



**Ganzkörper-
plethysmographie
Spirometrie
R-V Graph und
FRC Rebreathing**

1

Ganzkörperplethysmographie und Spirometrie

C.-P. Criée und H.-J. Smith

Einleitung

Aufgabe des respiratorischen Systems ist die Oxygenierung des Blutes sowie die Elimination des Stoffwechselprodukts Kohlendioxid. Die beiden Kompartimente, die für diese Aufgaben notwendig sind, sind das gasaustauschende Organ Lunge und das die Lungen belüftende Organ Atempumpe.

Untersuchungen der Lungenfunktion haben zum Ziel, Störungen im gasaustauschenden Organ zu erkennen und zu evaluieren. Dabei werden vier unterschiedliche Bereiche der Lungenfunktion unterschieden:

1. Die Ventilation, die für den Transport der Außenluft bis zur Alveole und zurück verantwortlich ist.
2. Die Diffusion, als treibende Kraft, die es Sauerstoff und Kohlendioxid erlaubt die alveolo-kapilläre Membran zu überwinden.
3. Die Perfusion, also die Durchblutung des gastauschenden Organs Lunge.
4. Die Atmungsmuskelfunktion.

Die Ganzkörperplethysmographie mit abschließender Spirometrie stellt die Grundlage jeder qualifizierten Lungenfunktionsprüfung dar. Mit ihrer Hilfe werden Atemwegswiderstände, absolute und relative Lungenvolumina bei Ruheatmung sowie dynamische Volumina und maximale Atemströmungen bei forcierten Atmungsmanövern bestimmt. Auf diese

Weise können Störungen in der Ventilation sicher analysiert werden. Ganzkörperplethysmographie und Spirometrie sind immer indiziert, wenn der Verdacht auf eine Lungen- oder Atemwegserkrankung besteht.

Eine auf die Spirometrie beschränkte Untersuchung minimiert den technischen Aufwand zwar erheblich, begrenzt die Diagnostik jedoch auf die Bestimmung von Flusslimitationen und relativen Lungenvolumina, die primär dem Nachweis obstruktiver Ventilationsstörungen dienen. Der nicht-spezifische Charakter der Spirometrie erfordert in jedem Falle eine enge Bezugsetzung zur Klinik des Patienten und eventuell die Anwendung weiterer, spezifischer Untersuchungsmethoden.

Indikationen für eine Lungenfunktionsuntersuchung

- Dyspnoe,
- Husten und/oder Auswurf,
- Screening (Gesundheitsuntersuchung),
- Früherkennung von Schäden durch inhalative Noxen,
- Verdacht auf Erkrankungen von Atemwegen, Lunge oder Herz sowie muskuloskelettale Erkrankungen mit Auswirkungen auf die Atmung,
- Verdacht auf Erkrankungen der Atempumpe (Atemzentrum, zugehörige Nerven und Muskeln),

- Verlaufsbeobachtung bronchopulmonaler Erkrankungen,
- Therapiekontrolle bronchopulmonaler Erkrankungen,
- arbeitsmedizinische Überwachung und Vorsorge (zum Beispiel bei Exposition gegenüber Allergenen, anorganischen Stäuben, Rauchbelastung usw.),
- präoperative Diagnostik.

Absolute Kontraindikationen für forcierte Manöver

- Akute lebensbedrohliche Krankheitsbilder jeglicher Art; zum Beispiel akuter Myokardinfarkt, akute fulminante Lungenembolie, großes ascendierendes Aortenaneurysma, Spannungspneumothorax.

4

Relative Kontraindikation für forcierte Manöver

- Ausgedehnter Pneumothorax (innerhalb der ersten 2 Wochen),
- Abdomen-/Thoraxoperation (je nach 1 – 4 Wochen postoperativ),
- Augen-/Hirn-/Ohrenoperation (variabel, Rücksprache mit Operateur),
- besondere Vorsicht bei Hämoptysen unklarer Genese.

Ganzkörperplethysmographie

Die Ganzkörperplethysmographie [1, 2] wird als GOLD-Standard der Atemwegs- und Lungenvolumenmessung angesehen. Die Vorteile dieser Methode liegen in den extrem geringen Anforderungen an die Mitarbeit des Patienten. Es ist lediglich die Registrierung einer einfachen Ruheatmung notwendig, um klinisch relevante und informative Kenngrößen des

Atmungstraktes zu bestimmen. So können Patienten nahezu aller Altersgruppen und unabhängig von der Art und Schwere der Erkrankung untersucht werden.

Der Ganzkörperplethysmograph besteht aus einer 700 – 1.000 Liter fassenden Kabine, die in Form und Größe einer Telefonzelle ähnelt. Bis auf eine kleine, der Stabilisierung des Kabineninnendrucks dienende, Leckage wird die Kabine während der Untersuchung dicht verschlossen. Innerhalb der Kabine ist ein höhenverstellbarer Messkopf angebracht, der einen Strömungssensor, eine Verschlussklappe (Shutter) zur kurzzeitigen Blockierung des Atemstromes sowie einen Munddrucksensor vereint. Zusätzlich erlaubt ein Kabinensensor die Registrierung der während der Messung in der Kabine auftretenden Kompressions- und Dekompressionsvolumina. Aus der Beziehung der verschiedenen Messsignale, in Verbindung mit festgelegten methodischen Verfahrensweisen, Atmungsmanövern und Berechnungsvorschriften, lassen sich klinisch informative Indizes der Lunge ableiten.

Die aufwendige Technologie des Ganzkörperplethysmographen auf der einen Seite, gestattet auf der anderen Seite eine einfache Ruheatmungsanalyse ohne Maximalmanöver als Voraussetzung für eine differenzierte und frühe Diagnostik von pulmonalen Erkrankungen. Dabei liefert der Plethysmograph Zielparameter, die weit über das Maß der Spirometrie hinausgehen. In diesem Zusammenhang ist die kooperationsarme Bestimmung des spezifischen Atemwegswiderstandes (sR_{aw}) aus der Spontanatmung zu sehen, der, wie die Einsekundenkapazität (FEV_1), als Globalparameter zu verstehen ist. Im Vergleich nimmt der sR_{aw} allerdings eine umfassendere Bewertung des Respirationstraktes vor. Wichtige klinische Fragestellungen zu den Ursachen einer pulmonalen Erkrankung, deren Bronchodilatator-Response bzw. Hyperreagibilität werden mit seiner Hilfe bereits beantwortet.

Ebenfalls bei Ruheatmung, jedoch mit einem etwas mitarbeitsintensiveren Verschlussmanöver, gelingt die Bestimmung der funktionellen Residualkapazität (FRC_{pleth}), dem zentralen Lungenvolumen überhaupt. Aus der Zusammenführung beider Größen kann schließlich der Atemwegswiderstand (R_{aw}) berechnet werden, der sich nicht ohne Grund als „Goldstandard“ darstellt, wenn man seine Aussagekraft mit den Ergebnissen anderer Methoden zur Widerstandsmessung vergleicht.

Alles in allem ermittelt der Ganzkörperplethysmograph bestimmte pulmonale Größen, die für die Spirometrie unerreichbar sind. Hierdurch gelingt es, komplexe und/oder kombinierte Ventilationsstörungen in größerem Detail aufzuschlüsseln.

Methodische Prinzipien der Ganzkörperplethysmographie

Die Inspiration aus der Atemruhelage erfolgt durch die Kontraktion der Inspirationsmuskulatur, womit sich das Thoraxvolumen und damit auch das Lungenvolumen vergrößern. Im allerersten Augenblick der Zunahme des Lungenvolumens ist noch keine Luft in die Lunge eingeströmt, sodass nach dem allgemeinen Gasgesetz nach Boyle-Mariotte ein alveolärer Unterdruck entsteht, welcher den inspiratorischen Atemstrom verursacht. Der Atemstrom vergrößert die Luftmenge in der Lunge, wodurch der Alveolardruck wieder auf den Umgebungsdruck ansteigen könnte, wenn das Lungenvolumen nicht weiterhin zunehmen würde. Der „Antrieb“ des Atemstroms ist die kontinuierliche Vergrößerung des Thorax- und folglich des Lungenvolumens. Die daraus resultierende Dekompression der Luft im Alveolarraum vergrößert sein Volumen zusätzlich um ein Kompartiment das Verschiebevolumen (ΔV_{pleth}) genannt wird. Der Betrag des Verschiebevolumens wi-

derspiegelt den erforderlichen Grad der Dekompression, um den für die Ventilation notwendigen alveolären Unterdruck zu erzielen. Am Ende der Inspiration hält die Atmungsmuskulatur die Spannung kurzzeitig konstant. Das Lungenvolumen ist nun um das Atemzugvolumen erhöht und der Alveolardruck entspricht wieder dem ursprünglichen Umgebungsdruck. Das Verschiebevolumen und damit der alveoläre Unterdruck sind Null. Die Ausführungen machen deutlich, dass das Verschiebevolumen nicht mit dem Atemzugvolumen gleichzusetzen ist.

Mit der Expiration kommt es zum Erschlaffen der Thoraxmuskulatur. Gleichzeitig führt der elastische Recoil der Lunge zu einem Absinken des Thoraxvolumens und folglich auch des Lungenvolumens. Im allerersten Augenblick bleibt die Luftmenge in der Lunge konstant. Sie wird jetzt komprimiert, sodass ein alveolärer Überdruck entsteht, der den expiratorischen Atemstrom bewirkt. Die Kompression der Luft im Alveolarraum verkleinert sein Volumen zusätzlich um den Betrag des Verschiebevolumens. Das Verschiebevolumen ist nun Äquivalent des erforderlichen Grades der Kompression, um den ventilatorisch notwendigen alveolären Überdruck für die Expiration bereitzustellen. Die Luftmenge in der Lunge nimmt mit einer geringen zeitlichen Verzögerung wieder ab. Der expiratorische Atemstrom wird aufrechterhalten, bis die Atemruhelage erreicht ist, weil die dort fehlende Retraktionskraft das Thoraxvolumen nicht weiter verkleinern kann und damit auch das Verschiebevolumen und der Alveolardruck auf Null zurückgehen.

Das Verschiebevolumen [3] ist der Betrag des Lungenvolumens, um den es sich durch inspiratorische Dekompression erhöht bzw. durch expiratorische Kompression verringert. Dabei besteht Proportionalität zum Grad der Dekompression bzw. Kompression. Dekompression und Kompression des Lungenvolumens sind

die Grundlage der Erzeugung der für die Ventilation erforderlichen Alveolardrücke, die wiederum von der Größe der Atemwegswiderstände und des Lungenvolumens abhängen. Zur Veranschaulichung beträgt das Verschiebevolumen bei einem spontan atmenden Lungengesunden mit einem Lungenvolumen von 3,5 L maximal 10 mL und steigt im Krankheitsfalle bis auf 50 mL an.

Das methodische Prinzip der Ganzkörperplethysmographie beruht darauf, dass sich das in der Lunge entstehende Verschiebevolumen in der luftdicht verschlossenen Kabine „spiegelt“. Wenn sich beispielsweise bei der Inspiration die Luftmenge in der Lunge durch Dekompression um die Größe des inspiratorischen Verschiebevolumens vergrößert, nimmt auch das Thoraxvolumen in gleichem Maße zu und sorgt für eine Kompression der Luft innerhalb der geschlossenen Kabine. In der Kabine entsteht demzufolge ein Verschiebevolumen, das genauso groß ist wie das Verschiebevolumen in der Lunge, allerdings mit umgekehrtem Vorzeichen. Während der Expiration sorgt die in der Lunge komprimierte Luftmenge für eine Dekompression der Kabinenluft.

Der in Volumeneinheiten kalibrierte Kabinensensor erlaubt die Registrierung des gespiegelten Verschiebevolumens. Die hohen Anforderungen an die technische Bereitstellung dieses Kabinensignals werden klar, wenn man sich verdeutlicht, dass Verschiebevolumina bis hinunter zu 10 mL, innerhalb einer rund 1.000 L fassenden Kabine akkurat gemessen werden müssen.

Primär können durch die Erfassung des Verschiebevolumens bei geschlossener Kabine folgende Kenngrößen der Lunge ermittelt werden:

- der spezifische Atemwegswiderstand, sR_{aw} ,
- das thorakale Gasvolumen (TGV) zum Zeitpunkt des Verschlusses; in der Regel die funktionelle Residualkapazität, FRC_{pleth} .

Durchführung der Untersuchung

Im europäischen Raum erfolgen die ganzkörperplethysmographischen und spirometrischen Messungen routinemäßig in einem zusammenhängenden Durchlauf. Die Reihenfolge wird dabei durch die Lungenphysiologie bestimmt. Plethysmographische Ruheatmungsanalysen, die vernachlässigbare Rückwirkungen auf das Bronchialsystem haben, sollten grundsätzlich im Vorfeld von spirometrischen Maximalmanövern erfolgen. Noch Minuten nach einer Maximalatmung ist das Bronchialsystem davon betroffen, das heißt in der Regel dilatiert.

Bevor jedoch der erste Patient im Ganzkörperplethysmographen zur Untersuchung kommt und mindestens einmal am Tag, ist es zur Sicherstellung der Validität der Untersuchungsergebnisse notwendig, die Sensorik des Messsystems zu kalibrieren bzw. zu verifizieren. Mithilfe einer 3-L-Handpumpe wird die Strömungs-/Volumensensorik geprüft. Im Anschluss erfolgen die Bestimmung der Kabinenzeitkonstante und die Kalibrierung des Kabinensignals. Dabei sind die Herstellerangaben zu berücksichtigen. Die Drucksensorik zur Erfassung des während des Verschlusses auftretenden Munddrucks, ist werkseitig kalibriert und bedarf keiner Neukalibrierung.

Die für die Patientenuntersuchungen notwendigen Angaben zu Umgebungstemperatur, Luftfeuchte und absolutem Luftdruck werden der Messsoftware entweder automatisch zur Verfügung gestellt oder manuell eingegeben.

Für die Routinediagnostik wird der in Abbildung 1 dargestellte Ablauf empfohlen [3, 4]. Bei geschlossener Kabinentür erfolgt nach einer kurzen Adaptationsphase die initiale Aufzeichnung der sogenannten Body- bzw. Atmungsschleifen, gefolgt von Verschlussmanövern, die final mit der Bestimmung langsamer und

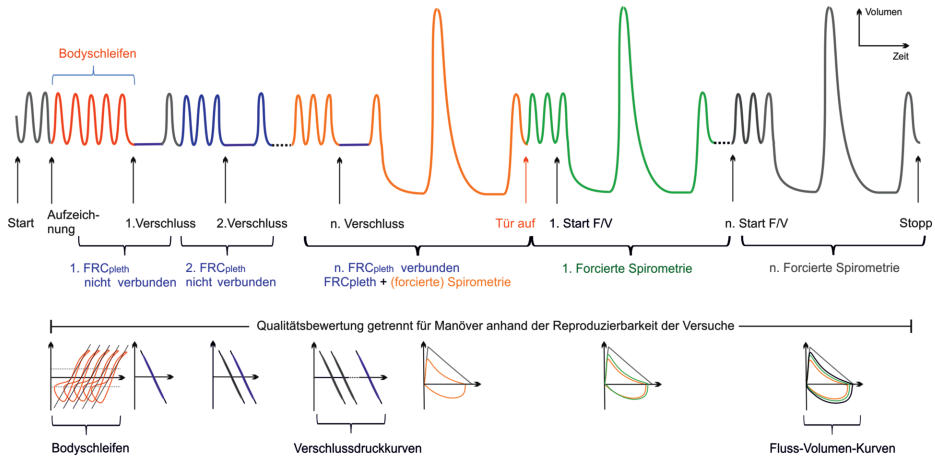


Abb. 1. Empfohlener Untersuchungsablauf. Bodyschleifen und nachfolgend zwei „nicht verbundene“ Verschlussmanöver werden bei Ruheatmung registriert. Anschließend folgt mindestens ein „verbundenes“ Manöver aus der Kombination von Verschluss und expiratorisch eingeleiteter forcierter Spirometrie. Bei unzureichender Kooperation kann alternativ zur forcierter Spirometrie eine Ruhespirometrie durchgeführt werden. Nach Öffnung der Kabinentür sind in jedem Falle zusätzliche, forcierte Manöver aufzuzeichnen. Die Qualitätsbewertung der Bodyschleifen, Verschlussdruckkurven und Fluss-Volumen-Kurven erfolgt anhand der Reproduzierbarkeit der durchgeführten und akzeptierten Versuche.

forcierter, maximaler Atmungsvolumina „verbunden“ werden können. Verbunden bedeutet, dass der Patient nach dem Verschlussmanöver nicht vom Mundstück geht, bis die Maximalatmung beendet ist. Die einzelnen Atmungsmanöver sollten in enger zeitlicher Reihenfolge stattfinden. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit minimiert, dass gegebenenfalls auf das Spirogramm, das heißt den Volumen-Zeit-Verlauf, wirkende Offset-Größen die Parameterbestimmung negativ beeinflussen. In der Regel und bei vertrauenswürdiger Mitarbeit des Patienten wird im Anschluss an die maximale Inspiration eine forcierte Expiration instruiert, woraus neben den Ruheparametern eine Fluss-Volumen-Kurve abgeleitet werden kann.

Das durchgängig verbundene Manöver wird erst registriert, wenn die Validität der FRC_{pleth} -Bestimmung durch mehrfaches Auslösen des Verschlusses, anhand der Reproduzierbarkeit der einzelnen Versuche, überprüft wurde. Es ist daher üblich, anfänglich mindestens zwei „nicht verbundene“,

reine Verschlussmanöver hintereinander aufzuzeichnen, zwischen denen der Patient ganz normal atmet. Das Assistenzpersonal hat so die Möglichkeit zu entscheiden, ob weitere Verschlüsse notwendig sind. Erst danach folgen die verbundenen Manöver in der Kombination von Verschluss und Maximalatmung. Damit wird verhindert, dass die spirometrischen Maximalmanöver eine mögliche Verschiebung der Atemmittellage bewirken, die die FRC_{pleth} -Güte verschlechtern könnte. Nicht zuletzt erfordern die Verschlussmanöver eine erhebliche Koordination und Kooperation vom Patienten, selbst wenn sie nicht verbunden sind.

Mindestens ein forciertes Manöver sollte abschließend bei geöffneter Kabinentür und ohne vorherigen Verschluss aufgezeichnet werden, um optimale Bedingungen für eine barrierefreie Instruktion der forcierter Spirometrie zu schaffen. Dies kommt der Qualität der Fluss-Volumen-Messung zugute.

Unmittelbar nach Abschluss der Untersuchung erfolgt die automatische Pa-

parameterbestimmung auf der Basis von qualitätsoptimierenden Algorithmen, die aus den Einzelversuchen die „Best“-Parameterwerte extrahieren und systematisch den Einfluss von Artefakten minimieren. An dieser Stelle wird eine „Bestandsaufnahme“ der Resultate der Gesamtuntersuchung durch das Assistenzpersonal empfohlen, die sich sowohl auf wichtige Zielparameter als auch auf zusammenfassende Grafikausgaben bezieht. Mögliche Defizite der Untersuchung sollten anschließend NICHT durch Editieren der Ergebnisse „geschönt“ oder gar manipuliert werden. Ausschließlich die problematischen Manöver sind nach erneuter und gezielter Instruktion zu wiederholen.

Eine Optimierung der Untersuchungsergebnisse ist nur durch und mit dem Patienten möglich!

Nach Abschluss der Untersuchung verbleibende Unzulänglichkeiten werden kommentiert.

8

Standardisierung der Ruheatmung

Die Aufzeichnung der Bodyschleifen und die Einleitung der Verschlussmanöver sollen bei ganz normaler Ruheatmung erfolgen. Dabei ist die Standardisierung der Ruheatmung [3] Voraussetzung für eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse der Einzelmessungen, aber auch der Vor-Nach- und Trend-Betrachtungen. Man erreicht sie, indem dem Patienten keine Vorgaben zur Atmung gemacht werden, sondern indem man seine spontane Atmungsaktivität unter den Bedingungen der Untersuchung bestätigt. Damit sorgt die zentrale Steuerung seiner Atmung durch das Atemzentrum dafür, dass die zu leistende Atmungsarbeit (WOB = work of breathing) unter den gegebenen Bedingungen minimiert wird.

Mit Erreichen der minimalen Atmungsarbeit (WOB) ist die Ruheatmung hoch reproduzierbar.

Lediglich bei gesunder Lungenfunktion kann es notwendig sein, die Atmungsfrequenz (BF) des Patienten für die Aufzeichnung der Bodyschleifen geringfügig auf 20 – 25 min⁻¹ anzuheben, um die minimalen, technisch bedingten Kompressions-/ Dekompressionsverluste der Kabine, die die Bodyschleifen sehr steil verlaufen lassen, zu kompensieren. Unrealistische Parameterableitungen werden so vermieden.

Eine optimale Mitarbeit erkennt man an der Regularität des Spirogramms, das dann eine Konstanz von Atemzugvolumen (V_T) und Atmungsfrequenz (BF) sowie von endexpiratorischem Niveau (EEL) zeigt.

Body- bzw. Atmungsschleife

Nachdem die Kabine auf mechanischem oder elektromagnetischem Wege luftdicht verschlossen ist, atmet der Patient über das Mundstück eines Bakterien-/Virenfilters mit aufgesetzter Nasenklammer spontan, ohne Vorgaben zur Atmung. Dabei registriert der Strömungssensor den Atemstrom am Mund und der Kabinensensor das korrespondierende Verschiebevolumen, das die in der Lunge auftretenden Kompressions-/ Dekompressionsvorgänge widerspiegelt. Die instantane Beziehung zwischen Atemströmung (V') und Verschiebevolumen (ΔV_{pleth}) wird schon während der Messung grafisch dargestellt, nachdem eine sogenannte „numerische Schleifenkorrektur“ den Gaswechsel zwischen In- und Expiration auf BTPS-Körperbedingungen (BTPS = Body temperature (37 °C), ambient pressure, gas saturated with water vapour) normiert hat. Es handelt sich um den Verlauf des spezifischen Atemwegswiderstandes, der auch als sR_{aw} -Schleife oder verständlicher als Body- bzw. Atmungsschleife bezeichnet wird. Je flacher die Bodyschleife verläuft, das heißt sich im Uhrzeigersinn dreht, desto größer

ist das Verschiebevolumen relativ zum Atemstrom und desto größer ist der sich daraus ergebene spezifische Atemwegswiderstand. Der Wert des sR_{aw} verhält sich also reziprok zur Steilheit der Bodyschleife.

Bewertung der Qualität der Bodyschleife

Die geforderte Qualität der Messung wird erreicht, wenn das simultan dargestellte Spirogramm gleichförmig ist und mindestens 3 von 5 Bodyschleifen in Form und Lage übereinstimmen. Dabei bieten die durch die Schleifen führenden Approximationsgeraden eine Hilfestellung (Abb. 1, Bodyschleifen). Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Artefakt-Vermeidung sollten nicht mehr als die 5 zuletzt aufgezeichneten Bodyschleifen berücksichtigt werden.

Die Parameterbestimmung erfolgt anhand der medianen Schleife. Siehe Anlage zur Akzeptanz der Bodyschleifen.

Grundlagen zum spezifischen Atemwegswiderstand

Der spezifische Atemwegswiderstand (sR_{aw}) wird sowohl durch das Lungenvolumen als auch durch den Atemwegswiderstand geprägt. Wenn zum Beispiel die Lunge eines Patienten A doppelt so groß ist wie die des Patienten B, so muss Patient A durch seine Thoraxbewegung doppelt so viel Verschiebevolumen komprimieren/dekomprimieren, um den gleichen Alveolardruck zu erzeugen wie Patient B. Der spezifische Atemwegswiderstand vergrößert sich, obwohl der Atemwegswiderstand beider Patienten identisch ist.

Wenn dagegen die Patienten A und B gleich große Lungenvolumina aufweisen und Patient B einen doppelt so hohen Atemwegswiderstand hat, müsste Patient B durch seine Thoraxbewegung doppelt so viel Verschiebevolumen komprimieren/dekomprimieren, um so den erforderlichen, doppelten Alveolardruck zu erzeugen.

Aus dieser Ableitung wird ersichtlich, dass der sR_{aw} den gesamten Respirations-trakt mit seinen zentralen, widerstand-sorientierten und peripheren, Volumen bestimmenden Komponenten erfasst. Da er aus der Ruheatmung abgeleitet wird, sind die Anforderungen an die Mitarbeit gering, sodass selbst Untersuchungen von Kindern unterer Altersgruppen, Schwerkranken, geriatrischen Patienten und neuromuskulär Erkrankten möglich sind. Nicht zuletzt kann der sR_{aw} zur Testung der Bronchodilatator-Response, Bronchoprovokation sowie Therapiekontrolle und Therapiesteuerung herangezogen werden, um mithilfe eines einzigen Parameters den Behandlungserfolg sicher zu dokumentieren.

Die Größe des spezifischen Atemwegswiderstandes (sR_{aw}) wird von seinen Fraktionen, dem Atemwegswiderstand (R_{aw}) und dem thorakalen Gasvolumen (TGV) bestimmt (Abb. 2). Obwohl ihr Verhältnis zueinander nicht bekannt ist, stehen sie in enger Wechselwirkung zueinander. Kleine Atemwegsstrukturen, mit geringen Querschnitten, haben verständlicherweise einen großen Atemwegswiderstand bei kleinem Lungenvolumen und umgekehrt. Durch diese Art von „Normierung“ zeigt der sR_{aw} bei gesunder Lungenfunktion eine bemerkenswerte Unabhängigkeit von alters-, größen- und geschlechtsspezifischen Merkmalen, sodass sein Normwert nahezu eine Konstante ist. Diese Besonderheit des sR_{aw} vereinfacht die Unterscheidung zwischen gesunder und krankhafter Lungenfunktion und erlaubt eine objektive Graduierung des vorhandenen Krankheitsgrades.

Sobald das Lungenvolumen zusätzlich zur Verfügung steht, kann der Atemwegswiderstand als Quotient aus dem spezifischen Atemwegswiderstand und dem Lungenvolumen bestimmt werden. Die Ermittlung des Atemwegswiderstandes setzt demzufolge die Kenntnis des Lungenvolumens voraus.

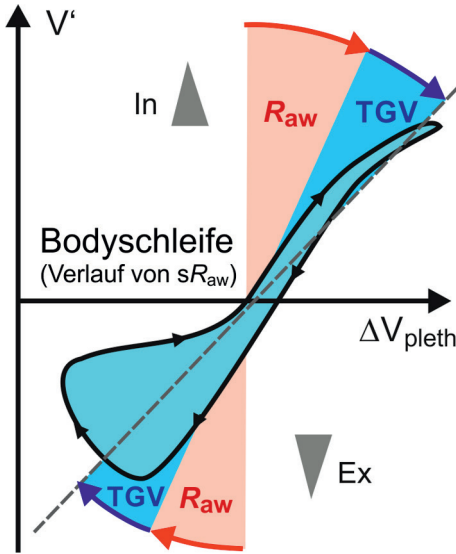


Abb. 2. Zur Drehung der Bodyschleife (sR_{aw} -Schleife) im Uhrzeigersinn tragen sowohl die Größe des Atemwegswiderstandes (R_{aw}) als auch des thorakalen Gasvolumens (TGV) bei. Ihr Verhältnis zueinander kann erst nach Bestimmung des Lungenvolumens ermittelt werden.

Wichtige Schleifenapproximationen und ihre klinische Interpretation

Unter der allgemeinen und zusammenfassenden Bezeichnung für den spezifischen Atemwegswiderstand (sR_{aw}) sind ganz konkrete Schleifenapproximationen zu verstehen, die von verschiedenen Autoren vorgeschlagen wurden. Sie unterscheiden sich in ihrer mathematischen Formulierung sowie ihrer klinischen Interpretation, mit der gemeinsamen Zielstellung, den oft komplexen Verlauf der Bodyschleife zu vereinfachen. Siehe Anlage. Zu den bekanntesten Approximationen zählen der totale spezifische Atemwegswiderstand (sR_{tot}) nach Ulmer [5] und der effektive spezifische Atemwegswiderstand (sR_{eff}) nach Matthys (Abb. 3) [6].

Die Vorzüge des sR_{eff} sind in seiner Ableitung begründet. Als integrales Flächenmaß ist seine Streuung gering. Zudem korreliert der sR_{eff} enger mit der vom Patienten aufzubringenden Atmungsarbeit. Siehe hierzu auch den Beitrag von H. Matthys in diesem Buch.

Der in der Vergangenheit populäre sR_{tot} zeigt nachteilig eine höhere Streuung, da

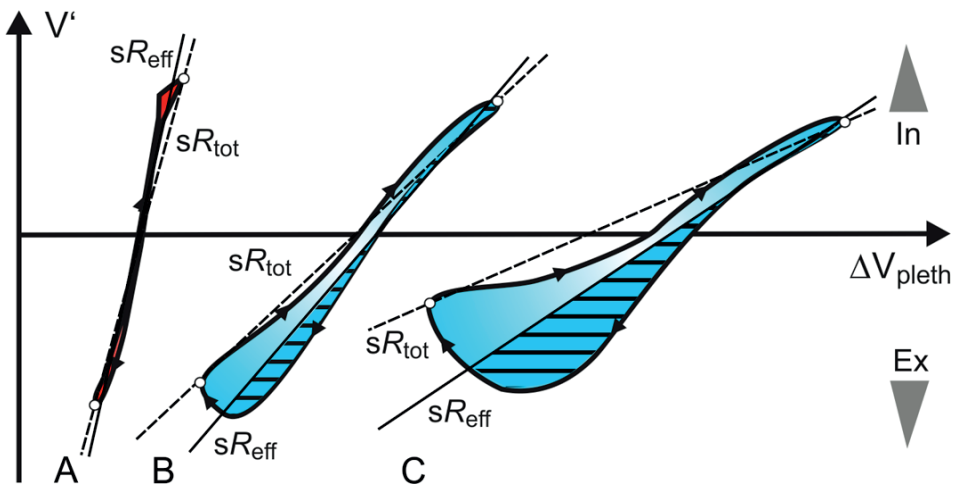


Abb. 3. Bodyschleifen bei normaler Lungenfunktion (A) und ansteigendem Krankheitsgrad (B – C) mit Angabe der sR_{eff} und sR_{tot} -Approximationen. In grober Näherung halbiert der sR_{eff} die Fläche der Bodyschleife (schraffiert), während sR_{tot} die Punkte der maximalen in- und expiratorischen Verschiebevolumina ΔV_{pleth} (Kreise) verbindet. sR_{eff} = effektiver spezifischer Atemwegswiderstand; sR_{tot} = totaler spezifischer Atemwegswiderstand.