

# Spezielle Lungenfunktions- diagnostik

Herausgegeben von  
Karl-Heinz Rühle



Dustri-Verlag Dr. Karl Feistle

# Spezielle Lungenfunktionsdiagnostik

## **Autoren**

---

Frank Artmann

Gunther Becher

Karl-Josef Franke

Wolfgang Galetke

Claus Hader

Gerhard W. Klein

Rolf F. Kroidl

Burghart Lehnigk

Georg Nilius

Christina Priegnitz

Winfried Randerath

Kurt Rasche

Karl-Heinz Rühle

Stefan Schwarz

Hans-Jürgen Smith

Sven Stieglitz

Michael Westhoff

# Spezielle Lungenfunktions- diagnostik

Herausgegeben von

Karl-Heinz Rühle



**Dusteri-Verlag**  
**Dr. Karl Feistle**

Prof. Karl-Heinz Rühle  
Ambrocker Weg 60  
58091 Hagen

Die einzelnen Artikel stellen ausschließlich die Auffassung der Autoren dar, die sich nicht mit den Vorstellungen der Herausgeber und des Verlages decken müssen.

Soweit in diesem Buch eine Dosierung oder eine Applikation angegeben wird, haben Autoren, Herausgeber und Verlag größtmögliche Sorgfalt beachtet. Jeder Leser ist aufgefordert, die Beipackzettel der verwendeten Präparate zu prüfen.

In diesem Buch sind die Stichwörter, die zugleich eingetragene Warenzeichen sind, als solche nicht immer besonders kenntlich gemacht. Es kann aus der Bezeichnung der Ware mit dem dafür eingetragenen Warenzeichen nicht geschlossen werden, dass die Bezeichnung ein freier Warenname ist.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

©2013 by Dustri-Verlag Dr. Karl Feistle,  
München-Deisenhofen  
Dustri-Verlag Dr. Karl Feistle GmbH & Co. KG,  
Postfach 1351, 82034 Deisenhofen bei München  
Druck: CPI buchbücher.de GmbH, Birkach  
Printed in Germany  
gedruckt auf säurefreiem, chlorfrei gebleichtem Papier  
ISBN 978-3-87185-415-6

# Vorwort

## Spezielle Lungenfunktionsdiagnostik

Unter Lungenfunktion versteht der Kliniker die Spirometrie mit Bestimmung von Vital- und Sekundenkapazität. Wenn es hoch kommt, fragt der Kenner nach dem Atemwegswiderstand bzw. Atemwegswiderstand und dem Residualvolumen. Zur Lungenfunktion gehören aber weitere Methoden, die sensitiv bestimmte Eigenschaften des Sauerstofftransport-Systems beschreiben. Pneumologen sollten deshalb auf der breiten Klaviatur der heute zur Verfügung stehenden Messmethoden spielen. Immer mehr kristallisieren sich in vielen Bereichen der inneren Medizin, der Neurologie, aber auch in den operativen Fächern die geeignetsten Methoden heraus, die meistens im Rahmen von Stufenkonzepten der jeweiligen Fragestellung zur Diagnostik und Therapie gerecht werden. Es sollte betont werden, dass die meisten hier vorgestellten Methoden wenig oder nicht invasiv sind und den Patienten damit gering oder überhaupt nicht beeinträchtigen. Sie sind deshalb im hohen Maße für Verlaufsbeobachtungen geeignet.

Die wichtigsten Methoden bzw. Messgrößen oder auch Messkom-

binationen wurden in diesem Band herausgegriffen:

Als Basis jeder atemmechanischen Betrachtung sollte die Ganzkörperplethysmographie dienen. Alle Manöver zusätzlich zur Spirometrie können während der Ruheatmung bestimmt werden und sind nur gering mit arbeitsabhängig. Erst durch die Spirometrie im „verbundenen Manöver“ erschließen sich alle Informationen (siehe Beitrag Smith). Eine Restriktion oder Lungenüberblähung kann nur durch die Bestimmung der totalen Lungenkapazität (TLC) sicher diagnostiziert werden. Die unterschiedliche Auswertung der Fluss-Kabinenverschiebolumen-Relation (sRaw) gestattet eine Beurteilung sowohl der zentralen als auch der peripheren Atemwege.

Da die Totalkapazität (TLC) mit der Compliance gut korreliert, hat die Compliancemesung im Klinikalltag an Bedeutung verloren. Bestimmte Nischen sind aber immer noch von ihr besetzt, so bei der frühzeitigen Erkennung von Funktionseinschränkungen in der Differenzialdiagnostik zwischen Restriktion durch Pleura- oder Parenchyembefall (siehe Beitrag von Galetke et al.). Die Arbeitsmedizin greift gern auf die Methode zurück, da die Ergebnisse von der Mitarbeit des Patienten unabhängig

V

sind. Umso anstrengender kann es sein, die Ösophagussonde zu legen und die Daten zu interpretieren. Hier bedarf es großer Erfahrung des Untersuchers und guter Kenntnisse der Pathophysiologie. Nicht zu vergessen sind verlässliche Referenzwerte, die kürzlich von einer deutschen Arbeitsgruppe publiziert worden sind.

Der Vorteil der Oszillometrie liegt ebenfalls in der Mitarbeitersunabhängigkeit der Messergebnisse (siehe Beitrag von Smith). Vor allem die einfache Bestimmung des Atemwegswiderstandes ( $R_5$ ) hat sich etabliert. Allerdings kann er nicht mit dem bodyplethysmographisch bestimmten Widerstand ( $R_{aw}$ ) gleichgesetzt werden. Hier gelten andere Sollwerte. Mit Hilfe der Informatio- nen aus der Reactance ( $X_5$ ) können zusätzliche Fragestellungen, wie die Differenzierung in zentrale und periphere Komponenten der Obstruktion, beantwortet werden.

Provokationstests: diese Tests sind immer dann sinnvoll, wenn in den Lungenfunktionstests kein Korrelat für die von den Patienten geschilderte episodische Dyspnoe gefunden wird (siehe Beitrag von Klein). Da bei Provokationstests – wenn auch selten – Zwischenfälle auftreten können, ist bei der Wahl der Provokationsdosis besondere Vorsicht geboten. In den letzten Jahren hat sich Methacholin als die am besten geeignete Substanz herausgestellt. Um zu einer richtigen Interpretation zu gelangen, sind viele Kriterien vor und während des Tests einzuhalten. Aber nicht nur die Messgrößen, sondern auch die Beschwerden des Patienten sollten bei der Beurteilung adäquat berücksichtigt werden.

Transferfaktor: Es sollte daran erinnert werden, dass  $O_2$  eine wichtige Hürde, nämlich die Strecke

zwischen Alveole und Kapillare auf seinem Weg in die Peripherie überwinden muss. Mit der Blutgasanalyse wird zwar der Gasaustausch charakterisiert, aber arterielle  $PCO_2$  und  $PO_2$  hängen sowohl von der alveolären Ventilation als auch von Ventilations-Perfusions-Inhomogenitäten ab. Eine heute auch schon in vielen Praxen zur Verfügung stehende Methode ist die Messung der Diffusionskapazität, die besser mit Transferfaktor bezeichnet wird, da nicht nur Diffusionseigenschaften der alveolo-kapillären Membran, sondern auch das pulmonale kapilläre Blutvolumen die genannte Messgröße beeinflussen (siehe Beitrag von Artmann et al.). Hier zeichnet sich eine neue Entwicklung ab, die es eventuell gestattet, mit Hilfe von Stickstoffmonoxid an Stelle von Kohlenmonoxid den Einfluss der Perfusion zu eliminieren. Damit wäre es möglich, allein die Membraneigenschaften der Lunge zu messen. Die TLCO-Methode wird in ihrer Anwendungsmöglichkeit dadurch eingeschränkt, dass Patienten mit schwergradiger Atemnot nicht in der Lage sind, die bei der CO-Single-Breath-Methode erforderliche Atemhaltezeit über 10 Sekunden lang einzuhalten. Da neuerdings auch schnelle Gasanalytoren für den praktischen Einsatz zur Verfügung stehen, kann mit der „Intra-Breath-Methode“ der einzelne Atemzug analysiert werden, ohne dass eine längere Atemhaltezeit erforderlich wäre. Anstelle des Heliums als Tracer wird hier Methan benutzt.

Im klinischen Einsatz ist der CO-Transferfaktor nicht nur bei der Verlaufsbeobachtung und Therapiesteuerung von Patienten mit IPF, sondern auch bei der präoperativen Abklärung von Patienten, bei denen ein

thoraxchirurgischer Eingriff geplant ist, im Rahmen eines Stufenkonzepts hilfreich.

Zur Beurteilung des Gasaustausches haben sich neben der klassischen Blutgas-Analyse als nicht invasive Methoden die Pulsoximetrie und die transcutane Messung des  $\text{PCO}_2$  bewährt. Technische Verbesserungen haben gegenüber früher zu einer höheren Zuverlässigkeit der transcutan ermittelten  $\text{PCO}_2$  Werte geführt. Die klinische Bedeutung der transcutanen Messung beruht auf dem Einsatz insbesondere während Verlaufsbeobachtungen z.B. während des Schlafes (siehe Beitrag von Stieglitz et al.). Die Registrierungen des  $\text{PtCO}_2$  unter der Einstellung auf eine nicht invasive Beatmung gestattet eine Abschätzung der alveolären Ventilation und damit der Qualität der Therapieeinstellung.

Zur Lungenfunktionsdiagnostik im weiteren Sinne gehört auch die Analyse der Ausatemluft. Dabei wird die Atemluft abgekühlt, das Kondensat (EBC) aufgefangen und analysiert. Des weiteren kann der interessierende volatile Marker sofort während der Ausatmung gemessen werden (siehe Beitrag von Becher). Am bekanntesten ist die Messung von NO zur Charakterisierung der eosinophilen Entzündung bei Asthma bronchiale, wobei das Verfahren zur Steuerung der Therapie mit inhalativen Steroiden dienen kann. pH,  $\text{H}_2\text{O}_2$  und Laktat, Leukotriene und Proteinmarker im EBC sind weitere vielversprechende Kandidaten für das Monitoring von Lungenkrankheiten.

Ein ganz neues Feld wurde durch endoskopische Funktionsmessungen, die regionale Ventilationsverhältnisse erfasst, erschlossen. Durch die Erzeugung einer Atelektase mit implantierbaren Ventilen in dem

Bronchus, der zu stark destruierten Emphysembezirken führt, kann die Sekundenkapazität und das Ventilations-Perfusions-Verhältnis der restlichen Lunge verbessert werden. Der Erfolg dieser endoskopischen Volumenreduktion hängt aber in hohem Maße von der kollateralen Ventilation der auszuschaltenden Lungensubstanz ab (siehe Beitrag von Franke et al.). Wenn das durch ein Ventil verschlossene Lungenvolumen durch sogenannte kollaterale Verbindungen an das Bronchialsystem angeschlossen ist, wird eine in diesem Fall gewünschte Atelektasenbildung verhindert. Mit einer Messkonsole und einem Ballonkatheter kann der kollaterale Widerstand bestimmt werden. Damit ist es möglich, diejenigen Patienten herauszufiltern, die von einer solchen Therapie mit Ventilen am ehesten profitieren werden.

Die Spiroergometrie (CPET) als die Königin der Lungenfunktionsdiagnostik zu bezeichnen wäre allzu vermessen. Aber in ihr werden viele Funktionen der Zusammenarbeit der verschiedenen Ebenen wie Motivation, Atemmechanik, Atempumpe, Gasaustausch, Ventilation, Kardiozirkulation, Metabolismus, vereint (siehe Artikel von Kroidl). Wenn die in Ruhe bestimmten Messgrößen nicht ausreichen, das Symptom Dyspnoe beziehungsweise mangelnde Leistungsfähigkeit hinreichend zu erklären, kann durch die Spiroergometrie Licht ins Dunkel gebracht werden. Wie bei vielen in diesem Band erwähnten Tests stellt die Mitarbeit des Patienten eine kritische Größe dar. Der Nachteil der Mitarbeitersabhängigkeit zum Beispiel für die höchste Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_{2,\text{peak}}$ ) kann durch Daten an der anaeroben Schwelle (aerob-anaerober Übergang) häufig minimiert

werden. Die Spiroergometrie ist damit ein wichtiges Werkzeug auch in der Begutachtungsmedizin. Wer allerdings meint, durch alleinige Betrachtung der Belastungsdaten z.B. die Minderung der Erwerbsfähigkeit (MdE) ermitteln zu können, wird enttäuscht werden.

Ein schönes Beispiel für eine integrale Beurteilung mittels eines diagnostischen Repertoires stellt die präoperative Abklärung bei lungenresezierenden Eingriffen dar (siehe Artikel von Westhoff). Das von der Deutschen Gesellschaft für Pneumologie (DGP) empfohlene Stufenkonzept räumt der Spirometrie, der TLCO und der Spiroergometrie einen hohen diagnostischen Stellenwert ein. Die FEV<sub>1</sub> und TLCO erlauben zunächst eine orientierende Abschätzung der postoperativ verbliebenen Funktionalität und damit auch des operativen Risikos aus pulmonaler Ursache. Bei einer FEV<sub>1</sub> und/oder DLCO < 80%-Soll sollte als zweiter diagnostischer Schritt direkt eine Spiroergometrie angeschlossen werden. Dieses Vorgehen wird durch gute klinische Daten zum jeweiligen Risiko unterfüttert.

Werden hier kritische Grenzwerte erreicht, kommt die Perfusionszintigraphie in diesem Fall nicht als morphologischer, sondern als weiterer Funktionstest ins Spiel. Mit ihr kann man die durch den thoraxchirurgischen Eingriff bedingte postoperativ zu erwartenden Funktionseinschränkungen z.B. für die Sekundenkapazität, TLCO und VO<sub>2</sub>-peak berechnen. Es handelt sich jeweils um den postoperativen Erwartungswert (prädiktiver postoperativer (ppo-)-Wert), also des Wertes, der postoperativ nach Resektion von Lungengewebe verbleibt. Zusammenfassend bietet dieses Vorgehen eine rationale Grund-

lage für die Entscheidung über die einzuschlagende Therapie.

Neuromuskuläre Funktion: Neben technisch immer aufwendigeren Methoden benötigen wir für die Patientengruppe mit neuromuskulären Erkrankungen auch vereinfachte, möglichst mit den klassischen Methoden der Atemmuskulaturmessung validierte Methoden (siehe Artikel von Rühle et al.). Patienten mit neuromuskulären Erkrankungen entwickeln im Rahmen der Verschlechterung des Leidens eine zunehmende Verringerung der Muskelkraft, nicht selten auch der Atemmuskulatur. Wird diese Störung erkannt, kann dem Patienten eine nächtliche nicht invasive Beatmung angeboten werden. Bei diesen wenig mobilen, schwerkranken Patienten mit neuromuskulären Erkrankungen sollte die Diagnostik mit tragbaren oder leicht transportablen Lungenfunktionsgeräten möglich sein. Serielle Messungen der Lungenvolumina zeigen zwar die Verschlechterung an, aber nicht alle Patienten sind in der Lage, ein optimales Vitalkapazitätsmanöver durchzuführen. Mit einem Manöver, das dem „Schnüffeln“ nachempfunden ist (Psniff) liegt ein neues, sehr simples Verfahren zur Abschätzung der maximalen inspiratorischen Muskelkraft vor. Der maximale expiratorische Druck kann ebenfalls einfach abgeschätzt werden, indem der Patient gegen einen Widerstand (ähnlich einer Pfeife, whistle) maximal und schnell ausatmet und der Druck am Mund P<sub>whistle</sub> gemessen wird. Schließlich besteht die Möglichkeit, mit dem kleinsten aller Lungenfunktionsmessgeräte, dem Peakflow-Meter, das wichtigste Manöver zur Sekretentfernung, aus den zentralen Atemwegen, den cough peak flow,

zu überprüfen. Mit den ermittelten Werten können wichtige Rückschlüsse für die physiotherapeutische Betreuung gezogen werden.

Auch auf Intensivstation spielen lungenfunktionelle Überlegungen eine relevante Rolle. Der erfahrene Intensivmediziner gewinnt aus den vom Respirator simultan dargestellten Zeitreihen für Druck, Fluss und Volumen wichtige Informationen zur Atemmechanik. Kehrt zum Beispiel am Ende einer (passiven) Expiration und vor Beginn der Inspiration die Flussrate nicht auf Null zurück, kann auf einen intrinsischen positiven expiratorischen Druck geschlossen werden. Starke sägezahnförmige Schwankungen der expiratorischen Flusskurve weisen auf erhebliches Sekret in den Atemwegen und dem Tubus hin. Durch Beobachtung der Druckkurve kann die Triggereinstellung beurteilt werden (siehe Beitrag Nilius et al.).

Eine der Aufgaben der Funktionsanalytik auf Intensiv-Station besteht in der Klärung der Frage, ob bei einem beatmeten Patienten eine

Spontanatmung ohne Respiratorunterstützung möglich sein wird. Eine Entscheidungshilfe bietet der Rapid Shallow-Breathing Index, d.h. der Quotient von Atemfrequenz und Tidalvolumen, der die Erschöpfbarkeit der Atmungsmuskulatur anzeigt. Beide Messgrößen sind relativ einfach zu berechnen oder der Index wird direkt vom Beatmungsgerät berechnet.

Aus all diesen Funktionsdaten können wichtige Therapieentscheidungen wie z. B. Änderung der Beatmungsparameter oder Fortsetzung der apparativen Beatmung abgeleitet werden

Zusammenfassend ermöglicht das in diesem Band vorgestellte Armentarium, dessen Einsatzmöglichkeiten ein engagierter Pneumologe beherrschen sollte, die an ihn gestellten Fragen aus dem Klinikalltag kompetent beantworten zu können.

Der Dank gilt allen Autoren, die an diesem Band mitgewirkt haben.

*K.H. Rühle, Hagen*



# Inhalt

Vorwort . . . . .	<u>V</u>	Kapnometrie und transkutane PO <sub>2</sub> , PCO <sub>2</sub> -Messungen . . . . .	<u>89</u>
Autoren . . . . .	<u>XIII</u>	<i>Sven Stieglitz, Christina Prieg- nitz und Winfried Randerath</i>	
Lungenfunktionsprüfung mittels Ganzkörperplethys- mographie. . . . .	<u>1</u>	Atemkondensat-Diagnostik (Exhalat-Diagnostik) . . . . .	<u>105</u>
<i>Hans-Jürgen Smith</i>		<i>Gunther Becher</i>	
Aussagekraft der Compliance-Messung in der Lungenfunktionsdiagnostik . . .	<u>19</u>	Messung der kollateralen Ventilation via Bronchoskopie. . .	<u>125</u>
<i>Wolfgang Galetke</i>		<i>Karl-Josef Franke</i>	
Durchführung und klinische Interpretation der Oszillometrie .	<u>27</u>	Spiroergometrie und Begutachtung . . . . .	<u>139</u>
<i>Hans-Jürgen Smith</i>		<i>Rolf F. Kroidl, Stefan Schwarz und Burghart Lehnigk</i>	
Bronchiale Provokationstests mit pharmakologischen Substanzen .	<u>51</u>	Präoperative Funktions- diagnostik vor lungen- resezierenden Eingriffen . . . .	<u>161</u>
<i>Gerhard W. Klein</i>		<i>Michael Westhoff</i>	
Die Diffusionskapazität in der täglichen Praxis . . . . .	<u>79</u>	Lungenfunktionsdiagnostik bei neuromuskulären Erkrankungen	<u>187</u>
<i>Frank Artmann, Claus Hader, Karl-Heinz Rühle und Kurt Rasche</i>		<i>Karl-Heinz Rühle, Karl-Josef Franke und Georg Nilius</i>	
		Lungenfunktionmessungen auf der Intensivstation . . . . .	<u>197</u>
		<i>Georg Nilius und Karl-Heinz Rühle</i>	



# Autoren

Artmann, Dr. Frank  
Berliner Straße 43  
42275 Wuppertal  
artmann@aeroprax.de

Becher, Dr. med. Gunther  
BecherConsult GmbH  
Fröbelweg 33  
16321 Bernau bei Berlin  
Email: info@becherconsult.de

Franke, Dr. Karl-Josef  
Klinik für Pneumologie und  
Beatmungsmedizin  
Helios-Klinik Ambrock  
Ambrocker Weg 60  
58091 Hagen  
karl-josef.franke@helios-kliniken.de.

Galetke, Priv.-Doz. Dr. Wolfgang  
Krankenhaus der Augustinerinnen  
Köln  
Klinik für Pneumologie,  
Kardiologie, Allergologie,  
Schlaf- und Beatmungsmedizin  
Jakobstraße 27-31  
50678 Köln  
wgaletke@koeln-kh-  
augustinerinnen.de

Hader, Dr. Claus  
Berliner Straße 43  
42275 Wuppertal  
hader@aeroprax.de

Klein, Prof. Dr. Gerhard  
Brandensteinstraße 1  
79110 Freiburg  
Klein-Freiburg@t-online.de

Kroidl, Dr. Rolf F.  
Frommholdstraße 71  
21680 Stade  
rolf.kroidl@t-online.de

Lehnigk, Dr. Burghart  
Facharzt Pneumologie/  
Pathophysiologie  
Krankenhaus Großhansdorf  
Wöhrendamm 80, 22927 Hamburg  
b.lehnigk@kh-grosshansdorf.de

Nilius, Dr. Georg  
Klinik für Pneumologie und  
Beatmungsmedizin  
Helios-Klinik Ambrock  
Ambrocker Weg 60  
58091 Hagen  
georg.nilius@helios-kliniken.de

Priegnitz, Dr. Christina  
Krankenhaus Bethanien gGmbH  
Klinik für Pneumolo-  
gie und Allergologie  
Zentrum für Schlaf- und  
Beatmungsmedizin  
Aufderhöher Straße 169-175  
42699 Solingen  
christina.priegnitz  
@klinik-bethanien.de

## Autoren

---

Randerath, Prof. Dr. Winfried J.  
Randerath  
Krankenhaus Bethanien gGmbH  
Klinik für Pneumologie und  
Allergologie  
Zentrum für Schlaf- und  
Beatmungsmedizin  
Aufderhöher Straße 169-175  
42699 Solingen  
winfried.randerath  
@klinik-bethanien.de

Rasche, Prof. Dr. Kurt  
Lungenzentrum,  
Kliniken St. Antonius  
Akademisches Lehrkrankenhaus  
der Heinrich-Heine-  
Universität Düsseldorf  
Vogelsangstraße 106  
42109 Wuppertal  
rasche@antonius.de

Rühle, Prof. Dr. Karl-Heinz  
Ambrocker Weg 60  
58091 Hagen  
Klinik-Ambrock.Pneumo  
@t-online.de

Smith, Hans-Jürgen  
Graduate Engineer  
CareFusion Germany 234 GmbH  
Leibnizstrasse 7  
97204 Hoechberg  
Hans-Juergen.Smith  
@CareFusion.com

Schwarz, Dr. Stefan  
Asklepios Klinik Harburg  
Abteilung Pneumologie  
Eißendorfer Pferdeweg 52  
21075 Hamburg  
st.schwarz@asklepios.com

Stieglitz, Dr. Sven  
Krankenhaus Bethanien gGmbH  
Klinik für Pneumologie und  
Allergologie  
Aufderhöher Straße 169-175  
42699 Solingen  
sven.stieglitz@klinik-bethanien.de

Westhoff, Dr. Michael  
Klinik für Pneumologie I  
Lungenklinik Hemer  
Theo-Funccius-Straße 1  
58675 Hemer  
michael.westhoff@lkhemer.de

# Lungenfunktionsprüfung mittels Ganzkörperplethysmographie

Hans-Jürgen Smith

## Einleitung

Die Bestimmung der Lungenfunktion im Ganzkörperplethysmographen gilt als eine der exaktesten und umfassendsten Methoden zur differenzierten Diagnostik von Patienten mit Lungen- und Atemwegserkrankungen. Die Ganzkörperplethysmographie wird deshalb als „Goldstandard“ der Atemwegswiderstands- und Lungenvolumenmessung angesehen.

Die Vorteile dieser Methodik, im Vergleich zu den technisch weniger aufwendigen, spirometrischen Untersuchungen, liegen in den geringen Anforderungen an die Mitarbeit der Patienten. Lediglich die Registrierung einer normalen Ruheatmung ist notwendig, um klinisch informative Kenngrößen des Atmungstraktes zu bestimmen. So können Patienten nahezu aller Altersgruppen, unabhängig von Art und Schwere der Erkrankung, untersucht werden.

Die Ganzkörperplethysmographie erfordert eine Kabine, in die sich der Patient setzt. Die Form der Kabine ähnelt einer Telefonzelle. Da in der Regel sämtliche Seitenwände aus Glas bestehen, vermittelt sie einen hellen und freundlichen Eindruck und erlaubt auf diese Art und Weise den uneingeschränkten Kon-

takt zwischen Patient und Untersuchungspersonal. Die Kabine ist das Kernstück der Ganzkörperplethysmographie.

Eine vollständige ganzkörperplethysmographische Untersuchung gliedert sich in 3 Messzyklen. Nacheinander erfolgen die Bestimmung des spezifischen Atemwegswiderstandes, die Erfassung wichtiger Lungenvolumina und die Aufzeichnung der langsamen bzw. forcierten Spirometrie. Jeder einzelne Untersuchungsschritt kann beliebig oft wiederholt oder auch übersprungen werden. Die Lungenphysiologie verbietet es jedoch, die Reihenfolge der Messzyklen zu ändern

## Der spezifische Atemwegswiderstand (1. Messzyklus)

Die Kabine wird für kurze Zeit durch das Schließen ihrer Tür luftdicht verriegelt. Der Patient atmet durch ein Mundstück bzw. ein Bakterien/Viren-Filter, das mit einem Strömungssensor verbunden ist. Um die Mundatmung zu garantieren, trägt der Patient während der gesamten Untersuchung einen Nasenklipp.

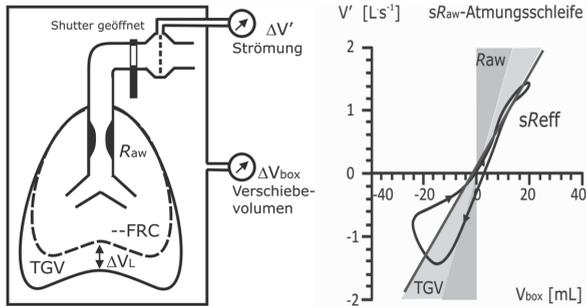


Abb. 1. Bestimmung des spezifischen Atemwiderstandes  $sRaw$  durch Aufzeichnung der Normalatmung bei geschlossener Kabinentür. Die Rechtsdrehung der  $sReff$ -Approximationsgeraden innerhalb der  $sRaw$ -Atmungsschleife ist anteilig durch den Atemwegswiderstand  $Raw$  und das Lungenvolumen  $TGV$  bestimmt.

## 2

Zum Zeitpunkt dieses Messvorganges ist der eigentlich interessierende Alveolardruck unbekannt, da seine Ableitung nur über die Kenntnis des Lungenvolumens möglich ist. Die Sensorik der Kabine registriert jedoch simultan zur Mundströmung  $\Delta V'$  das sogenannte Kabinen-Verschiebevolumen  $\Delta V_{box}$ , welches als „Spiegelung“ der Kompressions- und Dekompressionsvorgänge im Alveolarbereich der Lunge aufgefasst werden kann. Bei der Ausatmung verringert sich die durch die Thoraxbewegung erzeugte Mundströmung durch alveoläre Kompression, während sie bei der Einatmung durch Dekompression vermindert wird.

Die Intensität der alveolären Kompression bzw. Dekompression und damit die Größe des resultierenden Verschiebevolumens ist nicht nur vom Atemwegswiderstand, sondern auch vom Lungenvolumen abhängig und damit ein Maß für die aufzuwendende Atemarbeit. Einen Eindruck von den Größenverhältnissen der Volumina erhält man, wenn man das Atemzugvolumen  $V_T$  eines Lungengesunden von ungefähr 500 mL mit dem resultierenden Verschiebevolumen  $\Delta V_{box}$  von nur 10 mL ver-

gleicht. In Abhängigkeit vom Krankheitsgrad vergrößert sich  $\Delta V_{box}$  proportional zum Anstieg der Atemwegswiderstände bzw. zum Umfang einer (dynamischen) Lungenüberblähung auf Werte bis um 100 mL.

Die aus dem Atemstrom  $V'$  am Mund des Patienten und dem simultan dazu aufgezeichneten Kabinensignal  $\Delta V_{box}$  gebildeten Atmungsschleifen (Abb. 1) erlauben es, einen der wichtigsten Kennwerte der Ganzkörperplethysmographie zu bestimmen. Man nennt ihn spezifischen Atemwiderstand  $sRaw$ . Seine Attraktivität ist darin begründet, dass der Patient bei geschlossener Kabinentür und geöffnetem Shutter ganz normal durch den Strömungssensor atmen kann. Es werden keine besonderen Atemmanöver verlangt. Unter Normalatmung versteht man das Erreichen und die Aufzeichnung einer gleichmäßigen Atmung, ohne Vorgaben hinsichtlich Atemfrequenz  $BF$  und Atemzugtiefe  $V_T$ . Die Atmungsschleifen liefern bereits ein breites Spektrum von Informationen, die sich für die Beantwortung der verschiedensten klinischen Fragestellungen eignen. Die wichtigsten Interpre-

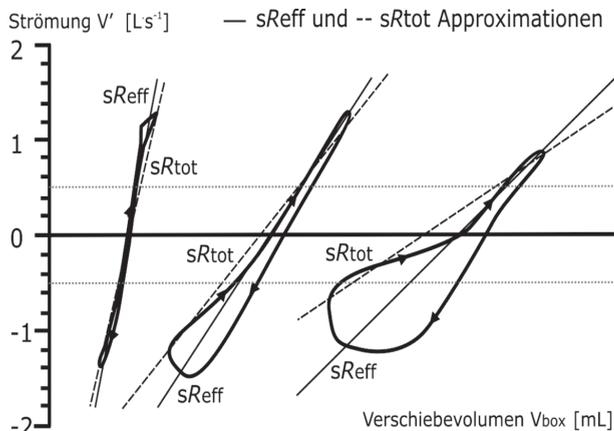


Abb. 2. Approximationsgeraden für  $s_{\text{Reff}}$  und  $s_{\text{Rtot}}$  bei normaler Lungenfunktion und zwei verschiedenen Obstruktionsgraden. Während sich die  $s_{\text{Reff}}$ -Approximation auf die gesamte Fläche der Atmungsschleife bezieht, verbindet die  $s_{\text{Rtot}}$ -Gerade die Punkte der maximalen in- und expiratorischen Verschiebevolumina. Es ist ersichtlich, dass die  $s_{\text{Reff}}$ - und  $s_{\text{Rtot}}$ -Approximationen im Normalfall weitgehend übereinstimmen. In Abhängigkeit vom Grad der Verteilungsstörung weichen sie jedoch voneinander ab.

3

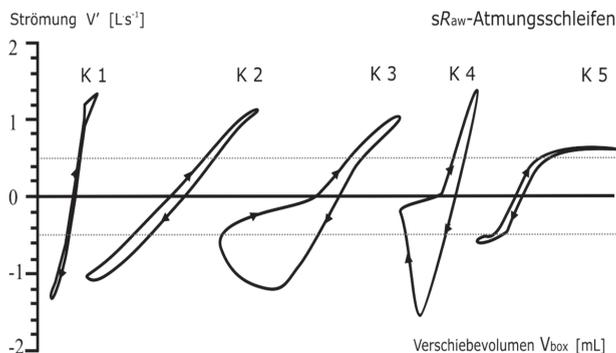


Abb. 3. Typische Verläufe der  $s_{\text{Raw}}$ -Atmungsschleifen. K1 = Normale Lungenfunktion; K2 = Obstruktion der großen, zentralen Atemwege; K3 = Erkrankung der kleinen, peripheren Atemwege, Verteilungsstörung; K4 = Zwerchfellhochstand bzw. endexpiratorisches „Closing“; K5 = extrathorakale Einengung.

tationsstrategien werden nachfolgend zusammengefasst.

Zur Vereinfachung des oft sehr komplexen Verlaufes der Atmungsschleifen (Abb. 2) hat Matthys [4] eine Approximationsgerade definiert, deren Anstieg er aus dem effektiven, spezifischen Atemwiderstand  $s_{\text{Reff}}$  ableitet. Grund-

sätzlich gilt, je flacher die Approximationsgerade verläuft, desto größer ist der spezifische Atemwiderstand. Die Besonderheit der  $s_{\text{Reff}}$ -Approximation besteht darin, dass sie sich auf die gesamte Fläche der Atmungsschleife bezieht und deshalb von Unregelmäßigkeiten in ihrem Verlauf wenig beeinflusst wird.

Tab. 1.

<b>s<sub>Reff</sub>, s<sub>Rtot</sub></b>	Grenzwerte
Erwachsene	1,2 kPa·s
Kinder	1 kPa·s

<b>s<sub>Reff</sub>, s<sub>Rtot</sub></b>	Schweregrade
Leichtgradig erhöht	1,2 – 2 kPa·s
Mittelgradig erhöht	2 – 4 kPa·s
Schwergradig erhöht	> 4 kPa·s

Wegen ihrer hohen Sensitivität, insbesondere bei Obstruktionen der großen, zentralen Atemwege und ihrer geringen Streuung, wird  $s_{\text{Reff}}$  von der Deutschen Atemwegliga [1, 2] als Zielparame-ter empfohlen. Im Sinne der Berücksichtigung der Lungenperipherie ist zusätzlich stets auf die Form der Atmungsschleife (Abb. 3) zu achten.

Die zweite, ebenfalls informative Approximationsgerade zur Bewertung der Atmungsschleife wurde von Ulmer [5] definiert. Nach Ulmer erstreckt sich diese Approximationsgerade vom Punkt des maximalen, inspiratorisch auftretenden Verschiebevolumens bis zum expiratorischen Maximalwert. Aus ihrem Anstieg ermittelt er den totalen, spezifischen Atemwiderstand  $s_{\text{Rtot}}$  (Abb. 2). Charakteristisches Merkmal des  $s_{\text{Rtot}}$  ist, dass er mögliche periphere Veränderungen sehr sensitiv erfasst. Die durch die Zweipunktapproximation im Vergleich zu  $s_{\text{Reff}}$  etwas höhere Streuung des Parameters und die Überbewertung der peripheren Inhomogenität, die zu sehr hohen  $s_{\text{Rtot}}$ -Werten führen kann, stellen in der Praxis kein großes Problem dar.

Im spezifischen Atemwiderstand  $s_{\text{Raw}}$  ( $s_{\text{Reff}}$  bzw.  $s_{\text{Rtot}}$ ) kommt die Wechselwirkung von Atemwegwiderstand ( $R_{\text{aw}}$ ) und dem der Lungengröße entsprechenden thorakalen Gasvolumen (TGV) zum

Ausdruck, wobei sich diese beiden wichtigen Merkmale der Lunge praktisch kompensieren bzw. normieren. Kleine Atemwegsstrukturen mit geringen Querschnitten haben verständlicherweise einen größeren Atemwegswiderstand bei kleinerem Lungenvolumen, während sich große Atemwegsstrukturen durch einen kleineren Widerstand bei größerem Lungenvolumen auszeichnen. In der Konsequenz entsteht dadurch eine bemerkenswerte Unabhängigkeit des  $s_{\text{Raw}}$  von alters-, größen- und geschlechtsspezifischen Merkmalen des Patienten. Diese Besonderheit des spezifischen Atemwiderstandes erlaubt eine sehr sichere Differenzierung zwischen gesunder und krankhafter Lungenfunktion anhand von festen Grenzwerten sowie eine objektive Graduierung der vorhandenen Einschränkung.

Die Tabellen zu den Grenzwerten der spezifischen Atemwiderstände und deren Schweregradeinteilung wurden dem Empfehlungspapier der Atemwegliga [1] entnommen. Die Angaben gelten für  $s_{\text{Reff}}$  und  $s_{\text{Rtot}}$  gleichermaßen (Tab. 1).

Die Kenntnis von typischen und markanten Verläufen der Atmungsschleifen (Abb. 3) lässt erste Einschätzungen der vorliegenden Grunderkrankung zu. Eine normale ganzkörperplethysmographische Untersuchung zeigt steil stehende und in sich geschlossene  $s_{\text{Raw}}$ -Atmungsschleifen (K1).

Schmale, wenig geöffnete Schleifen, die sich im Uhrzeigersinn neigen (K2), weisen auf eine Verengung der Bronchien schon unter Ruhebedingungen hin. Dies ist in der Regel bei Erkrankungen der zentralen oder großen Atemwege der Fall.

Nimmt die Schleife dagegen die Form eines Golschlägers (K3) an,

muss primär von einer Erkrankung der peripheren, kleinen Atemwege ausgegangen werden. Im Sinne der Frühdiagnostik von Atemwegserkrankungen weist diese Schleifenform zugleich auf eine ungleich verteilte Belüftung von Arealen innerhalb der Lunge hin, die typisch für den Beginn einer Lungenerkrankung ist.

Übergewicht führt dann zur Luftnot, wenn der wichtigste Muskel unserer Atemmuskulatur, das Zwerchfell, in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt wird. Die Einengung, insbesondere der terminalen Atemwege durch Zwerchfellhochstand bildet sich in einer spezifischen, spitzwinkligen V-Form der Atmungsschleifen (K4) ab. Ähnliche Schleifen entstehen jedoch auch, wenn ein end-expiratorisches „Closing“ der Lungenperipherie vorliegt.

Schließlich deutet ein ausgeprägter S-förmiger Verlauf der Atmungsschleife (K5) darauf hin, dass nicht die Lunge in erster Linie den Verlauf der Atmungsschleife bestimmt, sondern wahrscheinlich der Kehlkopfbereich bzw. die extrathorakalen Atemwege eine Verengung aufweisen.

Im Zusammenhang mit der Registrierung der  $s_{Raw}$ -Atmungsschleifen soll an dieser Stelle noch einmal explizit darauf hingewiesen werden, dass die abgeleiteten spezifischen Atemwegwiderstände – und dies gilt insbesondere für  $s_{Reff}$  – als primäre Messgrößen eine äußerst geringe Streuung aufweisen. Damit lassen sich klinische Entscheidungen sicher ableiten und Trendinformationen frühzeitig belegen. Obwohl eine Differenzierung zwischen dem Anteil des Atemwegwiderstandes  $R_{aw}$  und des thorakalen Lungenvolumens TGV nicht möglich ist, profitiert man von einer Gesamtbewertung des

Respirationstraktes, die seine zentralen ( $R_{aw}$ ) und peripheren (TGV) Komponenten einschließt. Jegliche krankhafte Veränderung widerspiegelt sich demzufolge in einem einzigen Parameterwert.

Wenn es vorrangig um Vor- und Nach-Betrachtungen im Zusammenhang mit der Applikation eines Broncholytikums geht oder mittels Provokationstestung der Grad einer Hyperreagibilität bestimmt werden soll, sind der  $s_{Reff}$  bzw. sein Kehrwert der  $s_{Ceff}$  die Parameter der ersten Wahl.

Zu beachten ist, dass bei Krankheitsbildern, in denen sowohl obstruktive (Widerstandserhöhung) als auch restriktive (Volumenverkleinerung) Einschränkungen kombiniert sind, der spezifische Atemwegwiderstand im Normbereich liegen kann. In diesem Falle ist eine differenzierte Interpretation von Atemwegwiderstand  $R_{aw}$  und totaler Lungenkapazität TLC notwendig, wie sie nachfolgend beschrieben wird.

## Das Lungenvolumen (2. Messzyklus)

Die Bestimmung des Lungenvolumens gehört zu der zweiten Hauptfunktion der Ganzkörperplethysmographie, ebenfalls bei luftdicht verriegelter Kabine. Für diesen Untersuchungsschritt wird etwas mehr Anstrengung vom Patienten verlangt. Der Patient atmet zwar weiterhin normal, jetzt jedoch gegen einen den Atemweg kurzzeitig verschließenden Shutter (Klappenventil). In der Zeit des Shutterverschlusses sollte sich der Patient so verhalten, als gäbe es diese Sperre überhaupt nicht und mit der gleichen Kraftanstrengung, wie

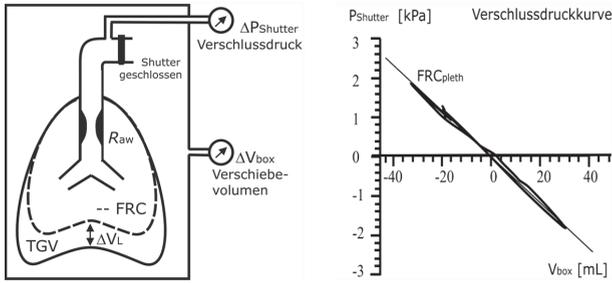


Abb. 4. Bestimmung des FRCpleth (ITGV) Lungenvolumens bei geschlossener Kabinentür und einem am Ende der normalen Ausatmung aktivierten Shutter. Während des kurzzeitigen Shutterverschlusses wird die Verschlussdruckkurve registriert.

## 6

bei der freien Atmung, gegen den Verschluss atmen. Ein Manöver, das eine gewisse Kooperation und Koordination vom Patienten verlangt und deshalb in seiner Durchführung und der erreichten Qualität aufmerksam kontrolliert werden muss.

Es ist üblich, den Shutter am Ende der normalen Ausatmung automatisch vom Messsystem schließen zu lassen. Die Atmungsexkursionen während des Verschlusses werden daraufhin als Verschlussdruckkurve dargestellt. Sie entstehen aus der simultanen Aufzeichnung des Munddrucks  $\Delta P_{\text{Shutter}}$  direkt am Shutter und des Kabinen-Verschiebevolumens  $\Delta V_{\text{box}}$  (Abb. 4). Die Öffnung des Verschlusses erfolgt in der Regel ebenfalls automatisch, nach etwa 3 bis 4 s beim Kind und maximal 5 s beim Erwachsenen. Das aus dem Anstieg der Verschlussdruckkurve abgeleitete Lungenvolumen wird funktionelle Residualkapazität FRCpleth genannt und entspricht der Luftmenge, die nach einer normalen Ausatmung in der Lunge verbleibt. Als Synonym für FRCpleth wurde in der Vergangenheit der Begriff intrathorakales Gasvolumen ITGV verwendet.

Um einen optimalen Qualitätsnachweis der FRCpleth-Bestimmung

führen zu können, wird empfohlen, mehrere Verschlüsse hintereinander aufzuzeichnen (Abb. 5) und lediglich Normalatmung zwischen den Verschlüssen anzuweisen. Nur so kann eine mögliche Beeinflussung der FRC des Patienten durch Maximalmanöver ausgeschlossen werden. Die Streuung der ermittelten FRCpleth-Werte ist dann das Maß für die Güte der Untersuchung. Sie sollte deutlich unter 10% liegen.

Die FRCpleth hat in ihrer Größe eine zentrale klinische Aussagekraft, da sie zumindest bei Gesunden die mechanisch neutrale Position des respiratorischen Systems repräsentiert.

Eine Vergrößerung des ermittelten Lungenvolumens gegenüber dem Normvolumen weist auf eine Überblähung hin, wie sie infolge einer Verteilungsstörung, einer chronischen Atemwegsverengung (COPD) oder einer emphysematischen, irreversiblen Schädigung bzw. Zerstörung der feingliedrigen Alveolarstrukturen entsteht.

Ein verkleinertes Volumen lässt dagegen auf eine Verminderung der Lungendehnbarkeit schließen, die typisch für krankhafte Veränderungen des Lungengewebes ist, bei-

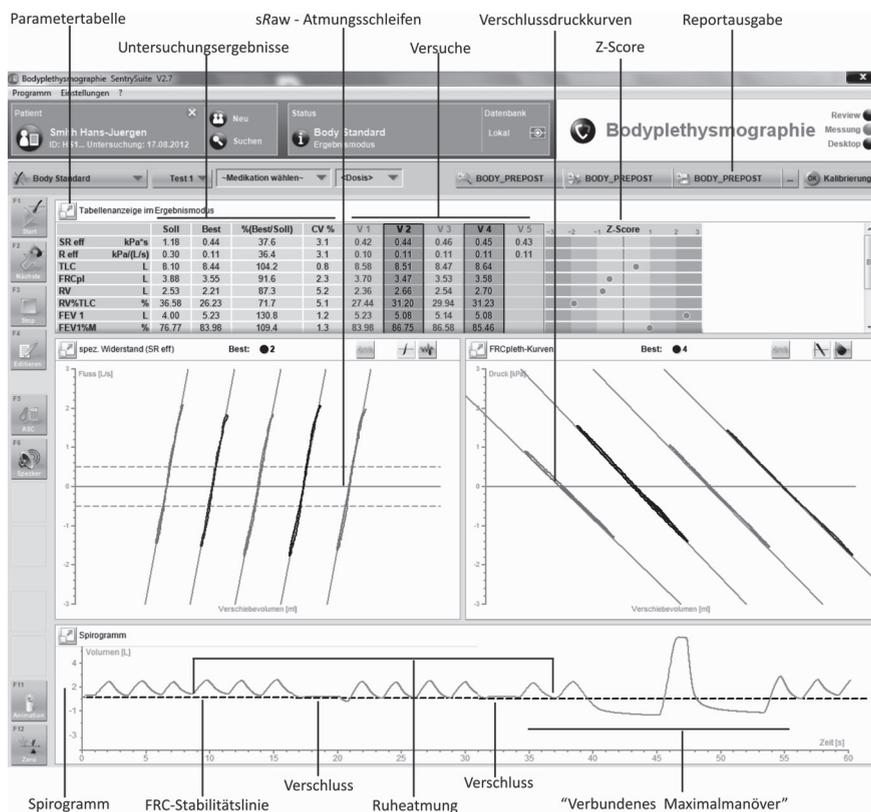


Abb. 5. Bildschirmmenü nach Aufzeichnung von 5 sRaw-Atmungsschleifen und 4 Verschlussdruckkurven. Im unteren Bereich ist das Spirogramm, also der zeitliche Verlauf der Volumenaufzeichnung, sichtbar. Die Stabilität des end-expiratorischen Niveaus kann anhand einer FRC-Stabilitätslinie leicht geprüft werden. Der letzte Verschluss ist in einem „verbundenen Manöver“ mit einer Maximalatmung kombiniert.

spielsweise bei Lungenfibrose oder Sarkoidose.

Weitere, klinisch informative, absolute Volumina werden abschließend in einem sogenannten „verbundenen Manöver“ registriert. Dazu gehören die totale Lungenkapazität TLC und das Residualvolumen RV.

## Lungenvolumina aus „verbundenem Manöver“

Die Verschlussdruckmessung zur Bestimmung der funktionellen Re-

sidualkapazität FRCpleth kann in einem „verbundenen Manöver“, bei dem der Patient nicht vom Mundstück gehen darf, mit der Erfassung einer langsamen oder auch forcierter Spirometrie kombiniert werden. Hierzu atmet der Patient innerhalb einer nicht allzu langen Zeit von 15 – 20 s nach Öffnung des Shutters maximal aus, bis der zeitliche Volumenverlauf (Spirogramm) ein deutliches Plateau zeigt. Das ausgeatmete Volumen entspricht dem expiratorischen Reservevolumen ERV. Anschließend atmet der Patient mit

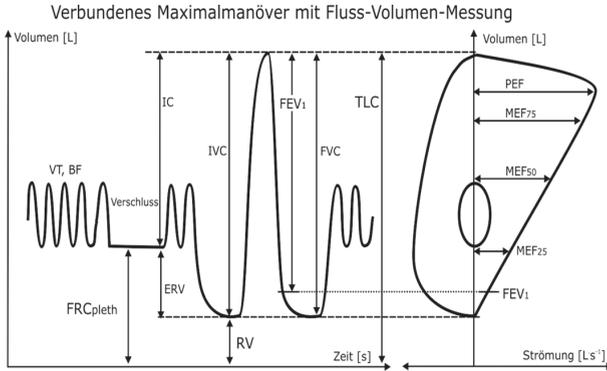


Abb. 6. Das „verbundene Manöver“, in der Kombination von Lungenvolumenbestimmung FRCpleth und maximaler Atmung, führt zu den absoluten Volumina totale Lungenkapazität TLC und Residualvolumen RV. Eine forcierte Ausatmung liefert zusätzlich die dynamischen Kennwerte der Fluss-Volumen-Kurve, wobei die Einsekundenkapazität  $FEV_1$  eine herausragende Bedeutung hat.

8

maximaler Anstrengung ein, wobei seine inspiratorische Vitalkapazität IVC registriert wird (Abb. 6). Diese Verfahrensweise liefert zwei weitere, klinisch relevante Kennwerte der Ganzkörperplethysmographie, die aus der üblichen spirometrischen Lungenfunktionsmessung nicht ableitbar sind. Dazu gehören die totale Lungenkapazität TLC, also die Luftmenge, die sich nach tiefer Einatmung in der Lunge befindet und das nach fester Ausatmung registrierte Lungenvolumen, das Residualvolumen RV genannt wird. Die angeführten Parameter lassen sich der langsamen Spirometrie zuordnen. Siehe Grundlagen zur Ganzkörperplethysmographie am Ende des Artikels.

Wenn möglich, sollte ausgehend vom TLC-Niveau, sofort, ohne Pause, ein forciertes Expirationsmanöver mit schlagartiger Ausatmung, entsprechend den Empfehlungen der nationalen und internationalen pneumologischen Gesellschaften [2, 8], veranlasst werden. Damit stehen die Kennwerte der forcierten Spirometrie, Fluss-Volumen-Messung,

zusätzlich zur Verfügung. Stellvertretend werden an dieser Stelle die Einsekundenkapazität  $FEV_1$ , die forcierte Vitalkapazität FVC und der Tiefeneau-Index  $FEV_1/IVC\%$  genannt.

Stark dyspnoeischen Patienten kann man erlauben, unmittelbar nach dem Verschluss tief einzuatmen, sodass sie ihrem natürlichen Bedürfnis zur Inspiration folgen können. In diesem Falle wird die inspiratorische Kapazität IC bestimmt.

Unabhängig von der Einleitung des Vitalkapazitätsmanövers stellen die Messplätze durch Registrierung bzw. Ableitung in jedem Falle sowohl die inspiratorische Kapazität IC als auch das expiratorische Reservevolumen ERV zur Verfügung.

In der klinischen Interpretation der Ergebnisse des „verbundenen Manövers“ bescheinigt die TLC wie kein anderer Parameter eine krankhaft verminderte Lungendehnbarkeit, wenn ihr unterer Grenzwert unterschritten wird. Selbst bei kombiniert obstruktiv-restriktiven Krankheitsbildern wird der Grad einer restriktiven