

Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga zur Messung der inspiratorischen Muskelfunktion

C.-P. Criée

Recommendations of the German Airway League (Deutsche Atemwegsliga) for the Determination of Inspiratory Muscle Function

Hintergrund

Die Ventilation der Lungen erfolgt durch die Atempumpe, die aus dem Atemzentrum, den abführenden Nerven und als Kernstück der Thoraxwand mit den Inspirationsmuskeln und dem knöchernen Thorax besteht. Die Inspirationsmuskeln haben die physiologischen Eigenschaften von Skelettmuskeln und sind daher auch ermüdbar. Unter Ermüdung wird der Funktionsverlust durch Überbeanspruchung verstanden. Die Ermüdbarkeit hängt von dem Verhältnis der aktuellen Beanspruchung (Last) zur maximalen Kraft (Kapazität) der Muskulatur ab. Bei den Extremitätenmuskeln tritt Ermüdung ein, wenn die Haltekraft mehr als 15% der maximalen Haltekraft beträgt. Die Inspirationsmuskeln ermüden innerhalb weniger Minuten, wenn der bei jedem Atemzug entwickelte Inspirationsdruck 35–40% des maximalen Inspirationsdrucks überschreitet ($PI/PI_{\max} > 35-40\%$). Könnte die Inspirationsmuskulatur ohne Ermüdung dauerhaft ihre Kapazität ausnutzen („Betrieb auf vollen Touren“), würde bei nahezu allen Erkrankungen die alveoläre Ventilation ausreichen, um zumindest das überschüssige Kohlendioxid zu eliminieren. Lediglich bei völlig destruierten Lungen, wie z. B. beim fortgeschrittenen ARDS ist eine normale Ventilation trotz maximaler Lungenbelüftung nicht mehr zu erreichen. Generell kommt es aber nur durch den ermüdungsbedingten Funktionsverlust der Inspirationsmuskeln infolge Überbeanspruchung zur unzureichenden alveolären Ventilation und damit zur Hyperkapnie ($p_a\text{CO}_2 > 45 \text{ mmHg}$). Bei akut hoher Belastung mit rasch progredienter Ermüdung (z. B. akuter Asthmaanfall) resultiert ein myogenes Pumpversagen mit Tachypnoe begleitet von progredienter Hyperkapnie und schließlich Apnoe. Bei weniger progredienten Krankheitsverläufen mit chronischen Belastungen (z. B. neuromuskulären Erkrankungen, Kyphoskoliose, COPD) wird durch Feedback-Mechanismen der zum kompletten Pumpversagen

führende Ermüdungsprozess aufgehalten, indem eine weitere Antriebssteigerung verhindert wird (zentralnervöse Anpassung an periphere Ermüdung). Hierdurch werden die Inspirationsmuskeln geschont, jedoch muss dafür eine unzureichende alveoläre Ventilation mit Hyperkapnie in Kauf genommen werden.

Mit Hilfe der Atemmuskelfunktionsdiagnostik sind folgende Fragen zu beantworten:

- Liegt eine Einschränkung der maximalen Inspirationskraft vor?
- Liegt eine erhöhte Beanspruchung der Inspirationsmuskulatur vor?

Durch Beantwortung dieser beiden Fragen kann die Ursache einer manifesten Pumpinsuffizienz (Hyperkapnie) differenzialdiagnostisch geklärt und Risikopatienten für die Entwicklung einer ventilatorischen Insuffizienz identifiziert werden. Weiterhin eignet sich die Bestimmung der maximalen Inspirationskraft zur Verlaufsbeurteilung der Atemmuskelfunktion z. B. bei Kortisonmyopathie oder bei einer neuromuskulären Erkrankung sowie bei einer Verlaufsbeurteilung der Muskelschwäche bei Gewichtsabnahme (z. B. Lungenemphysem) oder bei der nicht-invasiven Beatmung.

Methode

Die Bestimmung des maximalen Drucks am Mund bei forcierter Inspiration vom Residualvolumen aus gegen ein verschlossenes Ventil wird auch in dem aktuell publizierten ATS/ERS-Statement zur Atemmuskelpfung als generell angewandter sinnvoller Test empfohlen [4]. Der so gemessene maximale Druck wird als maximaler statischer Inspirationsdruck (PI_{\max}) bezeichnet. Die

Institutsangaben

Ev. Krankenhaus Gö.-Weende, Abteilung Pneumologie, Beatmungsmedizin/Schlaflabor, Bovenden-Lenglern

Korrespondenzadresse

Prof. Dr. C.-P. Criée · Ev. Krankenhaus Gö.-Weende · Abt. Pneumologie, Beatmungsmedizin/Schlaflabor · 37120 Bovenden-Lenglern

Bibliografie

Pneumologie 2003; 57: 98–100 © Georg Thieme Verlag Stuttgart · New York · ISSN 0934-8387

Messung ist schnell und nicht-invasiv. Es existieren keine international akzeptierten Normwerte, so dass unterschiedliche Autoren mit unterschiedlichen Normalwerten arbeiten [4]. Nun liegen erstmals Normalwertuntersuchungen aus dem deutschsprachigen Raum vor, wobei in den beiden größeren Untersuchungen jeweils über 500 Probanden untersucht wurden [1,2].

Messung des maximalen statischen Inspirationsdrucks (PI_{max})

Die maximale forcierte Inspiration gegen ein verschlossenes Ventil sollte ohne Pause nach langsamer Expiration bis zum Residualvolumen erfolgen. Durch die Inspiration vom Residualvolumen aus wird der maximale Inspirationsdruck zwar durch den elastischen Retraktionsdruck der Lunge beeinflusst, das Manöver ist jedoch einfach durchführbar und daher international üblich. Die Inspirationszeit gegen das Ventil sollte mindestens 2 Sekunden betragen, da das Maximum der Inspirationsdruckkurve im Mittel erst nach 1,5 Sekunden erreicht wird. Die hier angegebenen Werte beziehen sich auf den Spitzendruck, der aus der Inspirationsdruckkurve ermittelt wird. Hier ist zu beachten, dass in der Literatur sehr häufig nicht der Spitzenwert angegeben wird, sondern der maximale Inspirationsdruck, der über 1 Sekunde lang aufrecht erhalten werden kann (Plateau-Wert) [4]. Die Spitzendrücke liegen ca. 15% höher als die Plateaudrücke. Die Korrelation zwischen den Spitzendrücken und den Plateaudrücken ist hochsignifikant ($R = 0,95$) und die Reproduzierbarkeit ist identisch [2]. Für die Wahl der Spitzendrücke spricht die leichtere Durchführbarkeit des Manövers, die einfache Auswertung sowie der direkte Vergleich mit dem „Sniff-Manöver“, welches die Alternativmethode zur Bestimmung des PI_{max} ist (siehe unten). Es sollten mindestens 7 Manöver durchgeführt werden, evtl. mit einer Pause dazwischen, da das Maximum des Inspirationsdrucks häufig erst im 4. – 6. Versuch erreicht wird. Im ATS/ERS-Statement wird der Maximalwert von 3 Versuchen, die sich um weniger als 20% unterscheiden, empfohlen, wenn zuvor ein erfahrener Untersucher mit der Durchführung des Manövers zufrieden ist [4]. Die Bestimmung des maximalen Inspirationsdrucks 100 msec nach Inspirationsbeginn ($PO_{1,max}$) ist wegen der geringeren Reproduzierbarkeit und der höheren Standardabweichungen nicht zu empfehlen. Zudem ist dieser Parameter international nicht etabliert.

Zur Vermeidung einer zusätzlichen Druckerzeugung durch die orale Muskulatur sollte entweder ein konisches Mundstück mit einem Leck von 1 mm oder aber Mundstücke mit einem enoralen Gummiinsatz verwendet werden.

Messung der Last über den aktuellen Inspirationsdruck ($PO_{1,1}$)

Zur Bestimmung der Last hat sich der Mundverschlussdruck 100 msec nach Inspirationsbeginn ($PO_{1,1}$) bewährt. Hierbei wird zu Beginn einer Inspiration nach vorheriger normaler Expiration während Ruheatmung ein Ventil vor dem Mund für 120 ms verschlossen und der Munddruck 100 msec nach Inspirationsbeginn bestimmt. Nach anschließender Öffnung des Ventils erfolgt der weitere Atemvorgang unbeeinflusst. Es sollen dabei etwa 5–10 Verschlussmanöver in $1\frac{1}{2}$ min durchgeführt werden.

Wenn während des Manövers Atemnot auftritt, sollte dies in 2 Zyklen geschehen. Als Parameter der Last soll der Mittelwert oder besser noch der Median des $PO_{1,1}$ aus 5–6 Verschlüssen verwendet werden. Wenn der Mittelwert verwendet wird, müssen „Ausreißer“ (besonders hohe Drücke) eliminiert werden. Die Verschlüsse sollten unregelmäßig und zufällig erfolgen, um ein bewusstes oder unbewusstes Reagieren auf den Verschluss zu verhindern.

Normalwerte

Aufgrund der hohen Varianz des PI_{max} sind Abhängigkeiten von Körpergewicht und Alter zu vernachlässigen. In allen Studien zeigte sich aber, dass bei Patienten, die älter als 60 Jahre sind, die Standardabweichungen enorm hoch sind, so dass hier keine Empfehlungen gegeben werden können. Offenbar haben ältere Probanden zum Teil erhebliche Schwierigkeiten mit dem forcierten Inspirationsmanöver, obwohl sie ja zuvor die Spirometrie zufriedenstellend durchgeführt hatten. In Tab. 1 sind die Normalwerte für Frauen und Männer unterhalb von 60 Jahren aufgeführt. Sie liegen in der Mitte der in dem ATS/ERS-Statement angegebenen 6 unterschiedlichen Normalwertbereichen. Die Normalwerte errechnen sich aus den Mittelwerten der Kollektive der Arbeitsgruppen aus München und Freiburg [1,2] mit insgesamt über 1000 Normalpersonen. Bei Messungen der Reproduzierbarkeit des PI_{max} lag der intraindividuelle Variationsquotient immer unter 10% (im Mittel 7%) wobei die Mittelwerte ziemlich konstant waren und bei häufigen Messungen die Standardabweichungen geringer wurden. Aufgrund der relativ hohen interindividuellen Standardabweichungen liegt der untere Grenzwert für Frauen bei 4,0 und bei Männern bei 5,5 kPa. Als unterer Grenzwert wurde die 5. Perzentile berechnet. Bei unterschiedlichen Grenzwerten zwischen den Kollektiven der Studien [1,2] wurde der jeweils geringere Grenzwert zugrunde gelegt. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass natürlich eine Muskelschwäche vorliegen kann, wenn der Muskeldruck noch im Normbereich liegt, aber vor Krankheitsbeginn ein höherer Ausgangswert erreicht wurde. Insofern können hier, wie auch häufig bei der Spirometrie, nur Verlaufuntersuchungen weiterhelfen. Erfahrungsgemäß gilt, dass eine klinisch signifikante Muskelschwäche ausgeschlossen ist, wenn der maximale statische Inspirationsdruck bei Frauen 7,0 und bei Männern 8,0 kPa überschreitet (siehe Tab. 1).

Die Normalwerte für den Mundverschlussdruck während Ruheatmung sind in Tab. 2 angegeben. Die Normalwerte sind nur gering von Alter oder Geschlecht beeinflusst, so dass sie ohne Einschränkung gelten. Allerdings lagen die Mittelwerte in einem

Tab. 1 Maximaler statischer Inspirationsdruck (PI_{max})

< 60 Jahre	Frauen	Männer
Mittelwert (kPa)	8,5	11,5
Unterer Grenzwert (kPa)	4,0	5,5
Ausschluss einer relevanten Muskelschwäche (kPa)	> 7,0	> 8,0

Tab. 2 Mundverschlussdruck während Ruheatmung (P_{0,1})

Normalwerte	0,1 – 0,15 ± 0,07	kPa
oberer Grenzwert	0,3	kPa

Kollektiv bei 0,1 kPa [2] und in dem anderen großen Kollektiv bei 0,15 [1]. Dies liegt sicherlich an den unterschiedlichen apparativen Bedingungen (Apparatwiderstand, Apparatetraum), so dass bei genereller Abweichung von diesen Normalwerten die apparativen Konditionen überprüft werden müssen. Aus beiden großen Studien ergab sich aber, dass bei einem P_{0,1} über 0,3 kPa eine erhöhte Last der Inspirationsmuskulatur vorliegt.

In der Tab. 3 sind die oberen Grenzwerte aufgeführt, die sich für P_{0,1} bezogen auf das Atemminutenvolumen in Ruhe (V_E) bzw. bezogen auf die mittlere Inspirationsgeschwindigkeit bei Ruheatmung (V_T/T_I) und in Beziehung zum maximalen Inspirationsdruck P_{I,max} ergeben. Dabei reflektieren P_{0,1}/V_E und P_{0,1}/V_T/T_I die effektive inspiratorische Impedanz des gesamten respiratorischen Systems. Da der P_{0,1} bei Hyperventilation mit zunehmendem V_E oder zunehmender V_T/T_I ansteigt, werden unterschiedliche Atemminutenvolumina bzw. unterschiedliche Inspirationsgeschwindigkeiten bei Ruheatmung durch die Quotienten korrigiert, so dass diese Quotienten weniger variieren als der Absolutwert des P_{0,1}.

Tab. 3 Obere Grenzwerte für den Mundverschlussdruck (P_{0,1}) bezogen auf das Atemminutenvolumen (V_E) und die mittlere Inspirationsgeschwindigkeit (V_T/T_I) bei Ruheatmung sowie in Bezug auf den maximalen statischen Inspirationsdruck (P_{I,max})

P _{0,1} /V _E	< 0,025 [kPa × min/l]
P _{0,1} /V _T /T _I	< 0,5 [kPa × s/l]
P _{0,1} /P _{I,max}	< 4,5%

Durch Verzicht auf den maximalen P_{0,1} bei forcierter Inspiration (P_{0,1,max}) ist die prozentuale Beanspruchung der Inspirationsmuskulatur nicht mehr direkt abzulesen. Aus den Arbeiten über experimentelle Erschöpfung bei Stenoseatmung und ergometrischer Belastung geht hervor, dass die Erschöpfungsgrenze der Inspirationsmuskulatur von 35 – 40% der maximalen Kapazität einem Quotienten von P_{0,1} zu P_{I,max} von etwa 20 bis 25% entspricht. Eine Beanspruchung P_{0,1}/P_{I,max} von > 4,5% bei Ruheatmung ist sicher erhöht (siehe Tab. 3).

Bei Interpretation der Maximaldrücke als Ausdruck der maximalen Inspirationskraft muss das Lungenvolumen als Index der Länge der Inspirationsmuskulatur beachtet werden. Je höher das Lungenvolumen bei Bestimmung des maximalen Inspirationsdruckes ist, desto kürzer ist die Inspirationsmuskulatur und umso geringer ist der maximale Inspirationsdruck, obwohl keinerlei Kontraktilitätsstörung besteht. Somit muss beachtet werden, dass bei Patienten mit Lungenüberblähung geringere Inspirationsdrücke erreicht werden, obwohl die Kontraktilität der In-

spirationsmuskulatur ungestört ist. Da sich aber das erhöhte Lungenvolumen sowohl bei der Inspirationsdruckentwicklung in Ruhe als auch bei der forcierten Inspiration gleichermaßen auswirkt, ist der Quotient P_{0,1}/P_{I,max} als ein vom Lungenvolumen unabhängiger Parameter der Beanspruchung zu akzeptieren.

Wenn Zweifel an der Validität der Inspirationskraftbestimmung durch das forcierte Inspirationsmanöver bestehen, müssen andere Bestimmungen der Atemmuskulatur vorgenommen werden. Alternativ kann der Nasendruck bei kurzer forcierter Einatmung über die Nase und den geschlossenen Mund („Sniff“) gemessen werden (sniff P_{na}). Um mögliche Übertragungsstörungen des intrathorakalen Drucks zur Nase (wie z. B. bei Patienten mit schwerer Obstruktion beschrieben) auszuschließen, kann der Ösophagusdruck beim Sniff-Manöver gemessen werden (Sniff P_{es}). Dieses invasive Verfahren gilt als die Methode mit der geringsten Fehlermöglichkeit durch falsch niedrige Ergebnisse und wird eingesetzt, wenn Zweifel an der durch P_{I,max} oder sniff P_{na} festgestellten Einschränkung der Inspirationskraft bestehen. Eine mitarbeiterunabhängige Methode ist die Messung des Ösophagusdrucks oder Munddrucks nach magnetischer Reizung des Nervus phrenicus. Dazu liegen jedoch noch keine Normwerte vor, so dass diese Methoden nur in speziellen Laboratorien zur Anwendung kommen.

Die Empfehlungen wurden von

Prof. Dr. Criée, Ev. Krankenhaus Gö.-Weende, Abt. Pneumologie, Beatmungsmedizin/Schlaf Labor, 37120 Bovenden-Lenglern
Priv.-Doz. Dr. Hautmann, Pneumologie, Medizinische Klinik Innenstadt der Universität München, Ziemssenstr. 1, 80336 München

Dr. E. Hennings, Universitätsklinik, Abt. Pneumologie, Hugstetter Str. 55, 79106 Freiburg

Dr. Lehnigk, Fachkrankenhaus Großhansdorf GmbH, Zentrum f. Pneumologie und Thoraxchirurgie, Wöhrendamm 80, 22927 Großhansdorf

Dr. Mellies, Ruhrlandklinik, Tüschener Weg 40, 45239 Essen

Dr. Neumeister, Internistisches Klinikum Koblenz, Kardinal-Kreuz-Str. 1 – 5, 56073 Koblenz

Prof. Dr. Rasche, Kliniken St. Antonius/Standort Marienheim, Hardtstr. 46, 42107 Wuppertal

Prof. Schmidt, Mediz. Universitätsklinik, Schwerpunkt Pneumologie, Josef-Schneider-Str. 2, 97080 Würzburg

Dr. Wiebel, Thoraxklinik d. LVA, Amalienstr. 5, 69126 Heidelberg

Dr. Windisch, Universitätsklinik, Abt. Pneumologie, Hugstetter Str. 55, 79106 Freiburg

Dr. Winter, 3. Medizinische Abteilung Krankenhaus München-Schwabing, Kölner Platz 1, 80804 München

Literatur

- Hautmann H, Hefe S, Schotten K et al. Maximal inspiratory mouth pressures (P_{I,max}) in healthy subjects – What is the lower limit of normal? *Respir Med* 2000; 94: 689 – 693
- Windisch W, Hennings E, Soricter S et al. Peak- and plateau maximal inspiratory mouth pressures in healthy subjects at different lung volumes. *Eur Respir J* 2002; 20 Suppl. 38 : 498 s
- Winter M, Schmidt M. Normwerte für die Messung der inspiratorischen Munddrücke mit einem tragbaren Messgerät. *Atemw.-Lungenkrkh* 2002; 1: 3 – 9
- ATS/ERS. Statement on Respiratory Muscle Testing. *Am J Respir Crit Care Med* 2002; 166: 518 – 624