

AINS SOPs AINS

Lungenfunktion ☆

Methoden > Lungenfunktionsdiagnostik

[Jens Schreiber](#), [Eva Lücke](#), [Thomas Hachenberg](#)

Lungenfunktionsdiagnostik

Jens Schreiber, Eva Lücke, Thomas Hachenberg

Steckbrief

Mit der präoperativen Lungenfunktionsdiagnostik sollen mögliche pulmonale Erkrankungen erfasst werden. Dadurch lassen sich die jeweiligen Anästhesieverfahren besser planen, das perioperative Risiko und das mögliche Ausmaß einer Lungenparenchymresektion abschätzen, die postoperative Behandlung besser durchführen und perioperative pulmonale Komplikationen reduzieren. Zur Indikation wurde 2017 eine gemeinsame Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Anästhesiologie, der Deutschen Gesellschaft für Chirurgie und der Deutschen Gesellschaft für Innere Medizin publiziert, auf die an dieser Stelle verwiesen wird ([Abb. 24.1](#)). In diesem Kapitel wird auf die für die thorakale Anästhesie praktisch relevanten Aspekte der Diagnostik von Störungen der Ventilation, der Diffusion, der Atemmuskultur und der Blutgase eingegangen.

Synonyme

- ▶ Ganzkörperpletysmografie
- ▶ Bodypletysmografie
- ▶ Lungenfunktionstest
- ▶ Spirometrie

Keywords

- ▶ Spirometrie

- ▶ Ganzkörperpletysmografie
- ▶ Bodypletysmografie
- ▶ Fluss-Volumen-Kurve
- ▶ Ventilation
- ▶ Distribution
- ▶ Diffusion
- ▶ Blutgasanalyse

Definition

Verfahren

- ▶ Die Lungenfunktionsdiagnostik beinhaltet ein Repertoire von Methoden zur Quantifizierung von Störungen der
 - ▶ Ventilation,
 - ▶ Distribution (Ventilations-Perfusions-Verteilung),
 - ▶ Diffusion (Gasaustausch),
 - ▶ Funktion der respiratorischen Muskulatur und der
 - ▶ zentralen Atemsteuerung.
- ▶ Zusätzlich können bedeutsam sein (Abb. 24.1):
 - ▶ Untersuchung der Dehnbarkeit des thorako-pleuro-pulmonalen Systems (Compliance/Elastance),
 - ▶ Untersuchung der pulmonalen Perfusion,
 - ▶ Nachweis einer bronchialen Hyperreaktivität und
 - ▶ Prüfung der Reversibilität einer Störung.
- ▶ Dabei finden v.a. die folgenden **Methoden** Anwendung:
 - ▶ Spirometrie und Fluss-Volumen-Kurve,
 - ▶ Bodyplethysmografie,
 - ▶ Bronchospasmolysetestung (Reversibilitätstest),
 - ▶ Diffusionsmessung,
 - ▶ Compliance-Messung,
 - ▶ unspezifische (oder spezifische) inhalative Provokationstestung,

- ▶ Blutgasanalyse.
- ▶ Die Untersuchungen erfolgen meist in körperlicher Ruhe.
- ▶ Sie können ergänzt werden durch Belastungsuntersuchungen (Ergometrie, Ergo-oxytensiomtrie, Spiroergometrie) zum Nachweis von latenten Störungen (pulmonal und/oder kardial) und zur Quantifizierung der kardiopulmonalen Leistungsbreite.

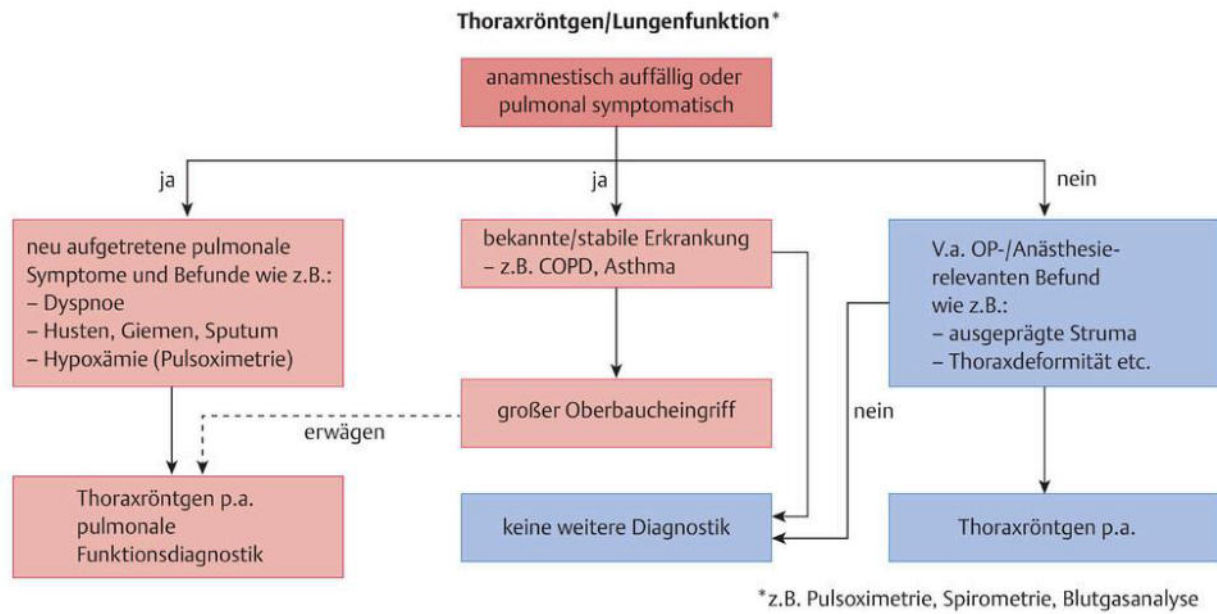


Abb. 24.1 Einteilung der Ventilationsstörungen.

Präoperatives diagnostisches Vorgehen.

Lungenfunktionsparameter

- ▶ Es werden statische und dynamische Lungenfunktionsparameter unterschieden (Tab. 24.1, Tab. 24.2, Tab. 24.3, Tab. 24.4, Tab. 24.5, Tab. 24.6).
- ▶ Die Lungenvolumina werden unterteilt in
 - ▶ mobilisierbare („atembare“) Volumina und
 - ▶ nichtmobilisierbare („nicht atembare“) Volumina.
- ▶ Mobilisierbare Parameter:
 - ▶ Diese können mithilfe der **Spirometrie** gemessen werden (Abb. 24.2).
- ▶ Nichtmobilisierbare Parameter:
 - ▶ Diese sind einer spirometrischen Messung nicht zugänglich.
 - ▶ Sie erfordern eine **Bodyplethysmografie**.

- ▶ Die flussabhängigen Parameter werden u.a. in der **Fluss-Volumen-Kurve** erfasst.
- ▶ Die einzelnen Parameter werden jeweils als aktueller Messwert (Ist-Wert) zu den alters-, gewichts- und geschlechtsbezogenen Sollwerten in Beziehung gesetzt (relative Werte = Prozent der Sollwerte).

Tab. 24.1 Definitionen: Statische Lungenvolumina.

Abkürzung	Begriff	Beschreibung
AML	Atemmittellage	Wendepunkt zwischen Aus- und Einatmung bei Ruheatmung
V_T	<u>Tidalvolumen</u>	<u>Atemzugvolumen</u> , das bei Ruheatmung pro Atemzug ein- bzw. ausgeatmete Volumen (l oder ml)
IRV	Inspiratorisches Reservevolumen	Volumen, das nach normaler Inspiration noch zusätzlich maximal eingeatmet werden kann (l oder ml)
IC	Inspiratorische Kapazität	Volumen, das aus der Atemruhelage heraus noch maximal eingeatmet werden kann (l oder ml)
ERV	Expiratorisches Reservevolumen	Volumen, das nach normaler Expiration noch zusätzlich maximal ausgeatmet werden kann (l oder ml)
VC	Vitalkapazität	Maximal atembares (mobilisierbares) Volumen ($VC = V_T + IRV + ERV$) (l oder ml)
VC_{IN}	Inspiratorische Vitalkapazität	Volumen, das nach einer maximalen Expiration noch maximal eingeatmet werden kann (l oder ml)
VC_{EX}	Expiratorische Vitalkapazität	Volumen, das nach maximaler Inspiration maximal ausgeatmet werden kann (l oder ml)
FVC	Forcierte Vitalkapazität	Volumen, das nach maximaler Inspiration schnellstmöglich maximal ausgeatmet werden kann (l oder ml)
FRC	Funktionelle Residualkapazität	Volumen, das sich nach einer normalen Expiration noch in der <u>Lunge</u> befindet – ($FRC = ERV + RV$) (Messung mit Heliumdilution) (l oder ml)
ITGV	Intrathorakales Gasvolumen	Volumen, das sich nach normaler Expiration noch in der <u>Lunge</u> befindet ($ITGV = ERV + RV$) (Messung mit Bodyplethysmografie) (l oder ml)
RV	Residualvolumen	Volumen, das sich nach maximaler Expiration noch in der <u>Lunge</u> befindet und nicht ausgeatmet werden kann (l oder ml)
TLC	Totale Lungenskapazität	Volumen, das sich nach maximaler Inspiration in der <u>Lunge</u> befindet ($TLC = VC + RV$) (l oder ml)

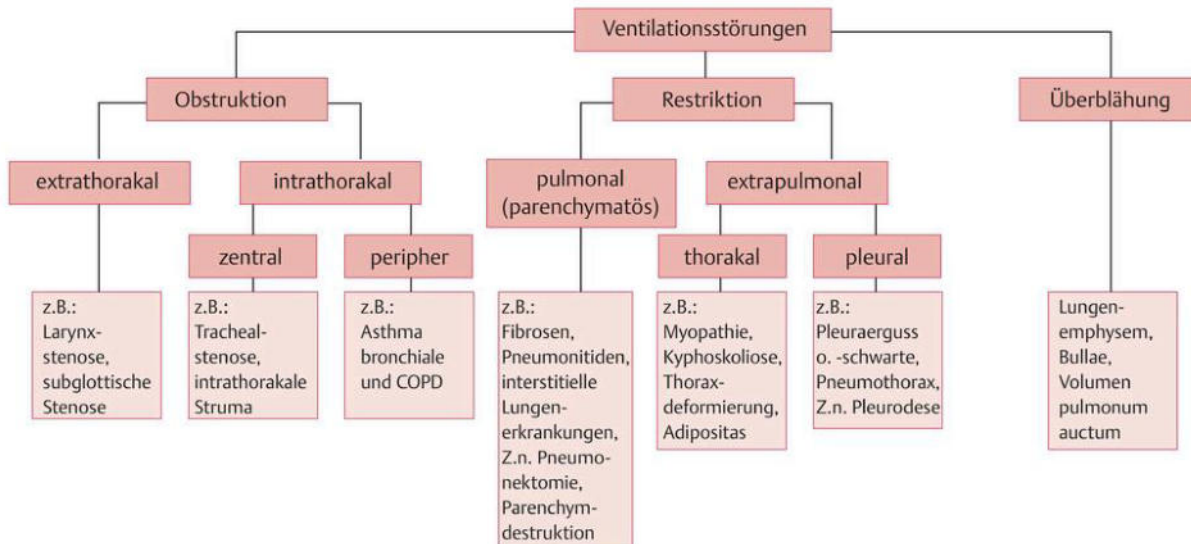


Abb. 24.2 Spirogramm.

Schematische Darstellung der verschiedenen Messparameter im Spirogramm (Abkürzungen [Tab. 24.1](#)).

Tab. 24.2 Definitionen Dynamische Ventilationsparameter.

Abkürzung	Begriff	Beschreibung
FEV1	Forciertes expiratorisches Volumen in der 1. Sekunde	Das nach maximaler Inspiration schnellstmöglich ausgeatmete Volumen in der 1. Sekunde (Synonym: 1-Sekunden-Kapazität) (l oder ml)
FEV1/FVC	relative 1-Sekunden-Kapazität	Verhältnis (prozentualer Anteil) des FEV1 zur Vitalkapazität (FVC oder VC _{IN}) (%)
PEF	Peak expiratory flow maximaler expiratorischer Fluss (Atemstromstärke)	Spitzenfluss bei forcierter Expiration nach kompletter Inspiration (l/min)
PIF	Peak inspiratory flow maximaler inspiratorischer Fluss	Maximaler Fluss (Atemstromstärke) bei forcierter Inspiration nach kompletter Expiration (l/min)
MEF ₇₅		Maximaler expiratorischer Fluss (Atemstromstärke) zu dem Zeitpunkt, bei dem noch 75% der VC auszuatmen sind (l/min)
MEF ₅₀		Maximaler expiratorischer Fluss (Atemstromstärke) zu dem Zeitpunkt, bei dem noch 50% der VC auszuatmen sind (l/min)
MEF ₂₅		Maximaler expiratorischer Fluss (Atemstromstärke) zu dem Zeitpunkt, bei dem noch 25% der VC auszuatmen sind (l/min)

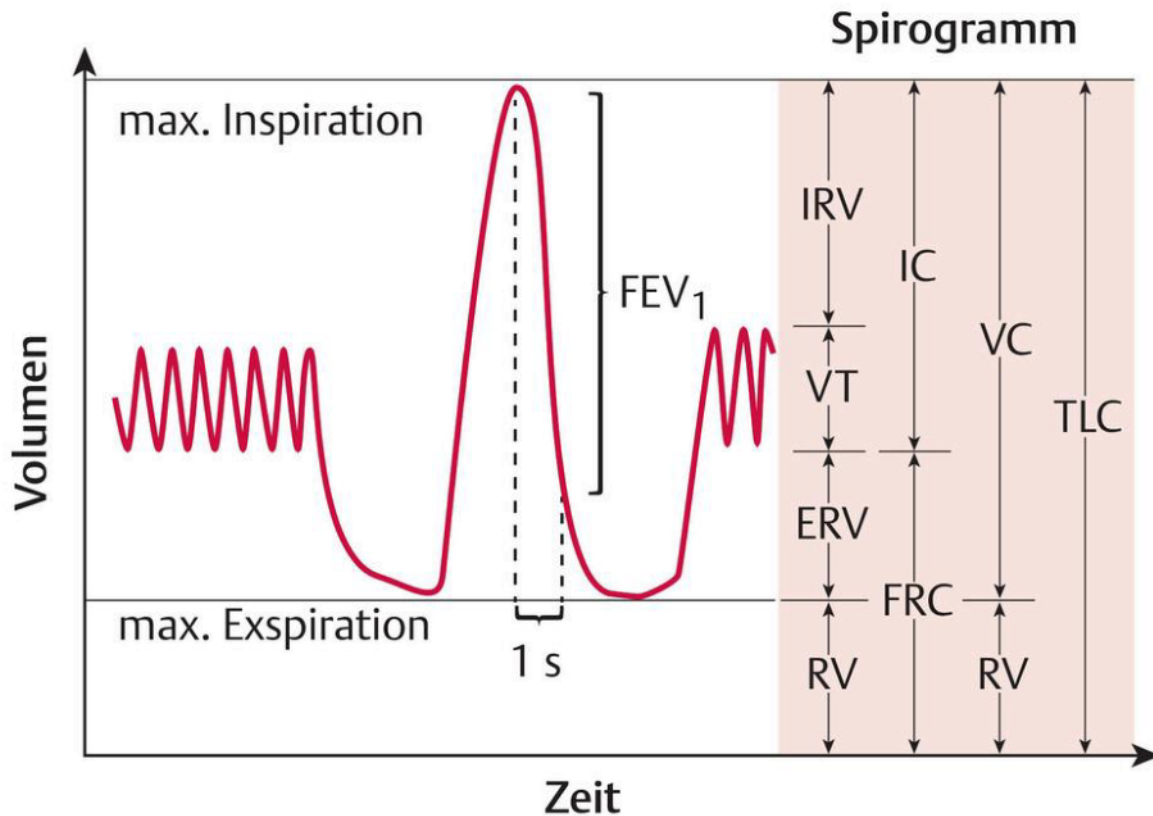


Abb. 24.3 Spirografie

Spirografie Volumen-Zeit-Diagramm (Abkürzungen [Tab. 24.2](#)).

Tab. 24.3 Definitionen Atemwegswiderstand (Resistance).

Abkürzung	Begriff	Bschreibung
R_{AWtot}	Totaler Atemwegswiderstand (Resistance)	Gerade zwischen den maximalen in- und expiratorischen Druckpunkten des Druckflussdiagramms (Resistance-Schleife) ($kPa/[l/s]$)
sR_{AWtot}	Spezifischer totaler Atemwegswiderstand (spezifische Resistance)	Auf das thorakale Volumen bezogener Atemwegswiderstand $R_{AWtot} \times ITGV$ ($kPa \times s$)
R_{AWex}	Expiratorischer Teilwiderstand ($kPa/[l/s]$)	
R_{AWin}	Inspiratorischer Teilwiderstand ($kPa/[l/s]$)	

Tab. 24.4 Definitionen Diffusionsparameter.

Abkürzung	Begriff	Beschreibung
TLCO	Transferfaktor für Kohlenmonoxid (Synonym DLCO)	Diffusionskapazität ($[mmol/min]/kPa$)

Abkürzung	Begriff	Beschreibung
KCO	Transferkoeffizient (Krogh-Index) (Synonym DLCO/VA)	Transferfaktor (Diffusionskapazität) bezogen auf das Alveolarvolumen ([mmol/min/kPa]/l)
VA	Alveolarvolumen (l)	
FRC-He	funktionelle Residualkapazität	Mittels Heliumdilution gemessen (l)
RV-He	Residualvolumen	Mittels Heliumdilution gemessen (l)

Tab. 24.5 Definitionen Mundverschlussdruckparameter (Parameter der Atemmuskulatur).

Abkürzung Beschreibung

$P_{0,1}$	Inspiratorischer Mundverschlussdruck 0,1 s nach Beginn der Inspiration bei Ruheatmung (kPa)
$P_{I_{max}}$	Maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck bei forcierter Inspiration nach vorheriger kompletter Expiration (kPa)
$P_{0,1}/P_{I_{max}}$	$P_{0,1}$ bezogen auf den maximalen inspiratorischen Munddruck
PE_{max}	Maximaler expiratorischer Mundverschlussdruck bei forcierter Expiration nach vorheriger kompletter Inspiration (kPa)

Tab. 24.6 Definitionen Parameter der Blutgasanalyse und des Säure-Basen-Status.

Abkürzung	Begriff	Beschreibung
pO_2	<u>Sauerstoffpartialdruck</u>	Teildruck des Sauerstoffs im Gesamtgasgemisch (mmHg)
SaO_2	Sauerstoffsättigung	Hämoglobinanteil, der mit Sauerstoff gesättigt (oxygeniert) ist (%)
pCO_2	Kohlendioxidpartialdruck	Teildruck des Kohlendioxyds im Gesamtgasgemisch (mmHg)
pH	pH-Wert	Gehalt an freien Protonen (H^+ -Ionenkonzentration)
HCO_3^-	Bikarbonat (bzw. <u>Standardbikarbonat</u>)	Konzentration an Bikarbonat (mmol/l)
BE	<u>Basenüberschuss</u> (<u>base excess</u>)	Abweichung der Pufferbasen (mmol/l)

Indikationen

- ▶ Die Lungenfunktionsdiagnostik hat in der Anästhesie neben der differenzialdiagnostischen Einschätzung und der Quantifizierung der funktionellen Konsequenzen von Erkrankungen der Atmungsorgane die folgenden Aufgaben (Abb. 24.4):
 - ▶ Abschätzung des perioperativen Risikos (Tab. 24.7),
 - ▶ Beurteilung der potenziellen Reversibilität einer Ventilationsstörung,
 - ▶ Quantifizierung des Ausmaßes einer möglichen Lungenresektion und Prognose der postoperativen Lungenfunktion,

- ▶ Differenzialdiagnostik und Quantifizierung der bronchopulmonalen Limitierung bei gleichzeitig bestehenden kardiovaskulären Risiken,
- ▶ Einschätzung der Gesamtprognose.

Tab. 24.7 Stratifizierung des perioperativen Risikos mit Hilfe der Spiroergometrie für extrathorakale Eingriffe (maximale Sauerstoffaufnahme $VO_2\text{max.}$).

Risiko	$VO_2\text{max.}$ (ml/kgKG) (Männer)	$VO_2\text{max.}$ (ml/kgKG) (Frauen)
Kein erhöhtes Risiko	>20	>18
Erhöhtes Risiko	14 bis <20	12 bis <18
Sehr hohes Risiko	<14	<12

- ▶ Spirometrie:
 - ▶ Abklärung bronchopulmonaler Symptome und präoperative Risikoabschätzung in der thorakalen Anästhesie.
- ▶ Bodyplethysmografie:
 - ▶ Sichere Differenzierung zwischen restriktiver und obstruktiver Ventilationsstörung,
 - ▶ Quantifizierung der pulmonalen Überblähung.
- ▶ Fluss-Volumen-Kurve:
 - ▶ Diagnostik einer obstruktiven Ventilationsstörung,
 - ▶ Hinweise auf periphere Bronchialobstruktion,
 - ▶ Hinweise auf Restriktion und Überblähung.
- ▶ Diffusionsmessung:
 - ▶ Quantifizierung einer Diffusionsstörung,
 - ▶ perioperative Risikoeinschätzung,
 - ▶ Differenzierung belüfteter und nichtbelüfteter pulmonaler Anteile von RV.

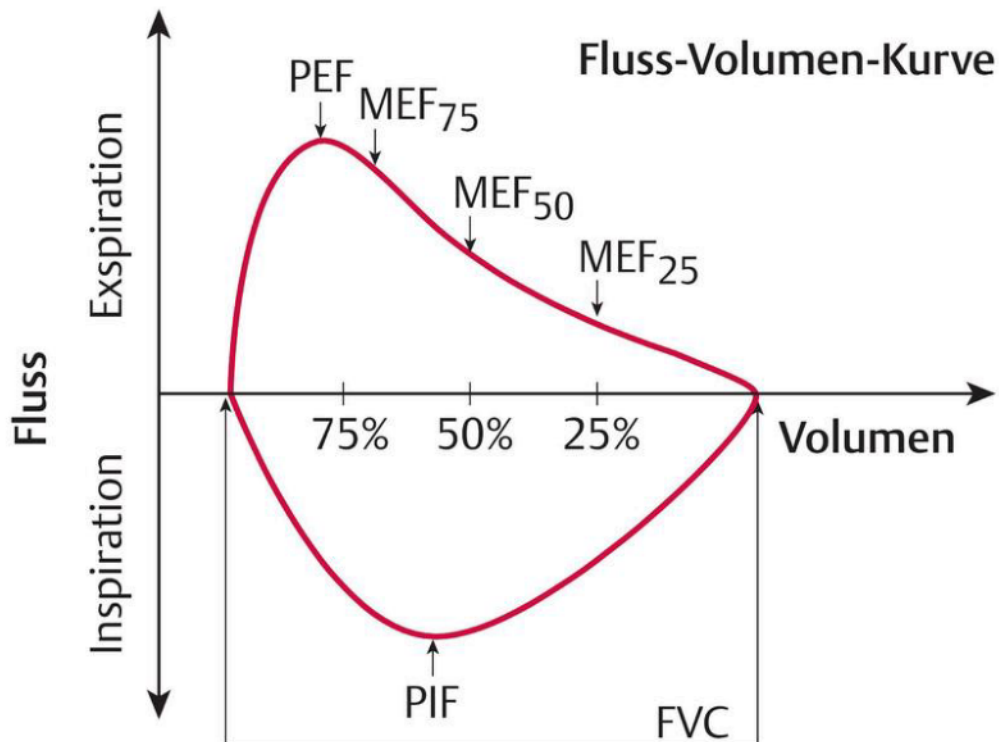


Abb. 24.4 Fluss-Volumen-Kurve.

Kontraindikationen

- ▶ Spirometrie:
 - ▶ Keine absoluten Kontraindikationen bei mitarbeitstfähigen Patienten,
 - ▶ starke Mitarbeitabhängigkeit der Untersuchung,
 - ▶ eine fehlende Mitarbeitstfähigkeit des Patienten ist eine relative Kontraindikation.
- ▶ Bodyplethysmografie:
 - ▶ weniger mitarbeitstabhängige Untersuchung,
 - ▶ keine absoluten Kontraindikationen.
- ▶ Diffusionsmessung:
 - ▶ Keine absoluten Kontraindikationen,
 - ▶ VC < 1000 ml und fehlende Möglichkeit des Patienten das Atemanhaltenmanöver auszuführen.
- ▶ Inhalative Provokationstestungen:
 - ▶ eingeschränkte Ausgangslungenfunktion.

Aufklärung und spezielle Risiken

- ▶ Unter Beachtung bestehender Kontraindikationen sind die Verfahren der Lungenfunktionsdiagnostik sicher und komplikationsarm.
- ▶ Bei inhalativen Provokationstestungen ist die Induktion von relevanten Bronchialobstruktionen möglich.
- ▶ Bei der Spirometrie, der Fluss-Volumen-Kurve und der Diffusionsmessung ist die Mitarbeit des Patienten entscheidend, um verwertbare Daten zu erhalten.
- ▶ Die Bodyplethysmografie ist weniger mitarbeitsabhängig.

Material

- ▶ Spirometer (Spirograph),
- ▶ Bodyplethysmograf,
- ▶ Diffusionsmessplatz.

Durchführung

Spirometrie, Fluss-Volumen-Kurve

- ▶ Die Spirometrie ist unverändert die Basis der Lungenfunktionsdiagnostik.
- ▶ Moderne Spirometer arbeiten meist nach dem Prinzip der Pneumotachografie, was neben einer Messung des Atemflusses zusätzlich eine Berechnung der Volumina ermöglicht.
- ▶ Dies ermöglicht eine Darstellung der Volumenänderung gegen die Zeit (Spirogramm, Abb. 24.3) und zusätzlich die Registrierung der Atemströmung (Flussgeschwindigkeit) gegen das Volumen (Fluss-Volumen-Kurve, Abb. 24.4).
- ▶ Die Durchführung der Spirometrie erfordert eine maximale Atemanstrengung und ist deshalb hochgradig von der Motivation und der Mitarbeit der Patienten abhängig.
- ▶ Deshalb ist die Durchführung von mindestens 2 (besser 3) Messungen erforderlich, wobei das jeweils beste Messergebnis in die Auswertung eingeht.
- ▶ Sowohl die Bewertung der Sollwert-bezogenen Messwerte als auch die Formanalyse der Kurven ermöglichen differenzialdiagnostische Aussagen.
- ▶ Die Normalwerte bzw. Sollwerte sind abhängig von der Größe, dem Alter und dem Geschlecht.

- ▶ Für die Fluss-Volumen-Kurve gilt ([Abb. 24.4](#)):
 - ▶ Die Parameter der ersten Hälfte der ausgeatmeten Vitalkapazität (PEF und MEF_{75}) sind hochgradig von der Mitarbeit des Patienten abhängig.
 - ▶ Die Parameter der zweiten Hälfte der ausgeatmeten Vitalkapazität (MEF_{50} und MEF_{25}) werden überwiegend durch die elastischen Rückstellkräfte der Lungen und die Strömungsverhältnisse in den peripheren Bronchien bedingt und sind weitgehend mitarbeitersunabhängig.
- ▶ Air trapping:
 - ▶ Eine forcierte Expiration kann eine Kompression der peripheren Bronchien (Bronchiolenkollaps) induzieren, was zur gefesselten Luft (air trapping) führen kann.
 - ▶ Deshalb können Lungenvolumina, die bei maximaler forcierter Expiration gemessen werden, geringer sein als bei Messung bei langsamer maximaler In- oder Expiration.
 - ▶ Die Differenz zwischen in- und expiratorischem Anteil der FVC beim expiratorischen Nullfluss ist ein quantitatives Maß für die gefesselte Luft.

Merke

Normabweichungen der Messwerte oder der Kurvenformen in der Spirometrie können durch pathologische Ventilationsstörungen, aber auch durch eine ungenügende Mitarbeit der Patienten oder durch Artefakte bedingt sein.

Bodyplethysmografie

- ▶ Die nichtmobilisierbaren Volumina (ITGV, RV; [Tab. 24.1](#)) sind einer spirometrischen Erfassung nicht zugänglich; dies erfordert eine Bodyplethysmografie (s. unten).
- ▶ Die Bodyplethysmografie ([Abb. 24.5](#)) ermöglicht eine umfassende Charakterisierung der Lungenfunktion, da sie eine zusätzliche Messung der nichtmobilisierbaren Lungenvolumina (intrathorakales Gasvolumen, ITGV) und der Atemwegwiderstände (R_{AWtot}) ermöglicht.
- ▶ Diese Messungen erfolgen bei Ruheatmung, sind weitgehend mitarbeitersunabhängig und für die Patienten wenig belastend.
- ▶ Moderne Bodyplethysmografen ermöglichen zusätzlich die Registrierung der Spirografie und der Fluss-Volumen-Kurve, wodurch in einem Untersuchungsgang eine komplette Diagnostik der Ventilation möglich ist.

Druckflussdiagramm

- ▶ Bei Ruheatmung kommt es infolge der thorakalen Atemexkursionen zur Kompression und Dekompression der Innenluft in der geschlossenen Kammer des Bodyplethysmografen.
- ▶ Diese Druckschwankungen werden synchron zum Atemfluss am Mundstück registriert und ein Druckflussdiagramm aufgezeichnet.

Merke

Die Bodyplethysmografie ist diagnostisch und differenzialdiagnostisch indiziert bei der Abklärung von unklaren oder kombinierten Ventilationsstörungen.

Resistance

- ▶ Die Steilheit des Druckflussdiagramms ist ein Maß des Atemwegswiderstandes (Resistance).
- ▶ Der Atemwegswiderstand ist ein Maß für die Weite bzw. Enge der Atemwege/Bronchien.
- ▶ Da der Atemwegswiderstand abhängig vom Lungenvolumen ist, wird die spezifische, volumenbezogene Resistance (sR_{AWtot}) durch Multiplikation von R_{AWtot} mit dem ITGV berechnet.
- ▶ Bei Gesunden sind keine signifikanten Unterschiede im Atemwegswiderstand zwischen Inspiration und Expiration nachweisbar, bei Patienten mit obstruktiven Atemwegserkrankungen ist jedoch eine vorwiegend expiratorische Resistance-Erhöhung nachweisbar.
- ▶ Deshalb werden ein expiratorischer (R_{AWex}) und ein inspiratorischer Teilwiderstand (R_{AWin}) unterschieden (Abb. 24.5).
- ▶ Zusätzlich sind ventilatorische Inhomogenitäten durch typische Kurvenverläufe der Resistance-Schleife erkennbar (s. unten).

Bodyplethysmografie

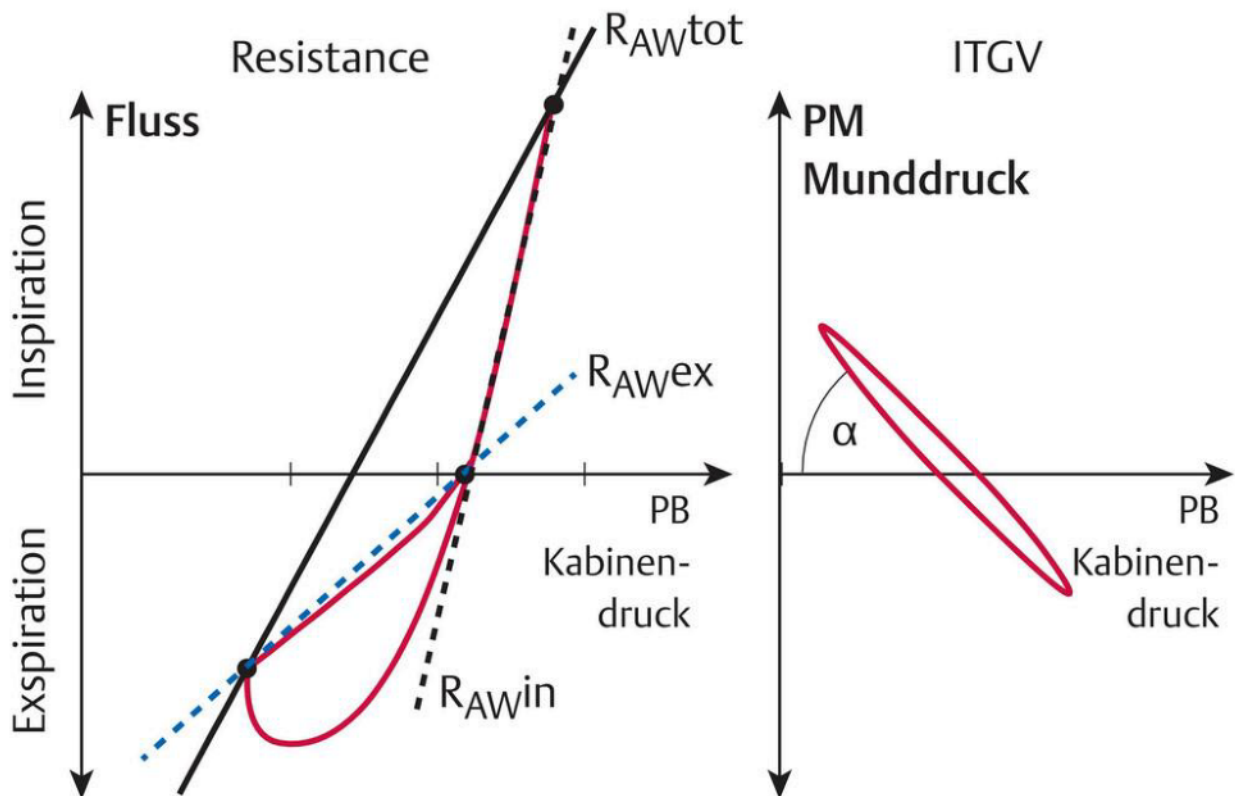


Abb. 24.5 Bodyplethysmografie.

Darstellung der per Bodyplethysmografie erfassten Messparameter (ITGV: Intrathorakales Gasvolumen; weitere Abkürzungen [Tab. 24.3](#)).

ITGV

- ▶ Die bodyplethysmografische Messung des intrathorakalen Gasvolumens (ITGV) beruht auf dem physikalischen Gesetz von Boyle und Mariott, nach dem das Produkt aus Druck und Volumen konstant ist.
- ▶ Da das Volumen der Kammer bekannt ist, der Druck in der Kammer und am Mund des Patienten gemessen werden kann, lässt sich das Lungenvolumen zu einer bestimmten Zeit des Atemzyklus, z.B. als ITGV, errechnen.
- ▶ Hierzu wird am endexpiratorischen Punkt der Ruheatmung für kurze Zeit der Atemstrom verschlossen.
- ▶ Der Patient vollführt frustrane Atemexkursionen und die Druckänderungen werden synchron registriert. Die Steilheit des Verschlussdruckwinkels (α) entspricht dem ITGV ([Abb. 24.5](#)).

Normalbefund

- ▶ Bei einem bodyplethysmografischen Normalbefund sind die Resistance-Schleifen steil und zeigen einen hohen Fluss bei geringen Druckschwankungen.
- ▶ Der Verlauf ist gerade und die Schenkel weichen nicht relevant voneinander ab.
- ▶ Die gemessenen Parameter sind bezogen auf die individuellen Sollwerte im Normbereich (<100%).
- ▶ Die Normwerte des Atemwegwiderstands sind bei Erwachsenen unabhängig von Größe, Gewicht und Geschlecht.
- ▶ Normale ITGV-Kurven (Verschlussdruckkurven) verlaufen gerade.

Diffusionsmessung

- ▶ Neben der Ventilation ist die Diffusion eine weitere wesentliche Teilfunktion der Atmung, die den Transport der Atemgase zwischen dem Alveolarraum und dem Hämoglobin der Erythrozyten (= Diffusionsstrecke) beschreibt (Abb. 24.6).
- ▶ Die Untersuchung erfolgt mithilfe eines Testgasgemischs, das Stickstoff (N), Helium (He) und Kohlenmonoxid (CO) enthält und in der klinischen Praxis meist mit der Einatemzugmethode („single breath CO“= SB-CO) durchgeführt wird.

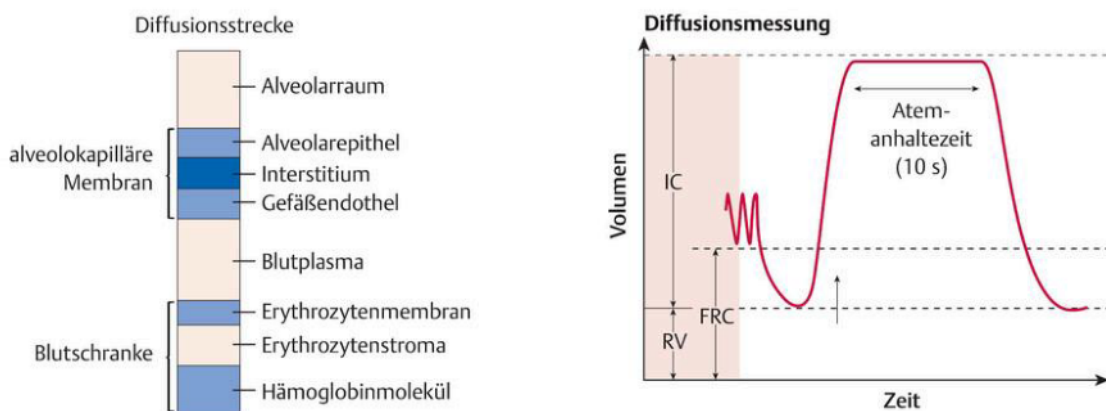


Abb. 24.6 Diffusionsmessung.

Die Diffusion beschreibt den Transport der Atemgase zwischen dem Alveolarraum und dem Hämoglobin der Erythrozyten; schematisch dargestellt sind auch die einzelnen Abschnitte der Diffusionsstrecke.

- ▶ Prinzip:
 - ▶ Das Prinzip der Methode besteht darin, dass CO während einer tiefen Inspiration der Atemluft zugemischt wird.
 - ▶ Während der folgenden Atemanhaltephase (meist 10 s) diffundiert das Testgas (CO) und wird an Hämoglobin gebunden abtransportiert.

- ▶ Das verbliebene Gas wird nach der Atemanhaltezeit ausgeatmet und analysiert.
- ▶ Je höher die Diffusion des Testgases war, desto weniger wird zurückgeatmet und umgekehrt.
- ▶ In die **Messung der TLCO** gehen neben der Diffusionsstrecke u.a. die Diffusionsfläche, ventilatorische Inhomogenitäten, die Perfusion und die Hämoglobinkonzentration im Blut ein, die bei der Untersuchung unspezifisch miterfasst werden.
- ▶ Bei der Berechnung des sogenannten **Transfer-Koeffizienten** (= Krogh-Index) (TLCO/VA) wird die TLCO in Bezug auf das Alveolarvolumen (VA) gesetzt. Dies ist u.a. hilfreich bei einer Unterscheidung einer extrapulmonalen von einer pulmonalen Ursache einer Restriktion.
- ▶ Die **Messung von VA** erfolgt durch das inerte Helium (He) im Testgasgemisch:
 - ▶ Die Dilution („Verdünnung“) des Heliums ermöglicht eine Aussage über nichtmobilisierbare, jedoch ventilierte Lungenvolumina.
 - ▶ Ein Vergleich mit den bodyplethysmografisch gemessenen nichtmobilisierbaren Lungenvolumina ermöglicht eine Abschätzung von nicht ventilierbaren Lungenanteilen (z.B. Bullae).
 - ▶ In diesen Fällen können sich FRC und ITGV (s. oben, Tab. 24.1) unterscheiden.

Merke

Die Diffusionsmessung eignet sich zur weiteren Differenzierung einer Restriktion und der Unterscheidung einer parenchymalen von einer extraparenchymalen Ursache.

Messung der Atemmuskulatur (Mundverschlussdruckmessung)

- ▶ Die Ventilation der Lungen setzt eine effektive Atempumpe (Atemmuskulatur und zentrale Atemsteuerung) voraus.
- ▶ Eine Erschöpfung der Atempumpe bei Überlastung kann z.B. infolge chronischer Lungen- oder Bronchialerkrankungen, von Thoraxdeformitäten oder bei neuromuskulären Erkrankungen auftreten.
- ▶ Eine Bestimmung der Kraft der Atemmuskulatur erfolgt über eine Messung des Drucks am Mund bei geschlossenem Atemventil bei verschiedenen Atemmanövern.
- ▶ Mit der Mundverschlussdruckmessung lassen sich Einschränkungen der maximalen Inspirations-, bzw. Expirationsmuskulatur messen.
- ▶ Diese Messungen sind hochgradig von der Mitarbeit des Patienten abhängig.
- ▶ Das Verhältnis von $P_{0,1}$ zu PI_{max} ist ein Maß für die Beanspruchung der Atemmuskulatur bei Ruheatmung.

Mögliche Komplikationen

- ▶ Unter Beachtung bestehender Kontraindikationen sind die Verfahren der Lungenfunktionsdiagnostik sicher und komplikationsarm.
- ▶ Bei inhalativen Provokationstestungen besteht ein Risiko der Induktion von relevanten Bronchialobstruktionen.

Ergebnisse

Anwendung und Interpretation der Lungenfunktionsdiagnostik

- ▶ Ventilationsstörungen werden unterteilt in (Tab. 24.8):
 - ▶ **Obstruktion** (Verengung der Atemwege),
 - ▶ **Restriktion** (Verlust an funktionsfähigem Lungenparenchym – volumengeminderte, starre Lunge) und
 - ▶ **Überblähung** (schlaaffe Lunge mit erhöhtem Gesamtvolumen und erniedrigten mobilisierbaren Volumina).
- ▶ Zu beachten:
 - ▶ Eine Obstruktion kann intrathorakal und extrathorakal lokalisiert sein und die zentralen und peripheren Atemwege betreffen.
 - ▶ Bei einer Restriktion müssen pulmonale (parenchymale) und extrapulmonale Ursachen unterschieden werden.
 - ▶ Bei einer Obstruktion und einer Überblähung wird das Ausmaß der Reversibilität bestimmt (Bronchospasmolysetest [Kap. Bronchospasmolysetest], Reversibilitätstestung: Wiederholung der Untersuchung nach Applikation bronchodilatatorisch wirkender Substanzen).
 - ▶ Beim gleichzeitigen Vorliegen einer Obstruktion und einer Restriktion wird von einer **kombinierten Ventilationsstörung** gesprochen.

Tab. 24.8 Typische Veränderungen der Lungenfunktionsparameter bei den verschiedenen Ventilationsstörungen.

Obstruktion

= Verengung der Atemwege

Extrathorakal versus intrathorakal
Zentral versus peripher
Reversibel versus irreversibel

Erniedrigung von:

- ▶ FEV1
- ▶ FEV1/FVC
- ▶ PEF
- ▶ MEF₇₅₋₂₅

Erhöhung von:

- ▶ R_{AW}
- ▶ sR_{AW}

Restriktion

= starres, volumengemindertes thorakopleuropulmonales System mit erniedrigter Dehnbarkeit (Compliance)

Pulmonal versus extrapulmonal

Erniedrigung von:

- ▶ VC/FVC **und**
- ▶ TLC
- ▶ FEV1 bei normalem FEV1/FVC
- ▶ (Compliance)

Überblähung

= „schlaffe“ Lunge mit erhöhtem Gesamtvolumen und erniedrigten mobilisierbaren Volumina und erhöhter Dehnbarkeit (Compliance)

Reversibel versus irreversibel

Erniedrigung von:

- ▶ FEV1 und VC/FVC

Erhöhung von:

- ▶ TLC
- ▶ ITGV/RV
- ▶ (Compliance)

FEV1: Forciertes expiratorisches Volumen in 1 s, FVC: Forcierte Vitalkapazität, PEF: peak expiratory flow, MEF: maximaler expiratorischer Fluss, R_{AW} : Resistance (Atemwegswiderstand), VC: Vitalkapazität, TLC: Transferfaktor für Kohlenmonoxid, ITGV: Intrathorakales Gasvolumen, RV: Residualvolumen.

Spirometrie

- ▶ Der besondere Wert der **Spirometrie** liegt in der Diagnostik obstruktiver Ventilationsstörungen und in der Möglichkeit, deren Reversibilität zu prüfen.
- ▶ Die Diagnostik einer restriktiven Ventilationsstörung oder einer pulmonalen Überblähung ist mit der **Spirometrie** nur eingeschränkt möglich.
- ▶ Eine **Obstruktion** ist in der **Spirometrie** durch eine Abnahme von PEF, FEV1/FVC und MEF₇₅₋₂₅ gekennzeichnet.
- ▶ Der spirometrischen Schweregradeinteilung einer Obstruktion liegt das FEV1 zugrunde ([Tab. 24.9](#), [Tab. 24.10](#)).

Tab. 24.9 Spirometrischer Schweregrad der Obstruktion.

Schweregrad	FEV1 (% Sollwert)
I: Leicht	≥70%
II: Mäßig	60–69%
III: Mittelschwer	50–59%
IV: Schwer	35–49%
V: Sehr schwer	<35%

Tab. 24.10 Spirometrischer Schweregrad der Restriktion.

Schweregrad	VC_{IN} (% Sollwert)
I: Leicht	≥70%
II: Mäßig	60–69%
III: Mittelschwer	50–59%
IV: Schwer	35–49%
V: Sehr schwer	<35%

- ▶ Eine **Restriktion** hingegen ist gekennzeichnet durch eine proportionale Verringerung der statischen Lungenvolumina TLC **und** VC.
- ▶ Eine alleinige Erniedrigung der Vitalkapazität gestattet keine Unterscheidung zwischen einer Restriktion und einer pulmonalen Überblähung.
- ▶ Insbesondere bei einer fortgeschrittenen chronisch obstruktiven Bronchitis liegt die Ursache meist in einer Überblähung mit erhöhtem Residualvolumen und konsekutiv erniedrigten mobilisierbaren Volumina.
- ▶ Aus diesem Grund ist auch der Nachweis von kombinierten Ventilationsstörungen mithilfe der alleinigen Spirometrie problematisch.
- ▶ Ein Hinweis auf eine Restriktion in der Spirometrie ist jedoch, eine erniedrigte Vitalkapazität (<80% vom Soll) mit einer normalen oder gar erhöhten relativen 1-Sekunden-Kapazität.
- ▶ Bei einer deutlich eingeschränkten Vitalkapazität ist die Beurteilung der Obstruktion mittels der spirometrischen Flussparameter insbesondere des FEV1 schwierig.
- ▶ Neben der relativen 1-Sekunden-Kapazität muss deshalb der Verlauf der Flussvolumenkurve bewertet werden.
- ▶ Bei gesunden Personen besteht kein bedeutsamer Unterschied zwischen VC_{IN}, VC_{EX} und FVC.
- ▶ Patienten mit einer obstruktiven Ventilationsstörung und gefesselter Luft („air trapping“) infolge eines Bronchiolenkollapses bei maximaler Expiration kann VC_{IN} > VC_{EX} > FVC sein.

Differenzierung zwischen Obstruktion und Restriktion/Bodyplethysmografie

- ▶ Zur sicheren Differenzierung ist eine **Bodyplethysmografie** mit Bestimmung der TLC erforderlich.
- ▶ Eine **Restriktion** ist über eine Verminderung der TLC auf <80% vom Sollwert definiert:
 - ▶ Die VC muss proportional erniedrigt sein.
 - ▶ Bei einer bodyplethysmografisch nachgewiesenen restriktiven Ventilationsstörung (Erniedrigung von TLC und VC) ist zur Differenzierung einer intra- und extrapulmonalen Ursache neben einer geeigneten Bildgebung die Durchführung der Diffusionsmessung sinnvoll (Tab. 24.11).
 - ▶ Bei extrapulmonalen Ursachen ist die auf das Alveolarvolumen bezogene Diffusionskapazität nicht eingeschränkt.
- ▶ **Obstruktive Ventilationsstörung:**
 - ▶ Diese zeigt in der Bodyplethysmografie eine Erhöhung des Atemwegswiderstands, wobei sein expiratorischer Anteil höher ist als der inspiratorische Anteil (Tab. 24.12).
 - ▶ Typische Deformierungen der Resistance-Schleife sind von differenzialdiagnostischer Bedeutung.
 - ▶ Bei einer relevanten Obstruktion und Überblähung ist eine sogenannte „Keulenform“ der Resistance-Schleife typisch.
 - ▶ Die Resistance ist vom Volumen abhängig.
 - ▶ Bei verändertem Lungenvolumina und stark verschobener Atemmittellage ist der Atemwegswiderstand RAWtot volumenbedingt erhöht oder erniedrigt.
 - ▶ Die spezifische Resistance (sRAWtot) ist volumenkorrigiert und deshalb ein vom ITGV unabhängiges Maß der Atemwegsobstruktion.

Tab. 24.11 Schweregradeinteilung einer Diffusionsstörung.

Schweregrad	TLCO (% Sollwert)
Leicht	>60
Mittel	40–60
Schwer	<40

Tab. 24.12 Schweregrad der Obstruktion – Resistance.

Schweregrad	RAW in kPa×s/l	sRAW (%Soll)
I: Grenzwertig	0,3–0,35	

Schweregrad	RAW in kPa×s/l	sRAW (%Soll)
II: Leicht	<0,5	<170%
III: Mittel	0,5–1,0	170–350%
IV: Schwer	>1,0	>350%

- ▶ Eine **isolierte Obstruktion der kleinen peripheren Bronchien** kann ein Hinweis auf ein beginnendes Lungenemphysem sein.
 - ▶ Dies führt zu einer Verschiebung der Atemmittellage zur Inspiration, die gekennzeichnet ist durch eine Verringerung des FEV1 und FVC mit erhöhtem RV und RV/TLC, bei normalem Verhältnis FEV1/VC und TLC.
 - ▶ Eine Verschiebung der Atemmittellage zur Inspiration kann im Alter physiologisch sein, tritt jedoch auch bei der COPD auf.
- ▶ Ebenso ist es altersphysiologisch, dass bei betagten Menschen das Verhältnis FEV1/FVC <70% abfällt, was zu einer Überdiagnostik obstruktiver Ventilationsstörungen führen kann. Umgekehrt kann bei jüngeren Menschen trotz FEV1/FVC >70% bereits eine obstruktive Ventilationsstörung vorliegen. In beiden Situationen hat sich die Berücksichtigung des LLN (lower limit of normal) bewährt.
- ▶ Der Atemwegwiderstand muss bei einer vorwiegend peripheren und noch gering ausgeprägten Obstruktion nicht erhöht sein.
- ▶ Ein **frühes Zeichen** ist eine Reduktion der peripheren Flüsse (MEF₅₀ und MEF₂₅) in der Fluss-Volumen-Kurve, was zu einem typischen „Durchhängen“ ihres expiratorischen Schenkels führt.
- ▶ Bei einer **ausgeprägten peripheren Bronchialobstruktion** kann es infolge eines Bronchiolenkollaps zu einer derartig starken Reduktion der peripheren Flüsse kommen, dass ein paralleler Verlauf des endexpiratorischen Anteils der Fluss-Volumen-Kurve knapp oberhalb des Nullflusses resultiert.
- ▶ Der Schweregrad der Überblähung wird anhand der TLC, ITGV und RV und dem Verhältnis RV/TLC bestimmt.
- ▶ Eine Atemwegsobstruktion, oder -stenose kann extra- oder intrathorakal lokalisiert sein:
 - ▶ Eine **intrathorakale Obstruktion** erkennt man an der überwiegend expiratorischen Flusslimitierung, erfasst durch ein forciertes Expirationsmanöver,
 - ▶ eine **extrathorakale Obstruktion** hingegen an einer inspiratorischen Flusslimitierung, erfasst durch ein forciertes inspiratorisches Manöver. Die Resistance-Schleife zeigt bei einer extrathorakalen Obstruktion eine charakteristische S-Form.

Bronchospasmodysetest

- ▶ Wenn eine bronchiale Obstruktion nachgewiesen wurde, kann es sinnvoll sein, ihre Reversibilität im Bronchospasmodysetest zu prüfen.
- ▶ Nach inhalativer Applikation eines Bronchospasmodolytikums (meist Beta2-Sympathomimetikum) wird nach adäquater Einwirkzeit der Lungenfunktionstest wiederholt und die Reversibilität der Obstruktion (FEV₁, sRAW_{tot}) und der Überblähung (IVC; TLC) beurteilt.
- ▶ Die Reversibilität einer Bronchialobstruktion ist ein wichtiges differenzialdiagnostisches Kriterium bei der Unterscheidung zwischen Asthma bronchiale und chronisch obstruktiver Bronchitis.

Merke

Der Beurteilung des perioperativen Risikos von Patienten mit obstruktiven Atemwegserkrankungen werden die lungenfunktionellen Ergebnisse unter adäquater Therapie zugrunde gelegt.

Unspezifische inhalative Provokationstestung

- ▶ Die unspezifische inhalative Provokationstestung dient dem Nachweis einer bronchialen Hyperreaktivität.
- ▶ Die Hyperreaktivität ist ein charakteristisches pathophysiologisches Phänomen beim Asthma bronchiale (jedoch auch bei anderen Erkrankungen).
- ▶ Bei dieser Untersuchung wird eine bronchokonstriktorisch wirkende Substanz, wie Metacholin oder Histamin oder ein bronchokonstriktorisch wirkender physikalischer Faktor, wie kalte Luft inhalativ appliziert und die daraus resultierende Bronchialobstruktion lungenfunktionell objektiviert.
- ▶ Es wird die Konzentration (PC = provocative concentration) oder Dosis (PD = provocative dosis) der Testsubstanz berechnet, die
 - ▶ einen 20%igen Abfall des FEV₁, (PD₂₀FEV₁ oder PC₂₀FEV₁) oder
 - ▶ einen 100%igen Anstieg des Atemwegswiderstandes (PD₁₀₀R_{AW} oder PC₁₀₀R_{AW}) induziert.
- ▶ Eine unspezifische inhalative Provokationstestung ist in der thorakalen Anästhesie in Ausnahmefällen indiziert, da eine höhergradige bronchiale Hyperreaktivität auch bei normalen Ventilationsparametern ein perioperatives Risiko darstellen kann.

Merke

Normale Ventilationsparameter in der Spirometrie und Bodyplethysmografie schließen ein variables Krankheitsbild wie das Asthma bronchiale nicht aus. Bei anamnestischen Hinweisen auf ein Asthma kann eine unspezifische Provokationstestung zum Nachweis einer bronchialen Hyperreagibilität indiziert sein.

Blutgasanalyse

- ▶ Eine arterielle Blutgasanalyse in Ruhe bei Raumluftatmung dient vorwiegend dem Ausschluss von Patienten von einer Lungenresektion.
- ▶ Grenzwerte hierfür werden unterschiedlich angegeben.
- ▶ Der Sauerstoffpartialdruck soll mindestens 6,7–8,0 kPa (50–60 mmHg) betragen, der Kohlendioxidpartialdruck nicht über 6,5–6,7 kPa (45–50 mmHg) liegen.
- ▶ Die Vorhersagekraft dieser Parameter für Komplikationen in der unmittelbar postoperativen Phase wird als nur gering eingeschätzt.

Blutgasanalyse und Säure-Basen-Status

- ▶ Aufgabe der äußeren Atmung sind die Versorgung des Organismus mit Sauerstoff und die Elimination des anfallenden Kohlendioxids.
- ▶ Mit der Blutgasanalyse wird letztlich das Endergebnis aller Teilfunktionen der Atmung erfasst:
 - ▶ Dafür eignet sich die Blutgasanalyse aus arteriellem oder aus arterialisiertem kapillärem, nicht jedoch aus venösem Blut.
 - ▶ In der klinischen Routine ist die Untersuchung von arterialisiertem Kapillarblut meist ausreichend (Ausnahme: Schockzustände mit verminderter peripherer Durchblutung).
- ▶ Die wesentlichen Parameter sind
 - ▶ pO_2 ,
 - ▶ pCO_2 ,
 - ▶ pH,
 - ▶ zusätzlich Standardbikarbonat und der Basenüberschuss.
- ▶ Zur Beurteilung des pO_2 müssen das Alter, die Sauerstoffkonzentration der Atemluft und die Ventilation der Atempumpe (pCO_2) berücksichtigt werden.
- ▶ Bei erniedrigtem pCO_2 muss der pO_2 korrigiert werden: $pO_{2\text{korr}} = pO_{2\text{ist}} - 1,66 \times (40 - pCO_2)$

Merke

In der klinischen Routine ist eine Blutgasanalyse aus dem hyperämisierten Ohrläppchen meist ausreichend, eine korrekte Entnahmetechnik vorausgesetzt.

- ▶ **Respiratorische Partialinsuffizienz:**
 - ▶ Isolierte Verminderung des pO_2 (Hypoxämie).
- ▶ **Respiratorische Globalinsuffizienz:**
 - ▶ Hypoxämie, kombiniert mit einem erhöhten pCO_2 (Hyperkapnie) (Tab. 24.13).
 - ▶ Sie ist immer Folge einer alveolären Hypoventilation.
- ▶ **Alveoläre Hyperventilation:**
 - ▶ Eine respiratorische Alkalose (erniedrigter pCO_2) hingegen ist Ausdruck einer alveolären Hyperventilation.
 - ▶ Dabei kann der pO_2 variabel sein.
- ▶ **Kompensationsmechanismen:**
 - ▶ Respiratorische Veränderungen des pH werden renal durch Bikarbonatausscheidung kompensiert (Dauer >6 h).
 - ▶ Umgekehrt werden metabolische Veränderungen des pH (metabolische Azidose oder Alkalose) respiratorisch durch Hypo- bzw. Hyperventilation kompensiert (Dauer ca. 1 h).

Tab. 24.13 Pathophysiologie und Beispiele für Hypoxämie, Hyperkapnie und Hypokapnie.

	Hypoxämie	Hyperkapnie	Hypokapnie
Mechanismen	Hypoxämie in der Atemluft Alveoläre Hypoventilation Diffusionsstörung Pulmonaler Rechts-links-Shunt Ventilations-Perfusions- Verteilungsstörung	Alveoläre Hypoventilation	Alveoläre <u>Hyperventilation</u>
Beispiele	Schwere Lungenerkrankungen (z.B. <u>COPD</u> , Lungenfibrosen) Shuntvitien Zentrale Atemregulationsstörungen Höhenaufenthalt	Versagen der Atemmuskulatur Zentrale Atemregulationsstörungen Schwere Lungenerkrankungen (z.B. <u>COPD</u>)	Hypoxämie <u>Lungenarterienembolie</u> <u>Fieber</u> Interstitielle Lungenerkrankung Psychische Störung

Literatur

- ▶ [1] ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2003; 167: 211–277
- ▶ [2] ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2002; 166: 518–642
- ▶ [3] Brusasco V, Crapo R, Viegi G: ATS/ERS Task Force. Standardisation of Lung Function Testing. *Eur Respir J* 2005; 26: 1–5
- ▶ [4] Canet J, Gallart L, Gomar C et al.; ARISCAT Group. Prediction of postoperative pulmonary complications in a population-based surgical cohort. *Anesthesiology* 2010; 113: 1338–1350
- ▶ [5] Deutsche Gesellschaft für Pneumologie: Empfehlungen zur Durchführung und Bewertung von Belastungsuntersuchungen in der Pneumologie. *Pneumologie* 2013; 67: 16–37
- ▶ [6] MacIntyre N, Crapo RO, Viegi G et al. ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing: Standardisation of the single-breath determination of carbon monoxide uptake in the lung. *Eur Respir J* 2005; 26: 720–735
- ▶ [7] Miller MR, Crapo R, Hankinson J et al. ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing: General considerations for lung function testing. *Eur Respir J* 2005; 26: 153–161
- ▶ [8] Miller MR, Hankinson J, Brusasco V et al. ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing: Standardisation of spirometry. *Eur Respir J* 2005; 26: 319–338
- ▶ [9] Pellegrino R, Viegi G, Brusasco V et al. ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing: Interpretative strategies for lung function tests. *Eur Respir J* 2005; 26: 948–968
- ▶ [10] Wanger J, Clausen JL, Coates A et al. ATS/ERS Task Force: Standardisation of Lung Function Testing: Standardisation of the measurement of lung volumes. *Eur Respir J* 2005; 26: 511–522
- ▶ [11] Zwißler B. Präoperative Evaluation erwachsener Patienten vor elektiven, nicht herz-thoraxchirurgischen Eingriffen. *AnästH Intensivmed* 2017; 58: 349–364

Bitte beachten Sie diesen Artikel im Zusammenhang des Gesamtwerks. Eine Ärztliche Plausibilitätsprüfung im Kontext dieses Cockpits ist unerlässlich. Die Anzeige von Inhalten ist insbesondere bei den Dropdowns zu Therapie und Medikamenten keinesfalls als Anwendungsempfehlung oder Indikation zu verstehen, sondern soll Ihnen lediglich die Suche erleichtern. Häufig werden ganze Medikamenten-/Themengruppen angezeigt, die im

gegebenen Zusammenhang möglicherweise von Interesse sein könnten. Für Vollständigkeit kann keine Gewähr übernommen werden.

Quelle:

Schreiber J, Lücke E, Hachenberg T. Lungenfunktionsdiagnostik. In: Zacharowski K, Marx G, Hrsg. *Referenz Anästhesie*. 1. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2020.
doi:10.1055/b000000027