

Christina M. Spengler

Sportphysiologie, Institut für Bewegungswissenschaften und Sport, ETH Zürich, und Physiologisches Institut und Zürcher Zentrum für Integrative Humanphysiologie (ZIHP), Universität Zürich, Schweiz

Atmungsmuskeltraining und Leistungsfähigkeit

Zusammenfassung

Momentan setzen Sportler zur Leistungsoptimierung verschiedene Geräte für ein spezifisches Training der Atmungsmuskulatur ein. Für das bessere Verständnis der aktuellen Datenlage wird in dieser Übersichtsarbeit (i) auf die Bedingungen, die zur Atmungsmuskelermüdung führen und die Quantifikation dieser Ermüdung, (ii) auf den Einfluss einer Atmungsmuskelermüdung auf die Leistungsfähigkeit, (iii) auf die verschiedenen Atmungstrainingsarten und deren Effekte auf die Atmungsmuskulatur und (iv) auf die Effekte eines spezifischen Atmungsmuskeltrainings auf die körperliche Leistungsfähigkeit eingegangen. Bezüglich des Einflusses eines Atmungsmuskeltrainings auf die Leistungsfähigkeit zeigt sich, dass Verbesserungen der in Stufentests erhobenen Maximalleistung nicht zu erwarten sind, dass jedoch die Mehrheit der Studien, unabhängig von der Art des Atmungsmuskeltrainings, eine Verbesserung der Ausdauerleistungsfähigkeit zeigen. Aufgrund der Heterogenität der Studienanlagen und der inter-individuellen Unterschiede und Bedürfnisse der Sportler können individuelle Empfehlungen jedoch nur nach detaillierter Analyse sportart-spezifischer Resultate sowie sportler-spezifischer Faktoren, wie z.B. Ermüdbarkeit und Wahrnehmung des Atmungssystems, gemacht werden.

Schweizerische Zeitschrift für «Sportmedizin und Sporttraumatologie» 59 (1), 34–39, 2011

Mitte der 1970er-Jahre wurde erstmals gezeigt, dass die Atmungsmuskulatur gesunder Personen so spezifisch trainiert werden kann wie jede andere Muskulatur auch, nämlich hinsichtlich Kraft oder Ausdauer (Leith & Bradely, 1976). Gut zehn Jahre später erschien die erste Studie (Morgan et al., 1987), welche den Effekt eines spezifischen Trainings der Atmungsmuskulatur auf die Ganzkörperleistungsfähigkeit untersuchte. Seither nimmt die Zahl der Studien bei Gesunden wie auch Patienten unterschiedlichster Krankheitsbilder fast exponentiell zu, wobei eine breite Variabilität bezüglich Art des Atmungstrainings, Sport- und Testart sowie Testintensität besteht.

Für das Verständnis des Zusammenhangs zwischen der Atmung, im Speziellen der Atmungsmuskulatur, und der körperlichen Leistungsfähigkeit sollen folgende Punkte kritisch beleuchtet werden:

- (i) Charakterisierung und Ermüdbarkeit der Atmungsmuskulatur
- (ii) Einfluss einer Atmungsmuskelermüdung auf die Leistungsfähigkeit
- (iii) Atmungstrainingsarten und deren Effekte auf die Atmungsmuskulatur
- (iv) Effekte eines spezifischen Atmungsmuskeltrainings auf die körperliche Leistungsfähigkeit

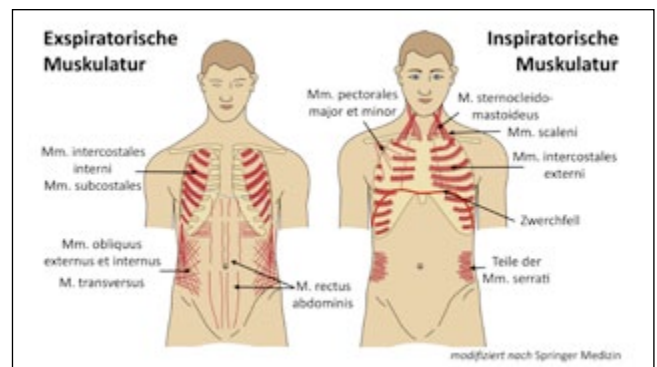
Charakterisierung und Ermüdbarkeit der Atmungsmuskulatur

Als Erstes möchte ich kurz ein paar wichtige Aspekte zur Funktion der Atmungsmuskulatur (Fig. 1) erwähnen. In Ruhe ist ausschliesslich die Einatemmuskulatur aktiv, während die Ausat-

Abstract

Currently, athletes use different devices for specific training of respiratory muscles to enhance their exercise performance. For better understanding of the available data, this review article provides an overview (i) of conditions that cause respiratory muscle fatigue and quantification of fatigue, (ii) of the influence of respiratory muscle fatigue on exercise performance, (iii) of the various respiratory training modes and their effects on respiratory muscles and (iv) of the effects of specific respiratory muscle training on physical performance. Regarding effects of respiratory muscle training on exercise performance, it is important to note that no improvement of the maximal workload is expected to occur while the majority of studies, regardless of the type of training, show improvements in endurance performance. However, due to the heterogeneity of study designs and inter-individual differences and athletes' needs, individual recommendations need detailed, sports-specific analyses of the data as well as an analysis of the athlete's personal factors, e.g. fatigability and perception of the respiratory system.

mung passiv erfolgt. Es wird jedoch nicht nur das Zwerchfell, der «Haupteinatmungsmuskel» eingesetzt, wie man erwarten könnte, sondern auch die inspiratorische Zwischenrippenmuskulatur. Diese verhindert einerseits eine paradoxe Atmung, d.h. ein Einfallen des Brustkorbes während der Kontraktion des Zwerchfells, andererseits trägt sie zur Vergrösserung des Lungenvolumens bei. Wird die Atmung jedoch gesteigert, wie zum Beispiel bei sportlicher Aktivität, so werden weitere inspiratorische Muskeln (z.B. Mm sternocleidomastoidei, Mm scaleni) aktiviert. Auch die Ausatmung muss nun aktiv erfolgen, um grössere Flüsse zu erreichen,



Figur 1: Schematische Darstellung der inspiratorischen und expiratorischen Muskulatur.

d.h. expiratorische Thorax- und Abdominalmuskulatur werden ebenfalls rekrutiert. Die Aktivität der gesamten Atmungsmuskulatur benötigt rund 1.8–2.9 ml Sauerstoff (\dot{V}_{O_2}) pro Liter Ventilation, wobei dieser Wert mit zunehmender Atmung disproportional zunimmt (Aaron et al., 1992a). Während maximaler Ganzkörperbelastung beansprucht die Atmungsarbeit bis zu 15% des gesamten \dot{V}_{O_2} (Aaron et al., 1992b) und des Herzminutenvolumens (Harms et al., 1998). Es scheint daher nicht verwunderlich, dass auch die Atmungsmuskulatur ermüden kann.

Die Charakterisierung der Atmungsmuskulatur stellt eine besondere Herausforderung dar, insbesondere da diese Muskulatur messtechnisch nicht so einfach zugänglich ist, wie zum Beispiel Arm- oder Beinmuskulatur. Die einfachste verwendete Methodik ist die Messung der maximal erreichbaren Kraft der in- und expiratorischen Muskulatur. Die *Maximalkraft der inspiratorischen Muskulatur* wird anhand des Unterdrucks bestimmt, der durch «Einatmen» aus ganz ausgeatmeter Stellung (d.h. vom Residualvolumen, RV) oder aus der Atemruhelage (d.h. von der funktionellen Residualkapazität, FRC) gegen einen verschlossenen Atemweg erzeugt werden kann. Diese Druckmessung wird als maximal inspiratorischer Druck (MIP) bezeichnet. Zu beachten ist dabei, dass die Messung bei RV zwar einfacher ist als bei FRC, da eine vollständige Ausatmung reproduzierbarer erreicht werden kann, jedoch diese Messung einen Teil der Retraktionskraft des Lungen-Thorax-Systems beinhaltet. Die Messung bei FRC hingegen stellt eine reine Messung der Muskelkraft dar, wobei die Kraft nicht nur aufgrund der fehlenden Retraktionskraft, sondern auch aufgrund der veränderten Längenverhältnisse der Atmungsmuskulatur *per se* geringer ist. Die *Maximalkraft der expiratorischen Muskulatur* wird durch Druckmessung während eines maximalen «Ausatmungsmanövers» gegen einen verschlossenen Atemweg, aus ganz eingatmeter Stellung, also bei totaler Lungenkapazität (TLC) oder bei FRC bestimmt, wobei hier ebenfalls gilt, dass bei TLC die Retraktionskraft des Lungen-Thorax-Systems zur Druckentwicklung beiträgt, dies also keine reine Muskelkraftmessung darstellt. Dieses Manöver erzeugt einen positiven Druck, der als maximal expiratorischer Druck (MEP) bezeichnet wird. Als Mass für eine globale in- resp. expiratorische *Atmungsmuskel-Ermüdung* werden MIP- und MEP-Messungen nach einer körperlichen Aktivität relativ zu denjenigen direkt vor dieser Aktivität gesetzt. Der grosse Nachteil dieser Messung ist allerdings, dass es sich nicht nur um eine Messung des Verlustes der Kraft der kontraktile Elemente der Muskulatur handelt, sondern dass auch zentrale Ermüdung mitgemessen wird, d.h. supraspinale Faktoren, welche keine maximale Rekrutierung der Muskulatur mehr erlauben (siehe z.B. Gandevia, 2001).

Um die effektive muskuläre Ermüdung und somit das Potenzial eines muskulären Trainings der Atmungsmuskulatur abschätzen zu können, muss jedoch die spezifische Veränderung der Muskelkontraktilität gemessen werden können. Als Goldstandard wird deshalb heute die *Messung der Muskelkontraktilität als Antwort auf elektrische oder magnetische Nervenstimulation* der entsprechenden Muskulatur angesehen (ERS/ATS, 2002). Für die Bestimmung der Zwerchfellerermüdung werden die Phrenicusnerven, ebenfalls vor und nach einer Belastung, stimuliert. Dies kann bilateral mittels Elektroden (invasiv mit Nadeln oder transkutan) erfolgen, was eine relativ selektive Zwerchfellkontraktion auslöst. Die Kontraktionsstärke während der Stimulation wird mittels Druckmessungen in Speiseröhre ($P_{es,tw}$) und Magen ($P_{ga,tw}$) erfasst, aus deren Differenz der transdiaphragmatische Druck ($P_{di,tw}$) berechnet wird. Die Phrenicusnerven können auch mittels bilateraler oder cervikaler Magnetstimulation gereizt werden, was, vor allem bei zervikaler Stimulation, auch Kontraktionen weiterer Atmungsmuskeln erzeugt und zu grösseren $P_{di,tw}$ führt (vermutlich durch eine «Versteifung» der Thoraxmuskulatur während der Zwerchfellkontraktion). Dies kann zwar ein Nachteil sein, aber auch ein Vorteil, denn Simikowski et al. (1998) zeigten, dass mittels zervikaler Magnetstimulation zwischen Zwerchfellerermüdung und Ermüdung weiterer Inspirationsmuskulatur unterschieden werden kann. Der Verlust der Kontraktilität der expiratorischen Muskulatur (v.a. der abdominalen Muskulatur) wird mittels Messung des

P_{ga} während Nervenwurzelstimulation um Th_{10} bestimmt. Positiv an dieser Methodik ist, dass auch sie eine rein muskuläre Messung darstellt, d.h. ohne den Einfluss zentraler Faktoren, andererseits hat sie den Nachteil, dass sie nicht die gesamte Ausatmungsmuskulatur erfasst.

Für die Charakterisierung der Atmungsmuskulatur interessiert allerdings, speziell im Zusammenhang mit sportlichen Aktivitäten, nicht nur die Kraft, resp. der Kraftverlust, einer Muskulatur, sondern auch deren Ausdauer. Zur Erfassung der *Atmungsmuskel-Ausdauer* werden verschiedene Tests herangezogen. Gewisse Autoren bezeichnen schon die Bestimmung des während 12–15 s gemessenen, maximalen Atemminutenvolumens (MVV) als Ausdauerermessung, was jedoch im Rahmen körperlicher Aktivitäten kaum als Ausdauer gelten kann. Weitere Testmodalitäten, welche als Ausdauerests für die Atmungsmuskulatur herangezogen werden (ERS/ATS, 2002), sind, analog zu «Ganzkörperests»: (i) Stufentests, bei denen entweder der inspiratorische Widerstand oder die Minutenventilation in regelmässigen Abständen, z.B. alle 2 min, erhöht wird bis die Leistung nicht mehr erbracht werden kann, (ii) constant-load Tests, bei denen ein bestimmter Widerstand oder eine bestimmte Minutenventilation so lange wie möglich aufrechterhalten werden muss oder (iii) Time Trials, d.h. Tests mit fixer Dauer, während der so viel Luft wie möglich umgesetzt werden muss. Werden diese Tests allerdings zur Erfassung einer Atmungsmuskelermüdung durch körperliche Aktivität eingesetzt, so müssen drei wichtige Faktoren berücksichtigt werden. Erstens sind auch dies Tests, welche nicht nur eine rein muskuläre, sondern auch eine zentrale Ermüdung erfassen. Zweitens besteht die Gefahr – falls mit erhöhten Widerständen geatmet wird – dass der Zeitpunkt des Testendes nicht ausschliesslich durch die Atmungsmuskulatur, sondern auch durch Hyperkapnie und damit assoziierte Veränderungen des homöostatischen Milieus und/oder das Auftreten von Atemnot bedingt ist (McKenzie et al., 1997). Drittens können diese Tests selbst schon zu einer Ermüdung der Atmungsmuskulatur führen (siehe unten). Das heisst, dass die körperliche Leistung, deren Atmungsermüdung bestimmt werden soll, mit vorermüdeter Atmungsmuskulatur absolviert wird, wenn direkt vor der Leistung ein Basiswert bestimmt wird und somit nicht ausreichend Zeit für eine vollständige Erholung der Atmungsmuskulatur gewährleistet ist.

Unter welchen Umständen aber ermüdet die Atmungsmuskulatur? Mittels genannter Nervenstimulation konnten Hamnegard et al. (1996) und Kyroussis et al. (1996) zeigen, dass schon eine 2-minütige, maximale Hyperpnoe sowohl zu einer Ermüdung des Zwerchfells (–24% $P_{di,tw}$) als auch zu einer Ermüdung der Abdominalmuskulatur (–17% $P_{ga,tw}$) führt. Auch submaximale Hyperpnoe (bei 60–70% MVV) bis Task Failure, d.h. bis zum Zeitpunkt, bei dem die vorgegebene Ventilation nicht mehr aufrechterhalten werden kann, führt zu einer Kontraktilitätseinbusse sowohl der inspiratorischen (Mador et al., 2002; Renggli et al., 2008; Kabitz et al., 2011) als auch der expiratorischen Muskulatur (Renggli et al., 2008). Interessanterweise beginnt jedoch die Kontraktilitätseinbusse schon relativ früh im Laufe der Hyperpnoe (Renggli et al., 2008; Kabitz et al., 2011), während die Ventilation weiter aufrechterhalten werden kann. Das würde heissen, dass im Falle von gleichzeitiger körperlicher Aktivität eine Ermüdung der Atmungsmuskulatur die Leistung auch schon relativ früh beeinflussen könnte. Interessanterweise führt isolierte Hyperpnoe, welche die Ventilation von intensiver körperlicher Belastung simuliert, nicht zwingend zu einer Ermüdung der Atmungsmuskulatur, im Speziellen des Zwerchfells, während dieselbe Hyperpnoe bei gleichzeitiger körperlicher Aktivität eine Ermüdung des Zwerchfells mit sich bringt (Babcock et al., 1995b). Als Grund für die erhöhte Ermüdbarkeit der Atmungsmuskulatur während körperlicher Belastung wird eine Blutfluss-Kompetition der Atmungsmuskulatur mit der restlichen arbeitenden (z.B. Bein-) Muskulatur postuliert (Dempsey et al., 2008). In der Tat wurde bisher – mittels Nervenstimulation – wiederholt gezeigt, dass sowohl die inspiratorische (Johnson et al., 1993; Mador et al., 1993; Babcock et al., 1995b; Babcock et al., 1996; Mador und Dahuja, 1996; Babcock et al., 1998; Babcock et al., 2002; Verges et al., 2007; Guenette et al., 2010; Kabitz et

al., 2010) als auch die expiratorische (Taylor et al., 2006; Verges et al., 2006) Muskulatur bei intensiven körperlichen Aktivitäten (70–100% der Maximalleistung) von unterschiedlicher Dauer (5–48 min) ermüdet. Obwohl MIP-Messungen keine rein muskulären Messungen darstellen, sollte trotzdem nicht ausser Acht gelassen werden, dass MIP-Reduktionen bei körperlichen Aktivitäten wesentlich längerer Dauer, z.B. nach einem Triathlon (Hill et al., 1991) oder nach einem Halbmarathon oder Marathon (Chevrolet et al., 1993) gezeigt wurden. Die Tatsache, dass Ker und Schultz (1996) mittels «Atmen gegen Widerstand bis Task Failure» auch 3 Tage nach einem Ultramarathon (87 km) eine Leistungsminderung zeigen konnten, deutet ebenfalls darauf hin, dass auch diese Belastungen (55–75% $\dot{V}_{O_{2max}}$; Davies et al., 1979) zu einer Atmungsmuskelermüdung führen können.

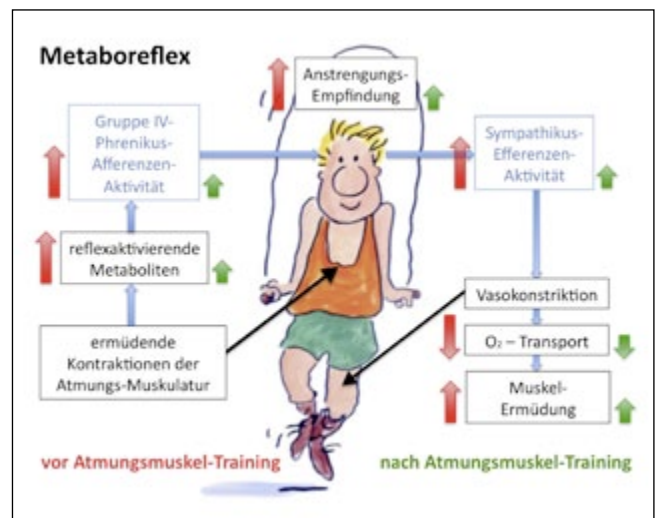
Einfluss einer Atmungsmuskelermüdung auf die Leistungsfähigkeit

Auch wenn viele Studien zeigen, dass durchaus verschiedene Teile der Atmungsmuskulatur bei körperlicher Aktivität unterschiedlicher Intensität und Dauer ermüden, so muss man sich natürlich die Frage stellen, ob diese Ermüdung eine Ausdauerleistung überhaupt limitiert, oder ob die Atmungsmuskelermüdung einfach nur präsent ist. Diese Frage wurde unter anderem versucht zu beantworten, indem die Ausdauerleistungsfähigkeit mit vorermüdeter Atmungsmuskulatur untersucht wurde. Dazu liess man die Probanden vor der körperlichen Belastung entweder während längerer Zeit normokapnische Hyperpnoe durchführen (Martin et al., 1982) oder man liess die Probanden mit inspiratorischem (Mador und Acevedo, 1991b) oder expiratorischem (Verges et al., 2007; Taylor und Romer, 2008) Widerstand atmen, bis sie die Belastungsvorgabe nicht mehr aufrechterhalten konnten. Diese Studien zeigten, dass in der Folge die Ausdauerleistung reduziert war. Auch zeigte sich, dass die Ventilation während körperlicher Aktivität mit vorermüdeter Atmungsmuskulatur nicht etwa vermindert, wie man erwarten könnte, sondern sogar erhöht war (Mador und Acevedo, 1991ab; Taylor und Romer, 2008).

Es stellt sich nun also die Frage, warum eine Leistung mit ermüdeter Atmungsmuskulatur vermindert sein könnte, wenn doch die Ventilation *per se* nicht reduziert ist. Eine mögliche Erklärung ist natürlich die Motivation der Probanden, welche reduziert sein könnte nach einer erschöpfenden Tätigkeit wie Atmen gegen Widerstand bis zum Task Failure direkt vor der körperlichen Leistung. Eine andere Erklärung könnte jedoch der von der Forschungsgruppe um J.A. Dempsey (Madison, WI) postulierte Metaboreflex bieten. Diese Gruppe zeigte mit verschiedenen Experimenten, dass es während intensiver, körperlicher Aktivität zwischen der Atmung und der Beinmuskulatur zu einem Konkurrenzkampf um den Blutfluss kommt (Dempsey et al., 2008). Kurz: hier (siehe Fig. 2) muss die Atmung mehr Arbeit leisten oder ermüdet sie, beziehungsweise erhöhen sich in der Atmungsmuskulatur metabolische Produkte wie Milchsäure, so kommt es zu einer Erhöhung der Aktivität des Sympathikus, was zu einer Vasokonstriktion, auch in der arbeitenden Beinmuskulatur, führt. Diese Vasokonstriktion wiederum führt zu einer verstärkten Ermüdung der Beinmuskulatur und als Folge zu einer Leistungslimitierung.

Atmungstrainingsarten und deren Effekte auf die Atmungsmuskulatur

Wie eingangs erwähnt, konnten Leith & Bradley (1976) schon vor 35 Jahren zeigen, dass die Atmungsmuskulatur bezüglich Kraft und Ausdauer spezifisch trainiert werden kann. Sie liessen ihre Probanden entweder maximale statische Inspirationsmanöver oder normokapnische Hyperpnoe durchführen. Während die erste Gruppe der Probanden ausschliesslich ihren MIP verbesserte, so verbesserte die zweite Gruppe ausschliesslich die während 15 min durchhaltbare, maximale Ventilation. Inzwischen sind nicht nur für die Klinik, sondern speziell auch auf Sportler ausgerichtete



Figur 2: Schematische Darstellung des Metaboreflexes und der Veränderungen durch ein Atmungsmuskel-Training.

Atmungstrainingsgeräte auf den Markt gekommen, welche diese unterschiedlichen Effekte hervorrufen. Bei den Krafttrainingsgeräten, welche zu MIP- und/oder MEP-Verbesserungen führen, unterscheidet man zwei verschiedene Typen, sogenannte Widerstands- und Threshold-Geräte. Bei Widerstands-Geräten (z.B. Sports Breather®, Health Fitness Center, Rockport, TX, USA; etc.) wird durch ein Loch eingatmet, was bedeutet, dass der Widerstand und somit die Kraft, die man erzeugen muss, umso grösser wird, je grösser der Fluss, also die Geschwindigkeit, ist, mit der man einatmet. Threshold-Geräte (z.B. Powerbreathe®, HaB International, Southam, UK; Powerlung®, PowerLung, Houston, TX, USA; etc.) basieren auf dem Prinzip eines Schwellendrucks (Unterdruck im Falle der Einatmung), der erreicht werden muss, um einatmen zu können. Wird dieser Druck nicht erreicht, kann durch das Gerät nicht geatmet werden, wird der Schwellendruck erreicht, bleibt der «Widerstand» während der gesamten Ein- resp. Ausatmung konstant. Vorteil des Threshold-Gerätes gegenüber dem Widerstands-Gerät ist somit, dass die Belastung klar eingestellt werden kann. Nachteil beider Geräte ist, dass die Lungenvolumina, über welche der Atemzug ausgeführt wird, nicht kontrolliert werden können, sofern das Gerät kein Feedback in Form einer Fluss-/Volumen-Angabe aufweist. Dies kann nachteilige Folgen für das Training haben, wie wir selbst kürzlich zeigen konnten (Hostettler et al., 2011). Solche Geräte führen in erster Linie zum Erfolg, wenn von RV, idealerweise bis TLC, geatmet wird, wenn möglich mit variablem, vorgegebenem Widerstand, da bei RV am meisten, bei TLC am wenigsten inspiratorische Kraft vorhanden ist. Auch sollte das Gerät über ein Feedback bezüglich Druck und/oder Fluss und über eine Aufzeichnung des Trainings verfügen. Dies ist z.T. beim RespiFit® (Biegler, Mauerbach, Österreich), welches vor allem in der Klinik eingesetzt wird, gegeben.

Ein Atmungs-Ausdauertraining mittels normokapnischer Hyperpnoe braucht eine ständige CO₂-Zufuhr, um eine Hyperventilation zu vermeiden. Dies kann mittels kontrollierter CO₂-Zufuhr aus einer Gasflasche geschehen oder mit einem einfachen, zusätzlichen Totraum (analog eines Schnorchels mit grossem Durchmesser). Ersteres ist aufwändig, letzteres wenig kontrolliert und kann daher trotzdem zu einer Hypo- oder Hyperkapnie führen. Alternativ kann ein Gerät mit kontrollierter, partieller Rückatmung verwendet werden, welches Tiefe und Frequenz der Atmung vorgibt, mittels Feedback-Kontrolle Normokapnie gewährleistet und auch die Trainings aufzeichnet (SpiroTiger®, iddiag, Volketswil, Schweiz). Mittels Hyperpnoe-Training verbessern Gesunde ihre Atmungsmuskulatur, d.h. MIP und MEP, in der Regel nicht, hingegen wird die Atmungsmuskelausdauer verbessert, die Milchsäure-Akkumulation im Blut während intensivem Atmen reduziert und die Atmung wird subjektiv als weniger anstrengend wahrgenommen (Verges et al., 2008).

Effekte eines spezifischen Atmungsmuskeltrainings auf die körperliche Leistungsfähigkeit

Nun stellt sich die Frage, ob ein isoliertes Training der Atmungsmuskulatur einen positiven Effekt auf die körperliche Leistungsfähigkeit hat und falls ja, welche Form von Training die effektivste ist. Mechanistisch gedacht, kann man sich vorstellen, dass eine reduzierte Ermüdbarkeit der Atmungsmuskulatur und/oder eine Veränderung des metabolischen Milieus innerhalb der Atmungsmuskulatur zu einer Verminderung des zuvor beschriebenen Metaboreflexes und somit zu einer Leistungsverbesserung führen kann.

Tatsächlich weisen MIP-Messungen darauf hin, dass die Ermüdbarkeit der Atmungsmuskulatur nach einem Atmungsmuskel-Krafttraining beim Rudern (Volianitis et al., 2001) und Radfahren (Romer et al., 2002b) reduziert ist. Unsere Gruppe konnte erstmals mittels Nervenstimulation bei gut trainierten Personen eine reduzierte Ermüdbarkeit der Atmungsmuskulatur nach einem Atmungsmuskel-Ausdauertraining bei intensivem Radfahren zeigen (Verges et al., 2007), wobei die Leistung speziell in jenem Kollektiv von Probanden verbessert wurde, welches vor der Trainingsphase eine signifikante Atmungsmuskel-Ermüdung ($\geq 10\%$ -ige $P_{di,tw}$ - resp. $P_{ga,tw}$ -Abnahme) aufwies. Dies könnte bedeuten, dass die reduzierte Ermüdung den Metaboreflex später oder weniger ausgeprägt auslöste, dadurch die Vasokonstriktion und Blutflussreduktion in der Beinmuskulatur geringer ausfiel und die Leistung deshalb verbessert wurde. Dass die Metaboreflex-auslösende Milchsäure weniger akkumuliert während intensivem Atmen nach Atmungsausdauertraining (Verges et al., 2008), ist mit diesem Mechanismus ebenfalls vereinbar. Auch Studien, in welchen Probanden ein Atmungsmuskel-Krafttraining durchführten, weisen darauf hin, dass die Reduktion dieses Metaboreflexes einer Leistungsverbesserung zugrundeliegen könnte (McConnell and Lomax, 2006; Witt et al. 2007).

In der Tat zeigen viele Atmungsmuskel-Trainings-Studien signifikante Leistungsverbesserungen beim Radfahren (Boutellier und Piwko, 1992; Boutellier et al., 1992; Spengler et al., 1999; Markov et al., 2001; Sonetti et al., 2001; Stuessi et al., 2001; McMahon et al., 2002; Gething et al., 2004; Holm et al., 2004; Enright et al., 2006; Guenette et al., 2006; Johnson et al., 2007; Bailey et al., 2010), Laufen (Hanel et al., 1991; Chatham et al., 1999; Edwards et al., 2004; Aznar-Lain et al., 2007; Leddy et al., 2007; Tong et al., 2008; Nicks et al., 2009; Mickleborough et al., 2010), Schwimmen (Lindholm et al., 2007; Ray et al., 2008; Wylegala et al., 2007; Kilding et al., 2009; Ray et al., 2010) und Rudern (Volianitis et al., 2001; Griffiths et al., 2007), während in gewissen Studien oder Tests keine Veränderung der Leistungsfähigkeit nachgewiesen werden konnte, sowohl beim Radfahren (Morgan et al., 1987; Fairbairn et al., 1991; Markov et al., 1996; Spengler et al., 1999; Stüssi et al., 2001; McMahon et al., 2002; Romer et al., 2002; Holm et al., 2004; Johnson et al., 2007; Verges et al., 2007; Verges et al., 2008; Brown et al., 2010; Esposito et al., 2010), als auch beim Laufen (Belman et al., 1988; Hart et al., 2001; Romer et al., 2002; Williams et al., 2002; Downey et al., 2007; Aznar-Lain et al., 2007; Sperlich et al., 2009), Schwimmen (Wells et al., 2005; Kilding et al., 2009) und Rudern (Griffiths et al., 2007; Riganas et al., 2008).

Es fragt sich nun, worin sich die Studien mit positiven und negativen Resultaten unterscheiden. Ein wichtiger Faktor scheint die *Testart* zu sein. So fällt zum Beispiel auf, dass Stufentests nur in knapp $\frac{1}{4}$ der Fälle signifikante Verbesserungen (durchschnittlich 12%) zeigten, während sich die Leistung in rund $\frac{2}{3}$ der Time Trial Studien (um 4%) und in $\frac{3}{4}$ der constant-load Studien (um 34%) signifikant verbesserte. Bemerkenswert ist, dass bei Stufentests häufig auch dann keine Verbesserungen zu sehen sind, wenn sich im gleichen Kollektiv die Leistung im Time Trial oder constant-load Test verbessert. Das heisst, dass ein Stufentest nicht geeignet ist, um den Erfolg eines Atmungsmuskel-Trainings bezüglich Ausdauerleistungsfähigkeit zu überprüfen. Das geringere Verbesserungspotenzial in Time Trials gegenüber constant-load Tests könnte möglicherweise durch die unterschiedliche Häufigkeit der vertretenen *Sportart* beeinflusst sein, da in den Time Trials kaum Läu-

fer, und in constant-load Tests keine Ruderer untersucht wurden. Andererseits könnte auch die *Testdauer* das Ergebnis beeinflussen. So variieren die Dauer der Time Trials und der constant-load Tests zwischen rund 2 und 60 min, die durchschnittliche Testdauer war jedoch in Time Trials mit 14 min tiefer als in constant-load Tests mit 23 min. Auch der unterschiedliche *Fitnesszustand* der Probandenkollektive könnte die Testergebnisse beeinflusst haben. Bekannt ist, dass Athleten, z.B. Marathonläufer (Eastwood et al. 2001), eine grössere Atmungsausdauer haben als unспортliche Personen, dies interessanterweise bei gleicher Kraft der inspiratorischen Muskulatur. Andererseits ist nicht bekannt, ob sich dieser Unterschied in Bezug auf die Limitierung einer Ganzkörperaktivität durch die Atmungs- vs. Beinmuskelermüdung auswirkt, denn auch die Beinmuskulatur von Athleten ist ausdauernder. Auch ist der Vergleich des Fitnesszustandes der Probanden zwischen den Studien aufgrund der unterschiedlichen Fitness-Angaben und Sportarten schwierig anzustellen.

Hingegen könnte ein weiteres Charakteristikum des Probandenkollektivs, nämlich das *Geschlecht*, die Ergebnisse ebenfalls beeinflussen. So wurde zum Beispiel erst kürzlich gezeigt, dass das Zwerchfell weiblicher Athleten weniger ermüdet als dasjenige männlicher Athleten bei sonst gleichen Bedingungen (Guenette et al., 2010), wobei die vorliegenden Atmungstrainings-Studien mit einer Ausnahme entweder männliche oder gemischte Probandenkollektive enthalten. Allerdings muss auch erwähnt werden, dass sogar bei homogenen Probandenkollektiven inter-individuelle Unterschiede auffallen. Wir und andere haben nämlich (mittels Nervenstimulation) festgestellt, dass bei gegebenem Leistungsprotokoll im Schnitt nur rund 70% der Probanden eine signifikante Ermüdung der Atmungsmuskulatur entwickeln (Babcock et al., 1996; Mador and Dahuja, 1996; Verges et al., 2007; Guenette et al., 2010; Kabitz et al., 2010; Walker et al., 2011) und somit muskulär von einem Atmungstraining profitieren könnten. Die Ursachen oder definierenden Faktoren dieser inter-individuellen Unterschiede sind jedoch noch unbekannt. Ob sich die Anzahl Personen mit und ohne Atmungsmuskelermüdung in den Studien mit positiven und negativen Resultaten unterscheiden, bleibt allerdings offen, da in den meisten Trainingsstudien keine objektiven Atmungsmuskelermüdungs-Messungen durchgeführt wurden. Schliesslich sollte erwähnt werden, dass nicht alle Atmungstrainingsstudien Placebo-/Kontrollgruppen führten, was zu einem falsch positiven Bild führen könnte. Vergleicht man jedoch die nicht-signifikanten Differenzen der Trainingsgruppen mit denjenigen der Placebo-/Kontrollgruppen, so «verbessern» sich die Resultate in Time Trials um durchschnittlich +1% resp. +0.5%, die in constant-load Tests um +7% resp. +0.5%. Dies könnte sogar darauf hinweisen, dass die zum Teil kleinen Probandenzahlen zu nicht-signifikanten Ergebnissen in den Trainings- verglichen zu den Placebo-/Kontrollgruppen führten.

Zu guter Letzt muss aufgrund der mannigfaltigen Unterschiede zwischen den Studien momentan auch offen bleiben, welchen Einfluss die *Trainingsart* auf das Verbesserungspotenzial der Leistung hat. Bei beiden Trainingsarten gehen rund $\frac{2}{3}$ aller Ausdauertests (Time Trial und constant-load Tests) mit signifikanten Verbesserungen von durchschnittlich rund 25% einher. Aufgrund des direkten Vergleichs der beiden Trainingsarten innerhalb einer einzigen Studie scheint jedoch, dass Atmungsmuskel-Ausdauertraining gegenüber einem mehr kraft-orientierten Training für subjektive Veresserungen vorteilhafter sei, d.h. zum Beispiel für die Verbesserung der Wahrnehmung von Atmungsanstrengung oder Atemnot, also dem Gefühl, relativ zur Leistung nicht genügend Luft zu bekommen oder ausser Atem zu sein (Verges et al., 2009). Ein Atmungsmuskel-Ausdauertraining ist daher auch sinnvoll einzusetzen bei Personen, welche eine sportliche Tätigkeit wiederaufnehmen möchten, sich aber durch das rasche «ausser Atem kommen» im Rahmen körperlicher Aktivität behindert fühlen, wie wir kürzlich zeigen konnten (Frank et al., 2011).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Mehrheit der Studien signifikante Verbesserungen der Ausdauerleistung nach einem spezifischen Training der Atmungsmuskulatur zeigen. Allerdings müssen sowohl studienspezifische wie auch athletenspe-

zifische Faktoren detailliert analysiert werden, um einen einzelnen Athleten oder Hobbysportler sportart- und distanz-spezifisch beraten zu können hinsichtlich des möglichen Nutzens eines Trainings der Atmungsmuskulatur. Empfehlenswert ist ein Atmungsausdauertraining für jene Personen, welche sich bei gewissen Leistungen durch das unangenehme Gefühl, relativ zur Leistung nicht genügend Luft zu bekommen oder rasch ausser Atem zu sein, in ihrer Leistungsfähigkeit eingeschränkt fühlen.

Dank

Ich danke Sabine Illi bestens für die kritische Durchsicht dieses Manuskriptes, sowie dem Schweizerischen Nationalfonds für seine langjährige Unterstützung der Forschung rund um das Thema der Interaktion von Atmungskontrolle, Atmungsmuskelermüdung und Leistungsfähigkeit (31-54071.98, 31-61941.00, 3100A0-013716, 3200B0-116777).

Korrespondenzadresse:

Christina M. Spengler, Sportphysiologie, Universität und ETH Zürich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zürich, Schweiz, Tel. +41 (0)44 635 50 07, Fax +41 (0)44 635 68 14, E-Mail: spengler@ethz.ch

Literaturverzeichnis

- Aaron E.A., Johnson B.D., Seow C.K., Dempsey J.A. 1992a: Oxygen cost of exercise hyperpnea: measurement. *J. Appl. Physiol.* 72: 1810–1817.
- Aaron E.A., Seow K.C., Johnson B.D., Dempsey J.A. 1992b: Oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J. Appl. Physiol.* 72: 1818–1825.
- American Thoracic Society/European Respiratory Society. 2002: ATS/ERS Statement on respiratory muscle testing. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 166: 518–624.
- American Thoracic Society/European Respiratory Society. 1995b: Contribution of diaphragmatic power output to exercise-induced diaphragm fatigue. *J. Appl. Physiol.* 78: 1710–1719.
- Aznar-Lain S., Webster A.L., Canete S., San Juan A.F., Lopez Mojares L.M., Perez M., Lucia A., Chicharro J.L. 2007: Effects of inspiratory muscle training on exercise capacity and spontaneous physical activity in elderly subjects: a randomized controlled pilot trial. *Int. J. Sports Med.* 28: 1025–1029.
- Babcock, M.A., Pegelow D.F., Johnson B.D., Dempsey J.A. 1996: Aerobic fitness effects on exercise-induced low-frequency diaphragm fatigue. *J. Appl. Physiol.* 81: 2156–2164.
- Babcock M.A., Pegelow D.F., Taha B.H., Dempsey J.A. 1998: High frequency diaphragmatic fatigue detected with paired stimuli in humans. *Med. Sci. Sports Exerc.* 30: 506–511.
- Babcock M.A., Pegelow D.F., Harms C.A., Dempsey J.A. 2002: Effects of respiratory muscle unloading on exercise-induced diaphragm fatigue. *J. Appl. Physiol.* 93: 201–206.
- Bailey S.J., Romer L.M., Kelly J., Wilkerson D.P., DiMenna F.J., Jones A.M. 2010: Inspiratory muscle training enhances pulmonary O₂ uptake kinetics and high-intensity exercise tolerance in humans. *J. Appl. Physiol.* 109: 457–468.
- Belman M.J., Gaesser G.A. 1988: Ventilatory muscle training in the elderly. *J. Appl. Physiol.* 64: 899–905.
- Boutellier U., Buchel R., Kundert A., Spengler C. 1992: The respiratory system as an exercise limiting factor in normal trained subjects. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 65:347–353.
- Boutellier U., Piwko P. 1992: The respiratory system as an exercise limiting factor in normal sedentary subjects. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 64: 145–152.
- Brown P.I., Sharpe G.R., Johnson M.A. 2010: Loading of trained inspiratory muscles speeds lactate recovery kinetics. *Med. Sci. Sports Exerc.* 42: 1103–1112.
- Chevrolet J.C., Tschopp J.M., Blanc Y., Rochat T., Junod A.F. 1993: Alterations in inspiratory and leg muscle force and recovery pattern after a marathon. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25: 501–507.
- Davies C.T., Thompson M.W. 1979: Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.* 41: 233–245.
- Dempsey J.A., Amann M., Romer L.M., Miller J.D. 2008: Respiratory system determinants of peripheral fatigue and endurance performance. *Med. Sci. Sports. Exerc.* 40: 457–461.
- Downey A.E., Chenoweth L.M., Townsend D.K., Ranum J.D., Ferguson C.S., Harms C.A. 2007: Effects of inspiratory muscle training on exercise responses in normoxia and hypoxia. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 156: 137–146.
- Eastwood P.R., Hillman D.R., Finucane K.E. 2001: Inspiratory muscle performance in endurance athletes and sedentary subjects. *Respirology* 6: 95–104.
- Edwards A.M., Cooke C.B. 2004: Oxygen uptake kinetics and maximal aerobic power are unaffected by inspiratory muscle training in healthy subjects where time to exhaustion is extended. *Eur. J. Appl. Physiol.* 93: 139–144.
- Esposito F., Limonta E., Alberti G., Veicsteinas A., Ferretti G. 2010: Effect of respiratory muscle training on maximum aerobic power in normoxia and hypoxia. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 170: 268–272.
- Fairbairn M.S., Coutts K.C., Pardy R.L., McKenzie D.C. 1991: Improved respiratory muscle endurance of highly trained cyclists and the effects on maximal exercise performance. *Int. J. Sports Med.* 12: 66–70.
- Frank I., Briggs R., Spengler C.M. 2011: Respiratory muscles, exercise performance, and health in overweight and obese subjects. *Med. Sci. Sports Exerc.* 43: 714–727.
- Gandevia S.C. 2001: Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol. Rev.* 81: 1725–1789.
- Gething A.D., Williams M., Davies B. 2004: Inspiratory resistive loading improves cycling capacity: a placebo controlled trial. *Br. J. Sports Med.* 38: 730–736.
- Griffiths L.A., McConnell A.K. 2007: The influence of inspiratory and expiratory muscle training upon rowing performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 99: 457–466.
- Guenette J.A., Martens A.M., Lee A.L., Tyler G.D., Richards J.C., Foster G.E., Warburton D.E., Sheel A.W. 2006: Variable effects of respiratory muscle training on cycle exercise performance in men and women. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 31: 159–166.
- Guenette J.A., Romer L.M., Querido J.S., Chua R., Eves N.D., Road J.D., McKenzie D.C., Sheel A.W. 2010: Sex differences in exercise-induced diaphragmatic fatigue in endurance-trained athletes. *J. Appl. Physiol.* 109: 35–46.
- Hamnegård C.H., Wragg S., Kyroussis D., Mills G.H., Polkey M.I., Moran J., Road J., Bake B., Green M., Moxham J. 1996: Diaphragm fatigue following maximal ventilation in man. *Eur. Respir. J* 9: 241–247.
- Hanel B., Secher N.H. 1991: Maximal oxygen uptake and work capacity after inspiratory muscle training: a controlled study. *J. Sports Sci.* 9: 43–52.
- Harms C.A., Wetter T.J., McClaran S.R., Pegelow D.F., Nickle G.A., Nelson W.B., Hanson P., Dempsey J.A. 1998: Effects of respiratory muscle work on cardiac output and its distribution during maximal exercise. *J. Appl. Physiol.* 85: 609–618.
- Hart N., Sylvester K., Ward S., Cramer D., Moxham J., Polkey M.I. 2001: Evaluation of an inspiratory muscle trainer in healthy humans. *Respir. Med.* 95: 526–531.
- Hill N.S., Jacoby C., Farber H.W. 1991: Effect of an endurance triathlon on pulmonary function. *Med. Sci. Sports Exerc.* 23: 1260–1264.
- Holm P., Sattler A., Fregosi R.F. 2004: Endurance training of respiratory muscles improves cycling performance in fit young cyclists. *BMC Physiol.* 4: 9.
- Hostettler S., Illi S.K., Mohler E., Aliverti A., Spengler C.M. 2011: Chest wall volume changes during inspiratory loaded breathing. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 175: 130–139.
- Johnson B.D., Babcock M.A., Suman O.E., Dempsey J.A. 1993: Exercise-induced diaphragmatic fatigue in healthy humans. *J. Physiol.* 460: 385–405.
- Johnson M.A., Sharpe G.R., Brown P.I. 2007: Inspiratory muscle training improves cycling time-trial performance and anaerobic work capacity but not critical power. *Eur. J. Appl. Physiol.* 101: 761–770.
- Kabitz H.J., Walker D., Schwoerer A., Walterspacher S., Sonntag F., Schlager D., Roecker K., Windisch W. 2010: Diaphragmatic fatigue is counterbalanced during exhaustive long-term exercise. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 172: 106–113.
- Kabitz H.J., Walker D.J., Schwoerer A., Schlager D., Walterspacher S., Hendrik Storre J., Roecker K., Windisch W., Vergès S., Spengler C.M.

- 2011: Biometric approximation of diaphragmatic contractility during sustained hyperpnea. *Respir. Physiol. Neurobiol.* [Epub ahead of print]
- Ker J.A., Schultz C.M. 1996: Respiratory muscle fatigue after an ultra-marathon measured as inspiratory task failure. *Int. J. Sports Med.* 17: 493–496
- Kilding A.E., Brown S., McConnell A.K. 2010: Inspiratory muscle training improves 100 and 200 m swimming performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 108: 505–511.
- Kyroussis D., Mills G.H., Polkey M.I., Hamnegard C.H., Koulouris N., Green M., Moxham J. 1996: Abdominal muscle fatigue after maximal ventilation in humans. *J. Appl. Physiol.* 81: 1477–1483.
- Leddy J.J., Limprasertkul A., Patel S., Modlich F., Buyea C., Pendergast D.R., Lundgren C.E. 2007: Isocapnic hyperpnea training improves performance in competitive male runners. *Eur. J. Appl. Physiol.* 99: 665–676.
- Leith D.E., Bradley M. 1976: Ventilatory muscle strength and endurance training. *J. Appl. Physiol.* 41: 508–516.
- Lindholm P., Wylegala J., Pendergast D.R., Lundgren C.E. 2007: Resistive respiratory muscle training improves and maintains endurance swimming performance in divers. *Undersea Hyperb. Med.* 34: 169–180.
- Mador M.J., Acevedo F.A. 1991a: Effect of respiratory muscle fatigue on breathing pattern during incremental exercise. *Am. Rev. Respir. Dis.* 143: 462–468.
- Mador M.J., Acevedo F.A. 1991b: Effect of respiratory muscle fatigue on subsequent exercise performance. *J. Appl. Physiol.* 70: 2059–2065.
- Mador M.J., Magalang U.J., Rodis A., Kufel T.J. 1993: Diaphragmatic fatigue after exercise in healthy human subjects. *Am. Rev. Respir. Dis.* 148: 1571–1575.
- Mador M.J., Dahuja M. 1996: Mechanisms for diaphragmatic fatigue following high-intensity leg exercise. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 154: 1484–1489.
- Mador M.J., Khan S., Kufel T.J. 2002: Bilateral anterolateral magnetic stimulation of the phrenic nerves can detect diaphragmatic fatigue. *Chest.* 121: 452–458.
- Markov G., Orler R., Boutellier U. 1996: Respiratory training, hypoxic ventilatory response and acute mountain sickness. *Respir. Physiol.* 105: 179–186.
- Markov G., Spengler C.M., Knopfli-Lenzin C., Stuessi C., Boutellier U. 2001: Respiratory muscle training increases cycling endurance without affecting cardiovascular responses to exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 85: 233–239.
- Martin B., Heintzelman M., Chen H.I. 1982: Exercise performance after ventilatory work. *J. Appl. Physiol.* 52: 1581–1585.
- McConnell A.K., Lomax M. 2006: The influence of inspiratory muscle work history and specific inspiratory muscle training upon human limb muscle fatigue. *J. Physiol.* 577: 445–457.
- McKenzie D.K., Allen G.M., Butler J.E., Gandevia S.C. 1997: Task failure with lack of diaphragm fatigue during inspiratory resistive loading in human subjects. *J. Appl. Physiol.* 82: 2011–2019.
- McMahon M.E., Boutellier U., Smith R.M., Spengler C.M. 2002: Hyperpnea training attenuates peripheral chemosensitivity and improves cycling endurance. *J. Exp. Biol.* 205: 3937–3943.
- Mickleborough T.D., Nichols T., Lindley M.R., Chatham K., Ionescu A.A. 2010: Inspiratory flow resistive loading improves respiratory muscle function and endurance capacity in recreational runners. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 20: 458–468.
- Morgan D.W., Kohrt W.M., Bates B.J., Skinner J.S. 1987: Effects of respiratory muscle endurance training on ventilatory and endurance performance of moderately trained cyclists. *Int. J. Sports Med.* 8: 88–93.
- Nicks C.R., Morgan D.W., Fuller D.K., Caputo J.L. 2009: The influence of respiratory muscle training upon intermittent exercise performance. *Int. J. Sports Med.* 30: 16–21.
- Ray A.D., Pendergast D.R., Lundgren C.E. 2008: Respiratory muscle training improves swimming endurance at depth. *Undersea Hyperb. Med.* 35: 185–196.
- Ray A.D., Pendergast D.R., Lundgren C.E. 2010: Respiratory muscle training reduces the work of breathing at depth. *Eur. J. Appl. Physiol.* 108: 811–820.
- Renggli A.S., Verges S., Notter D.A., Spengler C.M. 2008: Development of respiratory muscle contractile fatigue in the course of hyperpnoea. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 164: 366–372.
- Riganas C.S., Vrabas I.S., Christoulas K., Mandroukas K. 2008: Specific inspiratory muscle training does not improve performance or $\dot{V}O_{2\max}$ levels in well trained rowers. *J. Sports Med. Phys. Fitness.* 48: 285–292.
- Rohrbach M., Perret C., Kayser B., Boutellier U., Spengler C.M. 2003: Task failure from inspiratory resistive loaded breathing: a role for inspiratory muscle fatigue? *Eur. J. Appl. Physiol.* 90: 405–410.
- Romer L.M., McConnell A.K., Jones D.A. 2002: Effects of inspiratory muscle training on time-trial performance in trained cyclists. *J. Sports Sci.* 20: 547–562.
- Romer L.M., McConnell A.K., Jones D.A. 2002a: Effects of inspiratory muscle training upon recovery time during high intensity, repetitive sprint activity. *Int. J. Sports Med.* 23: 353–360.
- Romer L.M., McConnell A.K., Jones D.A. 2002b: Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists: effects of inspiratory muscle training. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 785–792.
- Similowski T., Straus C., Attali V., Duguet A., Derenne J.P. 1998: Cervical magnetic stimulation as a method to discriminate between diaphragm fatigue and rib cage muscle fatigue. *J. Appl. Physiol.* 84: 1692–1700.
- Sonetti D.A., Wetter T.J., Pegelow D.F., Dempsey J.A. 2001: Effects of respiratory muscle training versus placebo on endurance exercise performance. *Respir. Physiol.* 127: 185–199.
- Spengler C.M., Roos M., Laube S.M., Boutellier U. 1999: Decreased exercise blood lactate concentrations after respiratory endurance training in humans. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 79: 299–305.
- Sperlich B., Fricke H., de Marees M., Linville J.W., Mester J. 2009: Does respiratory muscle training increase physical performance? *Mil. Med.* 174: 977–982.
- Stuessi C., Spengler C.M., Knopfli-Lenzin C., Markov G., Boutellier U. 2001: Respiratory muscle endurance training in humans increases cycling endurance without affecting blood gas concentrations. *Eur. J. Appl. Physiol.* 84: 582–586.
- Taylor B.J., How S.C., Romer L.M. 2006: Exercise-induced abdominal muscle fatigue in healthy humans. *J. Appl. Physiol.* 100: 1554–1562.
- Taylor B.J., Romer L.M. 2008: Effect of expiratory muscle fatigue on exercise tolerance and locomotor muscle fatigue in healthy humans. *J. Appl. Physiol.* 104: 1442–1451.
- Tong T.K., Fu F.H., Chung P.K., Eston R., Lu K., Quach B., Nie J., So R. 2008: The effect of inspiratory muscle training on high-intensity, intermittent running performance to exhaustion. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 33: 671–681.
- Verges S., Kruttli U., Stahl B., Frigg R., Spengler C.M. 2008: Respiratory control, respiratory sensations and cycling endurance after respiratory muscle endurance training. *Adv. Exp. Med. Biol.* 605: 239–244.
- Tong T.K., Fu F.H., Chung P.K., Eston R., Lu K., Quach B., Nie J., So R. 2008: The effect of inspiratory muscle training on high-intensity, intermittent running performance to exhaustion. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 33: 671–681.
- Verges S., Boutellier U., Spengler C.M. 2008: Effect of respiratory muscle endurance training on respiratory sensations, respiratory control and exercise performance. A 15-year experience. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 161: 16–22.
- Verges S., Kruttli U., Stahl B., Frigg R., Spengler C.M. 2008: Respiratory control, respiratory sensations and cycling endurance after respiratory muscle endurance training. *Adv. Exp. Med. Biol.* 605: 239–244.
- Verges S., Lenherr O., Haner A., Schulz C., Spengler C.M. 2007: Increased fatigue resistance of respiratory muscles during exercise after respiratory muscle endurance training. *Am. J. Physiol. Regulatory Integrative Comp. Physiol.* 292: 1246–1253.
- Verges S., Schulz C., Perret C., Spengler C.M. 2006: Impaired abdominal muscle contractility after high-intensity exhaustive exercise assessed by magnetic stimulation. *Muscle Nerve.* 34: 423–430.
- Verges S., Sager Y., Erni C., Spengler C.M. 2007: Expiratory muscle fatigue impairs exercise performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 101: 225–232.
- Walker D.J., Waltersbacher S., Schlager D., Ertl T., Roecker K., Windisch W., Kabitz H.J. 2011: Characteristics of diaphragmatic fatigue during exhaustive exercise until task failure. *Respir. Physiol. Neurobiol.* 176: 14–20.
- Volianitis S., McConnell A.K., Koutedakis Y., McNaughton L., Backx K., Jones D.A. 2001: Inspiratory muscle training improves rowing performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 33: 803–809.
- Wells G.D., Plyley M., Thomas S., Goodman L., Duffin J. 2005: Effects of concurrent inspiratory and expiratory muscle training on respiratory and exercise performance in competitive swimmers. *Eur. J. Appl. Physiol.* 94: 527–540.
- Williams J.S., Wongsathikun J., Boon S.M., Acevedo E.O. 2002: Inspiratory muscle training fails to improve endurance capacity in athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34: 1194–1198.
- Witt J.D., Guenette J.A., Rupert J.L., McKenzie D.C., Sheel A.W. 2007: Inspiratory muscle training attenuates the human respiratory muscle metaboreflex. *J. Physiol.* 584: 1019–1028.
- Wylegala J.A., Pendergast D.R., Gosselin L.E., Warkander D.E., Lundgren C.E. 2007: Respiratory muscle training improves swimming endurance in divers. *Eur. J. Appl. Physiol.* 99: 393–404.