

Diss. ETH No. 20487

**NEW INSIGHTS INTO MECHANISMS OF RESPIRATORY MUSCLE TRAINING  
GAINED FROM COMPARTMENTAL CHEST WALL VOLUME CHANGES**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
SABINE KAROLYN ILLI  
Dipl. Natw. ETH  
born May 4, 1980  
citizen of Zurich ZH and Aesch ZH

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Christina M. Spengler Walder, examiner  
Prof. Dr. Urs Boutellier, co-examiner  
Prof. Dr. David P. Wolfer, co-examiner

## 1. SUMMARY

Highly trained athletes are interested in effective training stimuli. It has been shown that respiratory muscle training (RMT) improves exercise performance by a mechanism likely related to the prevention of respiratory muscle fatigue. The aim of the present doctoral thesis was to determine factors contributing to the success of RMT, possibly through their influence on respiratory muscle fatigue. Furthermore, the thesis aimed at gaining new insights into the consequences of development of respiratory muscle fatigue during an isolated RMT session. This knowledge could contribute to a better understanding of the ergogenic mechanism of RMT and help to improve the design of RMT devices and regimes.

The first project aimed at determining possible factors contributing to the success or failure of RMT regarding exercise performance. For this purpose, a systematic review of the literature was performed on studies investigating the effect of RMT on exercise performance using at least one endurance exercise test until subjective exhaustion. The applied multiple linear regression model revealed that RMT improves exercise performance independent of the two most commonly used kinds of RMT, i.e. respiratory muscle strength and respiratory muscle endurance training (RMET). Also, improvements in performance did not differ between different types of sports. On the other hand, improvements were greater for less fit individuals compared to highly-trained athletes as well as in exercises of longer duration. Changes in performance are seen in constant load tests, time trials, and intermittent incremental tests, but not in incremental tests that are commonly used to assess maximal oxygen uptake or anaerobic threshold. Hence, all types of RMT can be recommended to improve submaximal exercise performance.

The aim of the second and third study was to investigate the functional consequences of respiratory muscle fatigue during an isolated RMET session. For this purpose, subjects performed normocapnic hyperpnoea at 70% of maximal voluntary ventilation (the usual RMET intensity). Their compartmental chest wall volume changes, allowing conclusions about respiratory muscle action, were analysed using optoelectronic plethysmography (OEP). When breathing pattern was not constrained, simulating high-intensity exercise conditions, rapid shallow breathing developed with reductions in end-inspiratory volumes of all chest wall compartments indicating global inspiratory

muscle fatigue. In contrast, when tidal volume was fixed, as it usually is during an RMET session, only end-inspiratory volume of the upper rib cage decreased. These findings suggest an important role of inspiratory rib cage muscle fatigue in the development of the previously observed rapid shallow breathing and imply that RMT might be effective by preventing inspiratory rib cage muscle fatigue.

What might make the important difference in the decision of medal races for highly trained athletes can often improve quality of life for patients. For individuals with cervical spinal cord injury (cSCI), pulmonary complications are the main cause of death. This is primarily due to respiratory muscle paralysis leading to an inability to cough efficiently, and to a paradoxical inward motion of the rib cage during inspiration resulting in poor ventilation of the upper lobes of the lungs and thus to increased secretion retention.

The last study was a pilot study to test the potential of RMET to reduce the inspiratory paradox in individuals with cSCI. Using OEP in combination with electromyography, we demonstrated that acute hyperpnoea reduced the inspiratory paradox due to the recruitment of accessory inspiratory muscles of the neck. However, a period of RMET did not translate into increased neck muscle recruitment during spontaneous breathing, so that the inspiratory paradox persisted. Nevertheless, RMET might alleviate secretion retention by its acute effect of reducing the inspiratory paradox and increasing ventilation.

In conclusion, the present results emphasise the crucial role of the inspiratory rib cage muscles and the functional consequences of their fatigue during hyperpnoea in able-bodied individuals and in individuals with cSCI.

## 2. ZUSAMMENFASSUNG

Spitzensportler interessieren sich für effiziente Trainingsreize. Es konnte gezeigt werden, dass ein Training der Atmungsmuskulatur die Ausdauerleistungsfähigkeit verbessern kann. Obwohl der Wirkungsmechanismus noch nicht genau bekannt ist, spielt die Verhinderung der Ermüdung der Atmungsmuskulatur möglicherweise eine entscheidende Rolle. Deshalb war das Ziel dieser Doktorarbeit, Faktoren zu eruieren, welche, allenfalls über eine Beeinflussung der Ermüdung, zum Erfolg von Atmungsmuskeltraining (AMT) beitragen. Ein weiteres Ziel war es, neue Einblicke in den Verlauf der Atmungsmuskelermüdung und deren Konsequenzen während eines einzelnen Trainings zu gewinnen. Diese Kenntnisse könnten zu einem besseren Verständnis des leistungsfördernden Mechanismus von AMT beitragen und möglicherweise auch dazu, die AMT Geräte oder Regimes zu verbessern.

Das Ziel des ersten Projekts war es, mögliche Faktoren zu bestimmen, die zu einer Leistungssteigerung nach AMT beitragen. Dazu wurde eine systematische Literaturübersicht durchgeführt über Studien, die anhand mindestens eines Leistungstests bis zur subjektiven Erschöpfung den Effekt von AMT auf die Ausdauerleistungsfähigkeit evaluiert hatten. Das angewandte multiple lineare Modell zeigte, dass AMT die Ausdauerleistungsfähigkeit verbessert und zwar unabhängig davon, welche der beiden gebräuchlichsten Trainingsmethoden, Atmungsmuskelkrafttraining oder Atmungsmuskelausdauertraining (AMAT), angewandt wird. Zudem sind die Leistungssteigerungen nach AMT unabhängig von der Sportart. Hingegen sind die Verbesserungen grösser in untrainierten Probanden und bei längerer Dauer der Ausdauerleistung. Die Veränderungen nach AMT zeigen sich in verschiedenen Tests, nämlich wenn bei einer konstanten Leistung bis zur Erschöpfung gefahren wird, wenn eine bestimmte Distanz in möglichst kurzer Zeit absolviert werden muss oder in einem intermittierenden Stufentest. Allerdings sieht man keine Veränderungen in den Stufentests, die normalerweise zur Erhebung der maximalen Sauerstoffaufnahme-fähigkeit oder der anaeroben Schwelle verwendet werden. Alle AMT-Arten können demzufolge zur Verbesserung der submaximalen Ausdauerleistungsfähigkeit empfohlen werden.

Das Ziel der zweiten und dritten Studie war, die funktionellen Auswirkungen der Ermüdung der Atmungsmuskulatur während einer isolierten Trainingseinheit zu untersuchen. Dazu führten die Probanden normokapnische Hyperpnoe bei 70% der maxima-

len willkürlichen Ventilation (der üblichen AMAT Intensität) durch. Mittels optoelektronischer Plethysmographie (OEP) wurden die Volumenveränderungen von drei Kompartimenten des Oberkörpers erhoben, welche Rückschlüsse auf die Aktion der verschiedenen Atmungsmuskeln erlauben. Bei nicht vorgegebenem Atmungsmuster, zur Simulation der Bedingungen während intensiver Ausdauerleistungen, entwickelte sich ein oberflächliches, rasches Atmungsmuster mit einer Reduktion sämtlicher end-inspiratorischer Volumina, was auf eine globale Ermüdung der Inspirationsmuskulatur hindeutet. Hingegen wurde bei fixiertem Atemzugvolumen, wie dies bei AMAT üblicherweise angewandt wird, einzig das end-inspiratorische Volumen des oberen Brustkorbes reduziert. Dies weist auf eine wichtige Rolle der inspiratorischen Muskeln des Brustkorbes bei der Entwicklung des zuvor beobachteten oberflächlichen, raschen Atmungsmusters hin. Zudem bedeuten diese Resultate, dass AMAT seinen leistungssteigernden Effekt möglicherweise über die Verhinderung der Ermüdung speziell dieser inspiratorischen Muskeln des Brustkorbes ausübt.

Was im Spitzensport den Unterschied zwischen Sieg und Niederlage ausmachen kann, wird oft auch bei Patienten eingesetzt, um deren Lebensqualität zu verbessern. Atemwegsprobleme gehören zu den häufigsten Todesursachen bei Personen mit einer zervikalen Querschnittslähmung (zQL). Die primäre Ursache dabei ist die Lähmung der meisten Atmungsmuskeln. Diese führt zu einem ineffizienten Husten und einer paradoxen Einwärtsbewegung des oberen Brustkorbes während der Inspiration, was wiederum die Belüftung der oberen Lungenflügel beeinträchtigt und so die Zurückhaltung von Schleim begünstigt.

Die letzte Studie war eine Pilotstudie zur Untersuchung, ob sich AMAT zur Reduktion des inspiratorischen Paradox in Personen mit zQL eignet. Mittels OEP und Elektromyographie konnten wir zeigen, dass akute Hyperpnoe zu einer vermehrten Rekrutierung von Atmungshilfsmuskeln des Halses führt und so das inspiratorische Paradox reduziert. Allerdings wurde dieses Rekrutierungsmuster nach einer mehrwöchigen Trainingsphase nicht in die spontane Atmung integriert und das inspiratorische Paradox blieb bestehen. Trotzdem könnte AMAT die Zurückhaltung von Schleim durch seinen akuten positiven Effekt auf das inspiratorische Paradox und die Belüftung vermindern.

Zusammenfassend zeigen die vorliegenden Resultate die Wichtigkeit der inspiratorischen Muskeln des Brustkorbes und die funktionellen Auswirkungen ihrer Ermüdung während Hyperpnoe bei Fussgängern und Personen mit einer zQL.