

Atemmuskeltraining: State-of-the-Art

Respiratory Muscle Training: State of the Art

Autoren

O. Göhl¹, D. J. Walker², S. Walterspacher², D. Langer³, C. M. Spengler⁴, T. Wanke⁵, M. Petrovic⁵, R.-H. Zwick⁶, S. Stieglitz⁷, R. Glöckl⁸, D. Dellweg⁹, H.-J. Kabitz²

Institute

Die Institutsangaben sind am Ende des Beitrags gelistet.

eingereicht 18.8.2015
akzeptiert nach Revision
10.11.2015

Bibliografie

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0041-109312>
Pneumologie 2016; 70: 37–48
© Georg Thieme Verlag KG
Stuttgart · New York
ISSN 0934-8387

Korrespondenzadresse

Dr. phil. Oliver Göhl
Rehaklinik Heidelberg-
Königstuhl
Kohlhof 8
69117 Heidelberg
o.goehl@rehaklinik-koenigstuhl.de

Zusammenfassung

Spezifisches Atemmuskeltraining (IMT) ist in der Lage, die Funktion der Atemmuskulatur zu verbessern. Anhand der Studienlage und klinischen Praxis haben sich 3 Methoden etabliert: 1.) kontrollierte Stenoseatmung („resistive load“), 2.) „threshold load“ und 3.) normokapnische Hyperpnoe. Die jeweiligen Methoden und zugehörigen Trainingsgeräte weisen spezifische Charakteristika auf. Die Einleitung eines IMT erfordert eine vorausgehende Diagnostik der Atemmuskelfunktion und eine detaillierte individualisierte Trainingseinweisung und -anleitung. Ziel dieser Übersichtsarbeit ist es, anhand der aktuell verfügbaren Literatur die unterschiedlichen IMT-Methoden bei den wichtigsten Indikationsgebieten zu beleuchten und kritisch zu diskutieren. Bei den neuromuskulären Erkrankungen werden Muskeldystrophien, spinale Muskelatrophien, amyotrophe Lateralsklerose, Phrenicusparesen und Verletzungen des Rückenmarks dargestellt. Zudem werden die Bereiche interstitielle Lungenerkrankungen, Sarkoidose, Linksherzinsuffizienz, pulmonal-arterielle Hypertonie, Kyphoskoliose und Adipositas beleuchtet. Bei den obstruktiven Atemwegs- und Lungenerkrankungen werden COPD, Asthma, Mukoviszidose und „Non-CF-Bronchiektasen“ aufgearbeitet. Abschließend finden sich Ausarbeitungen für den Bereich Weaning vom Respirator und im Zusammenhang mit körperlicher Aktivität.

Hintergrund

Die Atempumpe bildet das Kernstück des ventilatorischen Systems, welches den An- und Abtransport der Atemgase sicherstellt (Abb. 1) [1,2]. Sie ist durch ein empfindliches Gleichgewicht zwischen der verfügbaren Kapazität und der ihr auferlegten Last gekennzeichnet (Abb. 2) [1,2]. Einschränkungen der Zwerchfellfunktion oder

Abstract

Specific respiratory muscle training (IMT) improves the function of the inspiratory muscles. According to literature and clinical experience, there are 3 established methods: 1.) resistive load 2.) threshold load and 3.) normocapnic hyperpnea. Each training method and the associated devices have specific characteristics. Setting up an IMT should start with specific diagnostics of respiratory muscle function and be followed by detailed individual introduction to training. The aim of this review is to take a closer look at the different training methods for the most relevant indications and to discuss these results in the context of current literature. The group of neuromuscular diseases includes muscular dystrophy, spinal muscular atrophy, amyotrophic lateral sclerosis, paralysis of the phrenic nerve, and injuries to the spinal cord. Furthermore, interstitial lung diseases, sarcoidosis, left ventricular heart failure, pulmonary arterial hypertension (PAH), kyphoscoliosis and obesity are also discussed in this context. COPD, asthma, cystic fibrosis (CF) and non-CF-bronchiectasis are among the group of obstructive lung diseases. Last but not least, we summarize current knowledge on weaning from respirator in the context of physical activity.

der nicht-diaphragmalen Inspirationsmuskulatur können dieses Gleichgewicht entscheidend verschieben und zu chronischer Überlastung führen. In der Folge wird die Ventilation gedrosselt, um ein akutes Atempumpenversagen zu verhindern [1,2]. Es entsteht eine alveoläre Hypoventilation mit Hyperkapnie und Hypoxämie im Sinne einer hyperkapnischen und hypoxischen respiratorischen Insuffizienz [1,2]. Durch eine Diagnostik

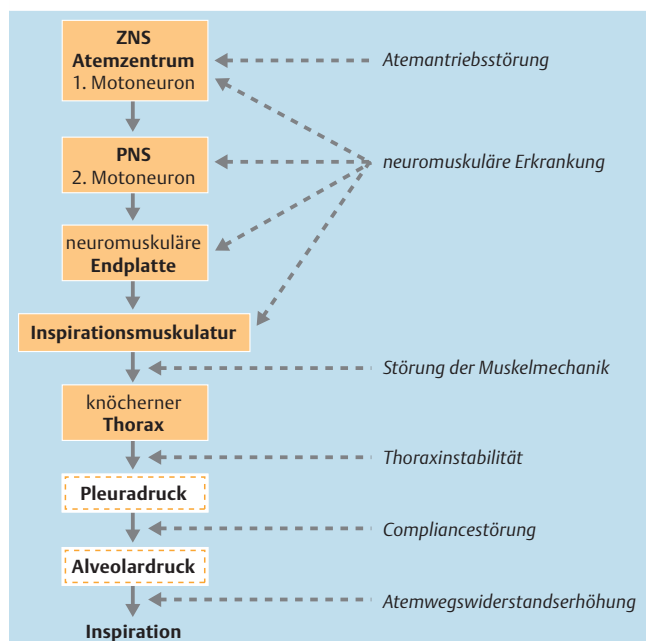


Abb. 1 Die Atempumpe mit unterschiedlichen Lokalisationen möglicher Funktionsstörungen [2].

der Atemmuskelfunktion ist zu klären, ob eine Einschränkung der Atemmuskulatur und/oder erhöhte Beanspruchung vorliegen und wie ausgeprägt diese ausfallen [1]. In dieser Übersichtsarbeit wird die Beeinflussung der Funktion der (inspiratorischen) Atemmuskulatur durch ein systematisches Training bei unterschiedlichen Voraussetzungen und Krankheitsbildern dargestellt.

Atemmuskultraining

Die Atemmuskulatur besteht aus quergestreifter Muskulatur. Sie unterliegt daher denselben physiologischen Gesetzmäßigkeiten wie die übrige Skelettmuskulatur [3] und ist grundsätzlich bzgl. Kraft und Ausdauer trainierbar [4–6]. Für beide Modalitäten ist eine exakte Dosierung der Trainingslast („targeting“) erforderlich. Aufgrund (patho-) physiologischer Überlegungen kommt dem inspiratorischen Atemmuskultraining (IMT) gegenüber dem expiratorischen Atemmuskultraining (EMT) bei Weitem die größere Bedeutung zu.

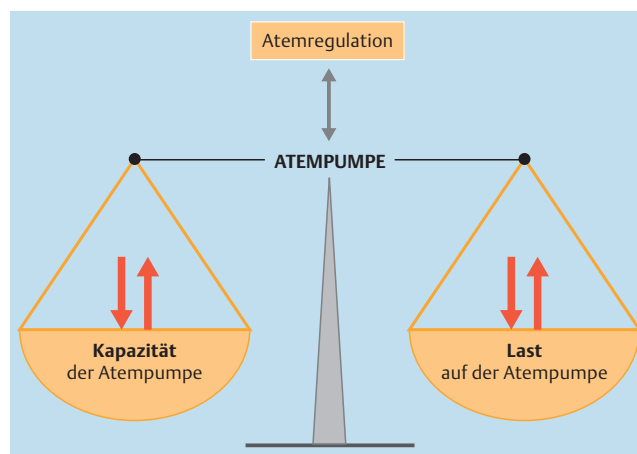


Abb. 2 Die Atempumpe und das empfindliche Gleichgewicht zwischen der ihr auferlegten Last und ihrer Kapazität [2].

Methoden

Anhand der verfügbaren Literatur und der klinischen Erfahrung haben sich die drei nachfolgend aufgeführten Trainingsmethoden etablieren können [5–8] (vgl. [Tab. 1](#)):

- ▶ kontrollierte Stenoseatmung („resistive load“) und „threshold load“ als Methoden des primär auf Kraftsteigerung abzielenden IMT: Kontraktionen (inspiratorisch) mit hohem Kraftaufwand und wenigen Wiederholungen.
- ▶ „Normokapnische Hyperpnoe“ als „Ausdauertraining“: Kontraktionen (in- und expiratorisch) mit niedrigem Kraftaufwand und vielen Wiederholungen.

Resistive Load

Zur Erzeugung eines spezifischen trainingswirksamen Widerstands, der mindestens 30% der maximal möglichen Inspirationskraft („ $P_{I\max}$ “) betragen sollte [5], wird durch eine definierte Stenose geatmet. Da hier der Widerstand vom aufgebauten Fluss abhängig ist, sollten die Trainingsgeräte den Atemfluss kontrollieren und einen Feedbackmechanismus besitzen („targeted resistive breathing“), der eine korrekte Durchführung des Trainings anzeigt [9]. Die neueste Generation dieser Geräte besitzt adaptive Stenosen, welche sich elektronisch dem Atemfluss anpassen. Hier wird jedoch zudem ein definierter Anfangswiderstand eingebaut, weshalb diese Geräte auch Komponenten des „threshold load“ (siehe unten) aufweisen.

Tab. 1 Charakteristika der verschiedenen Trainingsmethoden und Devices.

Trainingsmethode	Fokus	Kosten	Feedbacksystem	Speicherung Trainingsdaten	Hersteller
threshold Load	Kraft und Ausdauer	gering	nicht erforderlich	nein	z. B. Threshold IMT®; POWERbreathe® Medic
resistive load: kontrollierte Stenoseatmung	Kraft und Ausdauer	teuer	optisch	ja	z. B. Respifit S®
resistive load: adaptive Stenoseatmung	Kraft und Ausdauer	moderat	optisch	ja	z. B. Powerbreathe (K-Serie)
normokapnische Hyperpnoe	Ausdauer	teuer	optisch/akkustisch	ja	z. B. Spirotiger®

Threshold Load

Bei der Methode „threshold load“ muss zunächst statisch ein inspiratorischer Widerstand aufgebaut werden, bis eine vorher definierte Schwelle (engl.: threshold) erreicht wird. Anschließend ist eine Inspiration gegen den gleichbleibenden Widerstand möglich [10,11]. Der so erzeugte Widerstand, der mindestens 30% des P_{lmax} entsprechen sollte [5], ist unabhängig vom Atemfluss des Patienten. Daher ist zur korrekten Durchführung des Trainings kein Feedback-System erforderlich.

Normokapnische Hyperpnoe

Hier erfolgt eine schnelle und tiefe Ein- und Ausatmung. Um eine Hyperventilation mit konsekutiver Hypokapnie zu verhindern, wurden Trainingsgeräte entwickelt, welche durch partielle Rückatmung der Atemluft eine Normokapnie gewährleisten. Die Durchführung des Trainings ist koordinativ anspruchsvoll, sodass eine intensive Trainingseinweisung der Patienten notwendig ist; ein optisches/akustisches Feedback-System ist obligat. Anzustreben sind Trainingsintensitäten, die etwa 60% des Atemgrenzwertes (z.B. maximal voluntary ventilation; MVV) eines Patienten entsprechen [5,12,13].

IMT-Geräte

Bisher existieren zu wenig publizierte Daten, um den Einsatz der verschiedenen IMT-Methoden bei Patienten direkt miteinander zu vergleichen. Es können somit aktuell nur mit Einschränkung Empfehlungen gegeben werden, bei welchem Patientenkollektiv welche Methode eingesetzt werden sollte.

Umsetzung

Die Initiierung bzw. Optimierung eines IMT kann z.B. ideal im Rahmen eines pneumologischen Rehabilitationsprogrammes umgesetzt werden (● Tab.2). Zu Beginn sollten die Patienten über die physiologischen Veränderungen der Atemmuskulatur und die daraus resultierenden Prinzipien des IMT aufgeklärt werden. Des Weiteren sollten die Wirkmechanismen sowie die zu erwartenden Effekte vermittelt werden. Bei der Einweisung in das jeweilig verwendete Trainingsgerät sollten die Patienten neben Handhabung und Bedienung des Gerätes auch Informationen über die notwendigen Hygiene- und Reinigungsmaßnahmen erhalten. Weiterführende Informationen sind z.B. auf der Homepage www.atemmuskelttraining.com verfügbar.

IMT bei restriktiven Ventilationsstörungen

Neuromuskuläre Erkrankungen

Hierunter versteht man eine heterogene Gruppe von Krankheiten, welche nach der Ätiologie, dem klinischen Erscheinungsbild sowie der Lokalisation der Störung klassifiziert werden (vgl. ● Tab.3, ● Abb.3, ● Tab.4).

Wesentliches gemeinsames Kriterium ist die zumeist progrediente Muskelschwäche unterschiedlicher Geschwindigkeit und Ausprägung, die mit zunehmendem Lebensalter u.a. zu einer Atemmuskelschwäche und konsekutiv zur hyperkapnischen respiratorischen Insuffizienz führt.

Tab.2 Trainingsparameter eines initialen IMT Aufbauprogrammes.

Häufigkeit	5 – 7-mal pro Woche
Dauer	7-mal 2 Minuten (mit je 1 Minute Pause)
Intensität	initial ca. 30 % P _{lmax} (kontinuierliche Progression wie individuell möglich)
Trainingssteuerung (mod. Borg-Skala 0 – 10)	Atemkraftanstrengung: 4 – 6

P_{lmax} = maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck

Tab.3 Übersicht der neuromuskulären Erkrankungen (mod. nach [15]).

Erkrankungen des Muskels (Myopathien)	
Muskeldystrophie	z. B. Typ Duchenne, Typ Becker, Gliedergürteldystrophie
myotone Muskelerkrankung	z. B. myotone Dystrophie
entzündliche Myopathien	z. B. Polymyositis, Dermatomyositis
metabolische Myopathien	z. B. M. Pompe
Erkrankung der neuromuskulären Endplatte	z. B. Myasthenia gravis
Erkrankung des zentralen/peripheren Nervensystems	z. B. ALS (Amyotrophe Lateralsklerose), spinale Muskelatrophie, Phrenicusparese

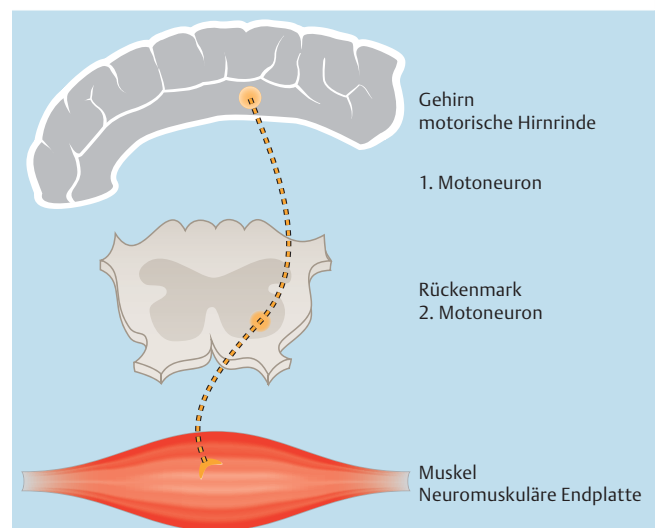


Abb.3 Das motorische Nervensystem [14].

Muskeldystrophien

Die zwei häufigsten Muskeldystrophien (beide „Beckengürtel-Typ“) sind: Typ Duchenne („maligne“) und Typ Becker-Kiener („benigne“) [16]. IMT in Form von resistive load erzielte hier Verbesserungen der Kraft als auch der Ausdauer der Atemmuskulatur sowie der Lebensqualität [17,18]. Es besteht eine Dosis/Wirkungs-Beziehung [19,20]. IMT erfolgte hierbei favorisiert täglich mit 70% des P_{lmax}; allerdings nur bei Patienten mit einer Vitalkapazität > 1 l (bzw. 25% soll) [17,18]. Das IMT sollte so früh wie möglich begonnen werden und zeigt auch im Langzeitverlauf günstige Ergebnisse [21].

Anhand der dünnen Datenlage zeigten sich bei diesem Patientenkollektiv weder für „normokapnische Hyperpnoe“ noch „threshold load“ signifikante Verbesserungen in Bezug auf die Atemmuskulaturkraft sowie die Vitalkapazität [22,23].

Spinale Muskelatrophien

Dies sind Erkrankungen, die auf einem Untergang der Vorderhornzellen im Rückenmark (zweites motorisches Neuron) beruhen. Publiziert sind lediglich Studien mit Verwendung von „resistive load“ [18,21,24]. Hierbei verbesserte sich sowohl die Atemmuskulaturkraft als auch die Dyspnoe [18,21]. Ein anhaltender Trainingseffekt konnte bei Kindern (bis zum 14. Lebensjahr) für 3 (Atemmuskulaturkraft) bzw. 12 Monate (Dyspnoe) erreicht werden [24].

Amyotrophe Lateralsklerose (ALS)

Bei dieser zumeist rasch progressiven Erkrankung degenerieren das 1. und 2. Motorneuron: Es kommt u.a. zu progredienten muskulären Funktionseinbußen – auch der Atemmuskulatur. Aktuell existieren nur wenige kontrollierte Studien zum IMT bei ALS. Threshold load verbessert hier die MVV [25], die Atemmuskulaturkraft kann (kurzfristig) minimal gesteigert werden [26]. Aussagen zur Beeinflussung der Lebensqualität und des weiteren Krankheitsverlaufs sind aktuell nicht möglich. Aufgrund der raschen Progredienz der Erkrankung erscheint der Stellenwert des IMT hierbei jedoch sehr fraglich – ggf. muss auch mit einer klinischen Verschlechterung gerechnet werden.

Phrenicusparesse

Tägliches IMT mittels resistive load (70% P_{lmax}) zeigte hier positive Effekte mit einer möglicherweise günstigen Beeinflussung auch beim Vorliegen einer respiratorischen Insuffizienz [27].

Verletzungen des Rückenmarks (hoher Querschnitt)

Zwar rechnen diese Erkrankungen streng genommen nicht zu den neuro-muskulären, zeigen jedoch ähnliche klinische Auswirkungen. Die meisten Studien verwendeten hier normokapnische Hyperpnoe [28, 29]. Trainingsdauern reichten von 10–20 Minuten, wobei 40% des MVV bei Tetraplegikern und 60% des MVV bei Paraplegikern gewählt wurden [28]. Eine Metaanalyse zeigte, dass sowohl die Vitalkapazität als auch die Atemmuskulaturkraft verbessert werden konnten [30].

Sonstige restriktive Ventilationsstörungen

Interstitielle Lungenerkrankungen (ILD)

Hierbei wird die Ausbildung einer hyperkapnischen respiratorischen Insuffizienz zumeist erst in sehr späten Stadien beobachtet [31]. Gleichwohl kann IMT hierbei den P_{lmax} und die 6-Minuten-Gehstrecke verbessern sowie die Dyspnoe reduzieren [32] (vgl. [Tab. 5](#)).

Sarkoidose

Luftnot gehört neben Erschöpfung („Fatigue“) zu den häufigsten Symptomen bei Sarkoidose [33]. Eine Beteiligung der Atemmuskulatur mit Funktionseinschränkung ist möglich [34]. Studien zum gezielten Einsatz eines IMT bei Sarkoidose existieren aktuell nicht.

Kyphoskoliose

Die Atemmuskulaturstärke ist bei milden Formen zumeist normal, fällt bei schweren Verlaufsformen jedoch ab [35]. Es existieren lediglich einzelne Fallberichte zum Einsatz des IMT [36].

Adipositas

Die Atemmuskulaturkraft ist hier zumeist normal oder aber gering reduziert [37,38]. IMT mittels normokapnischer Hyperpnoe verbesserte die Vitalkapazität, die Ausdauer der Atemmuskulatur,

die 6-Minuten-Gehstrecke sowie die Dyspnoe und Lebensqualität; nicht jedoch die Atemmuskulaturstärke [39]. Mittels „threshold load“ konnten der P_{lmax} sowie das MVV gesteigert werden [40]. Im Vorfeld einer bariatrischen Chirurgie kann IMT den P_{lmax} erhöhen und eine postoperative Abnahme verringern [41]. Postoperatives IMT verbessert deutlich die Atemmuskulaturkraft sowie die Ausdauer [42].

IMT bei kardio-zirkulatorischen Störungen



Linksherzinsuffizienz

Die Atemmuskulaturkraft ist hierbei reduziert, stellt ein unabhängiges Mortalitätsrisiko dar und korreliert mit Dyspnoe, maximaler Sauerstoffaufnahme und funktionellem Stadium („NYHA-Klasse“) [43,44]. IMT verbessert den P_{lmax}, die körperliche Belastbarkeit und reduziert die Dyspnoe [45–48] (vgl. [Tab. 6](#)).

Pulmonal-arterielle Hypertonie (PAH)

Hier mehren sich die Hinweise, dass die Atemmuskelfunktion eingeschränkt ist [49]. Rehabilitative Maßnahmen, die auch ein respiratorisches Training beinhalten, führen zu einer Zunahme der 6-Minuten-Gehstrecke wie auch der maximalen Sauerstoffaufnahme [50,51]. Isoliertes IMT bei PAH wurde bisher nicht untersucht (vgl. [Tab. 6](#)).

Obstruktive Atemwegs- und Lungenerkrankungen



COPD

Hier besteht bzgl. des IMT eine sehr gute Datenlage (vgl. [Tab. 7](#)). Es konnte gezeigt werden, dass IMT die Atemmuskelfunktion (Kraft und Ausdauer) und die körperliche Leistungsfähigkeit verbessern und die Dyspnoe reduzieren kann [5,7,52,53]. Positive Effekte setzen allerdings eine ausreichende Trainingsintensität voraus (siehe oben) [5]. Zumeist kommen threshold load oder resistive load 30 Minuten täglich – oder kürzer – zum Einsatz [5–7, 9,10,52]. Normokapnische Hyperpnoe scheint bei COPD weniger ausgeprägte Verbesserungen erzielen zu können [5]. Ein direkter Vergleich der verschiedenen Trainingsmethoden innerhalb einer Studie wurde allerdings bislang nicht durchgeführt. Besonders effektiv scheint das IMT bei Patienten mit deutlicher Schwäche der Atemmuskulatur (P_{lmax} < 60 cmH₂O) zu sein [5]. Zusätzliche Effekte eines IMT in Kombination mit körperlichem Training in Bezug auf Dyspnoe und körperliche Leistungsfähigkeit wurden bislang noch nicht eindeutig nachgewiesen [5,54,55].

Auch verbessert IMT mittels threshold load bei COPD die Kontraktionsgeschwindigkeit der inspiratorischen Muskulatur und erhöht den Querschnitt der schnell kontrahierenden (Typ II) Muskelfasern [56,57]. Erste Daten zeigen eine Zunahme der inspiratorischen Kapazität [58] wie auch des Atemzugvolumens [59] während Belastungstests. Dies resultiert in einem effizienteren (langsameren und „tieferen“) Atemmuster. Dieses effizientere Atemmuster [58–60] in Kombination mit verbesserter neuro-mechanischer Kopplung (geringere efferente Aktivierung der Atemmuskulatur) [61] sind Faktoren, die wahrscheinlich zur Verringerung der Dyspnoe bei vergleichbarer Belastung nach IMT beitragen [60].

Tab. 4 IMT bei restriktiven Ventilationsstörungen: Übersichtsdarstellung.

Studie	Jahr	Studientyp	n	Alter Geschlecht	Erkrankung Patientenmerkmale	IMT Dauer	Sham-IMT	Outcome	Evidenzgrad	Empfehlung	Bemerkungen
Wanke et al. Chest [18]	1994	RCT	30	14 y 18 m/12 w	M. Duchenne	resistive load 1-mal 20 min tgl. 6 Monate	ja	Pmax Tlim ja	I	↑	Studie bei M. Duchenne, Trainingseffekt nur wenn VC > 1 l
Koessler et al. Chest [21]	2001	prospektive Studie	27	16 y 16 m/11 w	M. Duchenne Spinale Muskel- atrophie	resistive load 1-mal 20 min tgl. 2 Jahre	nein	Pmax Tlim ja	II	↑	Studie bei NMD über 2 Jahre Progredienz der Atemmuskelschwäche konnte aufgehalten werden, Plateau nach 10 Monaten erreicht
Eidenberger et al. NeuroRehabilitation [26]	2014	syst. Übersichtsarbeit, 4 Studien	73		ALS	threshold, resistive load 1-mal 10 min	nein	Pmax nein	I	↔	aufgrund der raschen Progredienz der Erkrankung kein relevanter Trainingseffekt

n = Patientenzahl, ALS = Amyotrophe Lateralsklerose, Pmax = maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck, Tlim = Parameter der inspiratorischen Atemmuskelausdauer, VC = Vitalkapazität, ↑ = starke Empfehlung, ↔ = Empfehlung offen

Tab. 5 IMT bei sonstigen restriktiven Ventilationsstörungen.

Studie	Jahr	Studientyp	n	Alter Geschlecht	Erkrankung Patientenmerkmale	IMT Dauer	Sham-IMT	Outcome	Evidenzgrad	Empfehlung	Bemerkungen
Jastrzebski et al. Pneumonol Aergol Pol [32]	2008	RCT	30	65 y 19 m/11 w	idiopathische Lungenfibrose	threshold load, 12 Wochen (5-mal Einatmung, 1 min Pause; 6 Wdh.)	nein	6MWT, Dyspnoe (BDI) und MIP verbessert	I	↑	niedrige Fallzahl; vergeben wurde ein zusätzliches Atemmuskeltraining mit alleiniger Physiotherapie
Hornstein et al. Spine [36]	1987	Fallserie	2	–	Kyphoskoliose	–	–	Pmax; Respirator- entwöhnung	III	↔	2 Fälle in unter- schiedlicher Situa- tion
Villiot-Danger, JC et al. Int J Obes [39]	2011	RCT	30	42 ± 12 y	Adipositas (45 ± 7 kg/m ²)	30-min isocapnische Hyperpnoe mit 60–80 % maximum voluntary ventilation, 3–4 mal pro Woche	nein	Verbesserung von Endurance, 6MWT Dyspnoe und Lebens- qualität	I	↑	niedrige Fallzahl
Tenorio et al. Disabil Rehabil [40]	2013	RCT	31	–	Adipositas	Training über 12 Wochen	ja	Zunahme Pmax	I	↑	niedrige Fallzahl
Barbalho-Moukil et al. Clinics [41]	2011	RCT	32	36 y 32 w	Patientinnen vor Adipositas-Chirurgie	2–4 Wochen, 6-mal pro Woche für 15 min mit anfangs 30 % MIP	nein	max. inspiratorische Kraft nahm postope- rativ weniger stark ab	I	↑	niedrige Fallzahl
Casali, et al. Obes Surg [42]	2011	RCT	30	36 y 15 m/15 w	Patienten (35–60 kg/m ²) vor Adipositas-Chirurgie	threshold load 2. bis 30. Tag postoperative für je 30 min	ja	MIP und Endurance verbessert, schnellere Erholung der Lungen- funktionsparameter	I	↑	niedrige Fallzahl

n = Patientenzahl, Pmax = maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck, MIP = Maximal inspiratory pressure, BDI = Baseline Dyspnoea Index, 6 MWT = 6 Minute Walking Test, ↑ = starke Empfehlung, ↔ = Empfehlung offen

Tab. 6 IMT bei kardio-zirkulatorischen Störungen.

Studie	Jahr	Studientyp	n	Alter Geschlecht	Erkrankung Patientenmerkmale	IMT Dauer	Sham-IMT	Outcome	Evidenz- grad	Empfehlung	Bemerkungen
Weiner et al. Clin Cardiol [45]	1999	RCT	20	65 y 18 m/2 w	chronische Herzinsuffizienz	threshold load für 3 Monate, 30 min täglich 6-mal pro Woche	ja	Verbesserung von Pimax und Endurance sowie von 6MWT und Dyspnoe Score	I	↑	
Marco et al. Eur Heart Fail [46]	2013	RCT	22	69 y 17 m/5 w	chronische Herzinsuffizienz	threshold load (Oxygen-Dual Valve) mit 5-mal 10 Wiederholungen, täglich über 4 Wochen	ja	Verbesserung der Pimax und der Endurance	I	↑	niedrige Fallzahl
Plentz et al. Arq Bras Cardiol [47]	2012	Metaanalyse	7 Studien	–	chronische Herzinsuffizienz	–	–	Verbesserung der Peak-VO ₂ in Studien über 12 Wochen bei Patienten mit nachweislicher Atem- muskelschwäche und Verbesserung der 6MWT	I	↑ ↑	
Smart et al. Int J Cardiol [48]	2013	Metaanalyse	11 Studien (287 Patienten)	–	chronische Herzinsuffizienz	–	ja	Verbesserung von 6MWT, Peak-VO ₂ , Pimax und Lebensqualität	I	↑ ↑	
Grünig et al. Respiration [50]	2011	Beobach- tungsstudie	58	51 y 16 m/42 w	pulmonalerterielle Hypertonie	15 Wochen Training (telefonische Nach- verfolgung 24 ± 12 Monate)	–	Physiotherapie mit zu- sätzlichem Atemmuskel- training	III	↔	unklar, wieviele der Effekte durch gezieltes Atemmus- keltraining erreicht wurde
Mereles et al. Circulation [51]	2006	RCT	30	50 y 10 m/20 w	pulmonalerterielle Hypertonie	15 Wochen Training	nein	Peak-VO ₂ , 6MWT und Lebensqualität (SF-36 verbessert)	I	↔	Kontrollgruppe ohne jegliches Trai- ning; Trainings- gruppe mit zusätzli- chem Atemtraining

n = Patientenzahl, Pimax = maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck, SF-36 = Short Form 36 (Erfassung generische Lebensqualität), 6MWT = 6 Minute Walking Test, ↑ ↑ = starke Empfehlung, ↑ = Empfehlung, ↔ = Empfehlung offen

Tab. 7 IMT bei obstruktiven Atemwegs- und Lungenerkrankungen: Übersichtsdarstellung.

Studie Journal	Jahr	Studientyp	n	Alter Geschlecht	Erkrankung Patientenmerkmale	IMT Dauer	Sham-IMT	Outcome	Evidenzgrad	Empfehlung	Bemerkungen
Gosselink et al. Eur Respir J [5]	2011	systematic review of RCTs	742 29 RCTs mit 29 [SD: 13] Teilnehmern	64 (SD: 4) y 74 % m/26 % w	COPD FEV1: 41 (SD: 7) % Sollwert MIP: 62 (SD: 13) cmH ₂ O	threshold oder resistive load für 28 (SD: 11) Minuten täglich, 13 (SD: 11) Wochen	ja in 23 Studien, no-Sham control in 6 Studien	MIP, ja 6MWD, ja Dyspnoe, ja (Borg, TDI und CRQ Dyspnoe)	I	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	ausschließlich Studien mit minimaler Trainings- intensität von 30 % MIP oder größer einge- schlossen
Silva et al. Cochrane Databases Systematic Review [66]	2013	systematic review of RCTs	84 (4 RCTs)	34 (SD: 7) y 46 m/67 w	mild to moderate Asthma	threshold oder resistive load für 17 (SD: 11) Minuten täglich, 10 (SD: 6) Wochen	3 Studien ja, 1 Studie nein	MIP, ja Dyspnoe, nein	II II – III	↑ ↔	4 Studien verfügbar zur Bewertung der Effekte auf MIP, lediglich 1 Stu- die von mäßiger Qualität evaluierte Dyspnoe.
Reid et al. Clin Rehabil [69]	2008	systematic review of RCTs	36 (2 RCTs)	20 (SD: 4) y 18 m/18 w	CF FEV1: 68 (SD: 25) % Sollwert	threshold oder electro- nisches Manometer, 3 – 5 Tage pro Woche, 20 – 45 Min. pro Tag, 6 – 8 Wochen	ja	Atemmuskel- funktion und Lungenfunktion, nein	II – III	↔	ausgeprägte Heteroge- nität zwischen Studien. Datenlage unzureichend für eindeutige Schluss- folgerungen

n = Patientenzahl, P_{max} = maximaler Inspirationsdruck, FEV1 = Forciertes expiratorisches Volumen in 1 Sekunde, MIP = Maximal Inspiratory Pressure, CF = Zystische Fibrose, TDI = Transitional Dyspnoe Index, CRQ = Chronic Respiratory Disease Questionnaire
 ↑ 1 = starke Empfehlung, 1 = Empfehlung, ↔ = Empfehlung offen

Asthma

Die Atemmuskelfunktion (Kraft und Ausdauer) scheint bei nicht steroidpflichtigen Asthmatikern im Vergleich zur COPD weniger stark beeinträchtigt zu sein [62 – 65].

IMT in Form von threshold load oder resistive load verbessert beim Asthma den P_{max}, ohne jedoch die Dyspnoe zu reduzieren [66] (vgl. ● Tab. 7). Aktuell ist die Datenlage jedoch nicht ausreichend, um Add-on-Effekte von IMT, über eine Verbesserung der P_{max} hinaus, bei Asthma bewerten zu können.

Cystische Fibrose (CF)

Hier können unzureichende Nährstoffaufnahme und ein persistent kataboler Stoffwechsel aufgrund chronischer Infektionen zur peripheren und respiratorischen Muskelatrophie beitragen [67,68]. Als Resultat wird, wie bei Patienten mit COPD, bei vorliegender höherer Belastung der Atemmuskulatur häufig eine Schwächung der Atemmuskulatur beobachtet [67,68].

Trotz der soliden pathophysiologischen Grundlage für IMT ist die Datenlage hier bislang unzureichend [69,70] (vgl. ● Tab. 7). Threshold load wurde in Kombination mit körperlichem Training angewendet und zeigte bestenfalls einen Anstieg des P_{max}, jedoch nicht der Dyspnoe oder Lebensqualität [71,72].

Non-CF Bronchiektasen

Bei ähnlicher Pathophysiologie wie CF wird ein IMT empfohlen [73]. In zwei randomisierten kontrollierten Studien zeigte ein mehrwöchiges IMT allerdings lediglich eine Verbesserung der Atemmuskelfunktion, aber keine statistisch signifikante Verbesserung der 6-Minuten-Gehstrecke gegenüber den Kontrollgruppen [74,75].

Weaning vom Respirator

Die Notwendigkeit einer (invasiven) Beatmungstherapie führt via komplexer Pathophysiologie zu einer Reduktion der Atemmuskelfunktion. Der beatmungsinduzierte Muskelschaden wird als VIDD (ventilator induced diaphragmatic dysfunction) bezeichnet [76]. Mit Zunahme der Weaningzeit steigt auch die Mortalität [77,78]. Die Zunahme der atemmuskulären Kraft stellt den besten Prädiktor für den Weaningserfolg dar [79].

Atemmuskeln sind auch bei hyperkapnischen Patienten grundsätzlich trainierbar [80]. Essenziell scheint besonders im Weaning die intermittierende Entlastung via (nicht-) invasiver Beatmung zu sein [81]. Bereits Ende der 1980er Jahre wurden erste Weaningserfolge unter Anwendung eines „IMT“ (nicht-linearer Resistor) beschrieben, welche später mittels threshold load bestätigt wurden [82 – 84]. Hierbei fehlten jedoch Kontrollgruppen. Eine bahnbrechende Studie, welche eine Kontrollgruppe inkludierte, zeigte bei postoperativen Patienten ebenso beachtliche Weaningserfolge bei Anwendung von threshold load (4-mal tgl. 6 – 10 Atemzüge) [85]. Kürzlich konnte für internistische Patienten im Weaning durch IMT zwar eine verbesserte Atemmuskelfunktion jedoch keine Verbesserung der Extubationsrate gezeigt werden [86]. Kritikpunkte sind hierbei jedoch die möglicherweise zu geringe Last des IMT (40 % P_{max}) sowie diskussionswürdige Weaning-Strategien [86].

Trotz unzureichender Datenlage zeichnet sich ab, dass IMT im Weaning in entsprechend erfahrenen Behandlungsteams möglich und sicher ist und insbesondere bei Patienten im prolongierten Weaning einen besonderen Benefit aufweisen könnte (vgl. ● Tab. 8).

Tab. 8 IMT bei Weaning vom Respirator: Übersichtsdarstellung.

Studie	Jahr	Studientyp	Patientenzahl	Alter Geschlecht	Erkrankung Patientenmerkmale	IMT Dauer	Sham-IMT	Outcome	Evidenzgrad	Empfehlung	Bemerkungen
Aldrich et al. Crit Care Med [82]	1989	Fallserie	27	keine Angabe	neuromuskulär (n = 7), Lungenerkrankung (n = 20)	nichtlinearer Resistor, an Werktagen, nach Toleranz bis zu 30 min	nein	Weaningerfolg 12 von 27	III	↑	
Martin et al. Chest [83]	2002	Fallserie	10	59 y 4 m	heterogen	threshold load 4-mal 6 Atemzüge	nein	Weaningerfolg 9 von 10	III	↑	
Sprague et al. Phys Ther [84]	2003	Fallserie	6	61 y 5 m	postoperativ	threshold load 4-mal 6–8 Atemzüge	nein	Weaningerfolg 6 von 6	III	↑	
Martin et al. Crit Care [85]	2011	RCT	69	65 y 31 m	internistisch 15, postoperativ 54	threshold load 4-mal 6–10 Atemzüge an Werktagen	ja	Weaningerfolg 71 % im Behandlungsarm und 47 % in der Sham Gruppe, NNT = 4	I	↑ ↑	Patienten wurden mit SIMV beatmet
Condessa et al. J Physiother [86]	2013	RT	92	64 y 61 m	postoperativ/Trauma 26, internistisch 66	threshold load, 5-mal 10 Atemzüge zweimal täglich	nein	kein Einfluss auf die Weaningzeit, MIP und TV verbessert	I	↓	Trainingsbereich lag bei 40 % der Maximalkraft

n = Patientenzahl, P_{imax} = maximaler Inspirationsdruck, T_{lim} = Parameter der inspiratorischen Atemmuskelausdauer, ↑ ↑ = starke Empfehlung, ↑ = Empfehlung, ↔ = Empfehlung offen, ↓ = keine Empfehlung

Technische Aspekte und praktische Hinweise

Im Weaning erfolgt IMT fast ausschließlich via künstlichem Atemweg (Tracheostoma). Das IMT-Device wird via Adapter mit der Trachealkanüle (Tubus) verbunden. Der Cuff muss geblockt sein, eine etwaige Sauerstoffzufuhr patientenfern erfolgen (ansonsten Druckverlust und ineffektives IMT). Nur kooperationsfähige Patienten dürfen nach entsprechender Aufklärung einem IMT zugeführt werden. Das IMT muss unter ständiger Überwachung des Patienten erfolgen und ist bei Missempfindungen seitens des Patienten (Dyspnoe, Schmerzen, Angst, etc.) ggf. vorzeitig zu beenden.

Körperliche Aktivität

Körperliche Belastung erhöht bei Gesunden häufig die Wahrnehmung von Atmungsanstrengung und führt zum Gefühl von Dyspnoe [6,87]. Sportliche Tätigkeiten, seien es intensive, kurze Belastungen (≥85 % der maximalen Sauerstoffaufnahme) oder auch niedriger intensive, längerdauernde Belastungen („Ultramarathon“ u.a.) führen bei rund 70 % der Personen zur Ermüdung der inspiratorischen und/oder expiratorischen Atemmuskulatur [88–96]. Eine ermüdete Atemmuskulatur beeinträchtigt umgekehrt eine nachfolgende sportliche Leistung.

Während körperlicher Aktivität und Sport wird die Atemmuskulatur häufig „doppelt“ belastet: Neben der Atemaktivität werden die Muskeln einerseits zur Stabilisierung und andererseits für die effektive Bewegung eingesetzt (z. B. Rudern, Schwimmen, aber auch Laufen u.a.) [97]. Die Körperstabilität wird bei ermüdeter Atemmuskulatur beeinträchtigt, was die Stolper-/Sturzgefahr erhöhen kann [98].

Durch IMT lässt sich beim Gesunden die Ermüdbarkeit der Atemmuskulatur reduzieren [99–101]. Mehrheitlich wird durch IMT die Dyspnoe reduziert und die Leistung verbessert (vgl. [Tab. 9](#)), was zwei neuere, systematische Reviews mit Meta-Analyse gezeigt haben [6,87]. Entscheidend für den Wirksamkeitsnachweis des IMT hinsichtlich Leistungsverbesserung scheint allerdings die Testart zu sein: Die Leistung in Stufentests zeigt häufig keine Verbesserung, während sie in sogenannten „Time Trials“ und „Constant Load Tests“ mehrheitlich zunimmt [6,87]. Auch der Fitnesszustand scheint hier eine Rolle zu spielen, indem weniger Trainierte mehr profitieren [6].

Bezüglich der Wahl der optimalen IMT-Methode zeichnet sich aktuell keine eindeutige Überlegenheit einer Methode ab [6,87]. Gegebenenfalls bietet bei Sportarten mit hoher ventilatorischer Anforderung (z. B. Radfahren, Laufen, Langlauf etc.) ein forciertes in- und expiratorisches Training gegenüber dem rein inspiratorischen Training in Bezug auf die Leistungsverbesserung gewisse Vorteile [6,87].

Tab.9 IMT bei körperlicher Aktivität: Übersichtsdarstellung.

Studie	Jahr	Studientyp	n	Alter Geschlecht	Erkrankung Patienten- merkmale	IMT Dauer	Sham- IMT	Outcome	Evidenz- grad	Empfehlung	Bemerkungen
Illi et al. Sports Med [6]	2012	systematic Review + Meta- Analysis von RCTs	804 Personen in 28 RCTs, 6 CTs und 15 non-con- trolled Trials mit 4–40 Personen/ Trial	Gruppenmittel: 19–70 y 463 m 155 w 186 kA	gesunde nicht- trainierte bis gut trainierte Probanden	Hyperpnoe (55–85 % MVV oder 90–100 % MSVC 15–30 min 1–2-mal/Tag 3–5-mal/Woche 4–15 Wochen Threshold (30–80 % P _{lmax} oder 40–70 cmH ₂ O oder 60–72 % P _{lmax} und P _E _{max}) 30 min 5-mal/Woche 4–6 Wochen Resistive oder Threshold (50 %-75 % P _{lmax} , 40–80 % SMIP oder 60–80 % P _{lmax} und P _E _{max}) 24–40 Atemzüge 1–2-mal/Tag 3–10-mal/Woche 4–12 Wochen	21 Sham IMT 13 non-training Controls	Verbesserungen: Time Trial Performance Constant-load Ausdauer keine Verbesserung: Incremental Test Performance	↑ ↑ ↑ ↑ –	multiples lineares Regres- sionsmodell zeigt: 1) je weniger fit, umso grö- ßer der Effekt; 2) je länger der Test, umso größer der Effekt; 3) Effekt von in-/ex- spiratorischen resistive Training größer als Hyper- pnoe und als ausschließlich inspiratorisches threshold/ resistive Training; 4) Ver- besserungen sind unab- hängig von der Sportart (Schwimmen, Rudern, Laufen, Radfahren)	
HajGhanbari et al. J Strength Cond Res [87]	2013	systematic Review + Meta- Analysis von RCTs	378 Personen in 21 RCTs mit 10–30 Per- sonen/Trial	Gruppenmittel: 16–32 y 312 m 67 w 20 kA	Athleten	Hyperpnoe (50–85 % MVV) oder Threshold (30 % P _{lmax}) 30 min 1-mal/Tag 3–5-mal/Woche 3–10 Wochen Resistive oder Threshold 50–90 % P _{lmax} 30–40 Inspirationen 1–2-mal/Tag 3–7-mal/Woche 4–12 Wochen	15 Sham IMT 9 non-training Controls	Verbesserungen: P _{lmax} MVV Atmungsausdauer Time Trial Performance YoYo Test Ganzkörperausdauer Atemnot Anstrengungsempfin- dung	↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑ ↑	P _{lmax} bei threshold + tar- geted resistive Training MVV + Atmungsausdauer bei Hyperpnoe Training Atemnot (außer Atem sein) und Anstrengungsempfin- dung wurden während körperlicher Aktivität bestimmt	

n = Probandenzahl; P_{lmax} = maximaler inspiratorischer Mundverschlussdruck; P_{Emax} = maximaler expiratorischer Mundverschlussdruck; MVV = maximum voluntary ventilation (Atemgrenzwert), MSVC = maximal sustained ventilatory capacity;
SMIP = sustained maximal inspiratory pressure, ↑ ↑ = starke Empfehlung, ↑ = Empfehlung, ↔ = Empfehlung offen, kA = keine Angabe

Zusammenfassung

Spezifisches Atemmuskeltraining (IMT) kann anhand der Datenlage aktuell in 3 „methodisch gesicherte“ Verfahren unterteilt werden:

1. Resistive Load
2. Threshold Load
3. Normokapnische Hyperpnoe

Eine eindeutige Überlegenheit eines Verfahrens existiert bis dato nicht; vielmehr müssen die jeweiligen Vor- und Nachteile der Methoden kritisch gegeneinander abgewogen werden.

Bezüglich der hier abgehandelten Krankheitsbilder und Indikationen erscheint an vielen Stellen die Datenlage äußerst spärlich, sodass zumeist keine pauschalen Empfehlungen gegeben werden können. Häufig erscheint die Durchführung eines IMT auch aus pathophysiologischen Überlegungen sinnvoll und kann im Einzelfall zur Anwendung kommen.

Stets setzt ein IMT jedoch eine vorherige Diagnostik der Atemmuskelfunktion und eine klare Indikationsstellung voraus. Zum Teil ist es auch unerlässlich, dass IMT lediglich in erfahrenen Behandlungsteams und entsprechender Patientenüberwachung zum Einsatz kommt (z.B. IMT beim Weaning vom Respirator).

Bei gegebener Indikation, korrekter Patientenschulung und guter Compliance erscheint IMT bei vielen Krankheitsbildern eine wertvolle Therapiestrategie zu sein, von der zu wünschen bleibt, dass sie zukünftig häufiger ausgeschöpft werden wird.

Interessenkonflikt

O. Göhl, D. J. Walker und S. Stieglitz erhielten Vortragshonorare von der Firma Heinen + Löwenstein GmbH & Co. KG.

H.-J. Kabitz erhielt von den folgenden Firmen Honorare für Vortragstätigkeiten/Reisesponsoring zu wissenschaftlichen Veranstaltungen: Heinen + Löwenstein GmbH & Co. KG, Bad Ems; VIVI-SOL Deutschland GmbH, Neufahrn b. Freising; Anamed GmbH & Co. KG, Bad Ems; Sapio Life GmbH & Co. KG, Homburg; idiag AG, Fehraltorf (Schweiz).

S. Walterspacher, D. Langer, C. M. Spengler, T. Wanke, M. Petrovic, R.-H. Zwick, R. Glöckl und D. Dellweg geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Institute

¹ Rehaklinik Heidelberg-Königstuhl, Heidelberg

² II. Medizinische Klinik, Pneumologie, Kardiologie und Intensivmedizin, Klinikum Konstanz

³ KU Leuven – University of Leuven, Department of Rehabilitation Sciences, Leuven, Belgien

⁴ Exercise Physiology Lab, Institut für Bewegungswissenschaften und Sport, ETH Zürich, und Zentrum für Integrative Humanphysiologie, Universität Zürich, Schweiz

⁵ Krankenhaus Hietzing mit Neurologischem Zentrum Rosenhügel und Karl Landsteiner Institut, Abteilung für Atmungs- und Lungenerkrankungen, Wien, Österreich

⁶ Univ. Klinik für Innere Medizin, Univ. Klinikum Tulln, Karl Landsteiner Privatuniversität, Ambulante Pneumologische Rehabilitation, Therme Wien Med, Wien, Österreich

⁷ Medizinische Klinik I – Pneumologie und Kardiologie, Petrus Krankenhaus Wuppertal

⁸ Schön Klinik Berchtesgadener Land, Fachzentrum Pneumologie, Schönau am Königssee

⁹ Fachkrankenhaus Kloster Grafschaft GmbH, Lehrkrankenhaus der Universität Marburg, Schmallenberg

Literatur

- 1 Kabitz HJ, Walterspacher S, Mellies U et al. [Recommendations for respiratory muscle testing]. *Pneumologie* 2014; 68: 307–314
- 2 Kabitz HJ, Windisch W. Diagnostik der Atemmuskelfunktion: state of the art. *Pneumologie* 2007; 61: 582–587
- 3 Thews G. Lungenatmung. In: Schmidt RF, Thews G Hrsg. *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer; 1997: 565–591
- 4 Leith DE, Bradley M. Ventilatory muscle strength and endurance training. *J Appl Physiol* 1976; 41: 508–516
- 5 Gosselink R, De Vos J, van den Heuvel SP et al. Impact of inspiratory muscle training in patients with COPD: what is the evidence? *Eur Respir J* 2011; 37: 416–425
- 6 Illi SK, Held U, Frank I et al. Effect of respiratory muscle training on exercise performance in healthy individuals: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 2012; 42: 707–724
- 7 Geddes EL, O'Brien K, Reid WD et al. Inspiratory muscle training in adults with chronic obstructive pulmonary disease: an update of a systematic review. *Respir Med* 2008; 102: 1715–1729
- 8 Nici L, Donner C, Wouters E et al. American Thoracic Society/European Respiratory Society statement on pulmonary rehabilitation. *Am J Respir Crit Care Med* 2006; 173: 1390–1413
- 9 Belman MJ, Shadmehr R. Targeted resistive ventilatory muscle training in chronic obstructive pulmonary disease. *J Appl Physiol* (Bethesda, Md: 1985) 1988; 65: 2726–2735
- 10 Gosselink R, Wagenaar RC, Decramer M. Reliability of a commercially available threshold loading device in healthy subjects and in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Thorax* 1996; 51: 601–605
- 11 Caine MP, McConnell AK. Development and evaluation of a pressure threshold inspiratory muscle trainer for use in the context of sports performance. *Sports Engineering* 2000; 3: 149–159
- 12 McConnell AK, Romer LM. Dyspnoea in health and obstructive pulmonary disease: the role of respiratory muscle function and training. *Sports Med* 2004; 34: 117–132
- 13 Scherer TA, Spengler CM, Owassapian D et al. Respiratory muscle endurance training in chronic obstructive pulmonary disease: impact on exercise capacity, dyspnea, and quality of life. *Am J Respir Crit Care Med* 2000; 162: 1709–1714
- 14 Slavka G. Das motorische Nervensystem. Wien (Grafik unpublishiert) 2015
- 15 Walton J. Clinical Examination, Differential Diagnosis and Classification. In: Walton J, Karpati G, Hilton DJ eds. *Disorders of voluntary muscle*. 6th ed. Edinburgh: Churchill Livingstone; 1994: 547
- 16 Mah JK, Korngut L, Dykeman J et al. A systematic review and meta-analysis on the epidemiology of Duchenne and Becker muscular dystrophy. *Neuromuscul Disord* 2014; 24: 482–491
- 17 DiMarco AF, Kelling JS, DiMarco MS et al. The effects of inspiratory resistive training on respiratory muscle function in patients with muscular dystrophy. *Muscle Nerve* 1985; 8: 284–290
- 18 Wanke T, Tjoffl K, Merkle M et al. Inspiratory muscle training in patients with Duchenne muscular dystrophy. *Chest* 1994; 105: 475–482
- 19 Winkler G, Zifko U, Nader A et al. Dose-dependent effects of inspiratory muscle training in neuromuscular disorders. *Muscle Nerve* 2000; 23: 1257–1260
- 20 Topin N, Matecki S, Le Bris S et al. Dose-dependent effect of individualized respiratory muscle training in children with Duchenne muscular dystrophy. *Neuromuscul Disord* 2002; 12: 576–583
- 21 Koessler W, Wanke T, Winkler G et al. 2 Years' experience with inspiratory muscle training in patients with neuromuscular disorders. *Chest* 2001; 120: 765–769
- 22 Smith PE, Coakley JH, Edwards RH. Respiratory muscle training in Duchenne muscular dystrophy. *Muscle Nerve* 1988; 11: 784–785
- 23 Aslan GK, Gurses HN, Issever H et al. Effects of respiratory muscle training on pulmonary functions in patients with slowly progressive neuromuscular disease: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 2013; 28: 573–581
- 24 Gozal D, Thiriet P. Respiratory muscle training in neuromuscular disease: long-term effects on strength and load perception. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31: 1522–1527
- 25 Pinto S, de Carvalho M. Can inspiratory muscle training increase survival in early-affected amyotrophic lateral sclerosis patients? *Amyotroph Lateral Scler Frontotemporal Degener* 2013; 14: 124–126

- 26 Eidenberger M, Nowotny S. Inspiratory muscle training in patients with amyotrophic lateral sclerosis: A systematic review. *NeuroRehabilitation* 2014; 35: 349–361
- 27 Petrovic M, Lahrman H, Pohl W et al. Idiopathic diaphragmatic paralysis – satisfactory improvement of inspiratory muscle function by inspiratory muscle training. *Respir Physiol Neurobiol* 2009; 165: 266–267
- 28 Mueller G, Perret C, Spengler CM. Optimal intensity for respiratory muscle endurance training in patients with spinal cord injury. *J Rehabil Med* 2006; 38: 381–386
- 29 Van Houtte S, Vanlandewijck Y, Kiekens C et al. Patients with acute spinal cord injury benefit from normocapnic hyperpnoea training. *J Rehabil Med* 2008; 40: 119–125
- 30 Berlowitz DJ, Tamplin J. Respiratory muscle training for cervical spinal cord injury. *Cochrane Database Syst Rev* 2013; 7: Cd008507
- 31 Watanabe F, Taniguchi H, Sakamoto K et al. Quadriceps weakness contributes to exercise capacity in nonspecific interstitial pneumonia. *Respir Med* 2013; 107: 622–628
- 32 Jastrzebski D, Kozielski J, Zebrowska A. [Pulmonary rehabilitation in patients with idiopathic pulmonary fibrosis with inspiratory muscle training]. *Pneumonologia i alergologia polska* 2008; 76: 131–141
- 33 Newman LS, Rose CS, Maier LA. Sarcoidosis. *N Engl J Med* 1997; 336: 1224–1234
- 34 Kabitz HJ, Lang F, Waltersbacher S et al. Impact of impaired inspiratory muscle strength on dyspnea and walking capacity in sarcoidosis. *Chest* 2006; 130: 1496–1502
- 35 Murray J, Nadel J. Textbook of respiratory medicine. 3rd ed. Philadelphia: Saunders; 2000
- 36 Hornstein S, Inman S, Ledsome JR. Ventilatory muscle training in kyphoscoliosis. *Spine* 1987; 12: 859–863
- 37 Kelly TM, Jensen RL, Elliott CG et al. Maximum respiratory pressures in morbidly obese subjects. *Respirations* 1988; 54: 73–77
- 38 Chlif M, Keochkerian D, Choquet D et al. Effects of obesity on breathing pattern, ventilatory neural drive and mechanics. *Respir Physiol Neurobiol* 2009; 168: 198–202
- 39 Villiot-Danger JC, Villiot-Danger E, Borel JC et al. Respiratory muscle endurance training in obese patients. *Int J Obes* (2005) 2011; 35: 692–699
- 40 Tenorio LH, Santos AC, Camara Neto JB et al. The influence of inspiratory muscle training on diaphragmatic mobility, pulmonary function and maximum respiratory pressures in morbidly obese individuals: a pilot study. *Disabil Rehabil* 2013; 35: 1915–1920
- 41 Barbalho-Moulim MC, Miguel GP, Forti EM et al. Effects of preoperative inspiratory muscle training in obese women undergoing open bariatric surgery: respiratory muscle strength, lung volumes, and diaphragmatic excursion. *Clinics (Sao Paulo, Brazil)* 2011; 66: 1721–1727
- 42 Casali CC, Pereira AP, Martinez JA et al. Effects of inspiratory muscle training on muscular and pulmonary function after bariatric surgery in obese patients. *Obesity Surgery* 2011; 21: 1389–1394
- 43 McParland C, Krishnan B, Wang Y et al. Inspiratory muscle weakness and dyspnea in chronic heart failure. *Am Rev Respir Dis* 1992; 146: 467–472
- 44 Nishimura Y, Maeda H, Tanaka K et al. Respiratory muscle strength and hemodynamics in chronic heart failure. *Chest* 1994; 105: 355–359
- 45 Weiner P, Waizman J, Magadle R et al. The effect of specific inspiratory muscle training on the sensation of dyspnea and exercise tolerance in patients with congestive heart failure. *Clin Cardiol* 1999; 22: 727–732
- 46 Marco E, Ramirez-Sarmiento AL, Coloma A et al. High-intensity vs. sham inspiratory muscle training in patients with chronic heart failure: a prospective randomized trial. *Eur J Heart Fail* 2013; 15: 892–901
- 47 Plentz RD, Sbruzzi G, Ribeiro RA et al. Inspiratory muscle training in patients with heart failure: meta-analysis of randomized trials. *Arq Bras Cardiol* 2012; 99: 762–771
- 48 Smart NA, Giallauria F, Dieberg G. Efficacy of inspiratory muscle training in chronic heart failure patients: a systematic review and meta-analysis. *Int J Cardiol* 2013; 167: 1502–1507
- 49 Kabitz HJ, Schwoerer A, Bremer HC et al. Impairment of respiratory muscle function in pulmonary hypertension. *Clin Sci (Lond)* 2008; 114: 165–171
- 50 Grunig E, Ehlik N, Ghofrani A et al. Effect of exercise and respiratory training on clinical progression and survival in patients with severe chronic pulmonary hypertension. *Respiration* 2011; 81: 394–401
- 51 Mereles D, Ehlik N, Kreuscher S et al. Exercise and respiratory training improve exercise capacity and quality of life in patients with severe chronic pulmonary hypertension. *Circulation* 2006; 114: 1482–1489
- 52 Shoemaker MJ, Donker S, Lapoe A. Inspiratory muscle training in patients with chronic obstructive pulmonary disease: the state of the evidence. *Cardiopulm Phys Ther J* 2009; 20: 5–15
- 53 Geddes EL, Reid WD, Crowe J et al. Inspiratory muscle training in adults with chronic obstructive pulmonary disease: a systematic review. *Respir Med* 2005; 99: 1440–1458
- 54 Ambrosino N. The case for inspiratory muscle training in COPD. *For. Eur Respir J* 2011; 37: 233–235
- 55 Polkey MI, Moxham J, Green M. The case against inspiratory muscle training in COPD. *Against. Eur Respir J* 2011; 37: 236–237
- 56 Ramirez-Sarmiento A, Orozco-Levi M, Guell R et al. Inspiratory muscle training in patients with chronic obstructive pulmonary disease: structural adaptation and physiologic outcomes. *Am J Respir Crit Care Med* 2002; 166: 1491–1497
- 57 Villafranca C, Borzone G, Leiva A et al. Effect of inspiratory muscle training with an intermediate load on inspiratory power output in COPD. *Eur Respir J* 1998; 11: 28–33
- 58 Petrovic M, Reiter M, Zipko H et al. Effects of inspiratory muscle training on dynamic hyperinflation in patients with COPD. *Int J Chron Obstruct Pulmon Dis* 2012; 7: 797–805
- 59 Charusisin N, Langer D, Gosselink R. Does additional inspiratory muscle training alter breathing pattern during whole body exercise in COPD patients? *Eur Respir J* 2014; 44: 3345
- 60 Macklem PT. Therapeutic implications of the pathophysiology of COPD. *Eur Respir J* 2010; 35: 676–680
- 61 Langer D, Ciavaglia C, Preston M et al. Inspiratory Muscle Training Reduces Respiratory Neural Drive In Patients With COPD. *Eur Respir J* 2014; 44: 1912
- 62 Perez T, Becquart LA, Stach B et al. Inspiratory muscle strength and endurance in steroid-dependent asthma. *Am J Respir Crit Care Med* 1996; 153: 610–615
- 63 Stell IM, Polkey MI, Rees PJ et al. Inspiratory muscle strength in acute asthma. *Chest* 2001; 120: 757–764
- 64 Laviates MH, Grocela JA, Maniatis T et al. Inspiratory muscle strength in asthma. *Chest* 1988; 93: 1043–1048
- 65 McKenzie DK, Gandevia SC. Strength and endurance of inspiratory, expiratory, and limb muscles in asthma. *Am Rev Respir Dis* 1986; 134: 999–1004
- 66 Silva IS, Fregonezi GA, Dias FA et al. Inspiratory muscle training for asthma. *Cochrane Database Syst Rev* 2013; 9: CD003792
- 67 Pinet C, Cassart M, Scillia P et al. Function and bulk of respiratory and limb muscles in patients with cystic fibrosis. *Am J Respir Crit Care Med* 2003; 168: 989–994
- 68 Ionescu AA, Chatham K, Davies CA et al. Inspiratory muscle function and body composition in cystic fibrosis. *Am J Respir Crit Care Med* 1998; 158: 1271–1276
- 69 Reid WD, Geddes EL, O'Brien K et al. Effects of inspiratory muscle training in cystic fibrosis: a systematic review. *Clin Rehabil* 2008; 22: 1003–1013
- 70 Santana-Sosa E, Gonzalez-Saiz L, Groeneveld IF et al. Benefits of combining inspiratory muscle with 'whole muscle' training in children with cystic fibrosis: a randomised controlled trial. *Br J Sports Med* 2014; 48: 1513–1517
- 71 Enright S, Chatham K, Ionescu AA et al. Inspiratory muscle training improves lung function and exercise capacity in adults with cystic fibrosis. *Chest* 2004; 126: 405–411
- 72 de Jong W, van Aalderen WM, Kraan J et al. Inspiratory muscle training in patients with cystic fibrosis. *Respir Med* 2001; 95: 31–36
- 73 Rochester CL, Fairburn C, Crouch RH. Pulmonary rehabilitation for respiratory disorders other than chronic obstructive pulmonary disease. *Clin Chest Med* 2014; 35: 369–389
- 74 Newall C, Stockley RA, Hill SL. Exercise training and inspiratory muscle training in patients with bronchiectasis. *Thorax* 2005; 60: 943–948
- 75 Liaw MY, Wang YH, Tsai YC et al. Inspiratory muscle training in bronchiectasis patients: a prospective randomized controlled study. *Clin Rehabil* 2011; 25: 524–536
- 76 Levine S, Nguyen T, Taylor N et al. Rapid Disuse Atrophy of Diaphragm Fibers in Mechanically Ventilated Humans. *N Engl J Med* 2008; 358: 1327–1335
- 77 Esteban A, Anzueto A, Frutos F et al. Characteristics and outcomes in adult patients receiving mechanical ventilation: a 28-day international study. *JAMA* 2002; 287: 345–355
- 78 Funk GC, Anders S, Breyer MK et al. Incidence and outcome of weaning from mechanical ventilation according to new categories. *Eur Respir J* 2010; 35: 88–94

- 79 Carlucci A, Ceriana P, Prinianakis G et al. Determinants of weaning success in patients with prolonged mechanical ventilation. *Crit Care* 2009; 13: R97
- 80 Budweiser S, Moertl M, Jorres RA et al. Respiratory muscle training in restrictive thoracic disease: a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil* 2006; 87: 1559–1565
- 81 Schonhofer B, Geiseler J, Dellweg D et al. [Prolonged weaning: S2k-guideline published by the German Respiratory Society]. *Pneumologie* 2014; 68: 19–75
- 82 Aldrich TK, Karpel JP, Uhrlass RM et al. Weaning from mechanical ventilation: adjunctive use of inspiratory muscle resistive training. *Crit Care Med* 1989; 17: 143–147
- 83 Martin AD, Davenport PD, Franceschi AC et al. Use of inspiratory muscle strength training to facilitate ventilator weaning: a series of 10 consecutive patients. *Chest* 2002; 122: 192–196
- 84 Sprague SS, Hopkins PD. Use of inspiratory strength training to wean six patients who were ventilator-dependent. *Phys Ther* 2003; 83: 171–181
- 85 Martin AD, Smith BK, Davenport PD et al. Inspiratory muscle strength training improves weaning outcome in failure to wean patients: a randomized trial. *Crit Care (London, England)* 2011; 15: R84
- 86 Condessa RL, Brauner JS, Saul AL et al. Inspiratory muscle training did not accelerate weaning from mechanical ventilation but did improve tidal volume and maximal respiratory pressures: a randomised trial. *J Physiother* 2013; 59: 101–107
- 87 HajGhanbari B, Yamabayashi C, Buna TR et al. Effects of respiratory muscle training on performance in athletes: a systematic review with meta-analyses. *J Strength Cond Res* 2013; 27: 1643–1663
- 88 Mador MJ, Magalang UJ, Rodis A et al. Diaphragmatic fatigue after exercise in healthy human subjects. *Am Rev Respir Dis* 1993; 148: 1571–1575
- 89 Johnson BD, Babcock MA, Suman OE et al. Exercise-induced diaphragmatic fatigue in healthy humans. *J Physiol* 1993; 460: 385–405
- 90 Verges S, Schulz C, Perret C et al. Impaired abdominal muscle contractility after high-intensity exhaustive exercise assessed by magnetic stimulation. *Muscle Nerve* 2006; 34: 423–430
- 91 Taylor BJ, How SC, Romer LM. Exercise-induced abdominal muscle fatigue in healthy humans. *J Appl Physiol* 2006; 100: 1554–1562
- 92 Romer LM, Polkey MI. Exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance. *J Appl Physiol* 2008; 104: 879–888
- 93 Wüthrich TU, Marty J, Kerherve H et al. Aspects of respiratory muscle fatigue in a mountain ultramarathon race. *Med Sci Sports Exerc* 2015; 47: 519–527
- 94 Choukroun ML, Kays C, Gioux M et al. Respiratory muscle function in trained and untrained adolescents during short-term high intensity exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1993; 67: 14–19
- 95 Coast JR, Clifford PS, Henrich TW et al. Maximal inspiratory pressure following maximal exercise in trained and untrained subjects. *Med Sci Sports Exerc* 1990; 22: 811–815
- 96 Babcock MA, Pegelow DF, Johnson BD et al. Aerobic fitness effects on exercise-induced low-frequency diaphragm fatigue. *J Appl Physiol* 1996; 81: 2156–2164
- 97 Gandevia SC, Butler JE, Hodges PW et al. Balancing acts: respiratory sensations, motor control and human posture. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 2002; 29: 118–121
- 98 Janssens L, Brumagne S, Polspoel K et al. The effect of inspiratory muscles fatigue on postural control in people with and without recurrent low back pain. *Spine* 2010; 35: 1088–1094
- 99 Verges S, Lenherr O, Haner AC et al. Increased fatigue resistance of respiratory muscles during exercise after respiratory muscle endurance training. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 2007; 292: R1246–1253
- 100 Volianitis S, McConnell AK, Koutedakis Y et al. Inspiratory muscle training improves rowing performance. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 803–809
- 101 Romer LM, McConnell AK, Jones DA. Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists: effects of inspiratory muscle training. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34: 785–792