

Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga zur Spirometrie

Recommendations on Spirometry by Deutsche Atemwegsliga

Autoren

C.-P. Criée, D. Berdel, D. Heise, P. Kardos, D. Köhler, W. Leupold, H. Magnussen, W. Marek, R. Merget, H. Mitfessel, M. Rolke, S. Sorichter, W. Worth, H. Wuthe

Institut

Beatmungsmedizin/Schlaflabor, Bovenden-Lenglern

Bibliografie

DOI 10.1055/s-2006-944245
Pneumologie 2006; 60: 576–584
© Georg Thieme Verlag KG
Stuttgart · New York
ISSN 0934-8387

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. C.-P. Criée
Ev. Krankenhaus Göttingen-Weende · Abt. Pneumologie
Pappelweg 5
37120 Bovenden-Lenglern
criee@ekweende.de

Einleitung

Die Spirometrie ist eine einfache, schnelle, nicht-invasive und preisgünstige Untersuchung zur Messung von Lungenvolumina und Atemstromstärken. Ihr besonderer Wert liegt in der Diagnostik der sehr häufigen obstruktiven Ventilationsstörung und der Fähigkeit, deren therapeutische Beeinflussbarkeit zu objektivieren. In diesem Sinne dient sie zur Festlegung des Schweregrades obstruktiver Atemwegserkrankungen und zur Beurteilung von Therapie, Krankheitsverlauf und Prognose. Aussagen über andere Störungen der Lungenfunktion, wie Gasaustausch oder Funktion der Atempumpe, sind nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich. So können Patienten mit schwerster Ateminsuffizienz eine normale Spirometrie aufweisen. Mit der Spirometrie wird daher zwar ein sehr wichtiger, aber eben nur ein Teil der gesamten Lungenfunktion erfasst.

Definition

Unter Spirometrie versteht man die Messung von Lungenvolumina am Mund. Sie kann kontinuierlich zur Messung der Ventilation oder mittels willkürlicher Atemmanöver zur Bestimmung definierter Volumina und Atemstromstärken erfolgen. Die Messungen erfolgten früher mit einem Glocken- bzw. Trockenspirometer, heutzutage wird gewöhnlich ein Strömungs- bzw. Volumensensor verwendet.

Folgende Fragen kann die Spirometrie beantworten:

- Liegt eine Atemwegsobstruktion vor?
- Ist eine nachgewiesene Atemwegsobstruktion teilweise oder sogar vollständig reversibel (Reversibilitätstest mit Bronchodilatoren)?
- Liegt eine relevante Verringerung der Lungenvolumina vor?

Indikationen

Dyspnoe (anfallsartig, unter Belastung, intermittierend)
Husten und/oder Auswurf
Screening (Gesundheitsuntersuchung)
Tabakkonsum
Verdacht auf Erkrankungen von Atemwegen, Lunge, Herz, knöchernem Thorax, Wirbelsäule, Skelettmuskulatur
Verdacht auf Erkrankungen der Atempumpe (Atemzentrum, zugehörige Nerven und Muskeln)
Verlaufsbeobachtung bronchopulmonaler Erkrankungen
Therapiekontrolle bronchopulmonaler Erkrankungen
arbeitsmedizinische Überwachung (z. B. Staubexposition, Rettungswesen)
präoperative Diagnostik.

Kontraindikationen

Spannungspneumothorax
akuter Herzinfarkt
akute innere Blutung.

Messprinzip

Üblicherweise werden heute offene Spirometer auf der Basis der Pneumotachographie verwendet, Glocken- bzw. Trocken-Spirometer sind technisch überholt. Bei der Pneumotachographie wird der flussproportionale Druckabfall an einem definierten Widerstand gemessen und daraus in Analogie zum Ohm'schen Gesetz der Atemfluss bestimmt. Anschließend wird durch Integration des Flusses über die Zeit das Atemvolumen berechnet. Sämtliche Parameter sind auf BTPS-Bedingungen (BTPS = body temperature

pressure saturated) normiert, d.h. die erhobenen Daten gelten für 37 °C und 100% relative Feuchte beim gegebenen Luftdruck. Expiratorische Lungenvolumina und Strömungen werden demzufolge direkt erfasst, während inspiratorische Größen, für die die ATP-Umgebungsbedingungen gelten (ATP = ambient temperature pressure) auf BTPS korrigiert werden müssen. Ein Spirometer muss mit einfachen Mitteln durch Kalibrierung überprüfbar sein. Erforderlich ist die tägliche Kalibrierung, wobei das Kalibriervolumen (= Pumpenhub von 1–3 Liter) mit einem Fehler von unter 0,5% bestimmt werden muss (Ausnahme: Spirometer, die auf der Ultraschall-Laufzeitmessung basieren). Eine Überprüfung der Kalibrierung ist zusätzlich durchzuführen, wenn trotz guter Mitarbeit des Untersuchten und nach Überprüfung der persönlichen Daten ein Ergebnis trotz Austausch der Sensorik bzw. Reinigung des Systems nicht plausibel erscheint. Sinnvoll ist auch die gelegentliche Überprüfung der Kalibrierung anhand der bekannten Lungenvolumina eines Mitarbeiters. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind in einem Gerätebuch zu dokumentieren.

Messparameter

Man unterscheidet zwischen statischen und dynamischen Lungenvolumina. Unter den statischen Lungenvolumina versteht man Lungenvolumina, deren Messwerte nicht vom zeitlichen Ablauf des Spirogramms abhängen, z. B. Vitalkapazität (VC). Unter dynamischen Lungenvolumina versteht man Lungenvolumina, deren Messwerte vom zeitlichen Verlauf abhängig sind z. B. Einsekundenkapazität (FEV₁). Da offene Spirometer primär die Atemstromstärke messen, können zusätzlich zu den Lungenvolumina problemlos auch spezielle Atemstromstärken bestimmt werden (● **Abb. 1**). Die wichtigsten Parameter sind in ● **Tab. 1** aufgeführt.

Vitalkapazität (VC)

Die Vitalkapazität (VC) ist die Volumendifferenz, die am Mund zwischen vollständiger Inspiration (zur Totalkapazität TLC) und vollständiger Expiration (zum Residualvolumen RV) gemessen werden kann. In Deutschland und einigen europäischen Ländern

wird sie als „inspiratorische Vitalkapazität“ IVC bestimmt. Aus normaler Ruheatmung heraus wird langsam bis zum RV ausgeatmet und anschließend zügig – aber nicht forciert – bis zur TLC eingeatmet. In Großbritannien und Nordamerika wird die Vitalkapazität auch während einer langsamen („relaxed“) Expiration vom TLC-Niveau aus mit ansteigender Anstrengung am Expirationseende (EVC), in der Regel aber während einer forcierten Expiration (FVC) gemessen. Bei gesunden Probanden besteht keine systematische Differenz zwischen IVC und EVC, nur bei obstruktiven Lungenerkrankungen kann die IVC größer sein als EVC und FVC; EVC ist in der Regel größer als FVC.

Dynamische Lungenvolumina und maximale expiratorische Atemstromstärken

Als forcierte Expiration wird das Manöver bezeichnet, bei dem der Proband zügig bis zur TLC einatmet und sofort danach mit maximaler Anstrengung über mehrere Sekunden bis zum Residualvolumen ausatmet. Die maximale Muskelkraft soll dabei „schlagartig“ und nicht allmählich aufgebaut werden. Wird die forcierte Expiration verzögert begonnen, sollte der Versuch wiederholt werden. Bei diesem – auch Tiffeneau-Test genannten – Manöver werden das expirierete Volumen in der ersten Sekunde (forciertes Expirationsvolumen, FEV₁) sowie die maximalen expiratorischen Atemstromstärken bestimmt. Dabei wird sowohl das Volumen gegen die Zeit aufgetragen (Volumen/Zeit-Kurve), als auch die Atemstromstärke gegen das Lungenvolumen (Fluss/Volumen-Kurve) (● **Abb. 1**). Diese Darstellung sollte routinemäßig gewählt werden.

Bei dem forcierten Expirationsmanöver sind 2 Phänomene zu berücksichtigen:

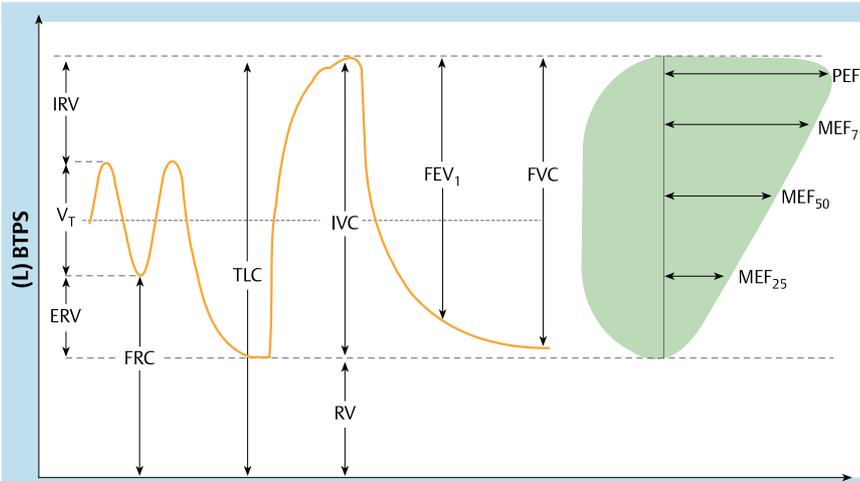
Die Anstrengungsabhängigkeit („effort-dependence“): Bei maximaler expiratorischer Anstrengung sind die maximalen expiratorischen Atemstromstärken durch die Kompression der Atemwege häufig geringer als bei submaximaler Anstrengung, was sich insbesondere bei Patienten mit obstruktiver Ventilationsstörung auswirkt. Da aber die Atemstromstärken bei submaximaler Anstrengung schlecht reproduzierbar sind, wird das maximal forcierte Manöver bevorzugt. Die Zeitabhängigkeit („time-dependence“): Bei langsamer Inspiration mit langer Pause vor der forcierten Expiration

Tab. 1 Spirometrische Parameter

Parameter	Definition	Symbol	Einheit
inspiratorische Vitalkapazität	Atemvolumen, welches nach kompletter Expiration maximal eingeatmet werden kann	IVC (Synonym: VC in)	l
forcierte Vitalkapazität	Atemvolumen, welches nach kompletter Inspiration forciert maximal ausgeatmet werden kann	FVC	l
forciertes expiratorisches Volumen in 1 Sekunde, Einsekundenkapazität	Atemvolumen, welches nach maximaler Inspiration forciert in der ersten Sekunde ausgeatmet werden kann	FEV ₁	l
relative Einsekundenkapazität, Tiffeneau-Index	forciertes expiratorisches Volumen in 1 Sek., ausgedrückt in % der inspiratorischen Vitalkapazität	FEV ₁ /IVC [*]	%
maximaler expiratorischer Spitzenfluss, „Peak flow“	Spitzenfluss bei maximaler expiratorischer Anstrengung	PEF	l × s ^{-1**}
maximaler expiratorischer Fluss bei 50% der FVC	maximale Atemstromstärke nach Ausatmung von 50% der FVC	MEF _{50%} , Synonym FEF _{50%}	l × s ⁻¹
maximaler expiratorischer Fluss bei 25% der FVC	maximale Atemstromstärke nach Ausatmung von 75% der FVC	MEF _{25%} , Synonym FEF _{75%}	l × s ⁻¹

* im angloamerikanischen Sprachraum wird häufig FVC statt IVC verwendet

** im Peakflow-Meter Angabe in l × min⁻¹.



Mobilisierbare und nicht mobilisierbare Lungenvolumina, sowie maximale expiratorische Flüsse. IRV = inspiratorisches Reservevolumen (L), ERV = expiratorisches Reservevolumen (L), V_T = Atemzugvolumen (L), FRC = Funktionelle Residualkapazität (L), TLC = Totale Lungkapazität (L), IVC = inspiratorische Vitalkapazität (L), RV = Residualvolumen (L), FEV₁ = forciertes expiratorisches Volumen in 1 Sekunde (L), FVC = forcierte Vitalkapazität (L), PEF = expiratorischer Spitzenfluss (L/s), MEF₇₅, 50, 25 = maximale expiratorische Flüsse als Prozent der FVC (L/s).

Abb. 1 Mobilisierbare und nicht mobilisierbare Lungenvolumina, sowie maximale expiratorische Flüsse. Linke Bildhälfte: Volumen/Zeit-Kurve. Rechte Bildhälfte: Fluss/Volumen-Kurve.

vom TLC-Niveau aus sind die Atemstromstärken und die FEV₁ bis zu 25% geringer als bei schneller Inspiration ohne Pause vor der forcierten Expiration. Die höheren Flüsse bei forcierter Expiration ohne Pause nach der Inspiration kommen durch die viskoelastischen Eigenschaften der Lunge nach vorausgegangener Dehnung zustande, aber auch durch eine bessere Aktivierung der Expirationsmuskulatur. Es wird daher eine zügige Inspiration mit nur kurzer Pause (< 1 Sek.) mit anschließender forcierter Expiration empfohlen. Dies ist wichtig zu beachten, da die unterschiedliche Ausführung des Manövers beim Bronchodilatationstest zu falsch-positiven oder falsch-negativen Ergebnissen führen kann.

Parameter zur Erfassung der forcieren Expiration

1. Einsekundenkapazität, forciertes expiratorisches Volumen in der ersten Sekunde (FEV₁)

Das Volumen, welches nach maximaler Inspiration mittels forcierter Expiration in der 1. Sekunde ausgeatmet werden kann, wird als (absolute) Einsekundenkapazität (FEV₁) bezeichnet. Die Einsekundenkapazität in Prozent der Vitalkapazität wird Tiffeneau-Index oder relative Einsekundenkapazität genannt. In Deutschland und Frankreich wird üblicherweise die inspiratorische Vitalkapazität IVC in den Nenner gesetzt, hingegen im nordamerikanischen Raum zumeist die forcierte Vitalkapazität FVC.

2. Spitzenfluss (PEF)

Der Spitzenfluss PEF (Peak Expiratory Flow) ist die maximal erreichbare Atemstromstärke bei forcierter Expiration. Er kann an der Fluss/Volumen-Kurve unmittelbar abgelesen werden. Das Messergebnis hängt wie bei allen Atemstromstärken stark von der Mitarbeit der Patienten ab.

Da der PEF gut mit dem Schweregrad der obstruktiven Ventilationsstörung einer asthmatischen Erkrankung korreliert, wird er zur Verlaufs- bzw. Therapiekontrolle genutzt. Hierzu misst der

Patient mithilfe eines Peakflow-Meters mehrmals täglich den PEF zu Hause, insbesondere bei akuter Atemnot oder Instabilität der Erkrankung. Es ist zu beachten, dass Peakflow-Meter ihre Messergebnisse in $L \times \text{min}^{-1}$ und nicht in $L \times \text{s}^{-1}$ anzeigen. Außerdem ist das Atemmanöver bei alleiniger Bestimmung des PEF nicht identisch mit der oben beschriebenen forcieren Expiration über mehrere Sekunden.

3. Maximale expiratorische Flüsse bei x% der Vitalkapazität (FEF_{x%} bzw. MEF_{x%})

Trägt man in die Fluss/Volumen-Kurve die Volumengrenzen ein, bei der jeweils ein Viertel der forcieren Vitalkapazität ausgeatmet wurde, so kann man an diesen Stellen die zugehörigen maximalen Atemstromstärken ablesen: Auf diese Weise erhält man Werte für die maximalen expiratorischen Flüsse MEF₇₅, MEF₅₀ und MEF₂₅ (jeweils bezogen auf den Prozentsatz der FVC, der dann noch ausgeatmet werden kann!). In der neuesten amerikanisch-europäischen Empfehlung wird die maximale expiratorische Atemstromstärke (MEF) als FEF (forced expiratory flow) angegeben. Der Index ist das Volumen, welches bereits ausgeatmet ist, so ist z.B. FEF₇₅ nach dieser Empfehlung identisch mit der oben definierten MEF₂₅. Es wird auch nicht mehr empfohlen die Volumengrenzen anhand der inspiratorischen Vitalkapazität festzulegen. Die maximalen expiratorischen Flüsse sind sehr empfindliche Indikatoren für jede Art von Veränderungen in den kleinen Atemwegen. Der Bezug auf die jeweilige FVC schmälert allerdings ihre Verwendbarkeit für die Beurteilung des bronchodilatatorischen Effektes. Bei Patienten nach Transplantation kann ein im Verlauf abnehmender MEF₂₅-Wert (FEF₇₅-Wert) ein Hinweis auf eine Abstoßungsreaktion sein.

Die mittlere maximale (forcierte) expiratorische Atemstromstärke, die zwischen 25 und 75% der forcieren Vitalkapazität ausgeatmet wird, wird als MMEF oder FEF 25–75% bezeichnet. Dieser Parameter gilt als sehr sensibel zur Erkennung einer beginnenden Atemwegsobstruktion, ein Vorteil gegenüber der Bestimmung von FEF₅₀ oder FEF₇₅ (bzw. MEF₅₀ oder MEF₂₅) ist aber nicht belegt.

Tab. 2 Kriterien für eine repräsentative forcierte Expiration

Reproduzierbarkeitskriterien:	
Die Differenz zwischen größtem und zweitgrößtem Wert darf bei	
FEV ₁ nicht mehr als 5 % betragen*	
FVC nicht mehr als 5 % betragen*	
PEF nicht mehr als 10 % betragen	
*Bei FVC < 1 l darf die Differenz nicht mehr als 100 ml betragen.	
Akzeptanzkriterien:	
Der maximale expiratorische Spitzenfluss („Peakflow“ PEF) soll innerhalb von 120 ms erreicht werden (steiler Anstieg).	
keine Artefakte (Husten, Glottisschluss, Leckagen, vorzeitige Beendigung, unterschiedliche Anstrengung)	
die Expiration ist erst beendet, wenn der kontinuierliche Fluss unter $0,1 \text{ l} \times \text{s}^{-1}$ abgesunken ist.	

Tab. 3 Dokumentation Mitarbeit und technische Qualität

Mitarbeit	technische Qualität
einwandfrei	Messung fehlerhaft
gut	Messung ohne relevante Fehler
eingeschränkt wegen mangelndem Verständnis	Messung noch brauchbar
eingeschränkt wegen Hustenreiz	Messung teilweise fehlerhaft
eingeschränkt wegen Angst	Messung mit großen Fehlern
eingeschränkt wegen mangelnder Kraft	
eingeschränkt wegen Schmerzen	
eingeschränkt wegen mangelnder Bereitschaft	

Das Volumen, welches bei einer forcierten Inspiration vom Residualvolumen in 1 Sekunde eingeatmet wird, wird als FIV₁ bezeichnet. Dieses forcierte Inspirationsvolumen in 1 Sekunde beträgt bei gesunden Probanden ca. 95% der inspiratorischen forcierten Vitalkapazität. Dieses Volumen ist ein Maß für die inspiratorisch wirksame Obstruktion und für die inspiratorisch wirksame Muskelkraft. Es ist kein Standardparameter der Spirometrie. Die Inspiratorische Kapazität (IC) ist das Volumen zwischen FRC und TLC (● Abb. 1). Nach mehreren Atemzügen und stabilem end-expiratorischen Volumen erfolgt die zügige maximale Einatmung bis zur TLC. Es sollte der Mittelwert aus 3 Manövern zur Auswertung kommen. Die inspiratorische Kapazität ist ein direktes Maß zur Abschätzung der Lungenüberblähung, ihre Verminderung auf unter 25% der TLC ist mit einer ungünstigen Prognose verbunden. Sie wird auch zur Abschätzung einer Änderung der FRC durch Pharmaka oder Belastung genutzt.

Durchführung der Untersuchung

Der Patient sollte beengende Kleidungsstücke ablegen. Die Messung wird im Sitzen durchgeführt, da sich alle Normalwerte auf die sitzende Position beziehen. Die Nase wird mit einer Nasenklemme luftdicht verschlossen. Der Patient nimmt das Mundstück vor dem Pneumotachographen zwischen die Zähne, die Zunge liegt unter dem Mundstück. Nachdem einige Male ruhig ein- bzw. ausgeatmet wurde, wird er aufgefordert, langsam pressend maximal auszuatmen. Danach erfolgt eine zügige vollständige Inspiration zur Bestimmung der inspiratorischen Vitalkapazität.

An dieses Manöver schließt sich nach einer möglichst geringen Pause (unter 1 sec) eine forcierte maximale Expiration an. Der Patient muss dazu angehalten werden, das minimale bzw. das maximale Lungenvolumen (also erst RV, dann TLC und wieder RV) wirklich zu erreichen. Um das RV bei langsamer und vor allem bei forcierter Expiration möglichst gut zu erreichen, kommt es darauf an, so lange wie möglich auszuatmen, bis ein deutliches Plateau im zeitlichen Volumenverlauf sichtbar wird. Dies fällt vor allem Patienten mit einer obstruktiven Ventilationsstörung schwer.

Kriterien für eine akzeptable Durchführung der Messung

Die Akzeptanzkriterien sind in ● Tab. 2 zusammengestellt. Das jeweilige Expirationsmanöver ist korrekt beendet, wenn der kontinuierliche Fluss unter $0,1 \text{ l} \times \text{s}^{-1}$ abgesunken ist. Andere Zeitkriterien, wie z. B. eine Expiration von mindestens 4 Sekunden, sind z. B. für Kinder und Patienten mit Lungengerüsterkrankung nicht möglich und sollten nicht verwendet werden. Um die Reproduzierbarkeit (auch „repeatability“, also „Wiederholbarkeit“ genannt) – und damit die Güte der Mitarbeit – bestimmen zu können, müssen mindestens 3 Versuche durchgeführt werden, wobei sich die Ergebnisse der besten 2 Versuche für FEV₁ und FVC um weniger als 5% (bei einer FVC < 1 l weniger als 100 ml) und für PEF um weniger als 10% unterscheiden dürfen. Hohe Reproduzierbarkeit ist trotz guter Mitarbeit nicht erreichbar, wenn durch die forcierten Manöver ein „Spirometer-Asthma“ induziert wurde. Diese Komplikation ist bei 2–3 Versuchen selten, die Wahrscheinlichkeit steigt aber mit der Zahl der Versuche, weil jede forcierte Expiration eine Art von Provokationstest darstellt: Mehr als 4 forcierte Expirationen sind nicht sinnvoll. Verstöße gegen die Akzeptanzkriterien müssen dokumentiert werden (soweit möglich automatisch von der Messsoftware) und die vom Untersucher abgeschätzte Güte der Mitarbeit muss auf dem Untersuchungsprotokoll notiert werden (Muster in ● Tab. 3) (● Abb. 2).

Auswertung

Die höchsten Werte für IVC, FEV₁ und FVC werden aus allen Manövern ermittelt, die die o. g. Akzeptanz- und Reproduzierbarkeitskriterien erfüllen. Die maximalen expiratorischen Atemstromstärken werden aus der optisch besten Fluss/Volumenkurve bzw. aus der mit der größten Summe aus FEV₁ und FVC bestimmt. Wahrscheinlich wird die „beste“ Kurve durch die höchste Summe von FVC, FEV₁ und $1/3 \times \text{PEF}$ beschrieben, dies ist jedoch nicht validiert.

Diese Kurve ist numerisch und graphisch zu dokumentieren. Um auch die Reproduzierbarkeit zu dokumentieren, bieten sich 2 Möglichkeiten an: Man notiert die Reproduzierbarkeit numerisch oder/und man dokumentiert alle akzeptablen Fluss/Volumenkurven grafisch. Die grafische Darstellung muss jederzeit eine erneute Formanalyse ermöglichen.

Nicht empfohlen wird die so genannte Hüllkurve. Dabei werden die Fluss/Volumenkurven am Ausgangspunkt der forcierten Expiration (TLC) übereinandergelegt und die Maximalkurve konstruiert, die Maximalflüsse werden dann von der Maximalkurve abgelesen. Die Maximalkurve ist daher eine konstruierte, fiktive Kurve, die nie geatmet wurde. Typische Fehlerzeichen bei der

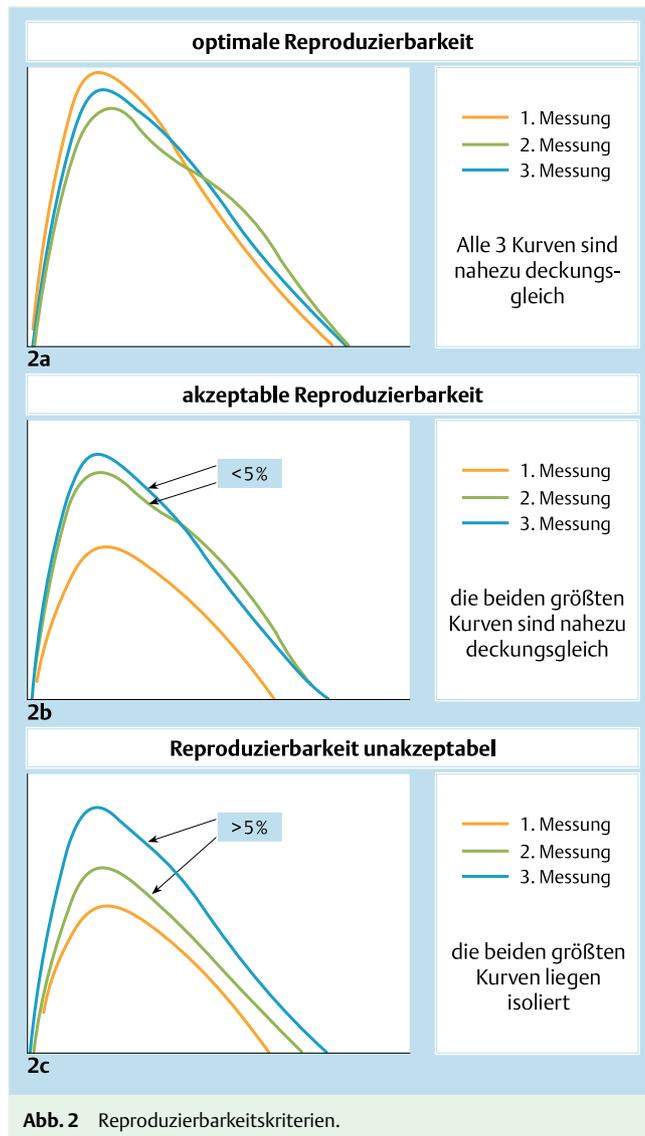
Tab. 4 Regressionsgleichungen (EGKS-Werte) für Lungenvolumina und expiratorische Atemstromstärken für Erwachsene im Alter von 18–70 Jahren

			Mittelwert-Gleichung	1,64 × RSD
Männer	IVC	(l)	6,10 KG–0,028 A–4,65	± 0,92
	FVC	(l)	5,76 KG–0,026 A–4,34	± 1,00
	FEV ₁	(l)	4,30 KG–0,029 A–2,49	± 0,84
	PEF	(l × s ⁻¹)	6,14 KG–0,043 A+ 0,15	± 1,99
	FEF _{50%} = MEF _{50%}	(l × s ⁻¹)	3,79 KG–0,031 A–0,35	± 2,17
	FEF _{75%} = MEF _{25%}	(l × s ⁻¹)	2,61 KG–0,026 A–1,34	± 1,28
	FEV ₁ /VC(%)		– 0,18A+ 87,21	± 11,8
Frauen	IVC	(l)	4,66 KG–0,024 A–3,28	± 0,69
	FVC	(l)	4,43 KG–0,026 A–2,89	± 0,71
	FEV ₁	(l)	3,95 KG–0,025 A–2,60	± 0,62
	PEF	(l × s ⁻¹)	5,50 KG–0,030 A–1,11	± 1,48
	FEF _{50%} = MEF _{50%}	(l × s ⁻¹)	2,45 KG–0,025 A+ 1,16	± 1,81
	FEF _{75%} = MEF _{25%}	(l × s ⁻¹)	1,05 KG–0,025 A+ 1,11	± 1,13
	FEV ₁ /VC(%)		– 0,19A+ 89,10	± 10,7

KG = Körperlänge in m, A = Alter in Jahren

Zwischen 18 und 25 Jahren wird in die Sollwertgleichung das Alter 25 eingesetzt. Die 5. Perzentile errechnet sich durch Subtraktion von 1,64 × RSD (residuale Standardabweichung) vom errechneten Mittelwert (z. B. ist der untere Grenzwert für IVC bei Männern: Mittlere IVC–0,92 l)

Sollwerte für Kinder in: Lindemann H., W. Leupold: Lungenfunktionsdiagnostik bei Kindern. Kohlhammer, Stuttgart 2003.

**Abb. 2** Reproduzierbarkeitskriterien.

Patienten-Mitarbeit bei der Auswertung der Fluss/Volumen-Kurve zeigt die ● **Abb. 3**.

Normalwerte

Die gebräuchlichsten Normalwerte sind von der European Respiratory Society (ERS) zuletzt 1993 publiziert worden. Es handelt sich um die so genannten EGKS (Europäische Gesellschaft für Kohle und Stahl)-Werte. Die Regressionsgleichungen zur Berechnung des Sollwertes sind in ● **Tab. 4** angegeben, die Streuung ist im Wesentlichen auf die lockere Korrelation zwischen Körperlänge und Lungenvolumen zurückzuführen. Werte unterhalb der 5. Perzentile des Frequenzspektrums der in der Referenzpopulation gemessenen Werte, also des „Normalbereichs“, gelten als pathologisch mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von unter 5%. Anders ausgedrückt weisen weniger als 5% der gesunden Bevölkerung einen Wert unterhalb der 5. Perzentile auf. Die 5. Perzentile wird durch Subtraktion von 1,64 × RSD (residuale Standardabweichung, Restvarianz) vom errechneten Sollwert ermittelt (● **Tab. 4**). Somit sind aber auch bis zu 5% der unterhalb des Normbereichs liegenden Werte nicht krankheitsbedingt. Auch kann ein im Normbereich liegender Wert pathologisch sein, so kann z. B. eine im Normbereich liegende Vitalkapazität durch einen Lungengerüstprozess von einem zuvor deutlich höheren Wert reduziert worden sein oder eine im Normbereich liegende FEV₁ durch einen Bronchodilatationstest ansteigen. Patienten können eine klinisch manifeste COPD aufweisen, obwohl ihre spirometrischen Werte noch im Normbereich liegen. Darum sollte man den individuellen Verlauf der Kenngrößen der Lungenfunktion verfolgen, um beurteilen zu können, ob die erhobenen Werte für den individuellen Patienten noch normal oder schon pathologisch sind.

Bewertung der Spirometrie

Mittels Spirometrie können unterschiedliche Ventilationsstörungen nachgewiesen und quantifiziert werden. Problemlos gelingt dies für die obstruktive Ventilationsstörung, für die restriktive

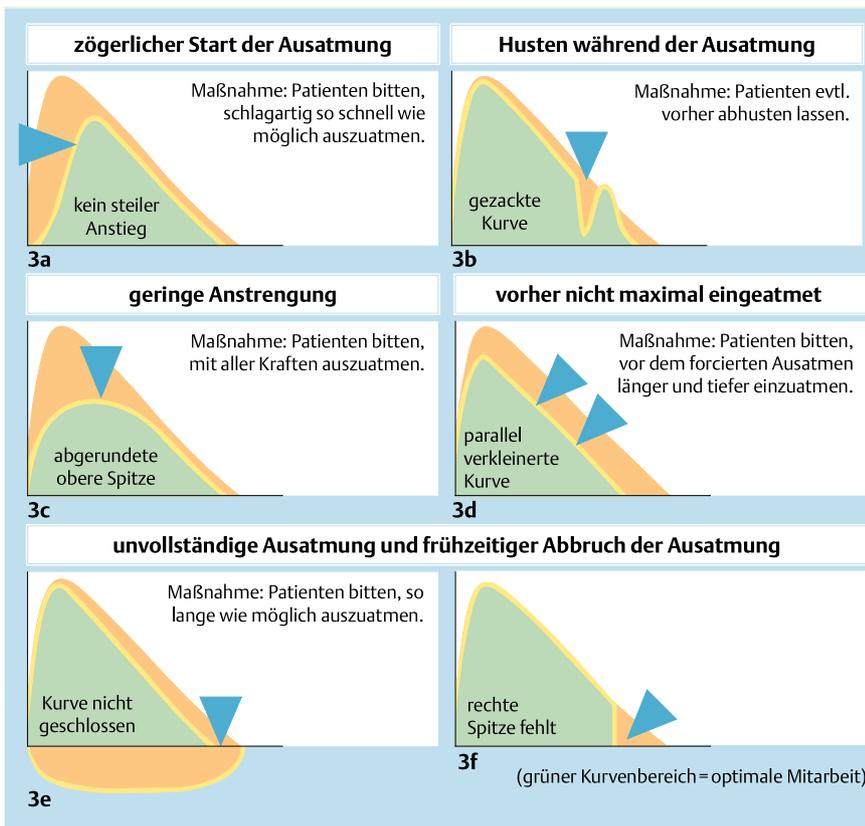


Abb. 3 Fehlerzeichen, die an eine mangelhafte Mitarbeit des Patienten hinweisen.

tive Ventilationsstörung allerdings nur mit erheblichen Einschränkungen.

1. Obstruktive Ventilationsstörung

Eine obstruktive Ventilationsstörung ist durch eine Verminderung des altersabhängigen Tiffeneau-Index (FEV_1/IVC) auf Werte unterhalb der 5. Perzentile definiert. Dabei ist in der Regel auch die absolute Einsekundenkapazität kleiner als der Normalwert. Charakteristisch ist die Abnahme der maximalen expiratorischen Atemstromstärken. Der spirometrische Schweregrad der obstruktiven Ventilationsstörung ergibt sich aus der Einschränkung der FEV_1 , ausgedrückt in Prozent des Sollwerts (● Tab. 5a). Er muss nicht mit dem klinischen Schweregrad der Erkrankungen wie COPD oder Asthma übereinstimmen. Außerdem sind die Spirometriedaten nur ein Teil der Surrogatparameter, die die Beurteilung des klinischen Schweregrades von Asthma und COPD bestimmen. So sind z. B. bei Asthma auch die Symptomatik tagsüber und nachts sowie die PEF-Schwankungen zu berücksichtigen. Selbst bei präbronchodilatatorisch gemessener normaler Spirometrie kann somit ein mittelschweres persistierendes Asthma vorliegen, wenn der Patient nächtliche Anfälle hat (● Tab. 5b). Bei der Schweregradeinteilung der COPD wird die postbronchodilatatorische FEV_1 gewählt, um die chronische (scheinbar irreversible) Lungenfunktionseinschränkung als Grundlage der Beurteilung heranzuziehen, aber es werden auch die Blutgase berücksichtigt (● Tab. 5c). Häufig ist die Vitalkapazität aufgrund einer zusätzlich bestehenden Lungenüberblähung vermindert, wobei aber die Totale Lungenkapazität (TLC) normal oder erhöht ist. Erkrankungen, die mit einer obstruktiven Ventilationsstörung einhergehen, sind in ● Tab. 5a aufgeführt. Stenosen in den oberen Atemwegen (z. B. tumorbedingte Trachealstenosen oder Stimmbandparesen) können zur Plateau-

bildung in der Fluss/Volumen-Kurve führen, d. h. große Atemströme werden regelrecht gekappt. Bei begründetem Verdacht auf eine zentrale Atemwegsstenose (Mundstück? Gebissposition? Stridor!) sollte nicht nur die forcierte expiratorische, sondern auch die forcierte inspiratorische Fluss/Volumen-Kurve bestimmt werden, die ebenfalls eine Limitierung der Spitzenflüsse zeigt. Da die Strömungshindernisse oft mechanisch instabil sind, sind die Fluss/Volumen-Kurven dann allerdings schlecht reproduzierbar. Bei dem optischen Eindruck einer expiratorischen Plateaubildung in der Fluss/Volumen-Kurve muss an einen Tu-

Tab. 5a Obstruktive Ventilationsstörung

Definition		
$FEV_1/IVC < 5.$ Perzentile des Sollwertes		
Schweregrade		
I	leicht	$FEV_1 > 70\%$ Soll
II	mäßig	$FEV_1 60 - 69\%$ Soll
III	mittelschwer	$FEV_1 50 - 59\%$ Soll
IV	schwer	$FEV_1 35 - 49\%$ Soll
V	sehr schwer	$FEV_1 < 35\%$ Soll
Der spirometrische Schweregrad der obstruktiven Ventilationsstörung stimmt nicht mit dem Schweregrad der Erkrankung, z. B. Asthma oder COPD, überein (s. Tab. ● 5b, c)		
Differenzialdiagnosen		
Asthma bronchiale		
COPD		
Bronchiektasie		
zystische Fibrose (Mukoviszidose)		
Silikose		
Stenose im Bereich der großen Atemwege (cave: Tumor)		
Lungenparenchymerkrankungen mit Obstruktion (z. B. Sarkoidose)		

	Symptome tagsüber	nächtliche Symptome	FEV ₁ oder PEF
4 schwergradig persistierend	Dauersymptome eingeschränkte körperliche Aktivität, hohe Intensität + Variabilität	häufig	≤ 60 % vom Sollwert PEF-Variabilität > 30 %
3 mittelgradig persistierend	täglich	> 1mal/Woche	60 – 80 % vom Sollwert PEF-Variabilität 20 – 30 %
2 geringgradig persistierend	> 1mal/Woche < 1mal/Tag	> 2mal/Monat	≥ 80 % vom Sollwert PEF-Variabilität 20 – 30 %
1 intermittierend	< 1mal/Woche dazwischen asymptomatisch	≤ 2mal/Monat	≥ 80 % vom Sollwert PEF-Variabilität < 20 %

Ein einziges Kriterium eines höheren Schweregrades ist bereits ausreichend, den Patienten dem höheren Schweregrad zuzuordnen.

Für die Beurteilung des Schweregrades des Asthmas sollte die prädilatorische FEV₁ gemessen werden. Berechnung der zirkadianen PEF-Variabilität: Geringster PEF-Morgenwert bei Messungen über 7 Tage in % des PEF-Bestwertes.

Tab. 5b Schweregrade bei unbehandeltem Asthma (Erwachsene)

Schweregrad	Charakteristik
IV (sehr schwer)	– FEV ₁ /VC < 70 % – FEV ₁ < 30 % Soll oder FEV ₁ < 50 % Soll und chronische respiratorische Insuffizienz*
III (schwer)	– FEV ₁ /VC < 70 %, 30 % ≤ FEV ₁ < 50 % Soll mit/ohne chronische Symptome (Husten, Auswurf)
II (mittelgradig)	– FEV ₁ /VC < 70 %, 50 % ≤ FEV ₁ < 80 % Soll, mit/ohne chronische Symptome (Husten, Auswurf)
I (leichtgradig)	– FEV ₁ /VC < 70 %, FEV ₁ > 80 % Soll, mit/ohne Symptomatik (Husten, Auswurf)

*Respiratorische Insuffizienz: PaO₂ < 60 mm Hg ± PaCO₂ > 50 mm Hg unter Raumluft

Die Schweregradeinteilung erfolgt anhand der nach akuter Bronchodilatation gemessenen FEV₁-Werte (postdilatorische FEV₁) in % vom Soll bei stabiler COPD.

Tab. 5c Schweregrade der COPD

mor oder Stenose im Bereich der großen Atemwege gedacht werden! Bei der numerischen Dokumentation einer extrathorakalen Stenose sind folgende Quotienten hilfreich: MIF₅₀/MEF₅₀ < 1,0, FEV₁/PEF > 10,0, FEV₁/FEV_{0,5} > 1,5. Allerdings ist zu beachten, dass die Sensitivität dieser Konstellationen sehr gering ist.

Reversibilitätstest mit Bronchodilatoren: Wird eine obstruktive Ventilationsstörung vermutet, sollte ein Bronchodilatationstest durchgeführt werden. Die Messungen der FEV₁ erfolgen vor und 15 Minuten nach Inhalation eines schnell wirksamen Beta-2-Sympathomimetikums (z.B. bis zu 400 µg Salbutamol in 4 separaten Dosen) bzw. vor und frühestens 30 Minuten nach Inhalation eines schnell wirksamen Anticholinergikums (z.B. 160 µg Ipratropiumbromid). Ein Anstieg der FEV₁ um mehr als 200 ml und um mindestens 15% des Ausgangswertes belegt die (Teil-)Reversibilität der Bronchialobstruktion. Die Messung der Reaktion der Atemwegsobstruktion auf Bronchodilatoren ist vor allem zur Differenzialdiagnose zwischen Asthma und COPD notwendig: Je höher der Grad der Reversibilität, umso wahrscheinlicher ist die Diagnose Asthma bronchiale. Bei COPD wird die nach Inhalation von Bronchodilatoren bestimmte FEV₁ zur Schweregradeinteilung verwendet. Bei der Beurteilung der Reversibilität ist auf die vorausgegangene Karenz von Bronchodilatoren zu achten (kurzwirksame Beta-Mimetika und Anticholinergika 4 Stunden, langwirksame Beta-Mimetika und retardierte Theophyllinpräparate 12 Stunden, langwirksame Anticholinergika 48 Stunden).

2. Restriktive Ventilationsstörung

Eine restriktive Ventilationsstörung ist durch eine Behinderung der normalen Lungenausdehnung charakterisiert. Definiert ist sie durch eine Verminderung der Totalkapazität, die allerdings spirometrisch nicht gemessen werden kann. Eine verminderte Vitalkapazität alleine kann nicht den Nachweis einer restrikti-

ven Ventilationsstörung erbringen. Wenn der FEV₁/IVC-Quotient normal oder erhöht ist, darf man allerdings bei einer verminderten Vitalkapazität eine restriktive Ventilationsstörung vermuten. Der spirometrische Schweregrad der restriktiven Ventilationsstörung ergibt sich aus der Einschränkung der IVC, ausgedrückt in % des Sollwerts (● **Tab. 6**). Sie ist ein pathophysiologisch sinnvolleres Maß, die behinderte Lungenausdehnung auszudrücken, wenn die TLC nicht zur Verfügung steht. Natürlich ist aber bei einer verminderten IVC auch die FEV₁ erniedrigt. Man unterscheidet prinzipiell eine pulmonale von einer extrapulmonalen Restriktion, die jeweiligen Ursachen sind in ● **Tab. 6** zusammengefasst. Die pulmonale Restriktion ist durch eine vermehrte Steifigkeit (verminderte Compliance) der Lunge bedingt. Daher ist die „Entleerung“ der Lunge bei forcierter Expiration durch die erhöhte Retraktionskraft beschleunigt, der Peak flow kaum erniedrigt und die Fluss/Volumen-Kurve expiratorisch konkavbogig verformt. Beim Zustand nach Pneumektomie liegt eine restriktive Ventilationsstörung vor, wobei die Steifigkeit der verbliebenen Lungenhälfte normal ist. Bei extrapulmonaler Restriktion ist die Lungenausdehnung trotz normaler Lunge, z.B. durch Atemmuskelschwäche oder Thoraxdeformität, vermindert. Dabei ist die Fluss/Volumen-Kurve kleiner und nicht verformt. Zur Diagnostik der Atemmuskelschwäche als Ursache einer Restriktion ist die Bestimmung der maximalen Inspirationskraft notwendig (siehe Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga zur Messung der inspiratorischen Muskelfunktion). Die Einteilung des Schweregrades findet sich in ● **Tab. 6**. Auch hier muss nicht der Schweregrad der Ventilationsstörung mit dem Schweregrad der Erkrankung übereinstimmen. So können z.B. Patienten mit schwerster Hypoxie bei Lungenfibrose lediglich eine leichte restriktive Ventilationsstörung aufweisen. ● **Abb. 4**.

Definition
TLC < 5. Perzentile des Sollwerts

Schweregrade

I	leicht	IVC	> 70 % Soll
II	mäßig	IVC	60 – 69 % Soll
III	mittelschwer	IVC	50 – 59 % Soll
IV	schwer	IVC	35 – 49 % Soll
V	sehr schwer	IVC	< 35 % Soll

Differenzialdiagnosen

a) pulmonal diffuse Lungenparenchymerkrankungen Silikose Pneumonie Pneumonitis zystische Fibrose (Mukoviszidose) Bronchiektasie Linksherzinsuffizienz (oft mit Obstruktion)	b) extrapulmonal Pneumothorax Atemmuskelschwäche (z. B. neuromuskuläre Erkrankungen, Myopathien, Steroide, Hyper/Hypothyreose etc.) Kyphoskoliose instabiler Thorax Pleuraerguss, -schwarte Zwerchfellparese Adipositas
c) Zustand nach Pneumektomie	

Tab. 6 Restriktive Ventilationsstörung

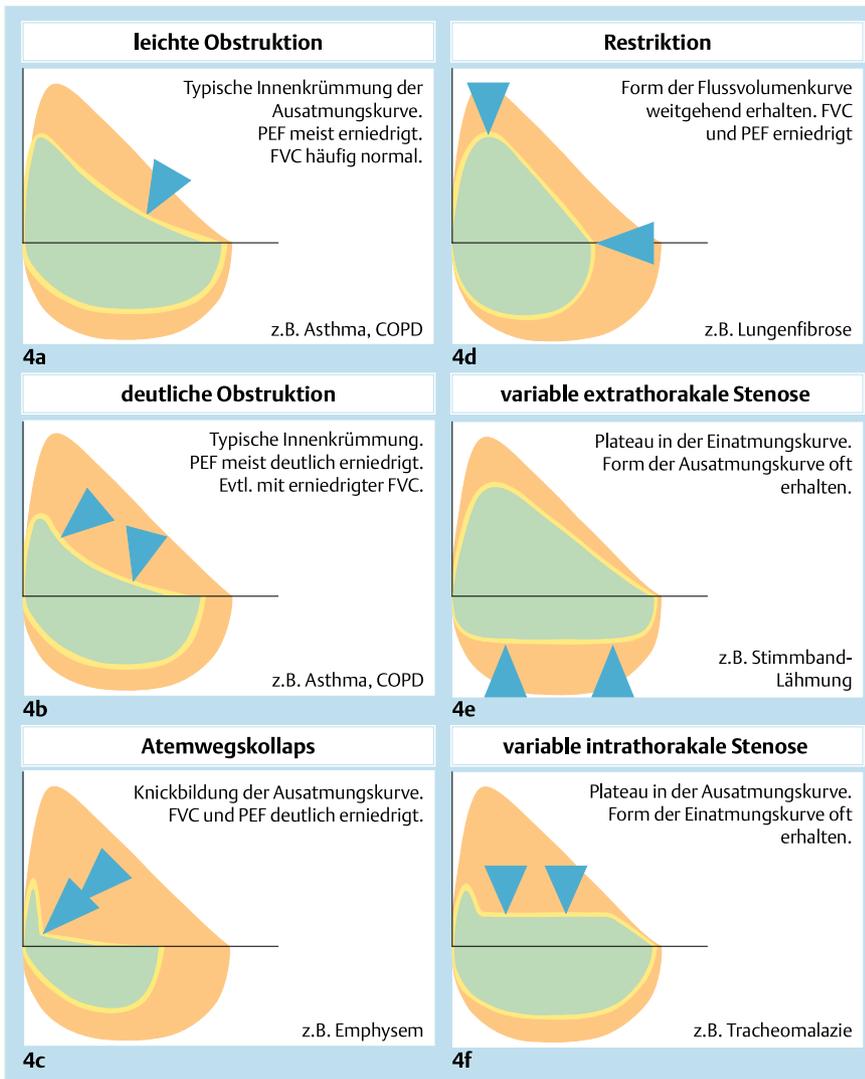


Abb. 4 Krankheitszeichen.

3. Differenzialdiagnose bei verminderter Vitalkapazität

Eine verminderte Vitalkapazität ist bei verminderter Totkapazität Ausdruck einer restriktiven Ventilationsstörung, bei normaler oder erhöhter Totkapazität ist sie Folge einer Lungen-

überblähung. Erfahrungsgemäß ist bei einer obstruktiven Ventilationsstörung mit einem FEV₁/IVC-Quotienten unter 55% die Verminderung der Vitalkapazität fast immer durch eine Lungenüberblähung bedingt. Der früher häufig verwendete Terminus

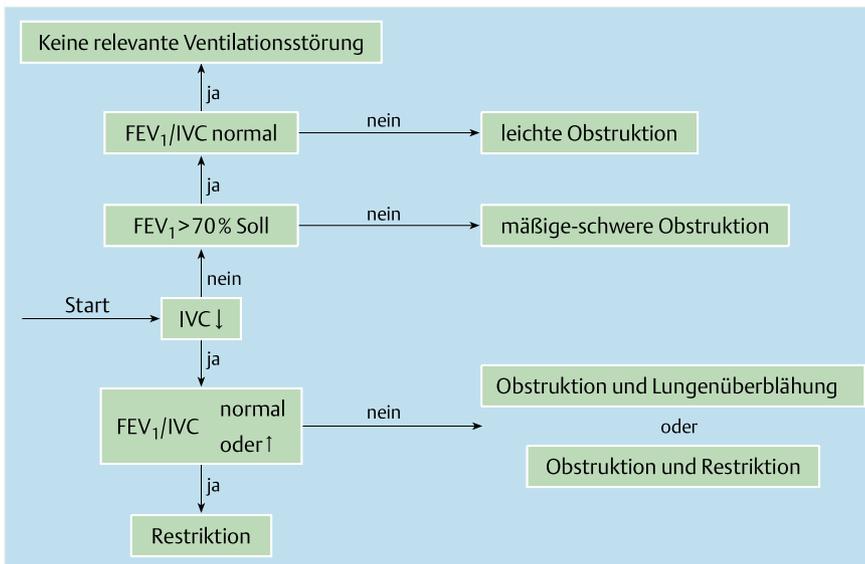


Abb. 5 Differenzialdiagnose bei Veränderungen von Vitalkapazität (IVC) und Sekundenkapazität (FEV_1).

„kombinierte Ventilationsstörung“ für die Kombination aus eingeschränktem FEV_1/IVC -Quotienten und verminderter Vitalkapazität unterschied nicht zwischen den Differenzialdiagnosen Restriktion vs. Lungenüberblähung und sollte wegen dieser Ungenauigkeit nicht mehr verwendet werden. Wenn z. B. bei einer restriktiven Ventilationsstörung bei Lungengerüsterkrankung der FEV_1/IVC -Quotient durch gleichzeitig bestehende Obstruktion (z. B. bei Sarkoidose II und III) vermindert ist, sollte eine simultan bestehende restriktive und obstruktive Ventilationsstörung diagnostiziert werden (Abb. ● 5).

Danksagung

Grafiken aus www.spiro-webCard.de. Wir danken Frau Dr. U. Butt für die redaktionelle Bearbeitung und Frau Barbara Crieé für die grafische Bearbeitung.

Literatur

Diese Empfehlungen wurden an die offiziellen gemeinsamen Empfehlungen der American Thoracic Society und der European Respiratory Society (ATS/ERS Task Force: Standardisation of lung function testing, Eur. Respir. J. 26: 2005) angeglichen. Allerdings wurde für die Schweregradeinteilung der restriktiven Ventilationsstörung die IVC verwendet (s. Text).

Anhang I: Hygieneempfehlungen

Insbesondere bei Verwendung von Geräten, bei denen auch inspiratorische Atemmanöver durchgeführt werden, sind Vorsichtsmaßnahmen zu beachten, da der Patient u.U. direkt gefährdet ist:

Bei Ausstattung mit beheiztem Pneumotachographen-Sieb ist davon auszugehen, dass die meisten Keime innerhalb kurzer

Zeit abgetötet werden. Wenn Nasenklemme, Mundstück und Krümmer nach jeder Messung gewechselt werden, ist das Risiko einer Infektion mit pathogenen Keimen zu vernachlässigen. Bei unbeheizten Systemen sollte nach jedem Patienten sicherheitshalber der gesamte Messkopf gewechselt oder der Einsatz von Atemfiltern erwogen werden. Bei erhöhtem Risiko (Hepatitis B oder C, Mukoviszidose, offener Lungen-Tuberkulose, AIDS, Immundefizienz, immun-suppressiver oder zytostatischer Therapie) wird anschließend entweder ein frischer Pneumotachograph verwendet bzw. können Einwegfilter entsprechend den Empfehlungen der Gerätehersteller verwendet werden. Damit wird ein verlässlicher Schutz gegen Bakterien und Viren gewährleistet, ohne dass die Messergebnisse in relevantem Ausmaß beeinträchtigt werden.

Zum Schutz des Personals und der nachfolgenden Patienten sollte nach jeder Untersuchung eines Patienten u. a. eine sorgfältige Reinigung und Desinfektion der Hände erfolgen.

Eine weitere Sicherheitsmaßnahme besteht darin, Messungen an infektiösen Patienten am Schluss der Lungenfunktionsuntersuchungen innerhalb eines Tages bzw. im Krankenzimmer durchzuführen.

Damit ergeben sich folgende Minimalanforderungen:

Demontage von Nasenklemme, Mundstück und gegebenenfalls Krümmer nach jedem Patienten, bei unbeheiztem Pneumotachographen wird dieser ebenfalls demontiert (bzw. das stattdessen eingesetzte widerstandsarme Einwegfilter). Sorgfältige Reinigung und Desinfektion der Hände (Kontamination!).

Montage von Krümmer, neuem Mundstück und Nasenklemme (bzw. des neuen Pneumotachographen oder Einwegfilters).

Je nach Räumlichkeit und Untersuchungsaufwand kann eine Lüftung des Lungenfunktionslabors nach jedem Patienten sinnvoll sein.