

Lungenfunktionsdiagnostik bei Kindern – Methoden und Interpretation

Joachim Freihorst

Übersicht

Einleitung	87
Spirometrie	87
Bodyplethysmografie	92
Provokationsverfahren und Broncholyse	94
Weitere und neuere Diagnostikmethoden	95
Zusammenfassung	97

Einleitung

Lungenfunktionsuntersuchungen bei Kindern sind immer dann sinnvoll, wenn sich aus Anamnese und klinischen Befunden Hinweise auf Atemstörungen ergeben, die weiterer Abklärung bedürfen. Sie sind insbesondere hilfreich zur Unterscheidung zwischen restriktiven und obstruktiven Ventilationsstörungen, zur Einschätzung des Schweregrads und zur Verlaufsbeurteilung bei chronischen Atemwegs- und Lungenkrankungen und zur Beurteilung der Effekte therapeutischer Interventionen. Wenig sinnvoll sind Lungenfunktionsuntersuchungen bei akuten Erkrankungen, wie Pneumonien oder Asthmaanfall. Im Kindesalter werden Lungenfunktionsuntersuchungen eher selten im Rahmen von Gutachten veranlasst.

Im Folgenden werden die wichtigsten bei Kindern anwendbaren Methoden, ihre Aussagekraft und ihre Limitationen beschrieben, von der relativ einfach durchführbaren Spirometrie über die Bodyplethysmografie bis hin zu neuen, noch nicht für die Routinediagnostik verfügbaren Methoden. Ziel ist es, die physiologischen Grundlagen und Besonderheiten der einzelnen Methoden zu erläutern und Verständnis für die Interpretation zu vermitteln. Bezüglich technischer Details und Einzelheiten der praktischen Durchführung wird auf die Literatur im Anhang verwiesen.

Spirometrie

Bei der Spirometrie wird die Strömungsgeschwindigkeit des Atemflusses (Volumen/Zeit in l/s) mittels eines Pneumotachografen (Abb. 1) oder eines Ultraschall-Flussaufnehmers im zeitlichen Verlauf eines Atemmanövers gemessen. Die dabei bewegten Luftvolumina können dann durch Integration der Strömungsgeschwindigkeit über die Zeit berechnet werden, die Atemmanöver lassen sich als Volumen-Zeit-Kurven oder als Fluss-Volumen-Kurven grafisch darstellen.



Abb. 1 Spirometrie am Pneumotachografen.

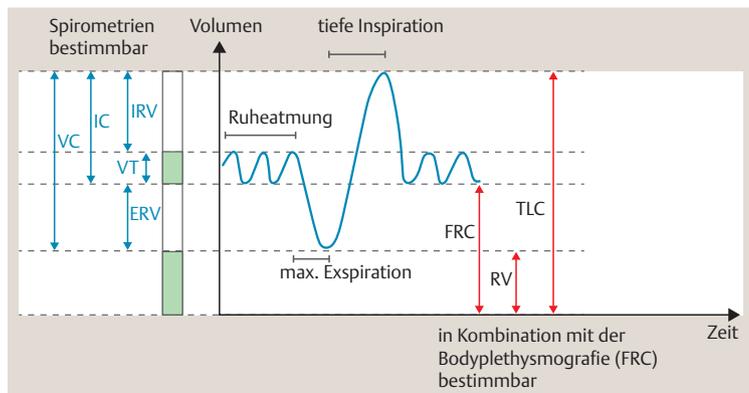


Abb. 2 Ruhespirometrie, Volumen-Zeit-Kurve mit Atemmanövern. VT, AZV = Tidalvolumen, Atemzugvolumen; ERV = expiratorisches Reservevolumen; IRV = inspiratorisches Reservevolumen; VC, IVC = (inspiratorische) Vitalkapazität; IC = inspiratorische Kapazität. Spirometrisch nicht messbar, jedoch zur Veranschaulichung: FRC, ITGV = funktionelle Residualkapazität, intrathorakales Gasvolumen; RV = Residualvolumen; TLC = totale Lungkapazität ($TLC = RV + VC$).

Abb. 2 stellt die wichtigsten spirometrisch erfassbaren Lungenvolumina dar (blau), darüber hinaus zur Veranschaulichung (rot) die zusätzlich bei bekannter funktionaler Residualkapazität (FRC) berechenbaren Volumina (s. Kapitel „Bodyplethysmografie“).

Ruhespirometrie

In der Regel wird zunächst eine *Ruhespirometrie* durchgeführt (Abb. 2), wobei der Proband ruhig und gleichmäßig ein- und ausatmet. Das dabei bewegte Luftvolumen ist das *Tidalvolumen* (VT) oder *Atemzugvolumen* (AZV). Der Proband wird dann aufgefordert, am Ende der Ruhe-Expiration soweit wie möglich weiter auszuatmen; das so zusätzlich mobilisierte Volumen ist das *expiratorische Reservevolumen* (ERV). Es folgt, vom Punkt der maximalen Expiration ausgehend, eine maximale Einatmung, das dabei bewegte Luftvolumen ist die *Vitalkapazität* (VC), in diesem Fall als *inspiratorische Vitalkapazität* (IVC oder VCin) bestimmt. Dabei wird über die Ruheatmung hinaus zusätzlich das *inspiratorische Reservevolumen* (IRV) mobilisiert. Die Summe aus IRV und Tidalvolumen wird als *inspiratorische Kapazität* (IC) bezeichnet. Die IVC ist der wichtigste Parameter der Ruhespirometrie, erniedrigte Werte sind ein Hinweis auf eine restriktive Ventilationsstörung (s. Kapitel „Interpretation“). Alternativ, jedoch weniger gebräuchlich, kann die *expiratorische Vitalkapazität* (EVC oder VCex) bestimmt werden, die als maximal auszuatmendes Volumen nach maximaler Inspiration gemessen wird. Sie ist normalerweise etwa

gleich groß wie die IVC, bei obstruktiven Atemwegserkrankungen jedoch meist etwas kleiner.

Merke: Die Vitalkapazität ist das Luftvolumen, das bei einem Atemmanöver mit maximaler Ein- und Ausatmung mobilisiert werden kann. Eine Verminderung weist auf eine restriktive Ventilationsstörung hin.

Forciertes Atemmanöver

Im Anschluss an die Ruhespirometrie wird in der Regel während des gleichen Messvorgangs mittels eines forcierten Ausatemmanövers eine Bestimmung der dynamischen Spirometrieparameter durchgeführt (Abb. 3): Nach tiefer Expiration erfolgt eine tiefe Inspiration mit Mobilisierung des inspiratorischen Reservevolumens; die so maximal gefüllte Lunge wird dann so schnell und kräftig und so weit wie möglich entleert. Das bei diesem Manöver (auch *Tiffeneau-Manöver* genannt) ausgeatmete Volumen wird als *forcierte Vitalkapazität* (FVC) bezeichnet. Die FVC ist gut reproduzierbar und entspricht im Normalfall der IVC, bei obstruktiven Atemwegserkrankungen ist sie jedoch meist kleiner. Als orientierendes Maß für die Fähigkeit der Atemwege, eine Ausatmung zu ermöglichen, hat sich die *Einsekundenkapazität* erwiesen, sie bezeichnet das während des Tiffeneau-Manövers in der ersten Sekunde *ausgeatmete Volumen* (FEV_1). Bezieht man diesen Wert prozentual auf die FVC, spricht man vom *Tiffeneau-Index* (FEV_1/FVC in %).

Die Bedeutung des forcierten Expirationsmanövers liegt unter anderem in der guten Reproduzierbarkeit. Bei der normalen Ausatmung nimmt der Druck in den Atemwegen von peripher nach zentral kontinuierlich ab und ist höher als der intrapleurale Druck. Somit bleiben die Atemwege offen und ermöglichen einen kontinuierlichen Atemfluss. Beim forcierten Expirationsmanöver kommt es jedoch, abhängig von den mechanischen Eigenschaften der Lunge und vom aktuellen Lungenvolumen, in einem bestimmten Abschnitt des Atemwegs, am sog. *Equal Pressure Point* (EPP), zum Druckausgleich zwischen Pleuradruck und intrabronchialen Druck. Zentralwärts vom EPP ist der Pleuradruck größer als der intrabronchiale Druck: Durch den von außen wirkenden Kompressionsdruck tritt eine funktionelle Atemwegsstenose auf, die wie ein Drosselventil flusslimitierend wirkt und eine weitere Steigerung des Atemflusses auch bei stärkerer

Anstrengung verhindert. Somit sind die gemessenen Atemflüsse weitgehend mitarbeitersunabhängig.

Die Darstellung des forcierten Expirationsmanövers erfolgt bevorzugt in Form einer Fluss-Volumen-Kurve (Abb. 3b). Dabei wird die Atemstromstärke in Form einer im Idealfall geschlossenen Kurve aufgezeichnet, beginnend mit der Inspiration vom Endpunkt einer maximalen Expiration bis zur maximalen Inspiration (negative Flusswerte), gefolgt vom eigentlichen forcierten Expirationsmanöver (positive Flusswerte) bis zur erneuten maximalen Expiration. Die expiratorischen Flusswerte steigen bei gesunden Probanden rasch und steil an bis zum Erreichen des expiratorischen Spitzenflusses (*Peak Expiratory Flow, PEF*). Dieser Wert spiegelt am ehesten die Weite der zentralen Atemwege wieder. Von dort fällt der expiratorische Atemstrom im Normalfall nahezu linear ab, mit Erreichen der maximalen Ausatmung wird er Null. Dieser Teil der Kurve wird beschrieben durch Angabe der *maximal erreichten Flusswerte (MEF)* bei jeweils 75/50/25% verbleibender Vitalkapazität: MEF_{75} , MEF_{50} und MEF_{25} .

Merke: MEF-Werte repräsentieren die Weite der peripheren Atemwege, und zwar umso mehr, je weiter die Lunge entleert ist (bei der MEF_{25} sind 75% der FVC ausgeschöpft!).

Für besondere Fragestellungen, z. B. zur Charakterisierung extrathokaler Atemwegsstenosen, kann auch das Inspirationsmanöver forciert durchgeführt werden. Der dabei bestimmte maximale inspiratorische Fluss (*Peak Inspiratory Flow; PIF*) ist ein Maß für die funktionelle Relevanz der Stenose.

Praktische Durchführung und Qualitätskriterien

Bezüglich der technischen Durchführung und der hygienischen Sicherheitsvorkehrungen sei auf die Herstellerangaben und die einschlägige Spezialliteratur verwiesen.

Merke: Besonders wichtig ist der korrekte Sitz des Mundstücks, es dürfen keine Lecks auftreten.

Die für die verlangten Atemmanöver notwendige Kooperation wird in der Regel erst ab einem Alter von 5–6 Jahren erreicht, mit entsprechender Übung und kindgerechter Zuwendung durchaus auch schon bei vielen 3- bis 4-Jährigen. Essentiell sind im Umgang mit

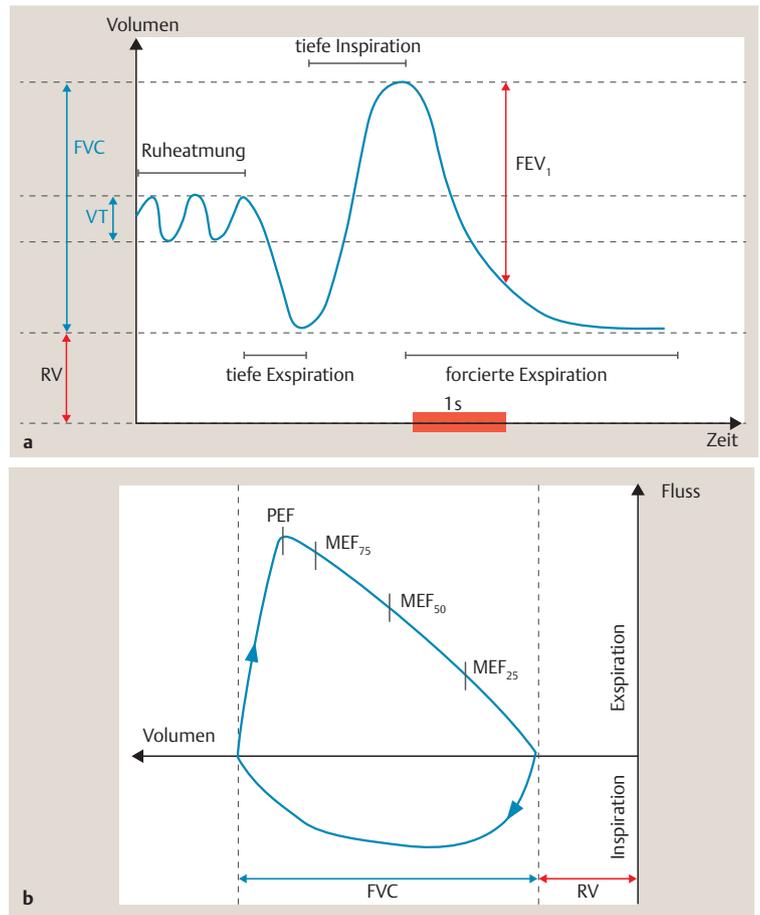


Abb. 3 a) Volumen-Zeit-Kurve beim forcierten Expirationsmanöver. b) Fluss-Volumen-Kurve beim forcierten Atemmanöver. VT = Tidalvolumen; FVC = forcierte Vitalkapazität; FEV_1 = Einsekundenkapazität; RV = Residualvolumen (zur Veranschaulichung, nicht spirometrisch messbar); PEF = expiratorischer Spitzenfluss, Peak-(Expiratory-)Flow; $MEF_{75/50/25}$ = maximaler expiratorischer Fluss bei 75/50/25% verbleibender Vitalkapazität.

Kindern besonders geschulte und erfahrene Mitarbeiter, hilfreich kann eine spezielle Animationssoftware sein (z. B. „Kerzen auspusten“).

Eine verwertbare Spirometrie mit forciertem Expirationsmanöver sollte

- eine ausreichend lange Expirationszeit beinhalten (> 6 Sekunden bei größeren Kindern, > 3 Sekunden bei Kleinkindern),
- die Expiration sollte nicht vorzeitig abgebrochen werden (angezeigt durch steilen Abfall der Flusswerte in der Endphase der Expiration statt „Auslaufen“ der Kurve),
- In- und Expiration sollten eine geschlossene Kurve bilden;
- am Beginn der forcierten Expiration muss die Kurve steil bis zum Erreichen des Peak Flow ansteigen,
- die folgende weitere Expirationsphase darf keine Hustenstöße oder Inspirationsversuche enthalten.

Aus mindestens 3 verwertbaren Atemmanövern wird mit Hilfe spezieller Auswertungsprogramme zunächst die Reproduzierbarkeit geprüft (u. a. FVC-Differenz $< 5\%$), dann werden die besten erreichten Werte ausgewählt bzw. berechnet. Zu beachten ist, dass wiederholte forcierte Atemmanöver bei Patienten mit Atemwegshyperreagibilität eine Bronchokonstriktion induzieren können (sog. „Spirometerasthma“).

Auswertung und Interpretation der Spirometrie

Nach Prüfung der erwähnten Qualitätsmerkmale wird als erster und wichtigster Schritt Größe und Form der Fluss-Volumen-Kurve visuell beurteilt. Dies erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die zugrunde liegende Pathophysiologie und ermöglicht unmittelbar eine orientierende Einteilung in restriktive, obstruktive oder gemischte Ventilationsstörungen.

Merke: Die Form der Fluss-Volumen-Kurve beim forcierten Expirationsmanöver gibt entscheidende Hinweise auf die zugrunde liegende Pathophysiologie. Eine „durchhängende“ Kurve ist typisch für ein Asthma bronchiale.

Bei einer rein *restriktiven Ventilationsstörung* findet sich eine „kleine“ aber normal geformte Kurve (Abb. 4a). Die FVC ist erniedrigt (sie entspricht i. d. R. der in der Ruhespirometrie bestimmten IVC), alle Flusswerte (PEF, MEF, FEV₁) sind proportional vermindert, dementsprechend ist der Tiffeneau-Index FEV₁/FVC normal.

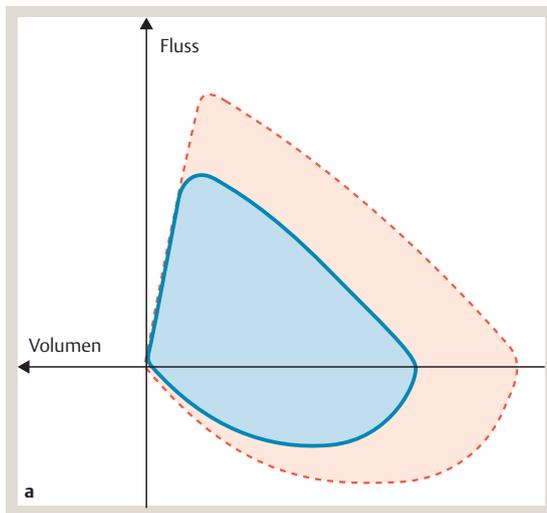


Abb. 4a Restriktive Ventilationsstörung.

Die *obstruktive Ventilationsstörung* ist durch eine Verminderung der expiratorischen Flusswerte (MEF, FEV₁, PEF) gekennzeichnet. Die Kurvenform ist verändert, sie zeigt bei einer peripheren, intrathorakalen Atemwegsobstruktion das Bild einer „durchhängenden Wäscheleine“ (Abb. 4b), hier sind insbesondere MEF₂₅ und MEF₅₀ vermindert, weniger PEF und FEV₁. Ist die Obstruktion eher extrathorakal lokalisiert, sind hingegen überwiegend PEF und FEV₁ eingeschränkt. Bei ausgeprägter Obstruktion zeigt sich eine typische Plateaubildung („Tafelberg“), meist ist auch die inspiratorische Kurve abgeflacht (Abb. 4c).

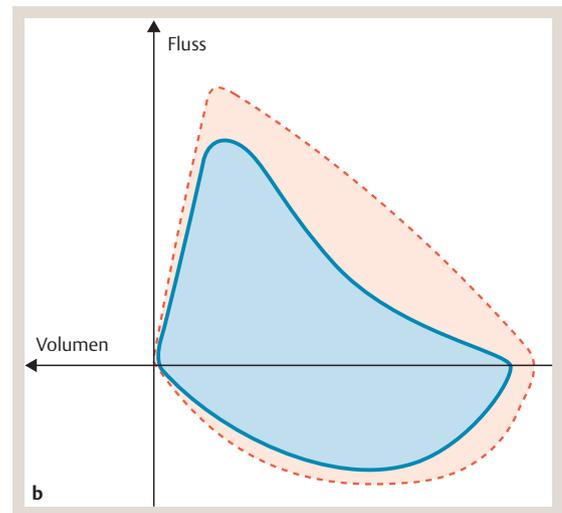


Abb. 4b Periphere (intrathorakale) Obstruktion.

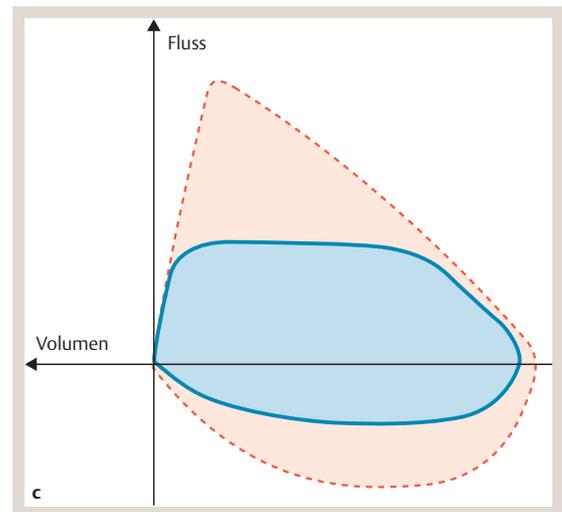


Abb. 4c Zentrale (extrathorakale) Obstruktion.

Eine *kombinierte restriktive/obstruktive Ventilationsstörung* ist charakterisiert durch eine verminderte VC in Kombination mit einer atypischen Kurvenform und eingeschränkten Flusswerten. Eine ausgeprägte Obstruktion mit Lungenüberblähung kann zur drama-

tischen Limitierung der peripheren Flusswerte führen (sog. „*Emphysemknick*“, Abb. 4d). Zu beachten ist, dass während des forcierten Expirationsmanövers zusätzlich eine dynamische Überblähung auftreten kann mit der Folge einer im Vergleich zur Ruhespirometrie vermindert gemessenen FVC („Pseudorestriktion“). Das wahre Ausmaß der Restriktion lässt sich hier mit der Bodyplethysmografie bestimmen (s. u.).

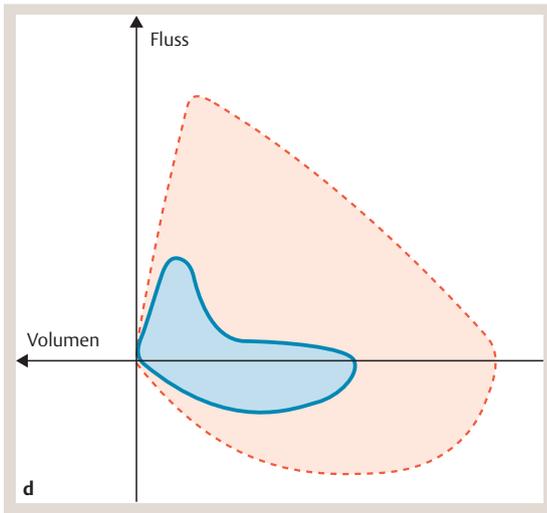


Abb. 4d Kombinierte Ventilationsstörung mit ausgeprägter peripherer Flusslimitierung (Emphysemknick), vermutlich Pseudorestriktion.

Zu warnen ist vor computergenerierten Diagnosen, die die individuelle Interpretation durch einen erfahrenen Untersucher keinesfalls ersetzen können. Gerade bei jüngeren Kindern sind niedrig gemessene Lungenvolumina häufig durch unzureichende Mitarbeit erklärbar (Abb. 4e).

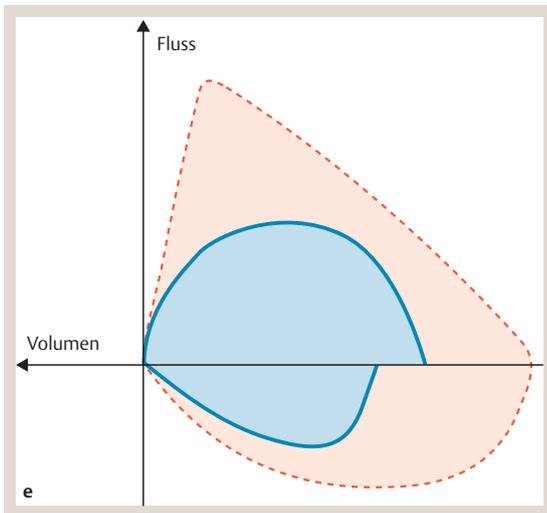


Abb. 4e Erniedrigt gemessene Vitalkapazität bei mangelnder Mitarbeit (langsamer Anstieg zum Peak-Flow, In- und Expiration inkongruent).

Cave: Computergenerierte Bewertungen einer Lungenfunktion sind mit Vorsicht zu genießen, sie ersetzen nicht die Beurteilung durch einen erfahrenen Untersucher.

Referenzwerte

Spirometrieparameter sind abhängig von:

- Alter
- Geschlecht
- Größe
- Gewicht
- ethnischer Zugehörigkeit der Probanden

Für die auf die visuelle Beurteilung der Spirometrikurven folgende quantitative Auswertung werden daher passende Referenzwerte benötigt. In der Software der auf dem Markt befindlichen Lungenfunktionsgeräte sind unterschiedliche, z. T. veraltete, Referenzwerte hinterlegt. Aktuell sind für deutsche Kinder unter „Feldbedingungen“ gewonnene Referenzwerte veröffentlicht worden (Lunokid-Studie), die insbesondere für das Vorschulalter die Bewertung erleichtern. Die Angabe der gemessenen bzw. berechneten Patientenwerte enthält neben den Absolutwerten auch den Bezug auf den jeweiligen Referenzwert, meist in Prozent des Medianwerts.

Als Normalbereich wird in der Regel eine Abweichung um das Doppelte des Variationskoeffizienten vom Median nach oben und unten angenommen. Bei einem Variationskoeffizienten von 10% (für VC und FEV₁) umfasst der Normalbereich also 80–120% des Medianwerts, andere Parameter (z. B. die MEF-Werte) variieren stärker und haben demzufolge einen breiteren Normalbereich.

Gewarnt werden muss vor einer Überinterpretation der Prozentangaben: eine aktuell gemessene FVC von 90% kann für ein gesundes Kind völlig normal sein, bei einem Patienten mit einer vorbestehenden (in der Regel nicht bekannten) FVC von 120% jedoch Ausdruck einer klinisch relevanten Restriktion. Die Interpretation muss daher immer im Kontext mit Anamnese und klinischen Befunden erfolgen, für den einzelnen Patienten sind Verlaufsuntersuchungen wichtig.

Tabelle 1

Ursachen von Ventilationsstörungen im Kindesalter.

Störung	Ursache
obstruktiv/intrathorakal	<ul style="list-style-type: none"> ■ Asthma bronchiale ■ Bronchitis, Bronchiolitis ■ Stenosen der intrathorakalen Atemwege (erworben, angeboren)
obstruktiv/extrathorakal/in- und extrathorakal	<ul style="list-style-type: none"> ■ laryngeale Obstruktion (funktionell, erworben, angeboren) ■ subglottische Stenosen, Hämangiome ■ Trachealstenosen-/malazien
restriktiv	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pneumonie ■ Pleuraerguss, Pleuraschwiele ■ interstitielle Lungenerkrankungen ■ Z. n. Lungenteilresektion ■ neuromuskuläre Erkrankungen ■ Anomalien der Thoraxwand
kombiniert restriktiv/obstruktiv	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mukoviszidose ■ chronische Lungenerkrankung nach Frühgeburt (CLD, BPD) ■ Ziliendyskinesie ■ chronische Lungenerkrankungen bei Immundefizienz

Bodyplethysmografie

Der Bodyplethysmograf ist eine luftdicht verschließbare, transparente Kammer mit bekanntem Volumen und einem geeichten Druckaufnehmer in der Kammer. Volumenänderungen in der Kammer (sog. *Verschiebevolumen*) können so aus den Druckänderungen berechnet werden. Das in der Kammer sitzende Kind atmet zunächst einige normale Atemzüge über ein abgedichtetes, mit der Außenluft verbundenes Mundstück. Am Ende einer Ausatmung wird der Atemstrom durch eine Verschlussklappe (Shutter) im Mundstück plötzlich abgeschnitten. Das Kind wird aufgefordert, gegen den Shutter weiterzuatmen, durch die Inspirationsbemühung weitet sich der Thorax, kompensatorisch wird die umgebende Kam-

merluft komprimiert. Aus der gemessenen Druckänderung ΔP lässt sich die Volumenänderung ΔV berechnen. Da das Gesamtvolumen der Kammer konstant bleibt, entspricht diese Änderung der Zunahme des intrathorakalen Gasvolumens beim Kind. Gleichzeitig wird über einen Druckaufnehmer im Mundstück der Munddruck gemessen, wobei die Druckänderungen am Mundstück hinreichend genau den intraalveolären Druckschwankungen entsprechen. Trägt man nun für verschiedene Phasen eines Atemzyklus den Munddruck über dem Verschiebevolumen auf, so erhält man eine Gerade, aus deren Steigung sich das intrathorakale Gasvolumen (ITGV) berechnen lässt.

Cave: Auf einen Referenzwert bezogene Lungenvolumina müssen immer im Kontext mit der Klinik interpretiert werden. Eine im Normbereich liegende Vitalkapazität schließt eine restriktive Ventilationsstörung nicht sicher aus, wenn keine „gesunden“ Vorwerte vorliegen.

In der Zusammenschau von Anamnese, klinischem Befund, Laborwerten und apparativer Diagnostik ist die Lungenfunktion ein wichtiger, oft entscheidender Baustein bei der Evaluation von Kindern mit respiratorischen Problemen. Dabei sind obstruktive Ventilationsstörungen im Kindesalter weitaus häufiger als restriktive Veränderungen. Tab. 1 fasst die wichtigsten Ursachen für restriktive, obstruktive und gemischte Ventilationsstörungen zusammen.

Bodyplethysmografie

Die Spirometrie erfasst nicht das nach einer Ausatmung in der Lunge verbleibende Luftvolumen, sondern nur die relativ zu diesem hin- und herbewegten Volumina. Das nach einer Ruhe-Ausatmung im Thorax verbleibende Luftvolumen wird als *intrathorakales Gasvolumen (ITGV)* oder auch *funktionelle Residualkapazität (FRC)* bezeichnet. Ist dieses Volumen bekannt, lassen sich alle anderen Lungenvolumina und Kapazitäten durch Kombination mit den spirometrisch erhobenen Werten in Bezug auf einen (hypothetischen) Volumen-Nullpunkt darstellen (Abb. 2).

Die gebräuchlichste Methode zur ITGV/FRC-Messung ist die Bodyplethysmografie (s. Infobox). Das Prinzip der Messung beruht auf der Anwendung des Boyle-Mariotte-Gesetzes: In einer geschlossenen gasgefüllten Kammer ist bei sonst unveränderten Bedingungen das Produkt aus Druck und Volumen konstant:

$$P \times V = \text{konst.}$$

Nach dem Boyle-Mariotte-Gesetz entspricht eine bestimmte Volumenänderung in einer kleineren Lunge einer größeren Druckänderung, somit ist die Kurve um so steiler, je kleiner das ITGV ist (Abb. 5).

Merke: Die funktionelle Residualkapazität (FRC oder ITGV), d. h. das nach einer normalen Ausatmung in der Lunge verbleibende Luftvolumen, kann nicht spirometrisch, wohl aber bodyplethysmografisch bestimmt werden.

Neben dem ITGV lässt sich im Bodyplethysmografen der *spezifische Atemwegswiderstand (sRaw)* bestimmen. Dazu wird während der Ruheatmung der Atemstrom am Mund gemessen und gleichzeitig das durch die Thoraxbewegungen erzeugte Verschiebevolumen. Dies ist ein Maß für die den Atemstrom erzeugenden alveolären Druckschwankungen. Der Quotient aus Druckdifferenz (bzw. Verschiebevolumen) und Atemstrom ergibt den spezifischen Atemwegswiderstand (sRaw). Trägt man den Atemstrom über dem Verschiebevolumen auf, erhält man sog. *Widerstandsschleifen*, deren Form wichtige Informationen über die Atemwegs- bzw. Pathophysiologie liefert.

Im Normalfall zeigt sich eine fast lineare, steile Kurve, d. h. eine geringe Druckschwankung erzeugt einen relativ hohen Atemstrom (Abb. 6a). Je größer der Widerstand wird, desto flacher verläuft die Kurve. Bei inhomogener Atemwegsobstruktion verlaufen die Druck- und Atemstromänderungen zeitversetzt, die Atemschleifen öffnen sich (Abb. 6b–e). In diesem Fall wird ein mittlerer Widerstandswert als *effektiver spezifischer Widerstand (sReff)* errechnet, auch die getrennte Berechnung der in- und expiratorischen Widerstände kann sinnvoll sein.

Merke: Bei der Messung des Atemwegswiderstand liefert die Form der Atemschleife entscheidende Hinweise auf die Lokalisation einer Atemwegsobstruktion.

Der sRaw ist wenig mitarbeitsabhängig, er ist ein Maß für die aufzuwendende Atemarbeit und wenig abhängig von der Größe der Lunge (eine kleinere Lunge erfordert kleinere Volumenverschiebungen, hat aber engere Atemwege mit höheren Widerständen).

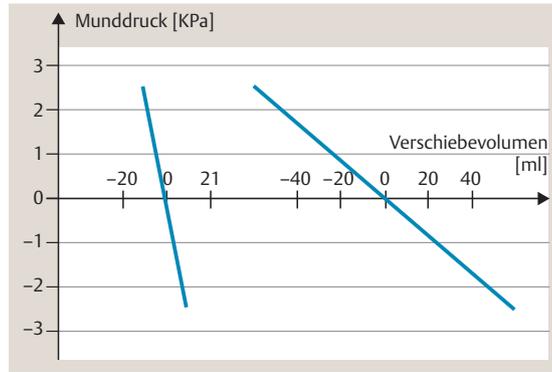


Abb. 5 Beziehung zwischen Munddruck und Verschiebevolumen bei kleinem (links) und größerem (rechts) intrathorakalen Gasvolumen.

Bezieht man den sRaw auf das Lungenvolumen, so erhält man den Atemwegswiderstand:

$$Raw = sRaw / ITGV$$

Interpretation und Bedeutung

Die Bedeutung der Bodyplethysmografie liegt einerseits in der gegenüber der Spirometrie exakteren Klassifizierung *restriktiver Ventilationsstörungen* (echte Restriktion vs. Pseudorestriktion) und dem Erkennen von *Überblähungszuständen* bei Erkrankungen mit chronischer Atemwegsobstruktion (CF, schweres Asthma). Hier ist insbesondere das Verhältnis RV/TLC ein wichtiger Verlaufsparemeter. Andererseits ist die sRaw-Messung gut reproduzierbar und wenig mitarbeitsabhängig, sie eignet sich daher auch bei kleinen Kindern zur Erkennung subtiler Atemwegsveränderungen und im Rahmen von Provokations- und Bronchospasmodolyseuntersuchungen (s.u.).

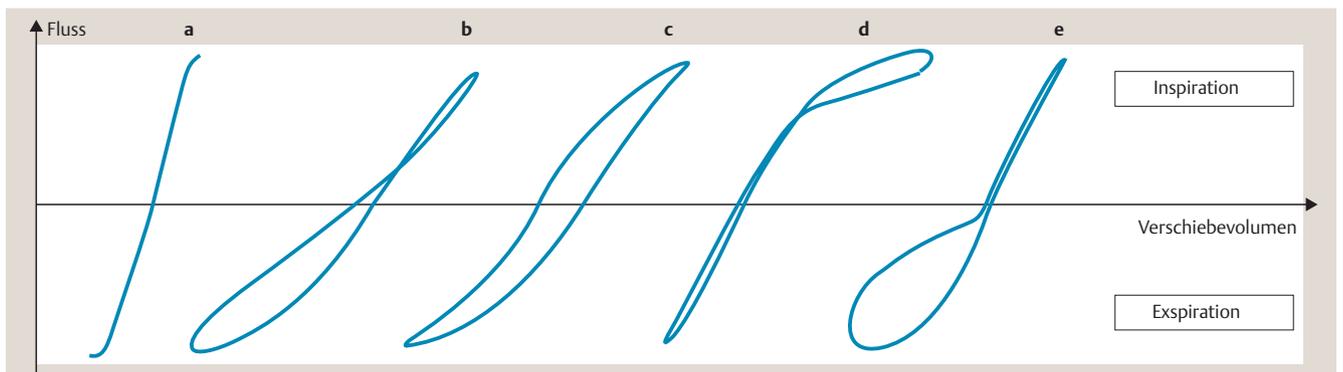


Abb. 6 Atemschleifen bei verschiedenen Atemwegsproblemen. **a** Normalbefund: steile, fast lineare Kurve. **b** Intrathorakale (periphere) Obstruktion mit überwiegend expiratorischer Widerstandserhöhung. **c** In- und expiratorische Widerstandserhöhung, z. B. bei fixierter Trachealstenose. **d** extrathorakale Obstruktion mit inspiratorischer Widerstandserhöhung, z. B. bei Laryngomalazie. **e** Lungenemphysem mit expiratorischer Widerstandserhöhung bei Bronchialkollaps.

Da im Bodyplethysmografen ein Pneumotachograf integriert ist, kann eine Spirometrie im selben Untersuchungsgang durchgeführt werden. Folgendes Vorgehen hat sich bewährt (Video unter [8]):

1. Ruheatmung im geschlossenen Bodyplethysmografen, Messung des sRaw, Widerstandsschleife
2. Atmung gegen den Shutter, Bestimmung des ITGV
3. Ruhespirometrie
4. forciertes Expirationsmanöver

Analog zur Spirometrie existieren auch für die zusätzlich bodyplethysmografisch bestimmten Parameter patientenbezogene Referenzwerte, es gelten die gleichen Kautelen.

Merke: Zu beachten ist, dass die Atemwiderstandswerte eine hohe Varianz aufweisen, der Normalbereich des sRaw reicht bis 180 % des patientenbezogenen Referenzwerts.

Provokationsverfahren und Broncholyse

Diese Untersuchungen spielen bei der Evaluation eines Asthmas bronchiale eine wichtige Rolle. Zeigt bereits die initiale Lungenfunktion typische Veränderungen einer (peripheren) Atemwegsobstruktion und ggf. Überblähung, wird durch einen *Bronchospasmolysetest* die Reversibilität geprüft, die ein wichtiges Kriterium für ein Asthma bronchiale ist. Allerdings schließt eine normale Lungenfunktion ein Asthma nicht aus, charakteristisch ist ja die Atemwegshyperreagibilität, die mit einer Atemwegsobstruktion nach Provokation mit verschiedenen spezifischen oder unspezifischen Stimuli einhergeht.

Merke: Typisch für ein Asthma bronchiale ist eine intrathorakale (periphere) Atemwegsobstruktion mit (zumindest partieller) Reversibilität nach Bronchospasmolyse.

Zu beachten ist, dass eine *antiasthmatische medikamentöse Therapie* die Untersuchungen beeinflussen kann, für verschiedene Medikamente muss eine entsprechende Karenz eingehalten werden:

- Salbutamol mind. 8 Stunden
- Kortikosteroide 1 Woche
- Antihistaminika 3 Tage
- Montelukast 1–2 Tage

Dies gilt natürlich nicht, wenn die Lungenfunktion zur Therapieüberprüfung eingesetzt wird.

Bei entsprechender Indikation (unklare Atemnot oder Husten, insbesondere bei Belastung) kann eine *Provokationstestung* mit pharmakologischen Substanzen (Metacholin, Histamin) oder mit unspezifischen Stimuli (Kaltluft, hypertone Kochsalzlösung, Laufbelastung) durchgeführt werden. Im Kindesalter ist die *Laufbelastung* (freies Laufen oder Laufband) eine auch in der Praxis leicht durchführbare und recht spezifische Untersuchung zum Nachweis einer bronchialen Hyperreagibilität, sie spiegelt die im Alltag auftretenden Belastungen gut wieder. Dabei wird nach Durchführung einer initialen Lungenfunktion ein Dauerlauf von 6 Minuten mit submaximaler Belastung (Herzfrequenz 160–180/min) durchgeführt, nach 2–5 Minuten wird die Lungenfunktion wiederholt. Kriterien für einen positiven Provokationstest sind signifikante Abfälle von PEF und FEV₁ (>20%) und der MEF_{50/25}-Werte (>25%) sowie ein Anstieg des Atemwegwiderstands um mind. 100%.

Pharmakologische Stimuli erfassen die BHR zwar sensibler, dafür jedoch weniger spezifisch, sie sind deutlich aufwändiger. Mit ihnen kann durch Titration der Konzentration eine definierte Reaktionsschwelle festgelegt werden, was insbesondere für wissenschaftliche Fragestellungen und Gutachten von Vorteil ist. In der Regel wird nach einem positiven Provokationstest ein Bronchospasmolysetest angeschlossen.

Die Bronchospasmolyse wird mit einem kurzwirkenden β -Sympatikomimetikum, meist Salbutamol, durchgeführt. Die Applikation kann als Dosieraerosol mit/ohne Spacer, Pulver oder über Vernebler erfolgen. Ein positiver Test liegt vor, wenn es 10–20 Minuten nach der Applikation zu einem signifikanten Anstieg der FEV₁ (>15%) kommt. Weitere Kriterien sind ein Anstieg von MEF₅₀ und MEF₂₅ um mehr als 35% und ein Abfall der Atemwegwiderstände um mind. 50%. Wird nach der Broncholyse eine normale Lungenfunktion erreicht, spricht man von einer vollständig reversiblen, ansonsten von einer partiell reversiblen Obstruktion.

Cave: Zu beachten ist, dass bei erhöhter Instabilität („Collapsibility“) der Atemwege, z. B. bei Knorpelmalazien, eine Verschlechterung der Lungenfunktion nach Anwendung eines β -Sympatikomimetikums auftreten kann.

Weitere und neuere Diagnostikmethoden

Oszillometrische Atemwegswiderstandsmessung

Weniger aufwändig als mit der Bodyplethysmografie lassen sich Atemwegswiderstände mit der relativ neuen Methode der *Impulsoszillometrie (IOS)* bestimmen. Dabei wird dem normalen Luftstrom unter Spontanatmung ein vom Oszillometer generierter polyfrequenter Schallimpuls (5–35 Hz) überlagert. Impuls und Impulsantwort werden analysiert und es wird – in Analogie zur Berechnung eines Wechselstromwiderstands in der Elektrotechnik – ein komplexer Widerstand (Impedanz) berechnet, der sich aus einer Resistance und einer Reactance zusammensetzt. Dabei entspricht die Resistance, insbesondere im niedrigen Frequenzbereich, in etwa dem bodyplethysmografisch bestimmten Atemwegswiderstand. Die Reactance, die dem elektromagnetischen „Blindwiderstand“ entspricht, wird maßgeblich durch die elastischen und Trägheitseigenschaften von Thorax, Lunge und Atemwegen bestimmt. Ihre genaue Bedeutung ist unklar, verwendet wird in erster Linie die sog. Resonanzfrequenz, bei der die Reactance die Nulllinie kreuzt.

Merke: Die in der IOS bestimmten Messwerte haben große Streubreiten und sind daher schlechter geeignet als Spirometrie und Bodyplethysmografie, normale von pathologischen Zuständen zu unterscheiden.

Die Domäne der Impulsoszillometrie liegt in der Anwendung bei der Provokationstestung und der Spasmyolyse sowie zur Verlaufskontrolle, da sie relative Veränderungen beim individuellen Patienten gut abbildet.

Gasverdünnungstechniken

Alternativ zur Bodyplethysmografie kann die FRC auch mittels *Gasverdünnung* bestimmt werden. Dabei wird ein inertes Gas, häufig Helium, der Atemluft in bekannter Konzentration in einem geschlossenen System zugesetzt. Nach Erreichen eines Konzentrationsgleichgewichts kann aus Anfangs- und Endkonzentration die FRC berechnet werden – je größer das Verteilungsvolumen ist, desto stärker wird das Indikatorgas verdünnt. Mit der Methode wird nur das an den Luftbewegungen teilnehmende Gasvolumen erfasst, nicht

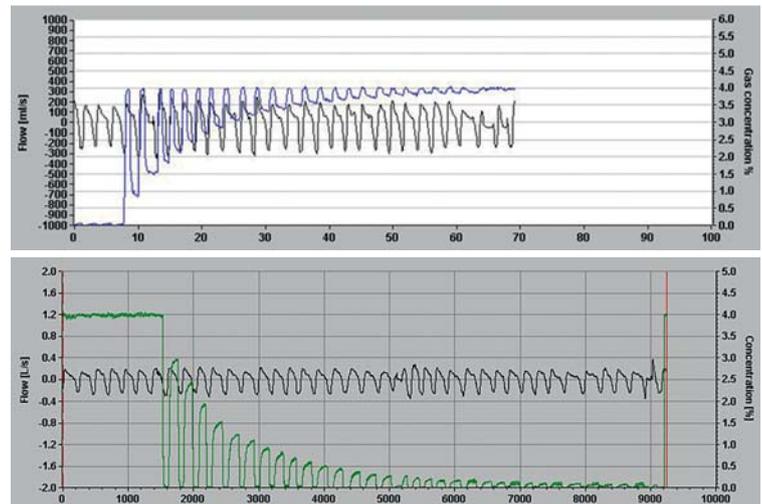


Abb. 7 MBW-Methode. **a** Einwaschkurve (blau). **b** Auswaschkurve (grün) (Software: NDD Medical Technologies, Schweiz).

jedoch das sog. „trapped gas“, das bei der Bodyplethysmografie immer mitgemessen wird und das bei obstruktiven Lungenerkrankungen mit Lungenüberblähung häufig vermehrt ist.

Neben der Möglichkeit der FRC-Bestimmung bieten Gasverdünnungstechniken eine weitere Einsatzmöglichkeit: Mit Hilfe der sog. *Multiple-Breath-Wash-out-Methode (MBW)* können Informationen über die Homogenität der Luftverteilung in der Lunge gewonnen werden. Dabei wird ein inertes Indikatorgas (z. B. Schwefelhexafluorid) zunächst bis zum Erreichen eines Gleichgewichts eingeatmet („wash-in“; Abb. 7a), anschließend wird die abnehmende Konzentration in der Ausatemluft gemessen („wash-out“; Abb. 7b). In der gesunden Lunge erfolgt der Konzentrationsabfall relativ rasch, in einer inhomogen belüfteten Lunge hingegen verzögert – quantitativ beschrieben durch den sog. *Lung-Clearance-Index (LCI)*. Mit der MBW-Methode konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass bei Säuglingen und Kleinkindern mit Mukoviszidose Veränderungen der kleinen Atemwege sehr sensitiv erfasst werden, noch bevor klinische Symptome, Röntgenveränderungen oder Auffälligkeiten der konventionellen Lungenfunktionsparameter manifest werden.

Merke: Gasverdünnungsmethoden wie die Multiple-Breath-Wash-out-Methode erfassen Veränderungen der kleinen Atemwege mit hoher Sensitivität.

Lungendehnbarkeit und Diffusionskapazität

Bei restriktiven Lungenfunktionsstörungen kann die Messung der *Lungendehnbarkeit* („*Compliance*“) zusätzliche Aussagen über die mechanischen Eigenschaften von Lunge und Thorax liefern. Dabei werden über eine im Ösophagus platzierte Sonde intrathorakale Druckänderungen während des Atemzyklus gemessen und mit den parallel registrierten Volumenänderungen am Mundstück ins Verhältnis gesetzt. Die *Compliance* errechnet sich dann als Quotient aus Volumenänderung und Druckänderung, sie ist umso niedriger, je mehr Druck für eine bestimmte Volumenänderung aufgebracht werden muss. Die Messung ist relativ aufwändig und auch belastend für die untersuchten Kinder und wird daher nur bei speziellen Fragestellungen durchgeführt.

Die Diffusionskapazität der Lunge (auch als *Transferfaktor* bezeichnet) ist ein Maß für die Effektivität des Gasaustauschs. Ihre Messung liefert insbesondere bei interstitiellen Lungenerkrankungen zusätzliche Informationen über die Funktion der alveolo-kapillären Einheit. Das Messprinzip beruht auf der quantitativen Bestimmung des Transports eines Indikatorgases (meist Kohlenmonoxid, CO) von den Alveolen bis zu den Erythrozyten, der gemessene Wert wird als CO-Transferfaktor (T_{LCO}) bezeichnet. Die T_{LCO} -Messung wird v.a. zur Verlaufskontrolle bei interstitiellen Prozessen eingesetzt.

Lungenfunktion bei Säuglingen

Aufgrund der Besonderheiten und Schwierigkeiten in dieser Altersgruppe (keine Kooperationsfähigkeit, geringe Lungenvolumina, störender Totraum der Apparate, hoher personeller und zeitlicher Aufwand) werden Lungenfunktionsuntersuchungen im Säuglings- und frühen Kleinkindalter derzeit fast ausschließlich in speziellen, meist universitären Einrichtungen mit überwiegend wissenschaftlichen Fragestellungen durchgeführt.

Analog zur Messung beim größeren Kind können auch bei Säuglingen Fluss-Volumen-Kurven während der Ruheatmung (Schlafphase oder Sedierung mit Chloralhydrat) abgeleitet werden. Der Atemstrom wird über einen Pneumotachografen, der mit einer Mund und Nase dicht umschließenden Maske verbundenen ist, gemessen, die Volumina werden als Zeitintegrale berechnet. Wichtigste Parameter sind neben Tidal-



Abb. 8 Baby-Lungenfunktion mit der RTC-Methode.

volumen und Atemfrequenz die In- und Expirationszeit sowie die maximalen Flusswerte in In- und Expiration.

Merke: Eine Messung der in- und expiratorischen Reservevolumina und somit Bestimmung der Vitalkapazität ist naturgemäß aufgrund der fehlenden Kooperationsfähigkeit nicht möglich.

Hingegen ist es gelungen, durch Entwicklung einer speziellen Technik mit einer erzwungenen *Thoraxkompression* („*Rapid Thoracic Compression*“, RTC) eine forcierte expiratorische Fluss-Volumen-Kurve zu generieren, die Ähnlichkeit mit den forcierten Kurven bei älteren Kindern hat; obstruktive Atemwegserkrankungen sind auch hier durch eine konkave Kurvenform charakterisiert. Die forcierte Expiration wird durch plötzliches Aufblasen einer Thorax und Abdomen umschließenden Weste erzeugt (Abb. 8). Eine Weiterentwicklung, die sog. *Raised-Volume-RTC*, startet das Kompressionsmanöver im Anschluss an ein inspiratorisches Blähmanöver und ermöglicht so besser reproduzierbare Messungen.

Merke: Bei Säuglingen lassen sich mit der Thoraxkompressionsmethode aussagekräftige forcierte expiratorische Fluss-Volumen-Kurven erzeugen.

Inzwischen sind auch für Säuglinge spezielle Ganzkörperplethysmografen verfügbar, die analog zur Bodyplethysmografie bei größeren Kindern und Erwachsenen eine Bestimmung der funktionellen Residualkapazität (FRC_{box}) ermöglichen. Alternativ kann auch hier die FRC mit Gasverdünnungstechniken gemessen werden (z. B. FRC_{Helium}).

Zusammenfassung

Lungenfunktionsuntersuchungen im Kindesalter liefern wichtige Informationen über die Funktion der Atemwege und die Leistungsfähigkeit der Lunge insbesondere bei chronischen respiratorischen Symptomen. Bei entsprechender Anleitung lassen sich ab dem Vorschulalter verwertbare Ergebnisse erzielen. Die Spirometrie, die mit geringem Aufwand in jeder Kinderarztpraxis durchführbar ist, erlaubt eine orientierende Einteilung in restriktive und obstruktive Ventilationsstörungen, beim forcierten Atemmanöver lassen sich Atemwegobstruktionen differenzieren. Die Bodyplethysmografie erfasst zusätzlich die spirometrisch nicht messbaren Lungenvolumina und erlaubt die Messung von Atemwegwiderständen. Aufgrund des höheren apparativen Aufwands wird sie überwiegend im Klinikbereich und in spezialisierten kinder pneumologischen Schwerpunktpraxen eingesetzt. Lungenfunktionsuntersuchungen bei Säuglingen, Gasverdünnungstechniken, Compliance-Messungen und Diffusionskapazitätsmessungen sind vorwiegend spezialisierten klinischen Einrichtungen vorbehalten.

Über den Autor

Joachim Werner Heinrich Freihorst



1969–1975 Studium der Physik an der damaligen TU Hannover mit Abschluss als Diplom-Physiker.
1975–1981 Medizinstudium an der Medizinischen Hochschule Hannover, 1981–1989 Weiterbildung zum Arzt für Kinderheilkunde an der Kinderklinik der Medizinischen Hochschule Hannover (MHH). 1986–1987 Forschungsaufenthalt am Children's Hospital in Buffalo/USA. 1989–2004 Oberarzt und Leitender Oberarzt an der Kinderklinik der MHH, zuletzt kommissarischer Leiter der Abteilung Kinderheilkunde I, Pädiatrische Pneumologie und Neonatologie und Geschäftsführender Direktor des Zentrums Kinderheilkunde. 1995 Habilitation, 2000 Ernennung zum Apl.-Professor an der MHH. Seit 2004 Chefarzt der Klinik für Kinder- und Jugendmedizin am Ostalb-Klinikum in Aalen. 2010 Umhabilitation an die Universität Ulm. Facharzt für Kinderheilkunde und Jugendmedizin, Neonatologie, Kinder-Pneumologie. Vorstandsmitglied der Gesellschaft für Pädiatrische Pneumologie (GPP) und der Atemwegsliga. Mitglied diverser Fachgesellschaften, Gutachter für diverse Journale.

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. med. Joachim Freihorst
Klinik für Kinder- und Jugendmedizin
Ostalb-Klinikum Aalen
Im Kälblesrain 1
73430 Aalen
E-Mail: Achim.Freihorst@ostalbklinikum.de

Interessenkonflikt: Der Autor gibt an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Literatur

- 1 Bundesarbeitsgemeinschaft Pädiatrische Pneumologie (BAPP) e.V. (Hrsg.) Qualitätsmanual Pädiatrische Pneumologie. Heidenheim: med info GmbH; 2013
- 2 Criece CP et al. Empfehlungen zur Ganzkörperplethysmografie. Deutsche Atemwegsliga und Deutsche Gesellschaft für Pneumologie und Beatmungsmedizin. Oberhaching: Dustri-Verlag; 2009
- 3 Glöckner-Pagel J, Schröter C, Griesse M. Lungenfunktionsdiagnostik. In: Nicolai T, Griesse M (Hrsg.) Praktische Pneumologie in der Pädiatrie-Diagnostik. Stuttgart: Thieme; 2011: 127–235
- 4 Hüls A, Krämer U, Gappa M et al. Neue spirometrische Referenzwerte für Kinder und Jugendliche in Deutschland unter Berücksichtigung der Größe und nichtlinearer Alterseffekte: Die LUNOKID-Studie. Pneumologie 2013; 67: 141–149
- 5 Lindemann H, Leupold W. Lungenfunktion bei Kindern. Stuttgart: Kohlhammer; 2003
- 6 Quanjer PH, Hall GL, Stanojevic S et al. Age- and height-based prediction bias in spirometry reference equations. Eur Respir J 2012; 40: 190–197
- 7 Zapletal A, Samánek M, Paul T et al. Lung Function in Children and Adolescents: Methods, Reference Values. Basel: Karger; 1987
- 8 Atemwegsliga. Videos. Im Internet: http://www.atemwegsliga.de/informationmaterial_videos.html; Zugriff am 30.12.2014

CME-Fragen

CME-Teilnahme

- ▶ Viel Erfolg bei Ihrer CME-Teilnahme unter <http://cme.thieme.de>
- ▶ Diese Fortbildungseinheit ist 12 Monate online für eine CME-Teilnahme verfügbar.
- ▶ Sollten Sie Fragen zur Online-Teilnahme haben, unter <http://cme.thieme.de/hilfe> finden Sie eine ausführliche Anleitung.

1

Für die Spirometrie trifft zu:

- A Sie ist auch bei 3-jährigen Kindern problemlos durchführbar.
- B Sie ermöglicht die Bestimmung des Residualvolumens.
- C Sie ermöglicht die Bestimmung der Vitalkapazität.
- D Eine erniedrigte Vitalkapazität ist immer beweisend für eine restriktive Ventilationsstörung.
- E Eine erniedrigte Vitalkapazität ist typisch für ein Asthma bronchiale.

2

Die totale Lungenkapazität (TLC) setzt sich zusammen aus:

- A FRC+VC
- B RV+VC
- C ERV+VT+IRV
- D FRC+ERV
- E FRC+VT+VC

3

Für das forcierte Expirationsmanöver bei der dynamischen Spirometrie gilt:

- A Ein erniedrigter Peak-Flow bei sonst normalen Flusswerten ist typisch für ein Asthma bronchiale.
- B Eine konkave Form der Fluss-Volumen-Kurve ist typisch für ein Asthma bronchiale.
- C Eine erniedrigte Einsekundenkapazität (FEV_1) beweist eine obstruktive Ventilationsstörung.
- D Ein erniedrigter Tiffeneau-Index (FEV_1/FVC) ist typisch für eine obstruktive Ventilationsstörung.
- E Ein erniedrigter MEF_{25} ist typisch für eine extrathorakale Atemwegsstenose.

4

Kriterien für eine verwertbare Fluss-Volumen-Kurve sind:

- A Eine möglichst kurze Expirationszeit.
- B Ein gleichmäßiger, flacher Anstieg bis zum Erreichen des Peak-Flow.
- C Kongruenz von In- und Expirationskurve.
- D Eine normale Vitalkapazität.
- E Ein linearer Abfall zwischen Peak-Flow und MEF_{25} .

5

Typische Ursachen für obstruktive Ventilationsstörungen im Kindesalter sind:

- A Bronchiolitis
- B Pleuritis
- C neuromuskuläre Erkrankungen
- D Lungenfibrosen
- E Lobärpneumonie

6

Die Bodyplethysmografie

- A erfordert keinen besonderen apparativen Aufwand.
- B ermöglicht nicht die Bestimmung der funktionellen Residualkapazität (FRC).
- C beruht auf der Anwendung des Hagen-Poiseuille-Gesetzes.
- D ist im Säuglingsalter nicht durchführbar.
- E ermöglicht die Bestimmung des spezifischen Atemwegswiderstands (sRAW).

CME-Fragen

Lungenfunktionsdiagnostik bei Kindern – Methoden und Interpretation

7

Welche Aussage trifft zu?

- A** Ein positiver Metacholin-Provokationstest ist hochspezifisch für ein Asthma bronchiale.
- B** Salbutamolinalationen müssen mind. 8 Stunden vor einem Provokationstest abgesetzt werden.
- C** Die Atemwegsobstruktion beim Asthma bronchiale ist meist nicht reversibel.
- D** Bei einer Laufbelastung sollte die Herzfrequenz nicht über 120/min ansteigen.
- E** Die Bronchospasmolyse mit Salbutamol sollte grundsätzlich als Feuchtinhalation mit einem Vernebler durchgeführt werden.

8

Welche Aussage trifft zu?

- A** Die Impulsoszilometrie (IOS) zeichnet sich durch eine besonders geringe Streubreite der Messung aus.
- B** Die Messung der Lungendehnbarkeit (Compliance) ist nur am intubierten Patienten möglich.
- C** Die Diffusionskapazität ist bei interstitiellen Lungenerkrankungen typischerweise erhöht.
- D** Gasverdünnungstechniken, z. B. mit Helium, ermöglichen die Bestimmung der funktionellen Residualkapazität (FRC).
- E** Bei einer inhomogenen Luftverteilung in der Lunge erfolgt das Auswaschen eines inerten Indikatorgases besonders rasch.

9

Lungenfunktionsuntersuchungen im Säuglingsalter

- A** sind in jeder Kinderarztpraxis problemlos durchführbar.
- B** können mittels einer erzwungenen Thoraxkompression aussagekräftige Expirationskurven erzeugen.
- C** werden grundsätzlich am wachen Kind durchgeführt.
- D** können die funktionelle Residualkapazität (FRC) nicht messen.
- E** sind mit einem hohen Risiko für einen Pneumothorax verbunden.

10

Lungenfunktionsuntersuchungen im Kindesalter

- A** liefern selten entscheidende Informationen.
- B** werden überwiegend in universitären Einrichtungen durchgeführt.
- C** eignen sich hervorragend für computergestützte Auswertungen.
- D** können restriktive und obstruktive Ventilationsstörungen meist nicht differenzieren.
- E** sind ein fester und wichtiger Bestandteil des diagnostischen Repertoires bei Atemwegs- und Lungenerkrankungen.