren eine mittlere Gehstrecke \pm SD von 571 m \pm 90 m, wobei Männer im Mittel 30 m weiter liefen und die Gehstrecke im Alter allgemein abnahm.

Unproblematisch hingegen ist die intraindividuelle Verlaufsbeurteilung der Messergebnisse, da die Ergebnisse intraindividuell recht gut reproduzierbar sind. Eine Veränderung um ca. 50 m wird allgemein als klinisch signifikant angesehen (MID).

Die Indikationen sind breit gefächert: eine Evaluation vor und nach Einleitung einer Therapie oder eine prognostische Einschätzung z. B. bei COPD, pulmonaler Hypertonie oder interstitieller Lungenerkrankung. Auch im Rahmen der pulmonalen Rehabilitation wird der Test regelmäßig eingesetzt. Mitunter ist er auch bei der Objektivierung einer unklaren Belastungsdyspnoe hilfreich. Kontraindikationen sind instabile kardiovaskuläre Zustände sowie deutliche Ruhetachykardie oder Hypertension.

11.2 Fallbeispiele

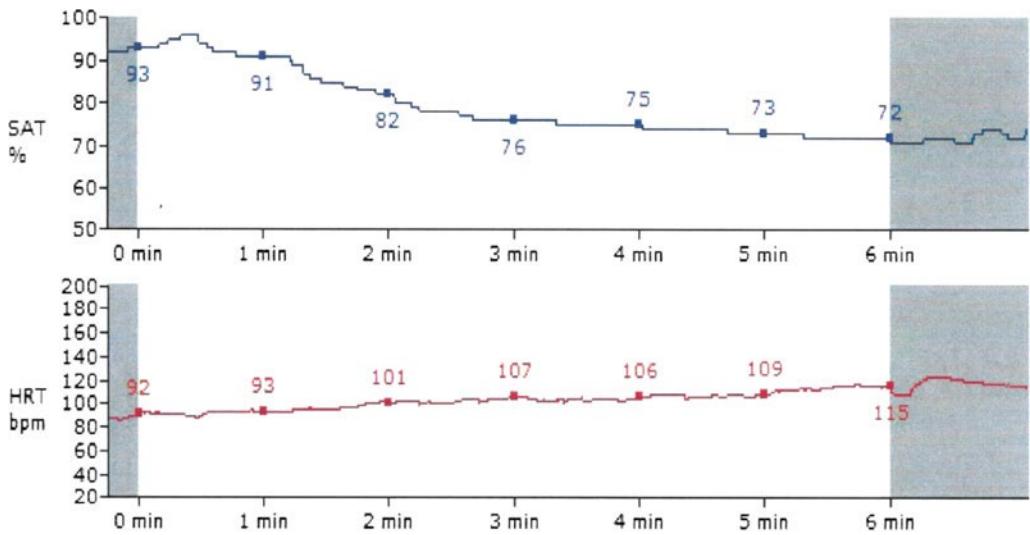
Die folgenden zwei Beispiele geben einen kleinen Überblick über die Untersuchungsmethode.

11.2 • Fallbeispiele

Fallbeispiel 61

68 Jahre, männlich, 167 cm, 77 kg, 28 kg/m²

Das erste Beispiel zeigt den Gehtest eines Patienten mit langjähriger COPD 3 Jahre nach Einleitung der Therapie; die Gehstrecke betrug vor 3 Jahren, also zu Beginn der Therapie, 460 m.



Ergebnisse	
Sauerstoff	Nein
Rollator	Nein
Dyspnoe Test	Borg
Atemnot bei Ruhe	2.0
Atemnot am Ende	4.0
MW SAT bei Ruhe	92 %
MW HRT bei Ruhe	88 bpm
Min. SAT	72 %
MW SAT	80 %
Max. HRT	117 bpm
MW HRT	103 bpm
ΔSAT (Erhol. – Ruhe)	-18 % = -20% RW
ΔHRT (Erhol. – Ruhe)	+20 bpm = +23% RW
Sollwert Distanz	478 m (Enright)
Erreichte Distanz	406 m (85 % SwD)

Abb. 11.1 6MWD Fallbeispiel 61

■ Interpretation der Untersuchung

Die beiden oberen Diagramme zeigen den Verlauf der Sättigung bzw. Pulsrate vor, während und nach der Belastung. Auf der Abszisse ist die jeweilige Zeit in Minuten abgebildet. Die Tabelle unten zeigt einige wichtige Messdaten und ist um relevante Informationen (Sauerstoff und ggf. Flussrate etc.) ergänzt.

Bereits vor Belastung zeigt sich eine leichte Dyspnoe (Borg 2) und leichte Ent-sättigung (92 %). Unter Belastung fällt dann die Sättigung bis auf 72 % deutlich ab, die Herzfrequenz steigt adäquat von 88 auf 117/min an. Das Dyspnoeempfinden hat sich überraschenderweise kaum verschlechtert (Borg 4). Die erreichte Gehstrecke ist mit 406 m (bzw. 85 % vom Soll) nur leicht vermindert bzw. noch im Bereich der Referenz und nur unwesentlich schlechter als vor 3 Jahren.

☞ Eine Desaturation während des Tests, definiert als SpO_2 -Abfall >4 auf $<90\%$, geht mit einer deutlich schlechteren Prognose einher (2,5-faches Risiko in den nächsten

5 Jahren im Vergleich zu Patienten ohne relevanten Sättigungsabfall). Zudem ist die Morbidität (Exazerbationsrisiko, Lungenfunktionsabbau etc.) bei diesen Patienten deutlich erhöht.

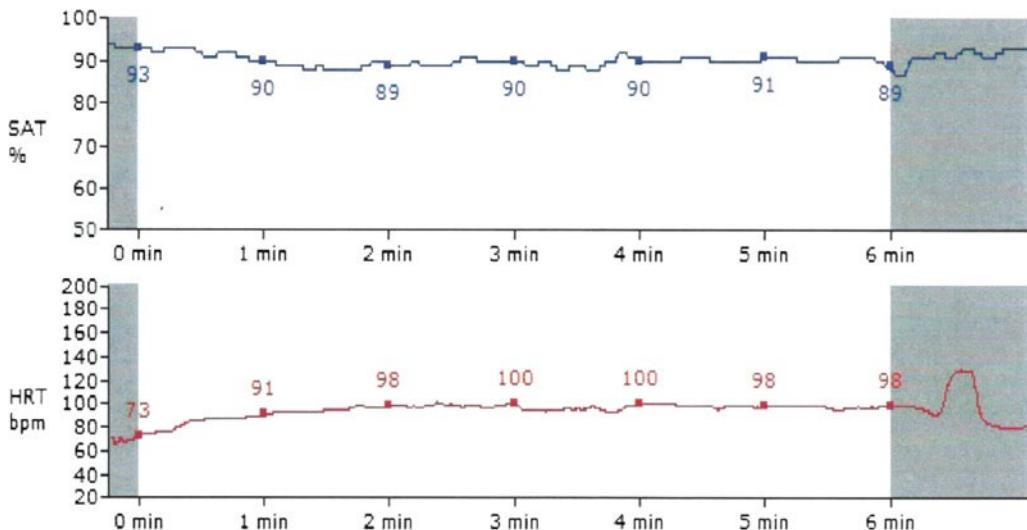


Die Borg-Skala ist ein Instrument zur Quantifizierung des Dyspnoe- oder auch Ermüdungsempfindens. Vor und nach dem Test werden die Patienten aufgefordert, die momentane Luftnot (und ggf. ergänzend die Erschöpfung) anhand der Skala einzustufen:

- 0 – überhaupt keine Atemnot
- 1 – sehr, sehr leicht
- 2 – sehr leicht
- 3 – leicht
- 4 – mäßig
- 5 – schwer
- 6
- 7 – sehr schwer
- 8
- 9
- 10 – sehr, sehr schwer

Fallbeispiel 62**86 Jahre, weiblich, 148 cm, 80 kg, 36 kg/m²**

Die Patientin des folgenden Beispiels klagte über eine schwere Belastungsdyspnoe. Sie erläuterte zudem eindrücklich, dass sie sich seit Monaten kaum noch belasten könne. Die üblichen Untersuchungen (Spirometrie, Echokardiographie etc.) blieben unauffällig, und so wurde ein 6MWT durchgeführt.



Ergebnisse	
Sauerstoff	Nein
Rollator	Nein
Dyspnoe Test	Borg
Atemnot bei Ruhe	0.0
Atemnot am Ende	5.0
MW SAT bei Ruhe	93 %
MW HRT bei Ruhe	69 bpm
Min. SAT	88 %
MW SAT	90 %
Max. HRT	102 bpm
MW HRT	95 bpm
ΔSAT (Erhol. – Ruhe)	-0 % = -0% RW
ΔHRT (Erhol. – Ruhe)	+11 bpm = +16% RW
Sollwert Distanz	291 m (Enright)
Erreichte Distanz	300 m (103 % SwD)

Abb. 11.2 6MWD Fallbeispiel 62

■ Interpretation der Untersuchung

Kein Abfall der leicht verminderten Sättigung (93 %) im Vergleich der Ruhephase vor Beginn mit der Erholungsphase unmittelbar nach Testende (Δ SAT), während die Herzfrequenz unter Belastung adäquat anstieg. Die erreichte Gehstrecke lag mit 300 m über der errechneten Sollwert-Distanz (103 % vom Soll) und war damit absolut altersgerecht. Auffällig war in diesem Zusammenhang der Anstieg der Dyspnoe von 0 auf 5 (Borg).

Ursächlich ergab sich zum einen eine Adipositas, andererseits wurde die Diagnose einer Depression bei der Patientin gestellt. Die Symptomatik besserte sich nach Aufklärung der Patientin und Einleiten einer entsprechenden Therapie.

➤ **Eine Depression ist deutlich gehäuft bei Patienten mit chronischen Lungenerkrankungen und kann die Wahrnehmung beeinflussen. Andererseits kann Kurzatmigkeit bei älteren Menschen aber auch Ausdruck einer depressiven Störung sein, unabhängig vom Bestehen kardiopulmonaler Einschränkungen.**



Der 6MWD liefert nur einen groben Anhalt bezüglich der Leistungsfähigkeit bzw. einer kardiopulmonalen Einschränkung. Zur differenzialdiagnostischen Abklärung einer Belastungsdyspnoe und um eine wesentlich genauere Analyse zu erhalten, ist die Durchführung einer Spiroergometrie angezeigt, die jedoch einen deutlich höheren (zeitlichen und apparativen) Aufwand darstellt.

Weiterführende Literatur

- ATS Committee on Proficiency Standards for Clinical Pulmonary Function Laboratories (Hrsg) (2002) ATS Statement: Guidelines for the Six-Minute Walk Test. Am J Respir Crit Care Med 166: 111–117
- Blazer DG, Hybels CF (2010) Shortness of breath as a predictor of depressive symptoms in a community sample of older adults. Int J Geriatr Psychiatry 25:1080–1084
- Enright PL, Sherrill DL (1998) Reference equations for the six-minute walk in healthy adults. Am J Respir Crit Care Med 158:1384–1387
- Holland AE, Spruit MA, Troosters T et al (2014) An official European Respiratory Society/American Thoracic Society technical standard: field walking tests in chronic respiratory disease. Eur Respir J 44:1428–1446
- Troosters T et al (1999) Six minute walking distance in healthy elderly subjects. Eur Respir J 14:270–274
- Waatevik M et al (2016) Oxygen desaturation in 6-min walk test is a risk factor for adverse outcomes in COPD. Eur Respir J 48:82–91



Die Variable Patient

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

- 12.1 Lungenfunktion in den Phasen des Lebens – 206
- 12.2 Individuelle Lungenfunktionen im Vergleich zu Referenzpopulationn – 208
- 12.3 Erworbene Einflüsse der Lungenfunktion – 209
- Weiterführende Literatur – 210

Es wurde in den vorhergehenden Kapiteln bereits mehrfach betont, dass eine gute Mitarbeit bei der Lungenfunktionsprüfung bzw. die korrekte Durchführung der Messung unabdingbare Voraussetzungen für die Validität der Messung und die Beurteilbarkeit der Ergebnisse sind. Neben der Betrachtung der Lungenfunktion in ihren Details muss aber auch stets der Mensch als Individuum berücksichtigt werden. Die menschliche Lunge durchläuft im Leben verschiedene Phasen (Entwicklung/Wachstum, adulte Lunge, Degeneration) und erfährt zudem unterschiedliche Einflüsse (Ernährungszustand etc.), die bei der Indikationsstellung verschiedener Tests sowie bei der Beurteilung der Lungenfunktionsprüfung zu beachten sind. Die „Variable Patient“ ist oftmals nicht unerheblich und soll daher im Folgenden weiter differenziert werden.

12.1 Lungenfunktion in den Phasen des Lebens

Die strukturelle **Entwicklung der Lunge** ist nach komplexen Prozessen in der Regel nach dem 5. Lebensjahr weitestgehend abgeschlossen. Danach vergrößert sich die Lunge vor allem – gemäß dem allgemeinen Körperwachstum –, die Vitalkapazität und andere Parameter steigen entsprechend an. Etwa zwischen dem 20. und 25. Lebensjahr hat die Lunge schließlich ihre maximale Größe und Funktion erreicht. In der adulten Phase wird die Lungenfunktion jedoch nicht nur von der Konstitution, sondern auch von variablen Einflussgrößen wie Ernährungszustand, Training, Schwangerschaft oder Krankheit beeinflusst. Dies trifft selbstverständlich zum Teil auch bei der kindlichen, vor allem aber auch für die alternde Lunge zu.

Im Rahmen des **Reifungs-** sowie des **physiologischen Alterungsprozesses** lassen sich einige funktionelle Veränderungen nachweisen, die zwar in den Referenzwerten gewissermaßen enthalten sind, jedoch für das tiefergehende Verständnis und die Interpretation der Lungenfunktionskurven und -werte berücksichtigt

werden sollten. So nimmt z. B. die elastische Retraktionskraft und somit auch das Kaliber der exspiratorischen Atemwege bis etwa zum 20. Lebensjahr zu, um dann mit steigendem Alter wieder kontinuierlich abzufallen.

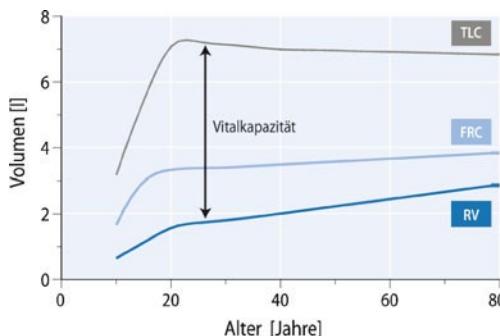
Der exspiratorische Atemwegswiderstand verhält sich entgegengesetzt und nimmt mit abnehmendem Kaliber tendenziell zu. So entspricht die elastische Retraktionskraft eines Kleinkindes in etwa der eines 60-jährigen Menschen. Bei Säuglingen und bei älteren Menschen mit zusätzlichem Emphysem erklärt sich so z. B. die Neigung zu einem exspiratorischen Bronchialkollaps.

Neben der Abnahme der elastischen Retraktionskraft kommt es mit zunehmendem Alter zudem zu einer gewissen Abnahme der Compliance der Brustwand (Versteifung), einer Einschränkung der respiratorischen Muskelkraft sowie zu gewissen parenchymalen Veränderungen. Die meisten altersbezogenen Veränderungen der Lungenfunktion lassen sich durch diese Phänomene erklären.

Während sich die TLC nach dem Erreichen der adulten Größe der Lunge im weiteren Leben nur geringfügig vermindert, kommt es etwa ab dem 25. Lebensjahr meist zu einer stetigen Zunahme des RV mit einhergehender Verkleinerung der VC. Während das RV (zwischen 25 und 75 Jahren) um ca. 50 % zunimmt, fällt die VC um etwa 30 %. In geringerem Ausmaß steigt neben dem RV auch die FRC mit entsprechender Verschiebung der Atemruhelage (Abb. 12.1).

Spirometrisch zeigt sich mit steigendem Alter eine stetige Abnahme des Peak Flow sowie der FEV₁ und FVC (Abb. 12.2). Bei Anwendung der bisherigen Referenzgleichungen wurde bei Menschen über 70 Jahren die Einschränkung einer Atemflussbehinderung tendenziell überschätzt. Da diese Personengruppe in den Referenzpopulationen bisher meist deutlich unterrepräsentiert war, andererseits jedoch einen Großteil unserer Bevölkerung stellt, wurde die Notwendigkeit neuer Referenzwerte immer deutlicher. Der Verlauf der Fluss-Volumen-Kurve eines Menschen erinnert ab ca. 60 Jahren häufig an Verände-

12.1 • Lungenfunktion in den Phasen des Lebens



■ Abb. 12.1 Änderungen der Lungenvolumina im Alter. Altersabhängigkeit der Vitalkapazität, der Totalkapazität (TLC), der funktionellen Residualkapazität (FRC) und des Residualvolumens (RV) für die männliche Bevölkerung. (Aus Kunzelmann und Thews 2011)

rungen im Sinne eines „small airways disease“. Diese Veränderungen finden sich jedoch auch bei gesunden, lebenslangen Nichtrauchern und haben keinen Krankheitswert.

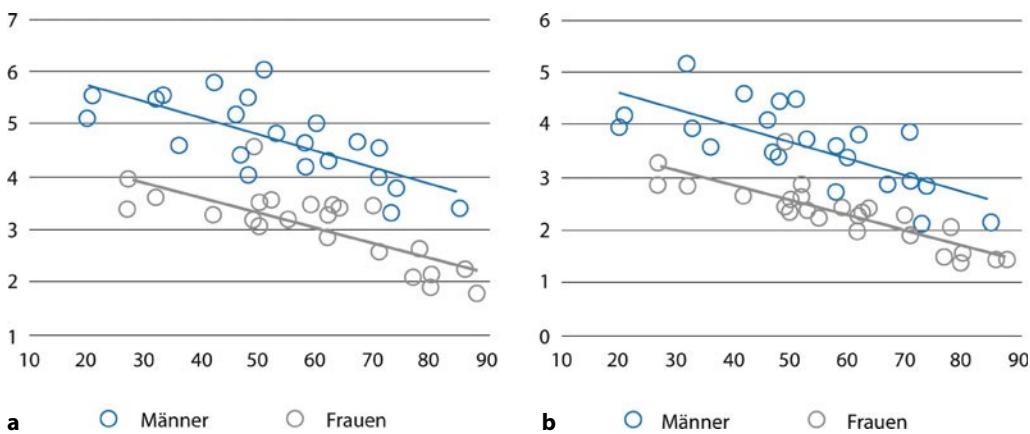
Seit wenigen Jahren gibt es mit den GLI-Werten (Global Lung Initiative, GLI 2012 mit fast 75.000 Patienten zwischen 3 und 95 Jahren) valide spirometrische Referenzwerte für alle Altersgruppen, die sich immer weiter verbreiten.

Die Anwendung des Quotienten $FEV_1/FVC < 70\%$ zur Definition der Obstruktion ist bei älteren Patienten nicht unproblematisch. Die relative Einsekundenkapazität ($FEV_1/$

VC) ist altersabhängig, und ein Wert von 70 % entspricht lediglich bei Patienten zwischen dem 40. und 50. Lebensjahr dem Wert des LNN (Abb. 12.3), d. h. bei jüngeren Patienten ist der Wert meist falsch negativ, bei älteren hingegen häufig falsch positiv. Die Umstellung der Definition einer Obstruktion auf das System der Untergrenze der Normalbefunde (LLN; gemäß den anderen wichtigen Parametern FEV_1 etc.) wurde – trotz Kenntnis der erläuterten Problematik – zugunsten einer einfacheren Anwendbarkeit der fixen Ratio 0,7 bzw. 70 % in den aktuellen COPD-Leitlinien der führenden Gesellschaften bisher nicht konsequent umgesetzt.

Die **Lungenfunktionsdiagnostik im Kindesalter** ist meist eine besondere Herausforderung. Mit befriedigender Qualität ist eine Lungenfunktionsdiagnostik im eigentlichen Sinne spätestens ab dem Schulalter möglich. Hierbei wird die Mitarbeit bei der Spirometrie meist durch eine visuelle Computeranimation (z. B. Auspusten einer Kerze etc.) verstärkt. Die für Erwachsene gültigen Qualitätskriterien können meist nach dem 10. Lebensjahr angewandt werden.

Während **bei Säuglingen** mittels Sedierung und speziellem Equipment Lungenfunktionswerte ermittelt werden können, ist das Alter zwischen 2 und 5 Jahren aufgrund der entwicklungsbedingten Grenzen der Koope-



■ Abb. 12.2 a FVC (Liter) in Abhängigkeit vom Alter (Jahre), (n = 50; 20–88 Jahre). b FEV_1 (Liter) in Abhängigkeit vom Alter (Jahre), (n = 50; 20–88 Jahre). (Daten von Bösch 2012 erhoben)

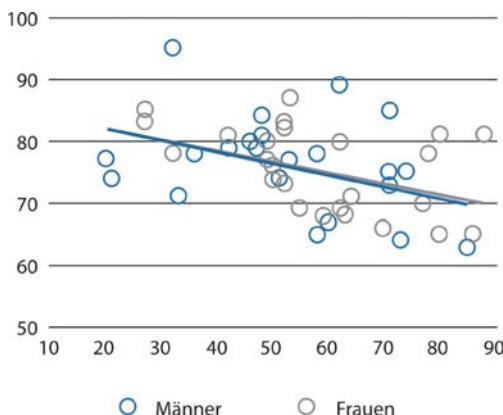


Abb. 12.3 FEV₁/VC (%) in Abhängigkeit vom Alter (Jahre), (n = 50; 20–88 Jahre). (Daten von Bösch 2012 erhoben)

ration besonders schwierig und erfordert ein hohes Maß an Erfahrung. Kleinkinder haben zudem in Relation zum Lungenvolumen recht große Atemwege und deshalb kurze Exspirationszeiten, sodass die FEV₁ meist nicht hilfreich ist. Daher wird die zusätzliche Angabe der FEV_{0,5} und der FEV_{0,75} empfohlen. Zudem ist die visuelle Inspektion des abfallenden Schenkels der Exspirationskurve obligat, um – unabhängig von den Werten – eine Obstruktion zu erkennen.

Prinzipiell ist auch eine Bodyplethysmografie möglich und wünschenswert. Allerdings bedeutet das Einschließen in der Kabine für die Kinder häufig unnötigen Stress. Alternativ wird daher, unter zudem weitaus geringerem technischem Aufwand, bei Kindern eine Widerstandsmessung mittels Oszillometrie (R_{os}) oder Unterbrechermethode (R_{occ}) durchgeführt.

Bei älteren Menschen kann die Durchführung ebenfalls schwierig werden, da nicht selten gewisse Einschränkungen (Schwerhörigkeit, kognitive Einbußen, eingeschränkte Mobilität etc.) eine optimale Durchführbarkeit bzw. Mitarbeit verhindern. Dies sollte bei der Untersuchung stets bedacht werden. Somit ist die Lungenfunktionsdiagnostik in der Entwicklungs- sowie Degenerationsphase der Lunge jeweils durch verschiedene Herausforderungen erschwert bzw. eingeschränkt.

12.2 Individuelle Lungenfunktionen im Vergleich zu Referenzpopulationen

Wie bei adulten Personen, müssen die Ergebnisse von Kindern – auch bei Werten im Referenzbereich – besonders kritisch und stets im Zusammenhang mit den klinischen Beschwerden beurteilt werden. Für Kinder fanden meist die Referenzgleichungen von Zapletal aus dem Jahre 1977 Anwendung. Wie bei den Erwachsenen werden auch hier nun die GLI-Werte empfohlen. Generell ist aber die unreflektierte Anwendung jeglicher Referenzformeln nicht unproblematisch (zu den Referenzwerten ▶ Abschn. 2.1).

Bei adulten Personen werden zum Teil noch die Referenzwerte der EGKS in der letzten Überarbeitung von 1993 angewandt. Die Referenzpopulation beinhaltet ein Kollektiv von Menschen zwischen 18 und 70 Jahren und einer Körpergröße von 155–195 cm (Männer) bzw. 145–180 cm (Frauen). Da die Patienten zwischen 18 und 25 Jahren näherungsweise gleiche Werte aufweisen, wird in dieser Altersgruppe das Alter von 25 Jahren in die Referenzformeln eingesetzt. Die Population >65 Jahre war hingegen nur sehr schwach erfasst. Folglich handelt es sich bei jüngeren oder älteren Menschen bzw. Personen, die größer oder kleiner sind, lediglich um interpolierte Vergleichswerte, die besonders kritisch hinterfragt werden müssen. Im Gegensatz zu den EGKS-Werten zeigen die aktuellen GLI-Werte um bis zu 10 % höhere Referenzwerte für die FVC und FEV₁ ab dem mittleren Lebensalter. Zudem wird eine recht große Streuung der Messwerte für Kinder und ältere Menschen deutlich, daraus ergibt sich die Notwendigkeit der individuellen Berechnung der Normwerte (s. auch ▶ Kap. 2).

Die eingeschränkte Mitarbeit eines Patienten sollte nicht pauschal als Kommunikationsfehler oder gar mangelnde Kooperationsbereitschaft gewertet werden. Selbst für erfahrene Untersucher ist es mitunter unmöglich, mit dem Patienten eine makellose Untersuchung

durchzuführen. Alters- oder auch krankheitsbedingte Einschränkungen machen es dem Patienten teilweise sehr schwer, die geforderten Manöver ohne „Schönheitsfehler“ durchzuführen. Handelt es sich z. B. um einen 80-jährigen COPD-Patienten mit schwerer Dyspnoe, Nervosität und Unruhe sowie einem gewissen Grad an Schwerhörigkeit, könnte es sein, dass eine korrekte Diffusionstestung den Patienten schlichtweg überfordert. Hier sollten der Nutzen der Untersuchung hinterfragt und/oder entsprechende Umstände bei der Beurteilung etwaiger Ergebnisse mitberücksichtigt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten: Bei allen Lungenfunktionsprüfungen wird ein individueller Mensch untersucht und in definierten Parametern seiner Lungenfunktion erfasst. Die Befundung über den schlichten Vergleich der Werte mit denen der Referenztabelle kann einem so differenzierten Individuum in seinen unterschiedlichen Lebensphasen und gesundheitlichen Zuständen nur unzureichend gerecht werden. Dennoch sind wir darauf angewiesen, eine gewisse Standardisierung und Vereinfachung bei den z. T. komplexen Untersuchungen unserer Patienten anzuwenden. Die Befundqualität gewinnt jedoch, wenn man klinische und patientenspezifische Informationen einbezieht.

Training (insbesondere Schwimmen) einen positiven Einfluss auf die VC und die FEV₁ zu haben. Bei Erwachsenen scheint körperliche Aktivität die altersbedingte physiologische Rückbildung der Lungenfunktion in gewisser Weise abzumildern. Zudem gibt es Hinweise, dass ein gezieltes körperliches Training bei älteren Menschen (>60 Jahren) die Lungenfunktion (VC, FEV₁) leicht verbessern kann.

Die Lungenfunktion ist auch vom **Ernährungszustand** abhängig. Bei übergewichtigen oder adipösen Menschen ist der kontinuierliche Funktionsverlust von VC und FEV₁ (insbesondere bei weiterer Gewichtszunahme) überproportional im Vergleich zu Menschen mit einem BMI <26 kg/m², hält sich jedoch meist im Rahmen normaler Referenzwerte. Den größten Einfluss hat ein steigender BMI auf das ERV bzw. die FRC. ERV und FRC fallen exponentiell mit steigendem BMI. Das RV und die TLC vermindern sich bei Adipositas hingegen meist kaum. Die Empfindlichkeit von ERV und FRC trifft nicht nur für gesunde Menschen zu, sondern auch für Patienten mit COPD unterschiedlicher Ausprägung. Bei COPD-Patienten konnte durch eine Erhöhung der IC und der IC/TLC mit steigendem BMI zudem ein positiver Effekt auf eine etwaige relative Hyperinflation gezeigt werden.

Der Einfluss einer **Schwangerschaft** auf die kardiopulmonale Funktion ist tiefgreifend und faszinierend zugleich. Bereits während des 1. Trimenons beklagen die meisten Frauen eine gewisse Belastungsdyspnoe, und die Atemfrequenz und vor allem das Atemzugvolumen steigen merklich. Im Laufe der Schwangerschaft steigt das Minutenvolumen um bis zu 50 %. Blutgasanalytisch lassen sich damit einhergehend ein Abfall des pCO₂ (auf ca. 30 mmHg) sowie ein leichter Anstieg des pO₂ feststellen. Während die Vitalkapazität weitestgehend stabil bleibt, kommt es im Verlauf der Schwangerschaft zu einem zunehmenden Abfall der FRC (ERV und RV) um ca. 20 % mit konsekutivem Anstieg der IC (bei weitestgehend konstanter TLC). Ursache ist ein komplexes Zusammenspiel aus biochemischen und mechanischen Veränderungen im Laufe der hormonellen Veränderungen und der Uterusvergrößerung.

12.3 Erworben Einflüsse der Lungenfunktion

Die Erfassung des Einflusses einer Atemwegs- oder Lungenerkrankung auf die Lungenfunktion ist der häufigste Grund, aus dem wir eine Lungenfunktionsdiagnostik durchführen. Es gibt jedoch noch eine Reihe weiterer, nicht-pathologischer Einflussgrößen auf die Lungenfunktion, die es für eine differenzierte Betrachtung zu beachten gilt.

Bei deutlicher Abhängigkeit der kardiopulmonalen Leistungsfähigkeit vom **körperlichen Training** bleiben die klassischen Parameter Vitalkapazität und Einsekundenkapazität durch Trainingsmaßnahmen bei gesunden Erwachsenen nahezu unverändert. Lediglich bei Heranwachsenden scheint ein starkes körperliches

Weiterführende Literatur

Verwendete Literatur

- Kunzelmann K, Thews O (2011) Lungenatmung. In: Schmidt, Lang, Heckmann (Hrsg) Physiologie des Menschen (Kap. 32). Springer, Berlin Heidelberg
- Weiterführende Literatur**
- Andrew GM et al (1972) Heart and lung functions in swimmers and nonathletes during growth. *J Appl Physiol* 32:245–251
- Cheng YJ et al (2003) Effects of physical activity on exercise tests and respiratory function. *Br J Sports Med* 37:521–528
- Holmen TL et al (2002) Physical exercise, sports, and lung function in smoking versus nonsmoking adolescents. *Eur Respir J* 19:8–15
- Huang G, Osnness W (2005) Changes in pulmonary function response to a 10-week controlled exercise program in sedentary elderly adults. *Percept Mot Skills* 100:394–402
- Janssens JP (2005) Aging of the respiratory system: impact on pulmonary function tests and adaptation to exertion. *Clin Chest Med* 26:469–484
- Janssens JP, Pache JC, Nicod LP (1999) Physiological changes in respiratory function associated with ageing. *Eur Respir J* 13:197–205

- Kippelen P et al (2005) Effect of endurance training on lung function: a one year study. *Br J Sports Med* 39:617–621
- LoMauro A, Aliverti A (2015) Respiratory physiology of pregnancy. *Breathe* 11:297–301
- Milne JA (1979) The respiratory response to pregnancy. *Postgrad Med J* 55:318–324
- O'Donnell DE et al (2011) Effects of BMI on static lung volumes in patients with airway obstruction. *Chest* 140:461–468
- Pelkonen M et al (2003) Delaying decline in pulmonary function with physical activity. *Am J Respir Crit Care Med* 168:494–499
- Rizk NW et al (2010) The lungs in obstetric and gynecologic disease. In: Broaddus VC et al (Hrsg) Murray and Nadel's Textbook of respiratory medicine, 5. Aufl. Elsevier Saunders, Philadelphia, USA
- Salome CM et al (2010) Physiology of obesity and effects on lung function. *J Appl Physiol* 108:206–211
- Thyagarajan B et al (2008) Longitudinal association of body mass index with lung function: The CARDIA Study. *Respir Res* 9:31–40
- Zapletal A et al (1977) Die Bedeutung heutiger Methoden der Lungenfunktionsdiagnostik zur Feststellung einer Obstruktion der Atemwege bei Kindern und Jugendlichen. *Z Erkr Atmungsorgane* 149:343–371



Befundung der Lungenfunktionsprüfung

Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

- 13.1 Voraussetzungen einer validen Lungenfunktionsdiagnostik – 212
- 13.2 Interpretationsstrategien – 212
- Weiterführende Literatur – 214

13.1 Voraussetzungen einer validen Lungenfunktionsdiagnostik

Eine valide Lungenfunktionstestung setzt voraus, dass der Befunder profunde Kenntnisse über die Lungenfunktion, etwaige Erkrankungen und die Testmethoden besitzt.

Eine erfolgreiche Lungenfunktionsdiagnostik ist nicht nur von einer guten Interpretation der einzelnen Untersuchung, sondern auch von der richtigen Auswahl des Testes und des Testzeitpunktes, d. h. einer gewissen Strategie, abhängig.

Die Funktionsmessung kann durch verschiedene Faktoren beeinflusst sein, diese sollten stets bedacht und so gut wie möglich ausgeschlossen werden. Folgende Faktoren können die Messung stören und eine valide Interpretation unmöglich machen:

- technischer Defekt der Messapparatur (Gerät),
- Fehler bei der Kalibration (Untersucher, Gerät),
- Fehler bei der Durchführung (Untersucher),
- Fehler bei der Mitarbeit (Patient),
- Fehler bei der Befundung (Arzt).

Um etwaige Störeinflüsse zu erkennen und möglichst auszuschließen, ist es hilfreich, sich im Rahmen der Befundung folgende Fragen zu stellen:

- Ist die Messung plausibel?
- Entspricht die Durchführung/Mitarbeit den Vorgaben?

Die Spirometrie ist zweifelsohne die Methode der Lungenfunktionsprüfung, die am häufigsten angewandt wird. Ihr besonderer Wert liegt in der einfachen Durchführbarkeit und der Fähigkeit, Ventilationsstörungen auszuschließen. Der fehlende Nachweis einer Ventilationsstörung darf aber nicht mit dem generellen Ausschluss einer Lungenfunktionsstörung gleichgesetzt werden. Bei der

Befundung sollte sich der Arzt darüber im Klaren sein, dass sich die Lungenfunktion aus vielen Teilstufen zusammensetzt und die Untersuchungen nur jeweilige Teilespekte widerspiegeln.

Zudem ist eine Messung nur eine jeweilige Momentaufnahme im Gefüge individueller Variationen, intraindividueller Schwankungen und auch wechselhafter pathophysiologischer Änderungen.

Außerdem sind tiefgreifende Kenntnisse und eine gewisse Erfahrung notwendig, um seltene Besonderheiten zu erkennen, die Pathologien vortäuschen oder auch maskieren können.

13.2 Interpretationsstrategien

Im Laufe der letzten 30 Jahre wurden von verschiedenen Fachgesellschaften unterschiedliche Interpretationskonzepte vorgestellt. Allen Strategien gemeinsam ist, dass sie jeweils Schwachstellen aufweisen und nur eine grobe Hilfsstruktur bieten können. Letztlich ist ein algorithmischer Ansatz eines so komplexen Themas immer mit Vereinfachungen verbunden, die nicht alle Konstellationen berücksichtigen können. Dies muss bei der Nutzung solcher Interpretationshilfen stets bedacht werden.

Von einer internationalen Arbeitsgruppe (ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing) wurde vor einigen Jahren ein vereinfachter Algorithmus zur Umsetzung der Lungenfunktionsprüfung in die klinische Praxis veröffentlicht. Hierbei bilden VC, FEV₁, FEV₁/VC und TLC die wegweisenden Basisparameter. Eine normale relative Einsekundenkapazität (FEV₁/VC) schließt bei zusätzlich normaler Vitalkapazität (VC) eine Ventilationsstörung aus. Ergänzend ist jedoch eine Diffusionstestung notwendig, um eine pulmonalvaskuläre Störung auszuschließen. Eine Diffusionstestung hilft auch bei der Differenzierung einer Restriktion und kann in Fällen einer Obstruktion weitere Hinweise auf das

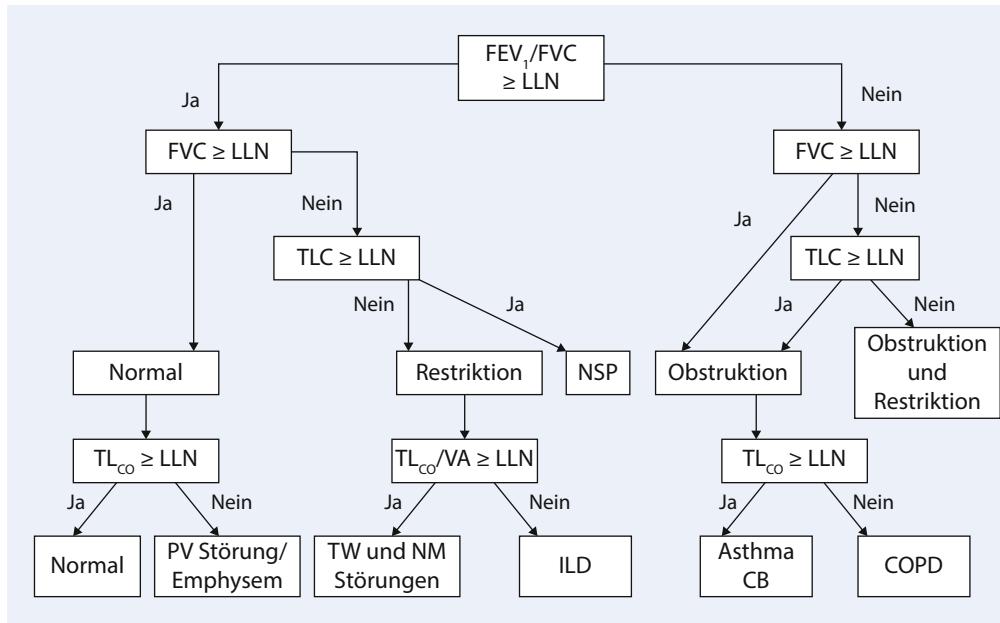


Abb. 13.1 Vereinfachter Lungenfunktionsalgorithmus für die klinische Praxis. (LLN „lower limit of normal“ [<5. Perzentile], PV pulmonal vaskulär, TW Thoraxwand, NM neuromuskulär, ILD „interstitial lung disease“, CB chronische Bronchitis, COPD, NSP „nonspecific pattern“). (Mod. nach Pellegrino et al. 2005)

Vorliegen eines Emphysems oder eines Asthma bronchiale geben.

In einer modifizierten Version (Abb. 13.1) wird im Rahmen der internationalen Vereinheitlichung und der neuen Referenzgleichungen die FVC bzw. FEV₁/FVC anstatt der maximalen VC genutzt.

Zudem wird für die Konstellation einer normalen FEV₁/FVC, jedoch verminderten FVC und normalen TLC der Begriff des „non-specific pattern“ gewählt. Hierbei handelt es sich letztlich um eine isolierte relative Überblähung, die nur zum Teil durch eine rein periphere/okkulte Obstruktion begründet ist („small airways obstruction syndrome“). Des Weiteren wird bei der Konstellation einer isolierten DL_{CO}-Verminderung (bei normaler Spirometrie und Volumenmessung) neben den pulmonal vaskulären Ursachen das Em-

physem als mögliche Ursache ergänzt. Zur Differenzierung der Restriktion haben wir bewusst den Transferkoeffizienten für den Transferfaktor zur Differenzierung der Restriktion ausgetauscht. Im Grunde müsste die Konstellation TLCO, KCO und VA beinhalten (► Kap. 6).

Ein solcher Algorithmus dient der vereinfachten Darstellung der Konstellationen und erhebt nicht den Anspruch auf eine hundertprozentige Sicherheit, da eine komplexere Darstellung den Rahmen sprengen würde und einiges nur unzureichend abgebildet werden kann.

Nicht integriert in den Algorithmus sind die Blutgasanalyse und die Mundverschlussdruckmessung, die jedoch häufig einen wichtigen Bestandteil der Beurteilung der Lungenfunktionseinschränkung bzw. Klärung der Genese einer Funktionsstörung darstellen.

Weiterführende Literatur

Verwendete Literatur

Pellegrino R et al (2005) Series „ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing“: Interpretative strategies for lung function tests. Eur Respir J 26:948–968

Weiterführende Literatur

Criée CP et al (2015) Leitlinie zur Spirometrie der Deutschen Atemwegsliga/Deutschen Gesellschaft für

Pneumologie und Deutschen Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin. Pneumologie 69:147–164

Hyatt RE (2009) Conditions associated with an abnormal nonspecific pattern of pulmonary function tests. Chest 135:419–424

Iver VN et al (2011) The nonspecific pulmonary function test – longitudinal follow-up and outcomes. Chest 139:878–886

Miller MP et al (2011) Interpreting lung function data using 80 % predicted and fixed thresholds misclassifies more than 20 % of patients. Chest 139:52–59



Gemischter Übungsteil

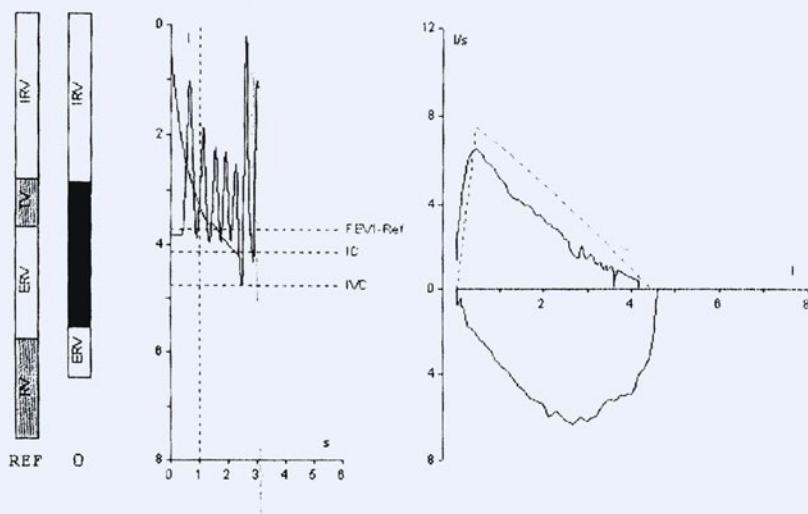
Dr. Dennis Bösch, Prof. Dr. Carl-Peter Criée

In diesem Kapitel sind die verschiedenen Untersuchungen der Lungenfunktionsprüfung als Kasuistiken in Übungsform nochmals zusammengestellt. Versuchen Sie, die Befunde selbstständig zu erheben, und vergleichen Sie die Ergebnisse anschließend mit den Interpretationsvorschlägen.

Gehen Sie hierbei, wie in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt, systematisch vor und blättern Sie ggf. zurück und wiederholen das entsprechende Kapitel. Sicherheit in der Befundung erhält man letztlich nur durch konstante Übung. Mit der Zeit können dann zunehmend auch differenzierte Nuancen in die Beurteilung integriert werden.

Fallbeispiel 63**15 Jahre, männlich, 174 cm, 84 kg, BMI 28 kg/m²**

Das Beispiel zeigt die Verlaufskontrolle eines Jungen mit bekanntem Asthma bronchiale unter laufender Medikation mit inhalativem Kortikosteroid.

**Statische Lungenvolumina**

Parameter	Einheit	Soll	Wert	%Soll
IVC	l	4.48	4.56	102
ERV	l	1.44	0.64	44
IRV	l	2.06	2.10	102
IC	l	2.87	3.93	137

Dynamische Lungenvolumina

FVCex	l	4.51	4.12	91
FEV1	l	3.73	3.13	84
FEV1/IVC	%	84	68	81
FEV1/FVCex	%	76		
PEF	l/s	7.51	6.53	87
MEF75	l/s	6.46	5.17	80
MEF50	l/s	4.58	3.22	70
MEF25	l/s	2.37	1.67	70
MEF25-75	l/s	4.17	2.77	67

Abb. 14.1 Fallbeispiel 63

■ Interpretation

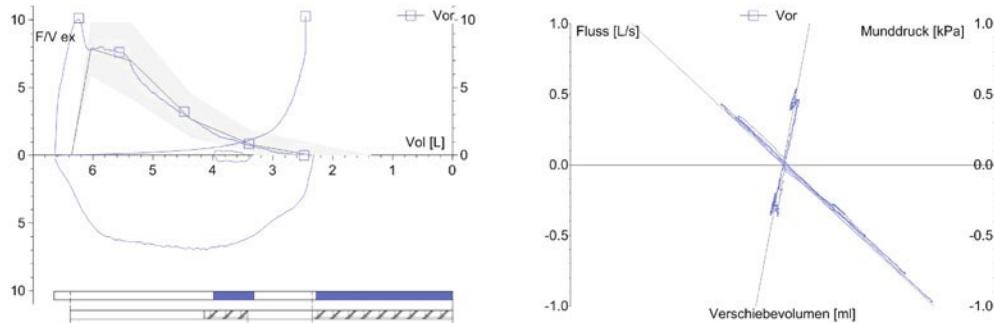
Gute Mitarbeit. Leichte Obstruktion (s. FEV₁/IVC, PEF, FEV₁, MEF_{25–75}) und leicht verschobene Atemmittellage (vermindertes ERV), passend zum vorbekannten Asthma bronchiale und der Übergewichtigkeit.

Mittels Bronchospasmolyse (2 Hub Salbutamol) könnten die Reversibilität und das Bes-

serungspotenzial gezeigt werden. Durch das Führen eines PEF-Protokolls kann zudem die Variabilität aufgezeigt und die Therapieadhärenz verbessert werden, die bei Jugendlichen oftmals eingeschränkt ist.

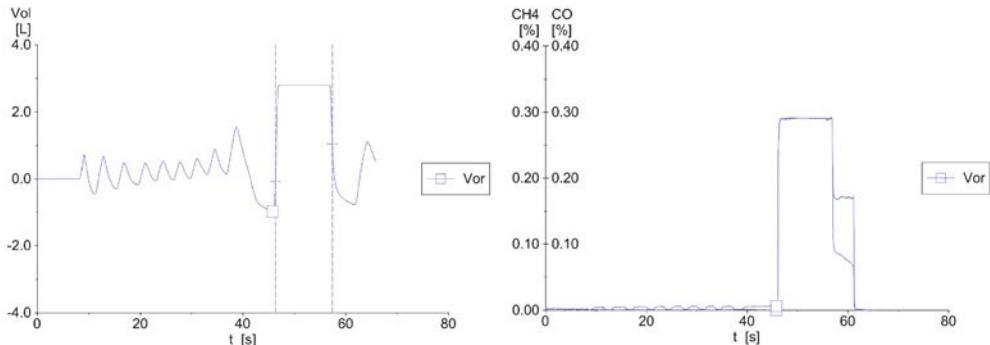
Fallbeispiel 64**62 Jahre, männlich, 169 cm, 102 kg, BMI 36 kg/m²**

Der Patient im nachfolgenden Beispiel kam zur Kontrolluntersuchung einer vorbeschriebenen restriktiven Ventilationsstörung bei Sarkoidose. Unter einer Kortisonbehandlung war seine Belastungsdyspnoe zwischenzeitlich komplett rückläufig.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	4.03	3.06	4.38	108.4				●			Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.03	3.06	4.17	103.4				●			Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.14	2.34	3.43	109.4				●			Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	76.05	64.26	82.22	108.1				●			ECCS (1993)
PEF	L/s	7.86	5.87	10.14	128.9					●		ECCS (1993)
FEF 25	L/s	6.96	4.15	7.61	109.4				●			ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.63	1.26	3.22	122.4				●			Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.77	0.30	0.86	112.3				●			Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	0.44	37.1							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.12	39.8							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	0.69	58.3							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.19	62.5							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	2.29	269.7							ECCS (1983)
TLC	L	6.42	5.27	6.66	103.6				●			ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.42	2.44	3.32	97.0				●			ECCS (1993)
ERV	L	1.07	1.07	1.04	96.6							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.35	1.67	2.28	97.2				●			ECCS (1993)
IC	L	2.85	2.85	3.34	117.2							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	38.14	29.16	34.27	89.9				●			ECCS (1993)

Abb. 14.2 Fallbeispiel 64: Spirometrie/Bodyplethysmografie



		Soll	Soll uG	Ist	% vS	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	8.65	6.33	7.87	90.9			●			ECCS (1993)
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.35	0.91	1.35	100.3			●			ECCS (1993)
VA_SB	L	6.27	6.27	5.82	92.8						JAEGER (1994)
VIN_SB	L	3.92	3.00	3.77	96.2			●			ECCS (1993)
TA	s			11.1							
TLC_SB	L	6.42	5.27	5.97	93.0			●			ECCS (1993)
FRC_SB	L	3.42	2.44	3.26	95.4			●			ECCS (1993)
RV_SB	L	2.35	1.67	2.20	93.7			●			ECCS (1993)
RV%RV_PL	%			96.4							
Hb	g(Hb)/dL			15.10							
%COHb	%			0.00							
DLCOcSB	mmol/(min*kPa)	8.65	6.33	7.76	89.7			●			ECCS (1993)
KCOc_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.35	0.91	1.33	98.9			●			ECCS (1993)

Abb. 14.3 Fallbeispiel 64: Diffusionsmessung

■ Interpretation

Spirometrie/Bodyplethysmografie Gute Mitarbeit. Keine Ventilationsstörung, d. h. keine Obstruktion oder Restriktion nachweisbar. Werte im oberen Normbereich sind etwas überraschend in Anbetracht der Vorgeschiede und der Adipositas.

Die leichte Inhomogenität des absteigenden Exspirationsschenkels in der Fluss-Volumen-Kurve ist ohne Krankheitswert.

Diffusionsmessung Ausreichend gute Mitarbeit. Die V_{in} ist in Anbetracht der Vitalkapazität von 4,4 l grenzwertig niedrig.

Keine Transferstörung und kein Anhalt für eine Verteilungsstörung.

Entsprechend der klinischen Besserung kann eine vollständige Rückbildung der vorgeschriebenen Ventilationsstörung gezeigt werden.

Fallbeispiel 65**57 Jahre, männlich, 174 cm, 84 kg, BMI 28 kg/m²**

Im nächsten Beispiel ist die Bodyplethysmografie/Spirometrie eines Patienten mit langjähriger COPD gezeigt. Der Patient war zum Untersuchungszeitpunkt klinisch stabil, und die Messung wurde unter laufender Medikation durchgeführt.

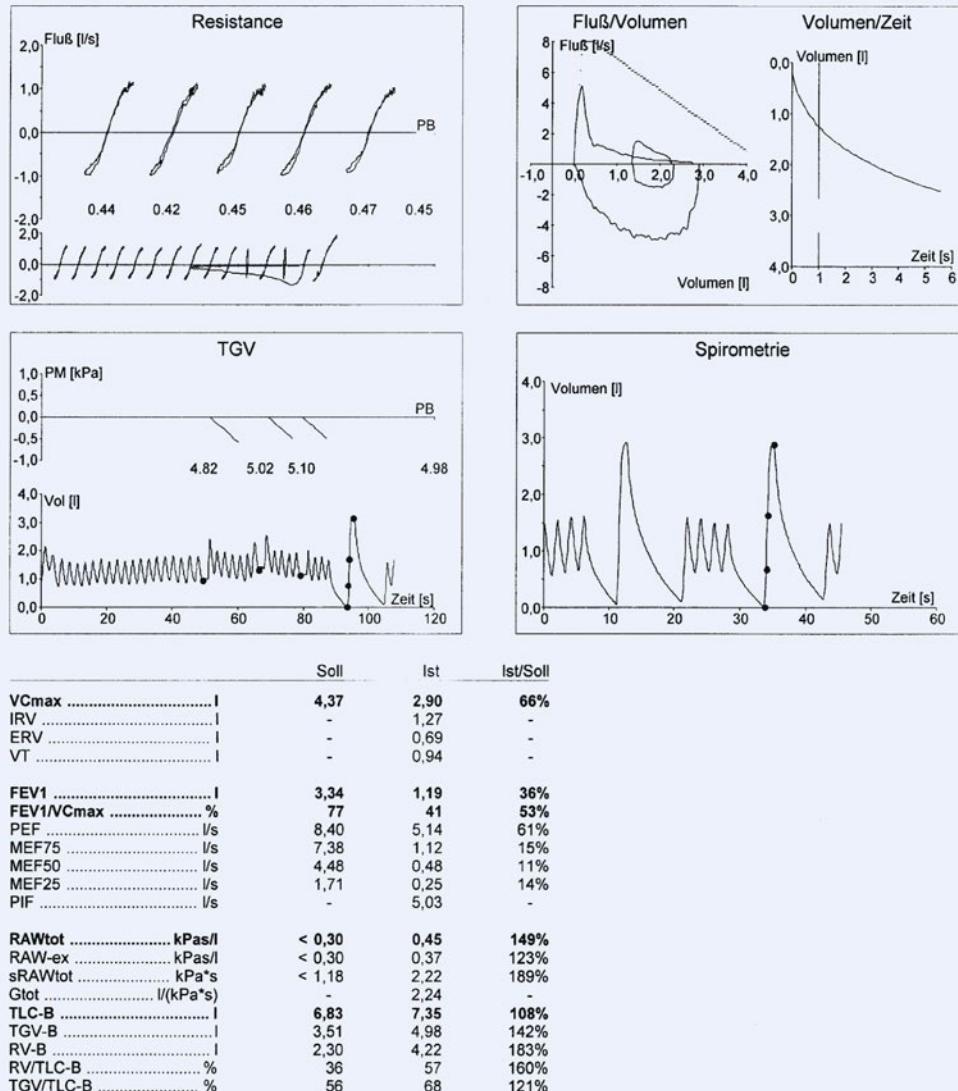


Abb. 14.4 Fallbeispiel 65: Spirometrie/Bodyplethysmografie

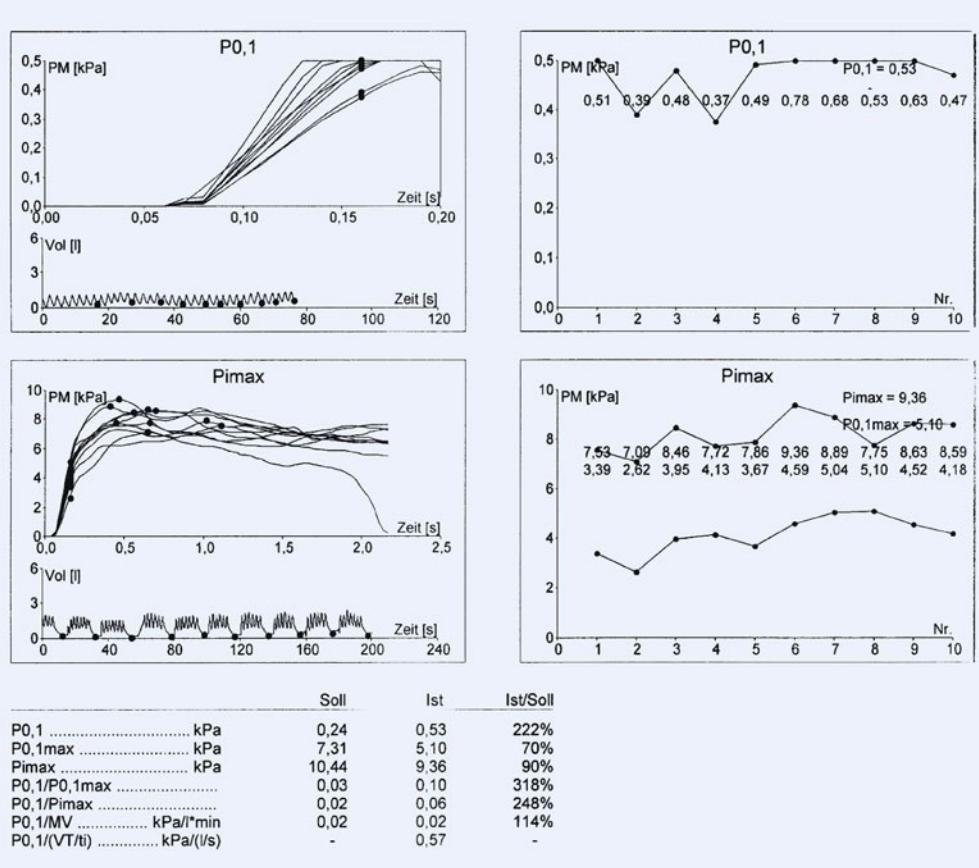


Abb. 14.5 Fallbeispiel 65: Mundverschlussdruckmessung

14

■ Interpretation

Spirometrie/Bodyplethysmografie Gute Mitarbeit. Typischer COPD-Aspekt. Schwergradige Obstruktion und schwergradige Überblähung mit deutlicher Minderung der Reserve (VC).

Mundverschlussdruckmessung Gute Mitarbeit. Erhöhte Last bei normaler Kapazität. Insgesamt leicht erhöhte Beanspruchung der Atempumpe.

Fallbeispiel 66**75 Jahre, weiblich, 164 cm, 71 kg, BMI 26 kg/m²**

Das Beispiel zeigt die arterielle BGA einer Patientin, die mit akutem Myokardinfarkt, exazerbierter COPD und Nierenversagen aufgenommen wurde.

Analyst	Ergebnis	Einheit	Referenzbereich
Art der BGA	art.		
pH	7.248 -		7.37-7.43
pCO ₂	51.9 +	mmHg	35-45
pO ₂	66.3 -	mmHg	75-95
	Referenzbereich arteriell: 71 - 104 mmHg		
	venös : 36 - 44 mmHg		
Bicarbonat	22.1	mmol/l	22-26
Std.-Bicarbonat	19.8 -	mmol/l	22-26
Basen-Abweichung	-5.6 -	mmol/l	-2.5-2.5
O ₂ -Gehalt	18.0	ml/dl	15-23
O ₂ -Sättigung	89.0 -	Vol%	92.0-98.5
Temperatur	37.0	°C	36-37
Hämoglobin (BGA)	14.6	g/dl	12-18
CO ₂ gesamt	23.7	mmol/l	23-28

Abb. 14.6 Fallbeispiel 66: Blutgasanalyse

■ **Interpretation**

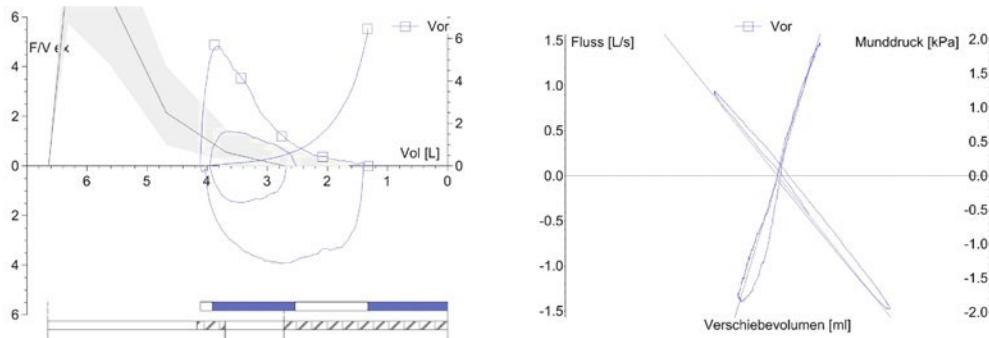
Gemischt respiratorisch-metabolische Azidose bei ventilatorischer Insuffizienz mit mittelgradiger Hyperkapnie sowie vorliegender Niereninsuffizienz und Myokardinfarkt. Zudem al-

tersentsprechende Normoxämie (bei unklarer Atemluft).

Auf Nachfrage wurde die BGA unter Sauerstoffgabe mit einer Flussrate von 2 l/min durchgeführt.

Fallbeispiel 67**75 Jahre, männlich, 176 cm, 65 kg, BMI 21 kg/m²**

Nachfolgend ist die Untersuchung eines Mannes mit leichter Dyspnoe und der Frage nach vorliegender Obstruktion gezeigt.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX L	3.93	2.87	2.79	70.8								Quanjer GLI (2012)
FVC L	3.93	2.87	2.79	70.8								Quanjer GLI (2012)
FEV 1 L	2.94	2.07	1.82	61.9								Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC %	75.28	61.04	65.31	86.8								Quanjer GLI (2012)
PEF L/s	7.73	5.74	4.89	63.2								ECCS (1993)
FEF 25 L/s	6.96	4.15	3.55	51.0								ECCS (1993)
FEF 50 L/s	2.14	0.86	1.21	56.2								Quanjer GLI (2012)
FEF 75 L/s	0.55	0.19	0.38	68.5								Quanjer GLI (2012)
sR eff kPa*s	1.18	1.18	0.91	77.5								ECCS calculated (1983)
R eff kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.28	94.1								ECCS (1983)
sR tot kPa*s	1.18	1.18	1.01	85.4								ECCS calculated (1983)
R tot kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.31	103.7								ECCS (1983)
sG eff 1/(kPa*s)	0.85	0.85	1.10	129.1								ECCS (1983)
G eff (L/s)/kPa	3.33	3.33	3.54	106.3								ECCS calculated (1983)
TLC L	6.98	5.83	4.11	58.9								ECCS (1993)
FRCpleth L	3.70	2.72	2.54	68.6								ECCS (1993)
ERV L	0.98	0.98	1.21	123.8								ECCS calculated (1993)
RV L	2.73	2.05	1.33	48.8								ECCS (1993)
IC L	3.01	3.01	1.57	52.3								ECCS calculated (1993)
RV % TLC %	43.21	34.23	32.32	74.8								ECCS (1993)

Abb. 14.7 Fallbeispiel 67: Spirometrie/Bodyplethysmografie

■ **Interpretation**

Gute Mitarbeit. Die Spirometrie/Bodyplethysmografie zeigt als Befund eine leichtgradige Restriktion. Eine Obstruktion liegt nicht vor.

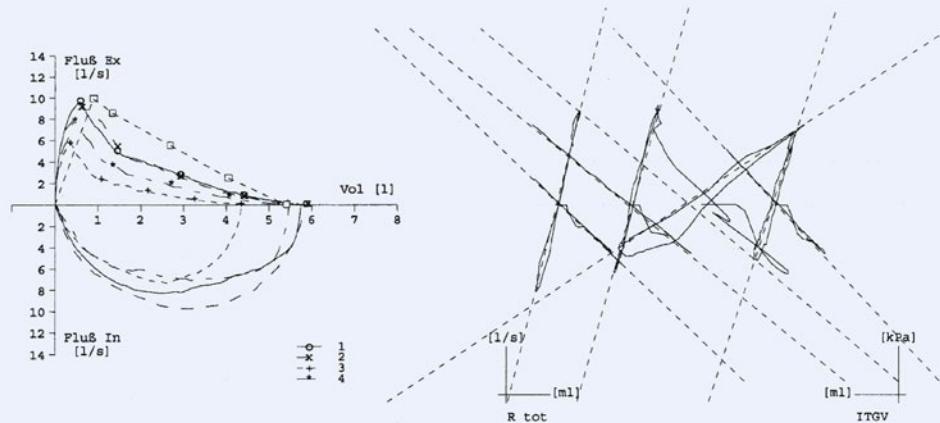
Zur weiteren Differenzierung wird eine ergänzende Diffusionsmessung empfohlen.

Im Verlauf ergab sich der Nachweis eines einseitigen Pleuraergusses bei Herzinsuffizienz.

Fallbeispiel 68**38 Jahre, männlich, 187 cm, 92 kg, BMI 26 kg/m²**

Dieses Beispiel zeigt die Untersuchung eines Patienten mit vermutetem Asthma bronchiale. Einer unspezifischen Provokation durch Belastung folgt eine inhalative Provokation mit Histamin 0,5% und nachfolgend eine Bronchospasmolyse mit 0,4 mg Salbutamol (Abb. 14.8, s. Legende oben links).

Ist2:n.Belastung
Ist3:n.Histamin 0,5%
Ist4:n.Bronchospray



	Soll	Ist 1	%Soll	Ist 2	%Soll	Ist 3	%Soll	Ist 4	%Soll
Zeit		11:36		11:55		12:05		12:17	
FVC	5.42	5.89	109	5.92	109	4.36	80.4	5.45	101
FEV 1	4.42	3.89	88.0	3.81	86.2	2.32	52.6	3.14	71.1
FEV1%I	80.2	68.1	84.9	65.9	82.2	54.0	67.4	57.8	72.1
MEF 50	5.53	2.76	50.0	2.62	47.4	1.26	22.9	1.80	32.5
PEF	9.95	9.65	96.9	9.09	91.3	5.74	57.6	7.78	78.2
R tot	.300	.182	60.8	.219	73.1	1.22	407	.291	97.0
SR tot	1.18	.750	63.8	.855	72.7	5.21	443	1.03	87.6
ITGV	3.64	3.81	105	3.54	97.3	3.98	109	3.12	85.7
RV	2.08	2.16	104	1.87	90.1	2.71	130	2.15	103
TLC	7.86	8.05	102	7.79	99.1	7.06	89.9	7.60	96.7
RV%TLC	29.2	26.8	91.9	24.0	82.3	38.3	131	28.3	96.9
VC	5.66	5.89	104	5.92	104	4.36	76.9	5.45	96.2
ERV	1.56	1.65	106	1.67	107	1.27	81.4	.968	62.1

Abb. 14.8 Fallbeispiel 68: Provokationstestung

■ Interpretation

Gute Mitarbeit. Leichte peripher betonte Obstruktion in der Baisuntersuchung (1). Nach Belastung diskrete Zunahme der Obstruktion (2). Nach Inhalation der Histamin-Lösung deutliche Zunahme der Obstruktion mit Abnahme der FEV_1 um 40 % und Zunahme des sR_{tot} um 695 % (3). Nach anschließender Bronchospasmolyse deutliche Teilreversibilität der Obstruktion mit Zunahme der FEV_1 um 820 ml bzw. 26 % (4). Es ist anzumerken,

dass die Wartezeit zwischen Untersuchung 3 und 4 etwas zu kurz ist. Nach Applikation des Salbutamol blieben allenfalls 10 min. Bei etwas längerer Wartezeit (15 min) hätte sich die Obstruktion vermutlich vollständig rückgebildet.

Der Befund bestätigt den Verdacht des Vorliegens eines Asthma bronchiale bei deutlich hyperreagiblem Bronchialsystem.

Der Patient konnte im Weiteren medikamentös gut eingestellt werden.

Fallbeispiel 69**61 Jahre, männlich, 177 cm, 115 kg, BMI 37 kg/m²**

Das folgende Beispiel zeigt die Untersuchung eines Patienten mit Asthma-COPD-Overlap (unter laufender inhalativer Triple-Therapie). Zudem Vorliegen einer deutlichen Adipositas. Die Untersuchung wurde 310 m über Meeresspiegel durchgeführt.

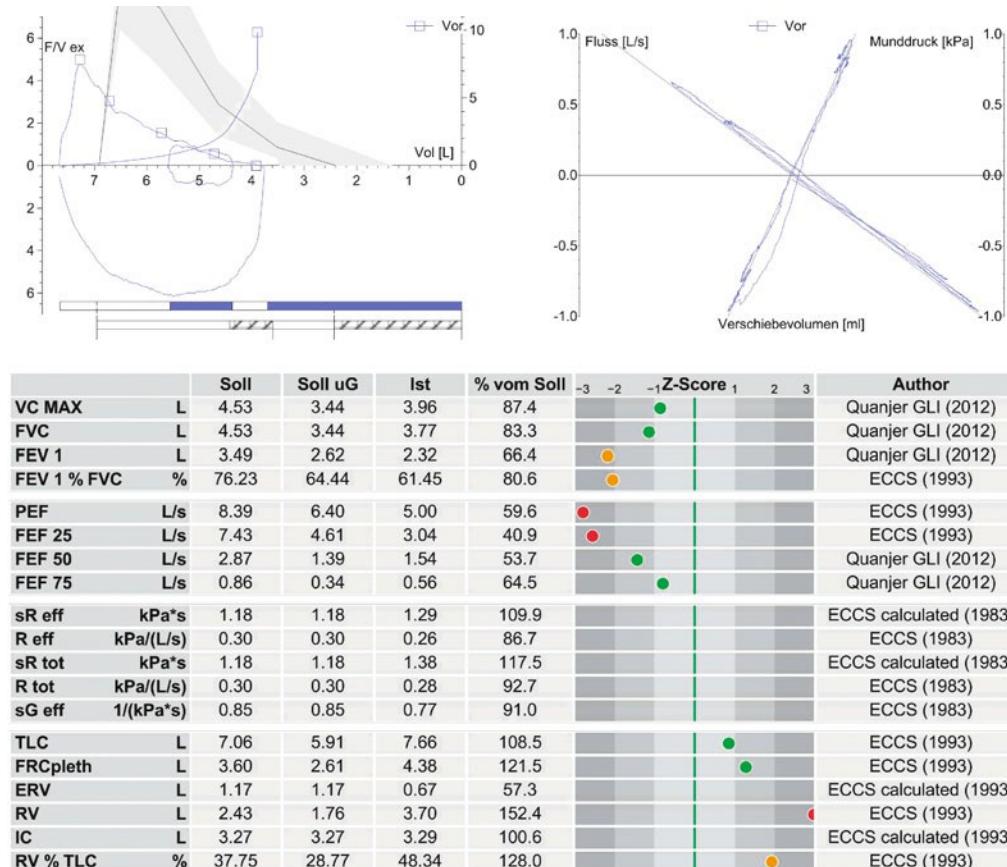
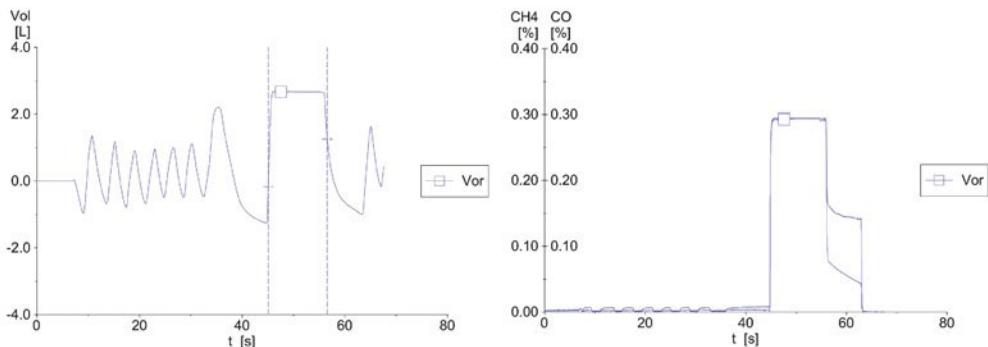


Abb. 14.9 Fallbeispiel 69: Spirometrie/Bodyplethysmografie



		Soll	Soll uG	Ist	% vS	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	9.61	7.29	9.87	102.7			●			ECCS (1993)
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.36	0.96	1.50	110.6			●			ECCS (1993)
VA_SB	L	6.91	6.91	6.56	94.9						JAEGER (1994)
VIN_SB	L	4.44	3.52	3.94	88.8			●			ECCS (1993)
TA	s			11.5							
TLC_SB	L	7.06	5.91	6.73	95.2			●			ECCS (1993)
FRC_SB	L	3.60	2.61	3.56	98.8			●			ECCS (1993)
RV_SB	L	2.43	1.76	2.78	114.6			●			ECCS (1993)
RV%RV_PL	%			75.2							
Hb	g(Hb)/dL			17.00							
%COHb	%			0.00							
DLCOcSB	mmol/(min*kPa)	9.61	7.29	9.29	96.7			●			ECCS (1993)
KCOc_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.36	0.96	1.42	104.1			●			ECCS (1993)

Abb. 14.10 Fallbeispiel 69: Diffusionsmessung

SÄURE-BASE 37.0 °C			SÄURE-BASE 37.0 °C		
pH	7.405		pH	7.389	
pCO ₂	37.8	mmHg	pCO ₂	36.9	mmHg
pO ₂	61.4	mmHg	pO ₂	73.4	mmHg
HCO ₃ act	23.2	mmol / L	HCO ₃ act	21.8	mmol / L
BE(B)	- 1.1	mmol / L	BE(B)	- 2.6	mmol / L
ctCO ₂	24.3	mmol / L	ctCO ₂	22.9	mmol / L
CO-OXYMETRIE			CO-OXYMETRIE		
Hct	50	%	Hct	45	%
tHb	17.0	g / dL	tHb	15.3	g / dL
sO ₂	92.3	%	sO ₂	94.5	%
FO ₂ Hb	86.4	%	FO ₂ Hb	88.7	%
FCOHb	6.0	%	FCOHb	5.7	%
FMetHb	0.4	%	FMetHb	0.4	%
FHHb	7.2	%	FHHb	5.2	%
SAUERSTOFFSTATUS 37.0 °C			SAUERSTOFFSTATUS 37.0 °C		
ctO ₂ (a)	20.6	mL / dL	ctO ₂ (a)	19.1	mL / dL
ELEKTROLYTE			ELEKTROLYTE		
Na ⁺	139.6	mmol / L	Na ⁺	139.2	mmol / L
K ⁺	4.81	mmol / L	K ⁺	4.56	mmol / L
Ca ⁺⁺	1.18	mmol / L	Ca ⁺⁺	1.18	mmol / L
Cl ⁻	104	mmol / L	Cl ⁻	105	mmol / L
AnGap	17.3	mmol / L	AnGap	17.0	mmol / L
METABOLITE			METABOLITE		
Glu	115	mg / dL	Glu	110	mg / dL
Lac	1.24	mmol / L	Lac	1.47	mmol / L
BENUTZERDEF. DATENKAT. KOMMENTAR			BENUTZERDEF. DATENKAT. KOMMENTAR		
a		RL	b		50 WATT RL

Abb. 14.11 Kapilläre BGA a vor und b während Belastung

■ Interpretation

Spirometrie/Bodyplethysmografie Gute Mitarbeit. Postdilatatorische, leichtgradige, peripher betonte Obstruktion und mittelgradige Überblähung. ERV im Rahmen der Adipositas vermindert.

Diffusionsmessung Gute Mitarbeit. Keine Transferstörung. Hinweise für eine leichte Verteilungsstörung.

Kapilläre BGA unter Raumluft vor und während Belastung (5 min, 50 W) Mittelgradige Hypoxämie unter Raumluft und Ruhe. Zudem deutliche Carboxyhämoglobinämie.

Während moderater Belastung Besserung mit nunmehr vorliegender Normoxämie.

Der Befund bestätigt eine Verteilungsstörung, die sich unter Belastung zurückbildet. Zudem könnte auch eine verbesserte Arterialisierung der kapillaren Probe aus dem Ohrläppchen aufgrund gesteigerter Durchblutung vorliegen.

Des Weiteren zeigt sich, dass der Patient weiterhin raucht, was in Anbetracht des Asthma-COPD-Overlap eine wichtige Zusatzinformation der BGA ist.

Fallbeispiel 70**17 Jahre, weiblich, 173 cm, 60 kg, BMI 20 kg/m²**

Nachfolgend ist die kapilläre BGA einer jungen Patientin mit ausgedehntem Oberlappeninfiltrat links im Rahmen einer offenen Lungentuberkulose gezeigt. Neben einer allgemeinen Abgeschlagenheit beklagt die Patientin eine mäßige Hustensymptomatik sowie eine Dyspnoe bei mäßiger Belastung.

Abb. 14.12 Fallbeispiel 70:
Blutgasanalyse

Probentyp <i>T</i>	Kapillär 37,0 °C		
Blutgas Ergebnis			
<i>p</i> O ₂	68,4	mmHg	[-]
↓ <i>p</i> CO ₂	32,4	mmHg	[36,0 - 44,0]
<i>s</i> O ₂	95,9	%	[-]
Saure Basen Status			
↑ pH	7,477		[7,360 - 7,440]
SBE _c	0,4	mmol/L	[-]
cHCO ₃ ⁻ (P,st) _c	25,3	mmol/L	[-]
Oxymetrie Ergebnis			
<i>FCO</i> Hb	1,0	%	[0,0 - 2,0]
Meldungen			
↑	Wert(e) oberhalb Referenzbereich		
↓	Wert(e) unterhalb Referenzbereich		
c	Kalkulierte(r) Wert(e)		

■ Interpretation

Der angegebene pO_2 -Wert erlangt erst in Zusammensetzung mit dem Alter der Patientin und der Hypokapnie als Zeichen der Hyperventilation sein volles Gewicht. Korrigiert man den Wert entsprechend dem pCO_2 , ergibt sich ein pO_{2korr} von 56 mmHg bei einem altersbezogenen Sollwert von 95 mmHg. Somit ergibt

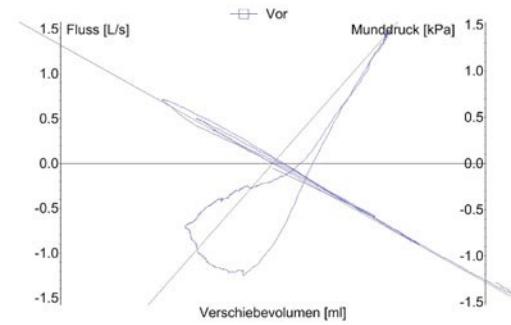
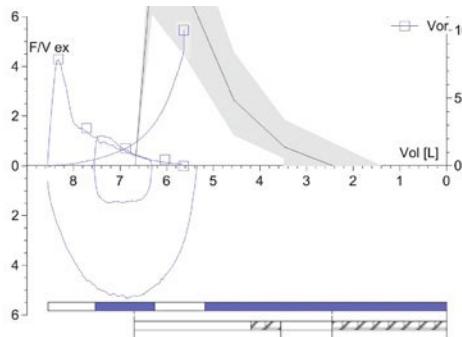
sich eine schwere Hypoxämie bei gleichzeitiger kompensatorischer Hyperventilation mit leichter respiratorischer Alkalose.

Vier Wochen nach Behandlung zeigte die Patientin eine normale BGA, die Klinik war deutlich gebessert und die Infiltrationen bildeten sich gut zurück.

Fallbeispiel 71

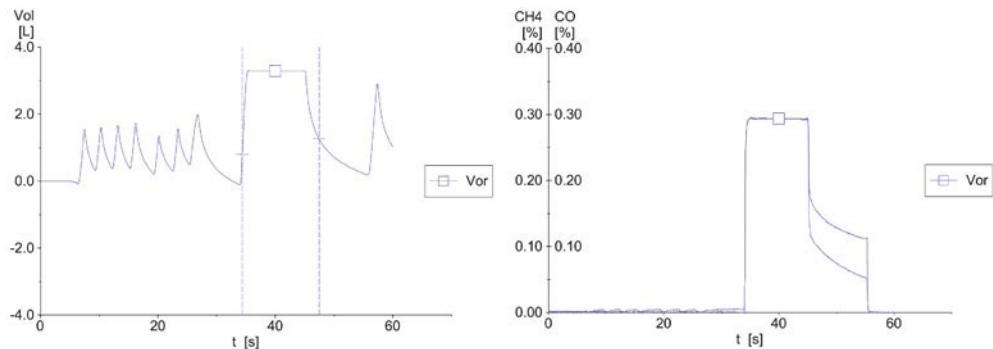
64 Jahre, männlich, 174 cm, 90 kg, BMI 30 kg/m²

Die nachstehenden Untersuchungen wurde bei einem Patienten mit bekannter COPD durchgeführt.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	4.24	3.20	3.36	79.1							Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.24	3.20	2.93	69.0							Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.26	2.42	1.47	45.1	●						Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	75.69	63.90	50.29	66.4	●						ECCS (1993)
PEF	L/s	8.08	6.09	4.29	53.1	●						ECCS (1993)
FEF 25	L/s	7.17	4.36	1.52	21.2	●						ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.64	1.23	0.71	27.1	●						Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.76	0.29	0.26	33.6	●						Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	2.74	232.5							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.40	132.1							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	3.14	266.7							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.45	151.6							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	0.37	43.0							ECCS (1983)
TLC	L	6.82	5.67	8.54	125.2				●			ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.56	2.57	6.26	176.0				●			ECCS (1993)
ERV	L	1.10	1.10	1.07	97.6							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.46	1.78	5.19	211.2				●			ECCS (1993)
IC	L	3.07	3.07	2.28	74.3							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	38.92	29.94	60.73	156.0				●			ECCS (1993)

Abb. 14.13 Fallbeispiel 71: Spirometrie/Bodyplethysmografie



		Soll	Soll uG	Ist	% vS	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	9.08	6.76	4.79	52.8	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.33	0.92	0.78	59.0	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
VA_SB	L	6.67	6.67	6.11	91.6	●	●	●	●	●	JAEGER (1994)
VIN_SB	L	4.17	3.25	3.41	81.8	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
TA	s			13.1		●	●	●	●	●	
TLC_SB	L	6.82	5.67	6.31	92.5	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
FRC_SB	L	3.56	2.57	3.34	93.8	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
RV_SB	L	2.46	1.78	2.89	117.8	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
RV%RV_PL	%			55.8		●	●	●	●	●	
Hb	g(Hb)/dL			13.70		●	●	●	●	●	
%COHb	%			0.00		●	●	●	●	●	
DLCOcSB	mmol/(min*kPa)	9.08	6.76	4.92	54.3	●	●	●	●	●	ECCS (1993)
KCOc_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.33	0.92	0.81	60.6	●	●	●	●	●	ECCS (1993)

Abb. 14.14 Fallbeispiel 71: Diffusionsmessung

■ Interpretation

Spirometrie/Bodyplethysmografie Gute Mitarbeit. Mittelgradige Obstruktion und schwergradige Überblähung. Typischer COPD-Aspekt (Fluss-Volumen-Kurve und Atmungsschleife). Unklar ist, ob die Werte prä- oder postdilatatorisch sind.

Zudem Hinweise auf eine deutliche Verteilungsstörung.

Eine spätere Nachfrage ergab, dass die Untersuchung unter laufender bronchodilatatorischer Medikation durchgeführt wurde, also postdilatatorisch.

Diffusionsmessung Gute Mitarbeit. Mittelgradige Transferstörung, normales V_A . Konstellation gut vereinbar mit dem ausgeprägten Emphysem.

Fallbeispiel 72**48 Jahre, männlich, 183 cm, 103 kg, BMI 31 kg/m²**

Die nachstehende Spirometrie/Bodyplethysmografie wurde bei einem Patienten im Rahmen einer betriebsärztlichen Vorsorgeuntersuchung durchgeführt. Anamnestisch gab es keine weiteren Hinweise.

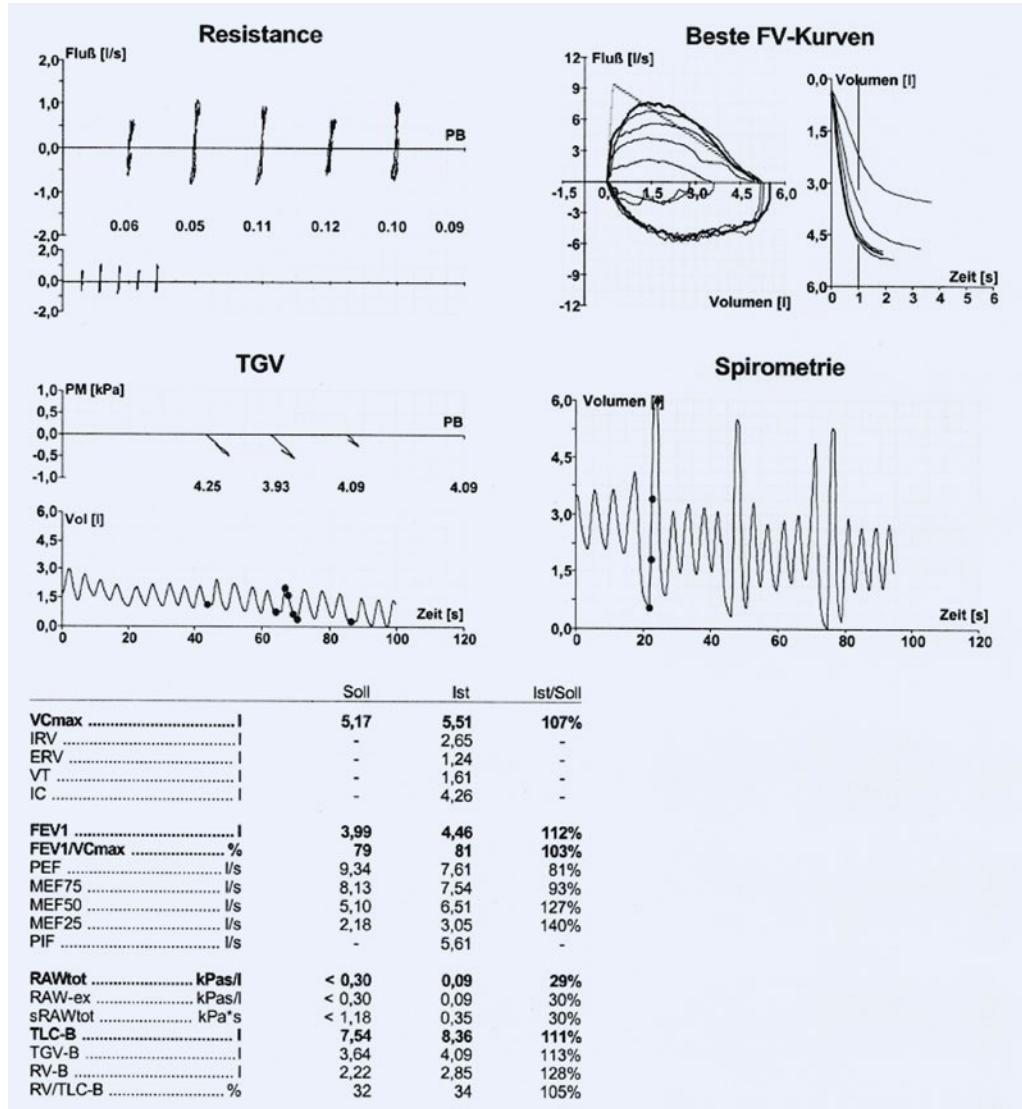


Abb. 14.15 Fallbeispiel 72: Spirometrie/Bodyplethysmografie

■ **Interpretation**

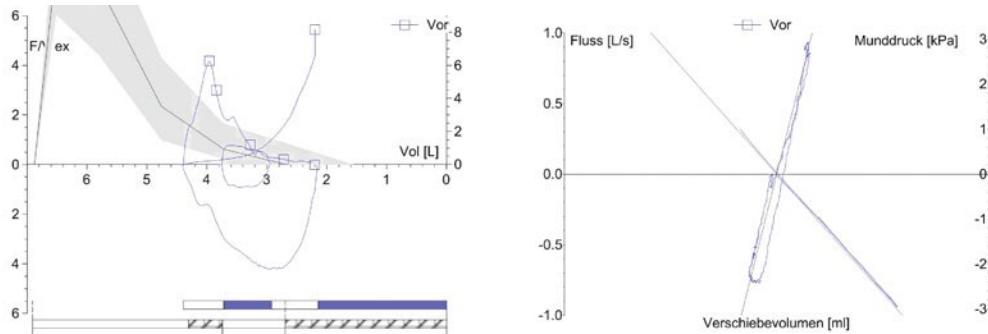
Eingeschränkte Mitarbeit. Man beachte die vielen verschiedenen Fluss-Volumen-Kurven.

Für eine normale exspiratorische Fluss-Volumen-Kurve waren 5 Anläufe nötig (mit jeweils 10- bis 20 %iger Steigerung). Inspiratorisch jeweils gute Anstrengung mit kongruenten Kurven.

Die Untersuchung zeigt einen völligen Normalbefund, weist jedoch abschließend noch einmal eindringlich auf die Gefahr der Fehlinterpretation einer unzureichenden Mitarbeit/Anstrengung als Lungenfunktionseinschränkung hin und unterstreicht die Notwendigkeit der korrekten Durchführung als Grundlage einer validen Befundung.

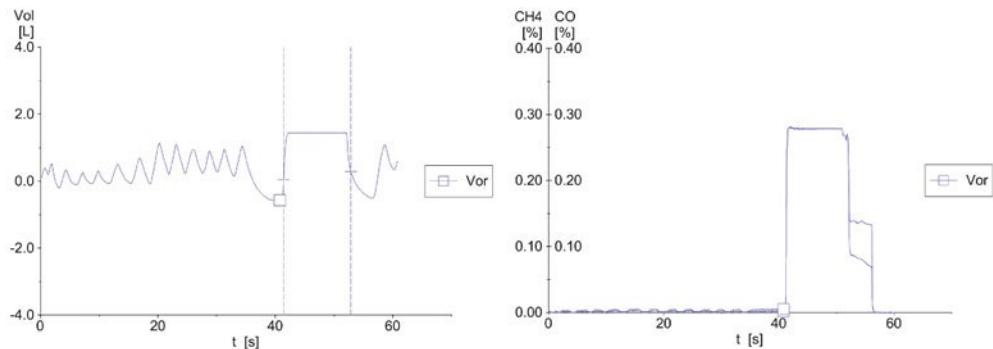
Fallbeispiel 73**72 Jahre, männlich, 179 cm, 80 kg, BMI 25 kg/m²**

Das letzte Beispiel zeigt die Untersuchung eines Mannes mit seit einigen Jahren langsam progre-
dienter, ätiologisch unklarer Belastungsdyspnoe und mäßig produktivem Husten.



	Soll	Soll uG	Ist	% vom Soll	-3	-2	-1	Z-Score	1	2	3	Author
VC MAX	L	4.21	3.10	2.26	53.5	●						Quanjer GLI (2012)
FVC	L	4.21	3.10	2.19	52.1	●						Quanjer GLI (2012)
FEV 1	L	3.16	2.26	1.40	44.1	●						Quanjer GLI (2012)
FEV 1 % FVC	%	74.25	62.46	63.65	85.7		●					ECCS (1993)
PEF	L/s	8.04	6.05	4.18	51.9	●						ECCS (1993)
FEF 25	L/s	7.22	4.40	3.00	41.6	●	●					ECCS (1993)
FEF 50	L/s	2.35	0.98	0.81	34.5		●					Quanjer GLI (2012)
FEF 75	L/s	0.62	0.22	0.21	34.1		●					Quanjer GLI (2012)
sR eff	kPa*s	1.18	1.18	0.70	59.3							ECCS calculated (1983)
R eff	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.21	70.0							ECCS (1983)
sR tot	kPa*s	1.18	1.18	0.75	63.8							ECCS calculated (1983)
R tot	kPa/(L/s)	0.30	0.30	0.23	75.3							ECCS (1983)
sG eff	1/(kPa*s)	0.85	0.85	1.43	168.6							ECCS (1983)
TLC	L	7.22	6.07	4.40	60.9	●						ECCS (1993)
FRCpleth	L	3.75	2.76	2.92	78.0		●					ECCS (1993)
ERV	L	1.05	1.05	0.78	74.3							ECCS calculated (1993)
RV	L	2.70	2.02	2.14	79.4		●					ECCS (1993)
IC	L	3.21	3.21	1.48	46.1							ECCS calculated (1993)
RV % TLC	%	42.04	33.06	48.73	115.9				●			ECCS (1993)

Abb. 14.16 Fallbeispiel 73: Spirometrie/Bodyplethysmografie



		Soll	Soll uG	Ist	% vS	-3	-2	-Z-Score ₁	2	3	Author
DLCO_SB	mmol/(min*kPa)	9.10	6.78	3.19	35.1	●					ECCS (1993)
KCO_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.26	0.88	0.96	75.9	●					ECCS (1993)
VA_SB	L	7.07	7.07	3.34	47.2						JAEGER (1994)
VIN_SB	L	4.25	3.33	2.02	47.6	●					ECCS (1993)
TA	s			11.4							
TLC_SB	L	7.22	6.07	3.51	48.6	●					ECCS (1993)
FRC_SB	L	3.75	2.76	2.28	61.0	●					ECCS (1993)
RV_SB	L	2.70	2.02	1.49	55.1	●					ECCS (1993)
RV%RV_PL	%			69.3							
Hb	g(Hb)/dL			14.60							
%COHb	%										
DLCoSB	mmol/(min*kPa)	9.10	6.78	3.19	35.1	●					ECCS (1993)
KCoC_SB	mmol/(min*kPa*L)	1.26	0.88	0.96	75.9	●					ECCS (1993)

Abb. 14.17 Fallbeispiel 73: Diffusionsmessung

■ Interpretation

Spirometrie/Bodyplethysmografie Ausreichend gute Mitarbeit. Etwas unregelmäßige In- und Exspiration, jedoch ohne relevanten Einfluss.

Mittelgradige (peripher betonte) Obstruktion und leichtgradige relative Überblähung bei zusätzlicher leichtgradiger Restriktion.

Führend ist die Obstruktion (FEV_1). Zudem leichtgradige Restriktion (VC und TLC). Bei der Konstellation ist zu bedenken, dass die FEV_1 auch durch die Restriktion vermindert ist und die TLC durch eine zusätzliche relative Überblähung/Air Trapping etwas erhöht ist, während die VC wiederum sowohl durch das Air Trapping als auch durch die Restriktion vermindert ist.

Diffusionsmessung Ausreichend gute Mitarbeit. Grenzwertige V_{in} (im Vergleich zur VC der Spirometrie).

Schwergradige Transferstörung gemischter Genese. Die Konstellation von DL_{CO} , KCO und

VA spricht sowohl für parenchymale als auch für extraparenchymale Anteile. Zudem deutliche Hinweise auf eine Verteilungsstörung.

Im Weiteren ergaben sich bei dem Patienten der Befund einer COPD sowie eine interstitielle Lungenerkrankung bei Kollagenose und außerdem plurale Verschwartungen beidseits.

Serviceteil

Verzeichnis der Fallbeispiele – 243

Quellenhinweis – 245

Index – 247

Verzeichnis der Fallbeispiele

- | | | | |
|------------------------|--|------------------------|--|
| Fallbeispiel 1 | Normalbefund Spirometrie | Fallbeispiel 23 | Leichtgradige Restriktion bei kryptogenen organisierender Pneumonie |
| Fallbeispiel 2 | Normalbefund Spirometrie | Fallbeispiel 24 | Gemischte Ventilationsstörung mit mittelgradiger Restriktion, mittelgradiger Obstruktion und leichter relativer Überblähung bei Atelektase |
| Fallbeispiel 3 | Schlechte Mitarbeit | Fallbeispiel 25 | Schwergradige Obstruktion und schwergradige Überblähung bei COPD |
| Fallbeispiel 4 | Leichtgradige obstruktive Ventilationsstörung | Fallbeispiel 26 | Leichte Restriktion bei Trichterbrust |
| Fallbeispiel 5 | Schwergradige obstruktive Ventilationsstörung bei COPD | Fallbeispiel 27 | „Abnormal nonspecific pattern“ bzw. Small Airways Obstruction Syndrome |
| Fallbeispiel 6 | Normalbefund Spirometrie bei eingeschränkter Mitarbeit | Fallbeispiel 28 | Überschießender frühexspiratorischer Fluss bei großer, kräftiger Lunge |
| Fallbeispiel 7 | Mittel- bis schwergradige restriktive Ventilationsstörung | Fallbeispiel 29 | Isolierte Überblähung |
| Fallbeispiel 8 | Mittelgradige obstruktive Ventilationsstörung bei COPD | Fallbeispiel 30 | Exazerbiertes Asthma bronchiale im kurzen und langen Verlauf |
| Fallbeispiel 9 | Normalbefund Spirometrie bei Asthma und Adipositas | Fallbeispiel 31 | Positiver Bronchospasmolysetest bei Asthma bronchiale |
| Fallbeispiel 10 | Schwergradige Restriktion bei Kyphoskoliose | Fallbeispiel 32 | Positiver Bronchospasmolysetest bei COPD |
| Fallbeispiel 11 | Normalbefund Spirometrie | Fallbeispiel 33 | Positiver Bronchospasmolysetest bei Asthma bronchiale |
| Fallbeispiel 12 | Fixe extrathorakale Stenose bei zervikalem Tumor mit Tracheakompression | Fallbeispiel 34 | Positiver Bronchospasmolysetest bei zuvor fehlender Obstruktion |
| Fallbeispiel 13 | Schwergradige Restriktion bei Muskelschwäche und bekannter Myasthenia gravis | Fallbeispiel 35 | Positiver Provokationstest bei Asthma bronchiale |
| Fallbeispiel 14 | Schwergradige Obstruktion bei COPD | Fallbeispiel 36 | Stark positiver Provokationstest bei Asthma bronchiale |
| Fallbeispiel 15 | Normalbefund Spirometrie/ Bodyplethysmographie | Fallbeispiel 37 | Positiver Provokationstest ohne FEV1-Abfall |
| Fallbeispiel 16 | Schwergradige Restriktion bei Pleuramesotheliom | Fallbeispiel 38 | Normalbefund Diffusionsmessung und Rauchen |
| Fallbeispiel 17 | Leichtgradige Obstruktion bei Asthma | Fallbeispiel 39 | Normalbefund bei Asthma bronchiale |
| Fallbeispiel 18 | Leichtgradige Obstruktion und mittelgradige Überblähung bei COPD | Fallbeispiel 40 | Leichtgradige Transferstörung bei extraparenchymaler Restriktion |
| Fallbeispiel 19 | Adipositas-Assoziierte Veränderungen | | |
| Fallbeispiel 20 | Mittelgradige Obstruktion und leichtgradige Überblähung bei COPD | | |
| Fallbeispiel 21 | Komplexe Restriktion bei Zwerchfellschwäche bds. | | |
| Fallbeispiel 22 | Mittelgradige Obstruktion und Überblähung sowie Hustenartefakte | | |

- Fallbeispiel 41** Schwergradige Transferstörung bei parenchymaler Restriktion/ILD
- Fallbeispiel 42** Schwergradige Transferstörung bei COPD
- Fallbeispiel 43** Schwergradige Transferstörung bei schwerer pulmonaler Hypertonie und Anämie
- Fallbeispiel 44** Transferstörung im Rahmen einer Verteilungsstörung
- Fallbeispiel 45** Normalbefund Mundverschlussdruckmessung
- Fallbeispiel 46** Schwergradige Einschränkung der Atemmuskulatur bei Myasthenia gravis
- Fallbeispiel 47** Mittelgradige Einschränkung der Atemmuskulatur bei Zwerchfellparese
- Fallbeispiel 48** Schwergradige Einschränkung der Atemmuskulatur bei COPD
- Fallbeispiel 49** Typische zirkadiane PEF-Varianz bei Asthma bronchiale
- Fallbeispiel 50** Typische zirkadiane PEF-Varianz bei intermittierendem Asthma bronchiale
- Fallbeispiel 51** PEF-Verlauf bei exazerbiertem COPD
- Fallbeispiel 52** Schwere Hypoxämie, respiratorische Alkalose bei Lungenarterienembolie
- Fallbeispiel 53** Respiratorische Globalinsuffizienz bei akut exazerbiertem COPD
- Fallbeispiel 54** Metabolische Azidose bei hyperosmolar entgleistem Diabetes
- Fallbeispiel 55** Belastungsinduzierte Hypoxämie bei COPD
- Fallbeispiel 56** Teilkompensierte metabolische Alkalose bei COPD mit Hypoxämie, rezidivierendes Erbrechen und Hypokaliämie
- Fallbeispiel 57** Hypoxämie und O2-Titration bei exazerbiertem COPD
- Fallbeispiel 58** COPD und Niereninsuffizienz mit Hypoxämie und metabolischer Azidose
- Fallbeispiel 59** Stark verminderte O2-Sättigung bei Lungenarterienembolie
- Fallbeispiel 60** Fehlmessung O2-Sättigung bei Nagellack
- Fallbeispiel 61** COPD mit schwerer Desaturation bei gut erhaltener Gehstrecke im 6MWD
- Fallbeispiel 62** Normaler 6MWD bei Depression und Adipositas
- Fallbeispiel 63** Leichte Obstruktion bei Asthma bronchiale
- Fallbeispiel 64** Ausschluss einer Ventilations- oder Transferstörung bei bekannter Sarkoidose
- Fallbeispiel 65** Schwergradige COPD mit erhöhter Beanspruchung der Atempumpe
- Fallbeispiel 66** Kombinierte respiratorische und metabolische Azidose und Hyperkapnie bei exazerbiertem COPD, Niereninsuffizienz und Myokardinfarkt
- Fallbeispiel 67** Leichtgradige Restriktion bei Herzinsuffizienz und einseitigem Pleuraerguss
- Fallbeispiel 68** Positiver Provokationstest bei Asthma bronchiale
- Fallbeispiel 69** Leichtgradige Obstruktion und Überblähung bei Asthma-COPD-Overlap, zudem Verteilungsstörung bei Adipositas
- Fallbeispiel 70** Schwere Hypoxämie mit kompensatorischer Hyperventilation bei Lungentuberkulose
- Fallbeispiel 71** Mittelgradige Obstruktion und schwergradige Überblähung bei COPD
- Fallbeispiel 72** Normalbefund Spirometrie/Bodyplethysmographie bei eingeschränkter Mitarbeit
- Fallbeispiel 73** Mittelgradige Obstruktion, leichtgradige relative Überblähung und leichtgradige Restriktion und entsprechende schwergradige Transferstörung gemischter Genese bei COPD, Kollagenose und pleurale Verschwartung

Quellenhinweis

Für die freundliche Bereitstellung der Abbildungen 3.2 und 3.3 danken wir der Firma

Ganshorn

Medizin Electronic
Industriestr. 6–8
97618 Niederlauer

Index

A

- Adenopathie, bihiläre 97
- Adipositas
 - Hypoventilationssyndrom 55
 - Veränderungen der Lungenfunktionsparameter 76, 209
- Air Trapping 72. Siehe Überblähung
 - COPD 34
- Alkalose
 - metabolische 186
 - respiratorische 178
- Alterungsprozess, funktionelle Veränderungen 206
- Alveolarvolumen 12, 127
- Anämie 145
- Asthma bronchiale 93, 101, 121
 - Bodyplethysmografie 69
 - Bronchospasmolysetest 109
 - Diagnostik 114, 117
 - Differenzialdiagnose 34
 - Diffusionsmessung 134
 - Mundverschlussdruckmessung 155
 - Peak-Flow-Messung 164, 166
 - Provokationstestung 123
 - schwer exazerbiertes 147
 - Spirometrie 22
 - teilkontrolliertes 167
 - therapierefraktäres 102
- Asthma-COPD-Overlap 114
- Atemflussbehinderung
 - Nachweis 100
 - Peak-Flow-Messung 164, 172
- Atemflussparameter 7, 11
- Atemmuskeleröpfung 153
- Atempumpe 162
 - Belastung 158
 - Erschöpfung 180, 190
- Atemstromstärke
 - forcierte expiratorische 11
 - maximale expiratorische 10
 - Regressionsgleichung 30
- Atemwegsconductance 12, 100
 - spezifische 12
- Atemwegskollaps 72
- Atemwegswiderstand
 - effektiver 12
 - effektiver spezifischer 12, 60
 - Normalwert 70
 - Okklusionsmethode 56

- spezifischer 8, 11
 - Bestimmung 60
 - Normalwert 70
- totaler 11
 - totaler spezifischer 11, 59
- Atemzugvolumen 9
- Atmungsschleife 8, 89
- Azidose
 - metabolische 182, 186, 190
 - respiratorische 180

B

- Basenüberschuss 13
- Befundung 212
- Beklemmungsgefühl, thorakales 113, 115
- Belastungsdyspnoe 67, 75, 83, 157, 203
- Bettmessung, spirometrische 56
- Bikarbonat 13
- Blutgasanalyse
 - Fallbeispiele 177
- Bodyplethysmografie
 - Atmungsschleife 60
 - Durchführung 62
 - Fallbeispiele 63
 - Fehler 66
 - Fehlerzeichen 84
 - Hustenartefakte 84
 - Messprinzip 58
 - Normalbefund 66
 - präoperative 46
- Borg-Skala 202
- Boyle-Mariotte-Gesetz 61
- Bronchialkollaps, expiratorischer 72
- Bronchialsystem, hyperreagibles 169
 - Spirometrie 22
- Bronchitis 111
- Bronchodilatationstestung, falsch negative 117
- Bronchodilatatorabusus 165
- Bronchospasmolysetestung 106
 - Fallbeispiele 109
 - positive 110, 112
 - Reversibilität 110
- Bronchospasmolytika 106

C

- Carboxyhämoglobin 12
- Chemotherapie, geplante 49, 129
- Closing, endexspiratorisches 76
- Closing Volume 76
 - erhöhtes 149
- Conductance-Parameter 12
- COPD
 - 6-Minuten-Gehtest 201
 - Befund 112
 - Blutgasanalyse 179, 183, 185, 187, 189
 - Bodyplethysmografie 91
 - Charakteristik 34
 - Diffusionsmessung 141
 - Mundverschlussdruckmessung 161
 - Peak-Flow-Messung 171
 - Prognosefaktor 92
 - Schweregrad 42, 78
 - Spirometrie 41
 - typische Kennzeichen 72

D

- Depression 204
- Diffusionskapazität 127. Siehe Transferfaktor
- Diffusionskoeffizient 127
- Diffusionsmessung
 - COPD 142
 - Fallbeispiele 129
 - Mitarbeit 134
 - präoperative 46
 - Single-Breath-Methode 126
- Dyshämoglobinwerte, erhöhte 198
- Dyspnoe 85, 87, 111, 137
 - rezidivierende 119
 - starke 195

E

- EGKS-Referenzwerte 6, 52
- Einsekundenkapazität 10
 - Altersabhängigkeit 207
 - relative 10, 43
- Emphysem 142
- Ernährungszustand 209
- Exspirationskurve, biphasische 72
- Exspirationsmanöver, forciertes 11

G

- Gasvolumen, thorakales 10
- Gesetz von Boyle und Mariotte 61
- Globalinsuffizienz, respiratorische 180
- Global Lung Initiative, Referenzwerte 6, 52

H

- Husten 87
 - chronischer 65
- Hustenartefakt 84
- Husteninsuffizienz 160
- Hyperinflationstest 76
- Hyperkapnie 188
 - Blutgasanalyse 182
- Hyperreagibilität, bronchiale
 - Graduierung 120
 - leichtgradige 120
 - mittelgradige 124
 - schwergradige 122
- Hyperreakтивität, bronchiale 106
- Hypertonie, schwere pulmonale 145
- Hyperventilation, alveoläre 178
- Hypoventilation, alveoläre 180
- Hypoxämie 178, 184, 188
 - hypoventilationsbedingte 196
 - Ursachen 184

I

- Inspirationsdruck, maximaler 152, 156, 160
- Inspirationsmuskulatur 152
 - Erschöpfungsgrenze 158
- Insuffizienz
 - pulmonale 180, 184
 - ventilatorische 180, 190

K

- Kapazität, inspiratorische 9
- Kindesalter, Lungenfunktionsdiagnostik 207
- Kohlendioxidpartialdruck 12
 - Ermittlung 175
- Körpergröße 48, 98
- Krogh-Faktor 12, 127
- Kyphoskoliose 47

L

- Lunge
 - große 98
 - strukturelle Entwicklung 206
- Lungenarterienembolie 177
- Lungenerkrankung, obstruktive 29
- Lungenfunktion
 - Messmethoden 2
 - Störbereiche 2
- Lungenfunktionsalgorithmus 213
- Lungenfunktionsparameter
 - Atemflussparameter 11
 - Conductance-Parameter 12

Index

- dynamische 11
- Gesunde 9
- Istwert 6
- Messfehler 212
- Resistance-Parameter 11
- Sollwert 6
- statische 11
- Lungenkapazität, totale 10
- Regressionsgleichung 40
- Lungensintigrafie, präoperative 46
- Lungenüberblähung 42. Siehe Überblähung
- Lungenvolumina
 - Änderungen im Alter 207
 - Regressionsgleichungen 30, 79
 - Trichterbrust 94
- Lysreaktion, positive 114

M

- Methämoglobin 12
- Mundverschlussdruck
 - inspiratorischer 12
 - maximaler inspiratorischer 12
- Mundverschlussdruckmessung
 - Fallbeispiele 155

N

- nonspecific pattern 96

O

- Obstruktion
 - Differenzialdiagnose 34
 - Erstbefund 34
 - extrathorakale 38
 - fixierte 38, 52
 - intrathorakale 38
 - leichtgradige 70
 - Lokalisation 70
 - mittelgradige 42, 84
 - Schweregrad 30, 70, 72
 - schwergradige 56, 92, 112, 142
- Okklusionsmethode 56
- Operation, präoperative Vorbereitung 46

P

- Partialinsuffizienz, respiratorische 180
- Peak Expiratory Flow 10
 - Altersabhängigkeit 206
 - zirkadiane Variabilität 166
- Peak-Flow-Messung 164
 - Früherkennung von Exazerbationen 172
 - Protokoll 169

- Peak Inspiratory Flow 10
 - Altersabhängigkeit 206
- Pectus excavatum 94
- pH-Wert 12
 - Bewertung 190
- Pleuramesotheliom 67
- Pneumonien, kryptogen organisierende 86
- Pneumotachograf 16, 17
- Provokationstestung 106
 - positive 120, 122

R

- Referenzwerte 6, 52
 - EGKS 6
 - Global Lung Initiative 6, 52
- Regressionsgleichungen
 - exspiratorische Atemstromstärken 30
 - Lungenvolumina 30, 79
 - totale Lungenkapazität 40
- Reizhusten 83, 119
- Reservevolumen
 - exspiratorisches 9
 - inspiratorisches 9
- Residualkapazität, funktionelle 10, 12, 61
 - Altersabhängigkeit 207
- Residualvolumen 10, 12
 - Altersabhängigkeit 207
- Resistance 11. Siehe Atemwegswiderstand
- Resistance-Parameter 11
- Restriktion
 - Beurteilung 68
 - Definition 40
 - einfache 82
 - gemischte 82
 - komplexe 82
 - leichtgradige 68, 86
 - Schweregradeinteilung 48
 - schwergradige 48, 54
- Riskostratifikation, Operation 46
- Ruhedyspnoe 177

S

- Sarkoidose 86, 97
- Sauerstoffbindungskurve 188, 194
- Sauerstoffgehalt des Blutes, Berechnung 188
- Sauerstofflangzeittherapie 185
- Sauerstoffpartialdruck 12
 - Aussagekraft 188
 - Beurteilung 178
 - Referenzwerte 190
- Sauerstoffsättigung 13
 - pulsoxymetrische Messung 194
- Säuglinge, Lungenfunktionsdiagnostik 207
- Säure-Basen-Haushalt, Störungen 190
- Schmerzen, thorakale 195

Schwangerschaft, Einfluss auf kardiopulmonale Funktion 209

Sechs-Minuten-Gehtest 200

- COPD 92

- Fallbeispiele 200

Small Airways Obstruction Syndrome 96

Spiroergometrie, präoperative 46

Spirometer 16

Spirometer-Asthma 84

Spirometrie

- Bettuntersuchung 55

- Durchführung 17

- Fallbeispiele 18

- Indikationen 22

- Interpretationsschema 50

- Kontraindikationen 22

- Messprinzip 16

- präoperative Vorbereitung 46

- Qualität der Mitarbeit 26

- Ventilationsstörung 18

Stenose 38. Siehe Obstruktion

- extrathorakale 38

- fixierte 38, 52

- intrathorakale 38

- variable extrathorakale 36

T

Thoraxdeformität 47

Tidalvolumen 9

Tiffeneau-Manöver 10, 28

- Anstrengungsabhängigkeit 11

- Mitarbeitsabhängigkeit 26

- Spirometrie 18

- Zeitabhängigkeit 11

Totalkapazität

- Altersabhängigkeit 207

Training, körperliches 209

Transferfaktor 12

- Erhöhung 127

- Erniedrigung 127

- korrigierter Referenz-Transferfaktor 146

- Minderung 138

- schwergradig erniedrigter 146

Transferkoeffizient 127

- schwergradig erniedrigter 146

Transferstörung 138

- Schweregradeinteilung 136

- Ursachen 149

Trichterbrust 94

Tumorkompression 52

U

Überblähung 72. Siehe Air Trapping

- absolute 102

- Inspirationsdruck 162

- leichtgradige 100

- mittelgradige 84

- relative 82, 88, 96

- schwergradige 92, 102, 112, 142

Ultraschall-Flussaufnehmer 17

Unterbrechermethode 56

V

Ventilationsstörung 18

- gemischte 88, 90

- obstruktive 19, 30

- restriktive 19, 40, 68

- leichtgradige 94

- unauffällige Spirometrie 36

Verschiebevolumen 58, 59

Verschlussdruckkurven 66

Verschlussdruckmessung, Prinzip 62

Verschlusskapazität 76

Verteilungsstörung, schwere 148

Vitalkapazität

- Altersabhängigkeit 207

- erniedrigte 42, 56

- expiratorische 10

- forcierte 10

- Altersabhängigkeit 207

- inspiratorische 9

Z

Z-Score 8, 9, 24

Zwerchfellparese 135, 159

Zwerchfellschwäche 81