

Empfehlungen der Deutschen Atemwegsliga zur Messung der inspiratorischen Muskelfunktion

C.P. Criée, H. Hautmann, E. Hennings, B. Lehnigk, U. Mellies, W. Neumeister, K. Rasche, M. Schmidt, M. Wiebel, W. Windisch und M. Winter

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 ($p_aCO_2 > 45$ 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 Ermü-

Quelle: *Pneumologie* 2003; 57: 98-100

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

dungsprozeß aufgehalten, indem eine weitere Antriebssteigerung verhindert wird (zentralnervöse Anpassung an periphere Ermüdung). Hierdurch werden die Inspirationsmuskeln geschont, jedoch muß dafür eine unzureichend 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 können die Ursache einer manifesten Pumpinsuffizienz (Hyperkapnie) differentialdiagnostisch 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 zur Verlaufsbeurteilung der Muskelschwäche bei Gewichtsabnahme (z.B. Lungemphysem) oder bei der nichtinvasiven Beatmung.

Methoden

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 Atemmuskelpfprüfung als generell angewandter sinnvoller Test empfohlen [4].

Der so gemessene maximale Druck wird als maximaler statischer Inspirationsdruck (PI_{max}) bezeichnet. Die Messung ist schnell und nicht invasiv. Es existieren noch 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 Plateau-

drücke. 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 (s.u.). Es sollten mindesten 7 Manöver durchgeführt werden, eventuell 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 ($P_{0,1max}$) 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 Gummiansatz verwendet werden.

Messung der Last über den aktuellen Inspirationsdruck ($P_{0,1}$)

Zur Bestimmung der Last hat sich der Mundverschlußdruck 100 msec nach Inspirationsbeginn ($P_{0,1}$) bewährt. Hierbei wird zu Beginn einer Inspirati-

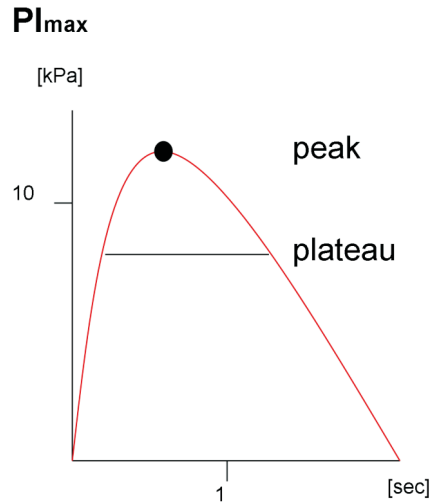


Abb. 1. Maximaler statischer Inspirationsdruck (PI_{max}). Unterschieden wird zwischen dem Spitzendruck (Peak) und dem Plateaudruck, der über 1 Sekunde aufrechterhalten wird.

on nach vorheriger normaler Expiration während Ruheatmung ein Ventil vor dem Mund für 120 msec verschlossen und der Munddruck 100 msec nach Inspirationsbeginn bestimmt. Nach anschließender Öffnung des Ventils erfolgt der weitere Atemvorgang uneinflusst. Es sollen dabei etwa 5 – 10 Verschlussmanöver in 1,5 Minuten 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 $P_{0,1}$ 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.

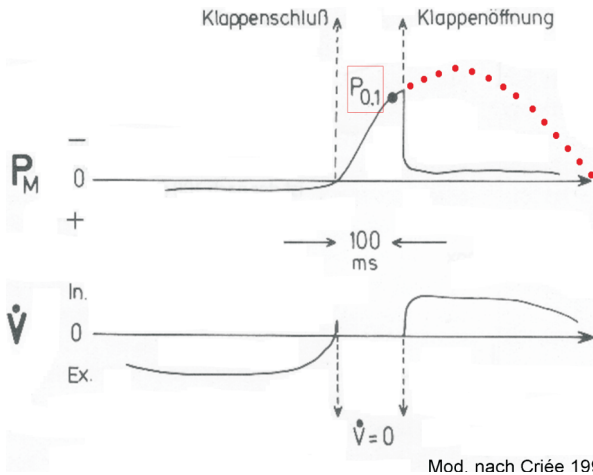


Abb. 2. $P_{0,1}$ = Mundverschlußdruck bei Ruheatmung 100 ms nach Inspirationsbeginn.
 P_M = Munddruck,
 \dot{V} = Atemfluß.

Mod. nach Criée 1995

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, ob-

wohl sie ja zuvor die Spirometrie zufriedenstellend durchgeführt hatten. In Tabelle 1 sind die Normalwerte für Frauen und Männer bis 60 Jahren aufgeführt. Sie liegen in der Mitte der in dem ATS/ERS-Statement angegebenen 6 unterschiedlichen Normwertbereichen. 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 für Männer 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

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

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 Verlaufsuntersuchungen 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 (Tab. 1).

Die Normalwerte für den Mundverschlusdruck während Ruheatmung sind in Tabelle 2 angegeben. Die Normalwerte sind nur gering von Alter oder Geschlecht beeinflusst, so daß sie ohne Einschränkung gelten. Allerdings lagen die Mittelwerte in einem 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, Apparatetrauma), so daß bei genereller Abweichung von diesen Normalwerten die apparativen Konditionen überprüft werden müssen. Aus beiden großen Studien ergibt sich aber, daß bei einem $P_{0,1}$ über 0,3 kPa eine erhöhte Last der Inspirationsmuskulatur vorliegt.

In Tabelle 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 PI_{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,

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

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

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

$P_{0,1}/V_E$	< 0,025	[kPa × min/l]
$P_{0,1}/V_T/T_I$	< 0,5	[kPa × sec/l]
$P_{0,1} / PI_{max}$	< 4,5%	

werden unterschiedliche Atemminutenvolumina bzw. unterschiedliche Inspirationsgeschwindigkeiten bei Ruheatmung durch die Quotienten korrigiert, so daß diese Quotienten weniger variieren als der Absolutwert des $P_{0,1}$.

Durch Verzicht auf den maximalen $P_{0,1}$ bei forciertter 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 PI_{max} von etwa 20 bis 25% entspricht. Eine Beanspruchung $P_{0,1}/PI_{max}$ von > 4,5% bei Ruheatmung ist sicher erhöht (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 Inspirationsmuskulatur 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 forcierten Einatmung über die Nase und den geschlossenen Mund ("Sniff") gemessen werden (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 (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 mitarbeitersunabhängige 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.

Literatur

- [1] *Hautmann H., S. Hefele, K. Schotten et al.*: Maximal inspiratory mouth pressures ($P_{I_{max}}$) in healthy subjects. What is the lower limit of normal? *Respir. Med.* 94, 689-693 (2000).
- [2] *Windisch W., E. Hennings, S. Sorichter et al.*: Peak- and plateau maximal inspiratory mouth pressure in healthy subjects at different lung volumes. *Eur. Respir. J.* 20 (Suppl. 38), 498s (2002).
- [3] *Winter M., M. Schmidt*: Normwerte für die Messung der inspiratorischen Munddrücke mit einem tragbaren Meßgerät. *Atemw.-Lungenkrkh.* 28, 3-9 (2002).
- [4] *ATS/ERS*: Statement on Respiratory Muscle Testing. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 166, 518-624 (2002).