Einfluss von Atemverhalten und Training auf die Energiebereitstellung am Beispiel des Freistilschwimmens

Von der Sportwissenschaftlichen Fakultät

der Universität Leipzig

genehmigte

D I S S E R T A T I O N

zur Erlangung des akademischen Grades

Doctor philosophiae
(Dr. phil.)

vorgelegt

von	Anna-Britta Marie Matthaei
geboren am	16.04.1985 in Kiel
Gutachter:	Prof. Dr. Maren Witt
	Prof. Dr. Christina Spengler

Tag der Verleihung: 23.01.2018

Bibliographische Angaben

Universität Leipzig, Sportwissenschaftliche Fakultät

Institut für Allgemeine Bewegungs- und Trainingswissenschaft

Dissertation

Hauptsachtitel:

Einfluss von Atemverhalten und Training auf die Energiebereitstellung am Beispiel des Freistilschwimmens

---

Verfasser: Anna-Britta Matthaei

Erscheinungsjahr 2017, 172 Seiten, 51 Abbildungen, 71 Tabellen, 133 Literaturangaben, 4 Anlagen

---

Referat

Die Schwimmer des Deutschen Schwimmverbands verlieren zunehmend den Anschluss an die Weltspitze, was sich in einer sinkenden Anzahl von Medaillen bei internationalen Großereignissen äußert. Als Ursache wurden Mängel im langfristigen Leistungsaufbau identifiziert; in Folge dessen wurden spezifischere Inhalte für das Grundlagenausdauertraining gefordert, um die wettkampfspezifischen Kraftvoraussetzungen besser vorzubereiten. Da gezeigt werden konnte, dass die Atmung im Freistilschwimmen leistungsbegrenzend wirkt, sollte untersucht werden, wie sich durch ein gezieltes Training der Atemmuskulatur bislang ungenutzte Leistungsreserven erschließen lassen. Darüber hinaus sollte die Reaktion auf Hypoventilation unter Belastung getestet werden, da eine Analyse der Atemrhythmen international erfolgreicher Schwimmer ergeben hatte, dass sich niederfrequente Atmung im Wettkampf vorteilhaft auf die Leistung auswirkt. Dazu wurde eine Interventionsstudie mit 15 Nachwuchsschwimmern im Crossover-Design durchgeführt. Während des ersten und des zweiten Makrozyklus des Trainings- und Wettkampfjahres (TWJ) führten je sechs Sportler ein achtwöchiges Atemtraining mit einem POWERbreathe-Gerät durch. Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit und der Veränderung physiologischer Parameter durch Training wurden vor und nach jeder Intervention Stufentests im Strömungskanal durchgeführt, wobei drei verschiedene Intensitäten und zwei Atemfrequenzen ausgewertet wurden. Das Hauptergebnis der Studie bestand in einer verbesserten Kraftfähigkeit und Ökonomie der Atemmuskulatur, was sich bei isolierter Belastung in Form einer Vergrößerung des maximalen Minutenvolumens zeigte und beim Schwimmen zu verringerten Laktatwerten und niedrigerer Zyklusfrequenz bei gleichbleibender Belastung führte. Die Trainingswirkung wird dabei auf eine weniger starke Ausprägung des inspiratorischen Metaboreflexes und eine Optimierung der Vortriebsphasen in Folge einer schnelleren Inspiration zurückgeführt. Durch das Atemtraining konnte die

respiratorische Muskulatur in Trainingsphasen niedrigerer Intensität auf die höheren Belastungen im späteren Verlauf des TWJ vorbereitet werden. Der Einsatz eines solchen Trainings hat daher das Potential, die Leistungsfähigkeit von Freistilschwimmern zu steigern.

Schlagwörter: Atmung, Atemtraining, Energiebereitstellung, Leistungsphysiologie, Leistungssport, Schwimmen, Trainingswissenschaft

Danksagung

Vor allem während der Durchführung der praktischen Untersuchungen zu dieser Arbeit wurde mir nur allzu deutlich vor Augen geführt, wie sehr man nach Abschluss einer Dissertation das Bedürfnis hat, sich von Herzen bei allen Mitstreitern zu bedanken. Ohne die zahlreichen helfenden Hände, das persönliche Engagement und die fachliche Unterstützung aller Beteiligten wäre die Umsetzung dieser Arbeit im wahrsten Sinne des Wortes nicht möglich gewesen.

Einen ganz besonders großen Dank möchte ich dabei Prof. Dr. Maren Witt für die umfassende und ausdauernde Betreuung meiner Arbeit aussprechen. Ihre wertvollen fachlichen Impulse zur Ausgestaltung des Themas und zur Strukturierung der Arbeit unterstützten mich ebenso wie persönliche Gespräche, in denen sie mich in meinem Handeln bestärkte. Prof. Dr. Christina Spengler von der ETH Zürich danke ich für fundierte Einblicke in das Themengebiet des Atemtrainings, die ich anhand ihrer Forschungsergebnisse gewinnen konnte, sowie die Bereitschaft zur Begutachtung dieser Dissertation.

Gerade in der Anfangsphase der Arbeit half mir das Fachwissen und die langjährige Erfahrung von Spezialisten verschiedener Disziplinen bei der Konkretisierung der Zielstellung. Ich bedanke mich daher bei Dr. Anneliese Berbalk vom IAT Leipzig für weitreichende fachliche Anregungen auf dem Gebiet der Sportmedizin und Leistungsphysiologie. Dr. Jürgen Küchler und Dr. Jens Graumnitz danke ich dafür, dass sie ihren umfassenden praktischen Erfahrungsschatz hinsichtlich des Schwimmsports und -trainings sowie der Durchführung und Gestaltung von leistungsdiagnostischen Tests mit mir geteilt haben. Meinen ehemaligen Kollegen bei der Firma Cortex Biophysik und insbesondere Dr. Ralf Henker danke ich für wertvolle Anregungen auf dem Gebiet der Spiroergometrie und Erfahrungswerte zur praktischen Durchführung leistungsdiagnostischer Tests.

Die Durchführung der Hauptstudie erforderte den Einsatz diverser Messsysteme. Ich bedanke mich daher ganz herzlich beim Fachbereich Sportmedizin des IAT Leipzig für die Wartung und Leihgabe der benötigten technischen Gerätschaften für die Spiroergometrie und das Atemtraining. Ein besonderer Dank gebührt dabei Peter Rüdrich für den umfassenden technischen Support und die terminliche Koordination mit dem IAT. Andreas Bronst, Wolfgang Hellstern und Stefan Ehrlicher vom Fachbereich MINT des IAT danke ich für die Steuerung des Strömungskanals und die Umsetzung des komplexen Belastungsprotokolls. Ebenso danke ich Sven Oester vom Olympiastützpunkt Leipzig für die Durchführung der Herzfrequenzmessung und die Bereitstellung des dazu benötigten Mess- und Telemetriesystems. Das Institut für Sportmedizin der Universität Leipzig unterstützte mich mit der Bereitstellung des Materials für die Laktatdiagnostik und die Lungenfunktionstests. Ich bedanke mich hier insbesondere bei Dr. Roberto Falz für die Leihgabe der Geräte und bei Anja Grohmann für die Auswertung der Laktatproben.

Sämtliche theoretischen Überlegungen wären hinfällig gewesen, wenn es nicht auch die Möglichkeit gegeben hätte, sie in Zusammenarbeit mit engagierten Nachwuchssportlern überprüfen zu können. Mein großer Dank gilt daher Dirk Franke und Dirk Oehme vom Bundesstützpunkt Nachwuchs in Leipzig dafür, dass sie mir ihre Trainingsgruppen zur Verfügung gestellt haben und bereit waren, trotz des eng getakteten Zeitplans sowohl für Trainer als auch für Sportler Zeit für meine Studie zu erübrigen. Den beteiligten Sportlern danke ich ganz herzlich für ihre Bereitschaft, das zusätzliche Atemtraining eigenständig durchzuführen, sich mehrfach dem erschöpfenden Belastungsprotokoll auszusetzen und trotz größter Anstrengung sämtliche Vorgaben tatkräftig umzusetzen.

Ich danke darüber hinaus allen, die mich bei der praktischen Durchführung der Belastungstests im Strömungskanal unterstützt haben. Sarah Dinger und Annika Thiede halfen mir, im Rahmen der Pilotstudie erste Erkenntnisse zu sammeln. Die Hauptstudie wurde maßgeblich von Kathrin Döge vom Institut für Biomechanik der Sportwissenschaftlichen Fakultät unterstützt, bei der ich mich für die Durchführung der Lungenfunktionstests und die terminliche Flexibilität bedanken möchte. Auch allen studentischen Helfern sowie Florian Hallmann von Institut für Biomechanik und Astrid Hartenstein gebührt mein großer Dank.

In der Endphase der Arbeit ist man dankbar für jegliche Unterstützung, die einem hilft, die Dissertation zu einem erfolgreichen Abschluss zu führen. Ich bedanke mich daher herzlich bei Claudia Jahn und Astrid Hartenstein für das gemeinsame Durchleben der Höhen und Tiefen einer Doktorarbeit, ausdauerndes Motivieren, anregende Diskussionen und nicht zuletzt akribisches Korrekturlesen. Auch Paul Humann gebührt in diesem Zusammenhang Dank für sein scharfes Auge und hilfreiche Anregungen bei der Durchsicht des Manuskripts. Ihm, meinen Eltern sowie meinen Brüdern möchte ich darüber hinaus ganz besonders für jahrelangen Rückhalt, Geduld und Unterstützung in allen Belangen während meiner Promotionszeit danken. Ihr habt mir die Kraft und das Durchhaltevermögen gegeben, diese Arbeit zu vollenden.

Inhaltsverzeichnis

1 VERWENDETE ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE 1

2 EINLEITUNG 3

3 THEORIEPOSITIONEN 8

3.1 Anforderungen an die Atmung im Schwimmen 8

3.2 Bewegungsstruktur und Atemverhalten im Wettkampf 11
3.2.1 Vortriebsoptimierung im Freistilschwimmen 11
3.2.2 Atemrhythmen im Hochleistungssport 14

3.3 Atemphysiologie unter Belastung 18
3.3.1 Zentrale Steuerung und Reflexverarbeitung als Reaktion auf die Erfordernisse des Muskelstoffwechsels 18
3.3.2 Muskulär ausgelöste Kreislaufreflexe und ihre Auswirkung auf die Atmung 23

3.4 Atemtraining 26
3.4.1 Tauch- und Hypoventilationstraining 27
3.4.2 Einsatz spezieller Trainingsmittel für das Atemtraining 31

4 FORSCHUNGSDEFIZIT 35

5 FRAGESTELLUNG 37

6 METHODEN 38

6.1 Arbeitsschwerpunkte und Lösungsweg 38

6.2 Pilotstudie im Strömungskanal 39
6.2.1 Hintergrund und Zielstellung 39
6.2.2 Ablauf 40

6.3 Hauptuntersuchung 41
6.3.1 Probanden 41
6.3.2 Studiendesign 43
6.3.3 Material und Testumgebung 49
6.3.4 Datenaufbereitung und statistische Auswertung 53

6.4 Methodenkritik 57

7 ERGEBNISSE 60

7.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen 60

7.2 Auswertung des Atemtrainings 65
7.2.1 Ergebnisse der POWERbreathe-Trainingsintervention 65
7.2.2 Veränderung der Lungenfunktion 68

7.3 Leistungsphysiologische Veränderungen durch Training am Beispiel der GA-II-Belastung mit normaler Atemfrequenz 74

7.4 Einfluss der Intensität auf leistungsphysiologische Parameter 81

7.5 Einfluss der Atemfrequenz auf leistungsphysiologische Parameter 87
7.5.1 Betrachtung der Gesamtgruppe vor Studienbeginn 87
7.5.2 Entwicklung der leistungsphysiologischen Reaktion im Studienverlauf 91

7.6 Zusammenhänge zwischen leistungsphysiologischen Parametern und den Ergebnissen des POWERbreathe-Trainings 96

8 DISKUSSION 109

8.1 Wirkung eines lokalen Krafttrainingsreizes auf die Atemmuskulatur und auf pulmonale Parameter 109

8.2 Systemische Effekte eines Atemtrainings auf leistungsphysiologische Parameter 112

8.3 Konsequenzen einer Atmungseinschränkung für die Energiebereitstellung und die sportliche Leistung vor und nach einem Atemtraining 114
8.3.1 Grundsätzliche physiologische Reaktion auf eine Atemfrequenzverringerung 115
8.3.2 Veränderte Reaktion auf eine Atmungseinschränkung nach einem Atemtraining 117

8.4 Wirkung des Atemtrainings auf die Bewegungsstruktur 120

8.5 Trainingswissenschaftliche Aspekte 123
8.5.1 Leistungsphysiologische Entwicklung im Längsschnitt 123
8.5.2 Wirksamkeit des Atemtrainings in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Durchführung und der Trainingshäufigkeit 127

9 FAZIT 132

9.1 Empfehlungen für die Durchführung eines Atemtrainings 132

9.2 Zukünftige Fragestellungen 133

9.3 Zusammenfassung und Ausblick 135

10 LITERATUR 138

11 ABBILDUNGSVERZEICHNIS 146

12 TABELLENVERZEICHNIS 149

13 ANHANG 155

13.1 Individuelle Stufengeschwindigkeiten der Hauptstudie 155

13.2 Ergebnisse der Prüfung der leistungsphysiologischen Parameter auf Normalverteilung 156

13.3 Ergebnisse der leistungsphysiologischen Parameter der vier Stufentest in Abhängigkeit von der Intensität 159

13.4 Ergebnisse der Kreuztabellenanalyse für den Parameter Zykluszeitverlängerung 167

1 Verwendete Abkürzungen und Symbole

♂	männlich
♀	weiblich
α	Alpha, Signifikanzniveau
Δ	Delta, bezeichnet Differenzen (bezogen auf einen Parameter)
Abb.	Abbildung
AF 1	Atemfrequenz 1, 2er- oder 3er-Atmung je nach Vorzugsseite des Sportlers
AF 2	Atemfrequenz 2, 4er- oder 5er-Atmung je nach Vorzugsseite des Sportlers
ATP	Adenosintriphosphat
AZV	Atemzugvolumen
BxB	*breath-by-breath* (Erfassung spiroergometrischer Parameter für jeden einzelnen Atemzug)
CFB	*Controlled frequency breathing* (Einschränkung der Atemfrequenz beim Schwimmen)
COPD	*Chronic obstructive pulmonary disease* (chronisch-obstruktive Lungenerkrankung)
CO_2	Kohlendioxid
DSV	Deutscher Schwimmverband
EPTL	*Exspiratory pressure threshold loading* (exspiratorische druckabhängige Belastung durch einen Atemwiderstand)
FEV1	Einsekundenkapazität
FVC	Forcierte Vitalkapazität
FRL	*Flow resistive loading* (flowabhängige Belastung durch einen Atemwegswiderstand)
GA I	Grundlagenausdauer I, entspricht im Schwimmsport 75-85 % der Maximalbelastung (bezogen auf die Geschwindigkeit)
GA II	Grundlagenausdauer II, entspricht im Schwimmsport 85-95 % der Maximalbelastung (bezogen auf die Geschwindigkeit)
HF	Herzfrequenz
IPTL	*Inspiratory pressure threshold loading* (inspiratorische druckabhängige Belastung durch einen Atemwiderstand)
m	Meter
min	Minuten

MIP	*Maximal inspiratory pressure* (maximaler inspiratorischer Druck)
MVV	Maximales Minutenvolumen (in Ruhe)
MW	Mittelwert
MZ	Makrozyklus
n. s.	nicht signifikant
O_2	Sauerstoff
p	p-Wert, von *propability* (Wahrscheinlichkeit), Signifikanzwert
P	Leistung [W]
PTL	*Pressure threshold loading* (druckabhängige Belastung durch einen Atemwiderstand)
r	Maßzahl der Effektstärke (Bravais-Pearson-Korrelation)
s	Sekunden
STABW	Standardabweichung
Tab.	Tabelle
TG	Trainingsgruppe
VIH	*Voluntary isocapnic hyperventilation* (freiwillige isokapnische Hyperventilation)
$\dot{V}O_2$	Sauerstoffaufnahme
W	Arbeit [J]
WM	Weltmeisterschaften
WSA	Wettkampfspezifische Ausdauer
ZF	Zyklusfrequenz
ZNS	Zentrales Nervensystem

2 Einleitung

> "The last ten or fifteen meters are the most painful, physically and mentally. Muscles flood with lactic acid. Strokes shorten, weaken, churn, and find no purchase. It's a terrible, desperate feeling, where the results of training are determined. Not enough cardio and your entire body fails, not enough drills and your stroke slips, not enough strength training and muscles burn like paper curling in flames." (Shapton, 2012, S. 33f)

Dieser Ausspruch der ehemaligen kanadischen Leistungsschwimmerin Leanne Shapton verdeutlicht, auf wie vielen verschiedenen Ebenen sich zum Teil erst auf den letzten Metern eines Schwimmwettbewerbs entscheidet, welcher der Teilnehmer im Vorfeld am effektivsten trainiert hat. In allen erfolgreichen Schwimmnationen der Welt wird mit Hilfe leistungsdiagnostischer Verfahren angestrebt, Spitzensportler durch das Aufzeigen individueller Leistungspotentiale zu befähigen, ihr Training zu optimieren und im Wettkampf die bestmögliche Leistung zu erbringen. Wie erfolgreich dies gelingt, zeigt die hohe Dynamik der Leistungsentwicklung im Schwimmsport der letzten Jahre, die sich unter anderem durch eine Vielzahl neuer Weltrekorde manifestiert (Graumnitz & Küchler, 2017). Zuletzt verdeutlichten die Olympischen Spiele 2016 in Rio de Janeiro, wie hoch die Leistungsdichte in der Weltspitze derzeit ist: Bei den meisten Finalrennen lagen nur wenige Zehntelsekunden zwischen Platz 1 und 5, über die 50 m Freistil trennten den Gold- und den Silbermedaillengewinner lediglich eine Hundertstelsekunde. Auch über 100 m Schmetterling kam es zu einem eindrucksvollen Kopf-an-Kopf-Rennen: Während sich zwar am Ende Joseph Schooling (Singapur) mit 0,75 s Vorsprung deutlich Gold sichern konnte, kamen dahinter drei Weltklasseathleten (Michael Phelps/USA, Laszlo Cseh/Ungarn und Chad Le Clos/Südafrika) zeitgleich auf Rang 2. Es besteht daher auf jedem Leistungsniveau die Notwendigkeit, zusätzliche Leistungsreserven zu erschließen, um sich in Wettkampfsituationen den entscheidenden Vorteil zu sichern. Zum Teil geschieht dies durch Technikvarianten, die den Spielraum des Regelwerks ausreizen, wie z. B. Delphinkicks nach der Wende im Brustschwimmen und eine besonders lange Tauchphase in allen anderen Schwimmstilen. Eine weitere Möglichkeit bot die immer weiter fortschreitende Entwicklung der Schwimmbekleidung, die im Zustandekommen von Fabel-Weltrekorden mit den sogenannten „Hightech-Anzügen" mündete. Auf alle drei genannten Entwicklungen wurde mit Regeländerungen reagiert, so dass sich die Suche nach zusätzlichen Potentialen spätestens seit dem Verbot der Schwimmanzüge 2010 wieder auf technische und konditionelle Aspekte konzentriert.

Die Spitzensportler des Deutschen Schwimmverbands können jedoch derzeit mit der Leistungsentwicklung der Weltspitze nicht Schritt halten. Seit Ende der neunziger Jahre hat sich die Medaillenausbeute der deutschen Beckenschwimmer bei internationalen Großereignissen zunehmend verschlechtert. Obwohl es nach der Wiedervereinigung zu einem sprunghaften Anstieg der Platzierungen auf den vordersten Rängen kam und die deutsche Mannschaft bei den Olympischen Spielen 1992 und 1996 elf bzw. zwölf Medaillen erringen konnte, ließ sich das hohe Leistungsniveau nicht bis in die Gegenwart fortführen (Küchler, Graumnitz & Buck, 2013). Bereits bei den Olympischen Spielen 2000 in Sydney zeichnete sich bei den Männern ein zunehmender Abstand zur Weltspitze ab, während die Frauen sich noch behaupten konnten (Küchler & Graumnitz, 2001). Die letzten Olympiamedaillen wurden 2008 durch Britta Steffen errungen, die Gold über 50 m und 100 m Freistil holte. 2009 konnte die deutsche Mannschaft bei der WM noch einmal von der internationalen Ruhephase im nacholympischen Jahr und den Ganzkörperschwimmanzügen profitieren, jedoch gelang es in den Folgejahren nicht mehr, Jugendliche an die Weltspitze heranzuführen bzw. mit den erwachsenen Athleten den Anschluss an die internationale Elite zu halten – der Abstand vergrößerte sich sogar zunehmend (Küchler et al., 2013, vgl. Abb. 1). Lediglich einzelne Athleten (Britta Steffen,

Paul Biedermann, Marco Koch) konnten noch hohe Leistungen erzielen und sich auf den vorderen Rängen platzieren.

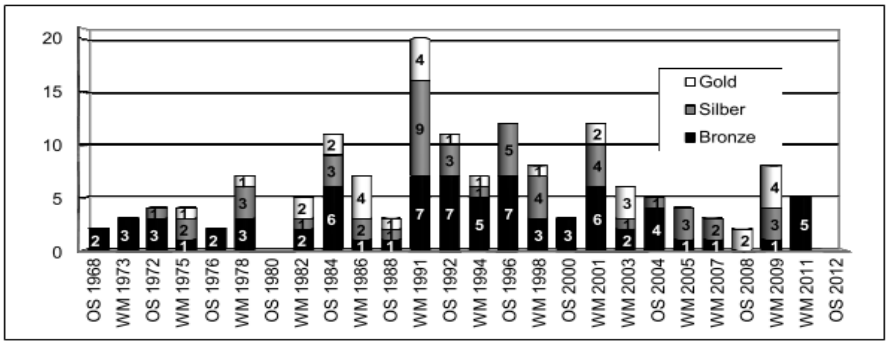


Abb. 14. BRD-Medaillen bei OS und WM (olympische Beckendisziplinen) seit 1968

Abb. 1. Abnehmende Medaillenzahl der deutschen Nationalmannschaft seit Ende der neunziger Jahre (Angaben vor 1990: nur BRD; Küchler et al., 2013)

Als Ursache wurden in verschiedenen Analysen, die zeitnah nach den jeweiligen Wettkämpfen durchgeführt wurden, wiederholt Mängel im langfristigen Leistungsaufbau identifiziert (Küchler & Graumnitz, 2001; Graumnitz & Küchler, 2004, 2009; Küchler et al., 2013). Es wurde angemahnt, dass die Trainingsplanung aufgrund fehlender Rahmentrainingspläne, nicht vorhandene Konzepte für die Leistungsentwicklung über den gesamten Olympiazeitraum hinweg und eine fehlende zentrale Steuerung nicht zielgerichtet genug erfolgt und daher eine zu geringe Wirksamkeit entfaltet, wodurch sich Defizite bei der mittel- und langfristigen Trainingssteuerung ergeben (Graumnitz & Küchler, 2004, 2009). Dieses Problem wird dadurch verstärkt, dass die von deutschen Athleten absolvierten Trainingsumfänge international gesehen zu gering sind und in den meisten Fällen nicht einmal den nationalen Vorgaben entsprechen: Während Athleten erfolgreicher Schwimmnationen wie die USA, China oder Ungarn 2500-3000 km pro Jahr absolvieren, erreichen deutsche Schwimmer im Schnitt lediglich Umfänge von 1500-2000 km (Küchler et al., 2013). Da auch das allgemeine Athletiktraining nicht in einem adäquaten Umfang durchgeführt wird, kommt es in Folge dessen zu Defiziten der Grundlagenausdauer (GA) und der Kraftausdauer (Küchler & Leopold, 2000). Dadurch, dass darüber hinaus auch das wettkampfnahe Training nicht in ausreichendem Maße durchgeführt wird, sind Mängel der schwimmspezifischen Kraftvoraussetzungen nachweisbar (Küchler et al., 2013). Im Wettkampf zeigt sich die daraus resultierende mangelnde Konditionierung an einem Leistungseinbruch z. B. im letzten Viertel der 100 m- bzw. 200 m-Strecken (Graumnitz & Küchler, 2009; Küchler et al., 2013). Zur Behebung dieser Missstände wurden unter anderem langfristige Konzepte zur zielgerichteten Entwicklung der Leistung und spezifischere Inhalte im Grundlagenausdauer-Training gefordert. Durch die planvolle Entwicklung relevanter Teilaspekte soll die wettkampfspezifische Kraft und Kraftausdauer besser vorbereitet werden (Graumnitz & Küchler, 2004; Küchler & Graumnitz, 2001).

Im Zusammenhang mit dem langfristigen Leistungsaufbau ist zu berücksichtigen, dass die Medaillengewinner bei Olympia im Mittel Anfang 20 waren (Graumnitz & Küchler, 2004, 2009; Küchler et al., 2013) und bereits im Jugendbereich hervorragende Leistungen erzielten (Küchler et al., 2013). Im Spitzenbereich beobachteten Tendenzen müssen daher bereits im Nachwuchsbereich vorbereitet werden, um langfristig wieder Jugendliche an die Weltspitze heranzuführen. Dazu wurde 2006 erstmals eine Nachwuchskonzeption entwickelt, die seitdem mehrfach überarbeitet wurde (Bußmann, Döttling, Jankowski, Jedamski, Lambertz, Lamodke, Ludewig, Staufenbiel & Spahl, 2015). Sie sieht unter anderem eine deutliche Erhöhung der Trainingsumfänge der Nachwuchssportler vor: im Aufbautraining (13-14 Jahre) bereits 22 Stunden, im

Anschlusstraining (15-16 Jahre) 26 Stunden pro Woche. Inklusive des regulären Schulunterrichts übersteigt die Arbeitsbelastung damit ab dem 10. Lebensjahr bereits die eines Berufstätigen (ebenda). Diese Vorgaben können vielerorts nicht realisiert werden, da der Trainingsalltag nicht leistungssportgerecht ausgerichtet ist (Küchler et al., 2013). Eine gute Koordination zwischen Schule und Verein bzw. Stützpunkt ist notwendig, um entsprechende Tagesabläufe zu ermöglichen. Darüber hinaus verfügen viele Vereine nicht über die benötigten Wasserflächen, was durch die aktuelle Entwicklung der Zusammenlegung von Stützpunkten und der damit einhergehenden Reduzierung regionaler Förderung weiter verschärft wird. Wo eine Ausweitung des Wassertrainings nicht möglich ist, müssen andere Wege gefunden werden, um den geforderten Trainingsumfängen und -inhalten gerecht zu werden und mit den vorhandenen Mitteln zusätzliche Leistungspotentiale zu erschließen.

Um den deutschen Schwimmsport international wieder wettbewerbsfähig zu machen, sind somit Verbesserungen des langfristigen Leistungsaufbaus, spezifischere Inhalte im Grundlagenausdauer-Training und die Integration neuer Entwicklungen aus der Weltspitze in das Nachwuchstraining notwendig, um diese ausreichend vorbereiten zu können. Nur so können Schwimmer, die schon im Jugendbereich herausragende Leistungen zeigen, an die Weltspitze herangeführt werden. Da sich eine Umfangserhöhung oder eine grundsätzliche Umstrukturierung des Wassertrainings zur Erschließung neuer Leistungsreserven aufgrund der dazu benötigten umfangreichen strukturellen Veränderungen nicht ohne weiteres umsetzen lässt, ist es kurzfristig zielführender, stattdessen die von Küchler und Graumnitz geforderte Steigerung der Spezifität des GA-Trainings zu forcieren. Eine Erhöhung der Effektivität dieser Trainingsinhalte kann zur Vorbereitung der wettkampfspezifischen Kraft und Kraftausdauer genutzt werden, wenn die Größenordnung des Krafteinsatzes und die zeitliche Struktur von Ansteuerung und Koordination der beteiligten Muskeln der Belastung unter Wettkampfbedingungen entspricht (Küchler et al., 2013).

Bei der Gestaltung des Trainings ist dabei zu berücksichtigen, dass das Zustandekommen einer sportlichen Wettkampfleistung als komplexes Zusammenspiel verschiedener Leistungsfaktoren beschrieben wird. Dazu gehören neben der Konstitution und der Kondition auch technisch-koordinative und strategische Leistungsvoraussetzungen sowie die Handlungskompetenz des Sportlers (Barth & Schnabel, 2014). Besonders die energetisch-konditionellen Leistungsvoraussetzungen, die die Kraft-, Schnelligkeits- und Ausdauerfähigkeiten umfassen, sind eng an die Fähigkeit gekoppelt, ein ausreichend großes Atemminutenvolumen durch die Lungenventilation bereitstellen zu können. Dass dazu ein koordiniertes Ineinandergreifen von Herz-Kreislauf-Mechanismen notwendig ist, zeigt das „Modell der drei Zahnräder“ von Karlman Wassermann (Kroidl, Schwarz, Lehnigk & Fritsch, 2014, vgl. Abb. 2). Das kardiopulmonale System fungiert dabei als Sauerstoff-Zulieferer der beanspruchten Muskulatur; erst durch die effiziente und aufeinander abgestimmte Arbeitsweise aller drei Systeme kann die sportliche Leistung realisiert und maximiert werden.

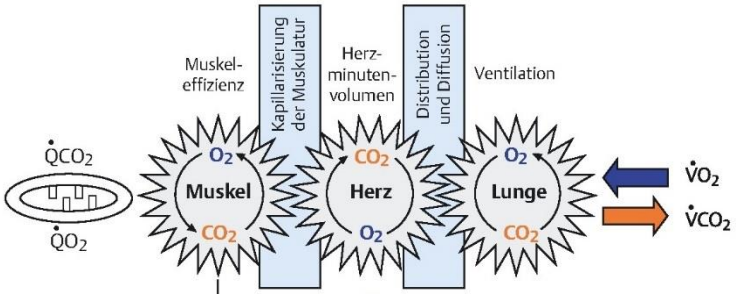


Abb. 2. „The 3 gears“ nach Wasserman (modifiziert nach Kroidl et al., 2014)

Bereits in den neunziger Jahren konnte in Studien gezeigt werden, dass auch die Atmung und die daran beteiligte Muskulatur einen leistungsbestimmenden Parameter für die sportliche Leistungsfähigkeit darstellt (Boutellier, 1996), was einleuchtend erscheint angesichts der Tatsache, dass die Ventilation der primäre Transportmechanismus des Sauerstoffs auf dem Weg zum Muskel ist. Wettkampfanalysen bei internationalen Großereignissen lieferten darüber hinaus erste Hinweise darauf, dass Spitzensportler während der zyklischen Bewegung individuelle und reproduzierbare Atemrhythmen anwenden. Erfolgreiche Sportler zeichnen sich häufig auch durch eine lange Tauchphase an der Wende aus (Küchler et al., 2013; Küchler & Graumnitz, 2001). Das Atemverhalten unter Wettkampfbelastungen ist somit offensichtlich Bestandteil des Trainings von Hochleistungsathleten und hat möglicherweise das Potential, die Wettkampfleistung zu verbessern. Da die Trainingspläne dieser Sportler zur Wahrung ihres Leistungsvorsprungs im Allgemeinen nicht frei zugänglich sind, ist derzeit nicht bekannt, wie ein solches individuelles Atemverhalten – auch im Hinblick auf den langfristigen Leistungsaufbau – trainiert werden kann und welche Aspekte bei der Gestaltung des Atemrhythmus relevant sind. Da auch der Einfluss eines bestimmten Atemverhaltens auf die Energiebereitstellung noch nicht umfassend untersucht wurde, fehlen wesentliche Grundlagen zur gezielten Optimierung der Atmung eines Sportlers unter Berücksichtigung der individuellen Leistungsvoraussetzungen.

Letztere umfassen auch die Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur selbst. Wie negativ sich eine nicht optimal belastete Atemmuskulatur während einer sportlichen Bewegung auswirkt, kann jeder Sportler aus schmerzhafter Erfahrung bestätigen, der je unter Seitenstichen litt, die vielfach auf Krämpfe des Zwerchfells in Folge einer Minderdurchblutung zurückgeführt werden (Costabel & Kroegel, 2013). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Masse der Respirationsmuskulatur eines erwachsenen Mannes 4-5 kg und damit rund 16 % der Gesamtmuskulatur beträgt (Roussos & Macklem, 1982), kann auch diesem Teil der Muskulatur einen Anteil am Zustandekommen der körperlichen Leistungsfähigkeit zugesprochen werden – und somit auch die Möglichkeit, diesen durch ein spezifisches Training zu optimieren. Ein solches Atemtraining ist bereits aus verschiedenen Disziplinen des Kampf- und Kraftsports bekannt; auch im Yoga oder in der Meditation sowie in Teilgebieten aus dem Bereich der Musik (Bläser, Sänger) oder der audiovisuellen Medien (Sprecher, Radiomoderatoren) widmet man sich der Atmung aus den unterschiedlichsten Zielstellungen heraus mit einem speziellen Training. In jüngster Vergangenheit fanden sich auch im Leistungssport Ansätze für ein gezieltes Atemtraining, um auf diesem Wege bislang ungenutzte Leistungsreserven zu erschließen. Vor dem Hintergrund einer angestrebten Erhöhung der Spezifität des GA-Trainings und unter Berücksichtigung der begrenzten Verfügbarkeit von Wasserflächen kommt in diesem Zusammenhang der Einsatz neuer Trainingsmittel und -methoden im Landtraining in Betracht, um in der Trainingsphase des Grundlagenaufbaus die Atemmuskulatur zu trainieren. Dadurch werden die beteiligten Muskeln bereits in Trainingsabschnitten, in denen sie durch die Schwimmbelastung nur unzureichend gefordert werden, einem Trainingsreiz ausgesetzt, der sich am Atemverhalten im Wettkampf orientiert. Das Ziel ist dabei die „adäquate Steigerung in schwimmspezifischen Kraftvoraussetzungen“ (Küchler et al., 2013, S. 86).

Diese Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, Leistungspotentiale im Zusammenhang mit dem Atemverhalten beim Freistilschwimmen zu erschließen. Das Hauptaugenmerk soll dabei auf Ökonomiebetrachtungen und Auswirkungen von Atemrhythmen und respiratorischen Trainingsinhalten auf die Energiebereitstellung unter Belastung gelegt werden. Mit Rücksicht auf den langfristigen Leistungsaufbau sollen Trainingsinhalte identifiziert werden, die bereits im Nachwuchsbereich eingesetzt werden können, um die Sportler auf die Anforderungen im Hochleistungsbereich vorzubereiten. Dazu soll untersucht werden, welche

Atemrhythmen von international erfolgreichen Sportlern angewendet werden und wie diese von Nachwuchssportlern umgesetzt werden können. Des Weiteren soll umfassend beleuchtet werden, welche Chancen und Möglichkeiten sich durch ein spezielles Training der Atemmuskulatur für den Schwimmsport ergeben. Anhand der im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Daten soll eine umfassende Beschreibung der einem Atemtraining zugrundeliegenden physiologischen Wirkmechanismen erfolgen, die zur Leistungsverbesserung beitragen. Auf Basis dieser Studienergebnisse sollen Empfehlungen für den Einsatz eines Atemtrainings in der Trainingspraxis abgeleitet werden, um dazu beizutragen, den Abstand der Schwimmer des deutschen Schwimmverbands zur Weltspitze langfristig wieder zu verringern.

Der Reiz dieses Themas lag dabei für die Autorin im interdisziplinären Zusammengreifen verschiedener Aspekte. Bereits die Betrachtung des menschlichen Körpers als Einheit verschiedener Funktionssysteme, die in unterschiedlicher Weise auf Belastung reagieren und Anpassungserscheinungen in Folge von Training zeigen, stellte ein spannendes Forschungsfeld dar. Der Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie erforderte darüber hinaus die Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen aus den Bereichen der Medizin, des Sports und der Technik. Sowohl bei der Planung als auch bei der Auswertung konnte in Folge dessen auf theoretisches Wissen und praktische Erfahrungen aus der Physiologie, der Biomechanik, der Trainingswissenschaft sowie der Medizin- und Sportgerätetechnik zurückgegriffen werden. Die sich daraus ergebende Vielseitigkeit der zu berücksichtigenden Aspekte und die Verbindung aller Inhalte zu einem Gesamtkonzept machten die Bearbeitung des Themas sowohl zu einer herausfordernden als auch zu einer sehr anregenden Tätigkeit. Nicht zuletzt wurde diese Arbeit auch von dem Wunsch motiviert, einen Beitrag zur Wissenschaft zu leisten und durch das Betreten von Neuland den derzeitigen Wissensstand voranzutreiben.

Im Verlauf dieser Arbeit sollen zunächst relevante Theoriepositionen vorgestellt werden, anhand derer sich das zu bearbeitende Forschungsdefizit formulieren lässt. Das weitere Vorgehen bei der Bearbeitung des Themas orientierte sich an den folgenden Forschungsfragestellungen und wird im sich anschließenden Kapitel in Form eines Lösungswegs kurz skizziert. Es folgt die Darstellung einer Pilotstudie, in der erste Erfahrungswerte zur Gestaltung der Hauptuntersuchung gesammelt werden konnten. Im Rahmen der Hauptstudie wurde im weiteren Verlauf mit je sechs Nachwuchsschwimmern zu verschiedenen Zeitpunkten im Trainings- und Wettkampfjahr ein achtwöchiges Atemtraining durchgeführt und anhand von Belastungstests die Entwicklung ausgewählter leistungsphysiologischer Parameter und die Reaktion auf unterschiedliche Atemfrequenzen im Schwimmen untersucht. Es folgt eine Darstellung der Ergebnisse sowie die Diskussion der Resultate hinsichtlich des Einflusses des Atem- und Schwimmtrainings sowie des Atemrhythmus auf die Energiebereitstellung. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen, Empfehlungen für die Durchführung eines Atemtrainings und einem Ausblick auf zukünftige Forschungsfelder.

3 Theoriepositionen

3.1 Anforderungen an die Atmung im Schwimmen

Die vergangenen 15 Jahre waren international durch eine hohe Dynamik der Entwicklung der Weltrekorde geprägt (Küchler et al., 2013). Diese wurde unter anderem durch die Weiterentwicklung der Schwimmbekleidung begünstigt. Die sogenannten „Hightech-Anzüge" unterstützten durch erhöhte Kompression die Muskeltätigkeit und den Transport des venösen Blutes und ermöglichten durch spezielle Beschichtungen und den dadurch minimierten Strömungswiderstand im Wasser eine deutliche Verbesserung des Vortriebs (Graumnitz & Küchler, 2009). Das Verbot der Schwimmanzüge im Jahr 2010 hatte große Auswirkungen auf die erzielten Wettkampfergebnisse, vor allem bei den Männern, bei denen die Oberfläche der zulässigen Schwimmbekleidung massiv verringert wurde. Nach einem anfänglichen Rückgang der Leistungen wurden jedoch in den Folgejahren (und bis heute) wieder neue Weltrekorde aufgestellt. Offensichtlich hat die Notwendigkeit, neue Leistungspotentiale zu erschließen, zu einer Umstellung der Trainingsmethodik und einem größeren Einfluss der Schwimmtechnik geführt. Die fehlenden Vorteile des Schwimmanzugs hinsichtlich Vortrieb und Rumpfstabilität können dabei durch höhere Kraftpotentiale kompensiert werden (Küchler et al., 2013). Eine Auftriebsverbesserung lässt sich darüber hinaus auch durch einen größeren Befüllungsgrad der Lungen realisieren. Dazu ist ein hohes Maximalvolumen und die Fähigkeit zum schnellen Wiederauffüllen notwendig (McConnell, 2011).

Bei bisherigen Untersuchungen zu leistungsbestimmenden Merkmalen im Schwimmen anhand von Topathleten wurden vorwiegend kinematische Parameter zur Antriebsgestaltung analysiert (z. B. auf Basis der Bewegungsabläufe während Start und Wende oder der Größenordnung von Zyklusfrequenz und -geschwindigkeit während der zyklischen Bewegung), es fanden sich jedoch auch Hinweise auf unterschiedliche Atemstrategien. Bislang liegen wenige Untersuchungen zum Atemverhalten und dessen Bezug zur Leistung vor, insbesondere keine, die das individuelle Atemverhalten einzelner Spitzenathleten analysieren und das Zustandekommen durch Training darstellen. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass Sportler und Trainer zur Wahrung ihres Wettbewerbsvorteils daran interessiert sind, individuelle Trainingsprogramme unter Verschluss zu halten. Dass das Atemverhalten Gegenstand des Hochleistungstrainings ist, wird jedoch durch Rennen deutlich, in denen Einzelsportler durch Technikvariationen die Grenzen dieses Leistungsparameters austesten. So siegte Michael Phelps im Jahr 2016 beim Pro Swim Series Meeting in Austin/Texas über die 200 m Lagen mit einer Bewegungsumstellung auf den letzten 10-15 m der Freistilstrecke: statt Wechselbeinschlag führte er Delphinkicks aus. Diese Technik wurde bereits im Jahr 2000 durch den Australier Michael Klim angewandt und verhindert eine Atmung auf den letzten Metern zugunsten einer gesteigerten Armfrequenz (Schwenke, 2016). Phelps und Klim profitieren dabei von der biomechanisch günstigen Verringerung der Atmung im Freistilschwimmen, da das Anheben des Kopfes zum Atmen die Wasserlage des Schwimmers verschlechtert und den Vortriebswiderstand erhöht (Key, Bunn & Eschbach, 2014; Pedersen & Kjendlie, 2006). In einer Studie konnte gezeigt werden, dass bei einem Verzicht auf die Atmung durch die Minimierung des Vortriebwiderstands Zeitunterschiede von bis zu einer Zehntelsekunde während der zyklischen Bewegung auf einer Schwimmstrecke von 10 m erreicht werden können (Pedersen & Kjendlie, 2006). Die Atmung kann jedoch nicht beliebig stark reduziert werden, da mit zunehmender Belastungsdauer der Anteil des aeroben Stoffwechsels und somit die Notwendigkeit einer höheren Atemfrequenz steigt (Neumann, Pfützner & Berbalk, 2013, vgl. Abb. 3).

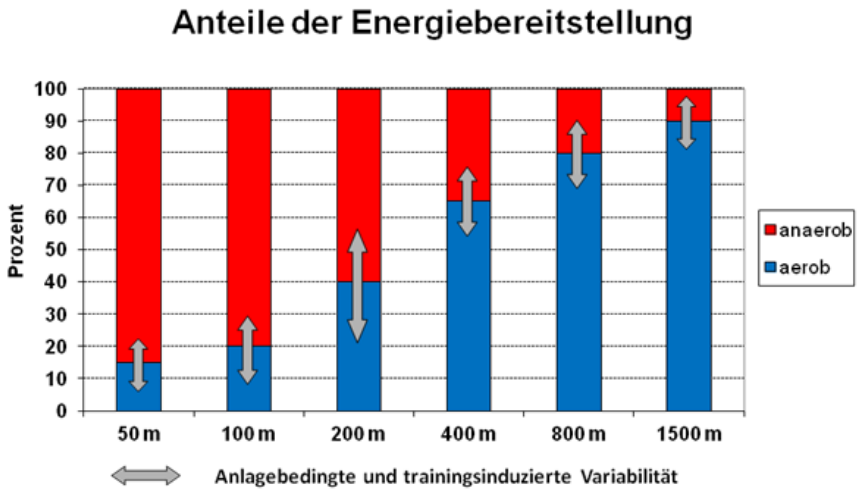


Abb. 3. Anteile der Energiebereitstellung (in Anlehnung an Neumann et al., 2013)

Auch die Atemmuskulatur selbst hat durch die hohen Anforderungen, die beim Freistilschwimmen an die Atmung gestellt werden, einen bestimmten Energiebedarf. So muss unter Belastung ein Atemminutenvolumen von bis zu 250 l/min realisiert werden; außerdem ist die Atmung an die Bewegung gekoppelt und somit zeitlichen Einschränkungen unterworfen. Dabei muss die Inspiration sowohl schnell als auch tief erfolgen (Mickleborough, Stager, Chatham, Lindley & Ionescu, 2008), was erfordert, dass die Atemmuskulatur über einen großen Bereich des möglichen Lungenvolumens hohe Kontraktionsgeschwindigkeiten realisiert. Dadurch ergibt sich ein mechanisch ungünstiges Zusammenspiel von Muskellänge und -spannung bzw. aufgebrachter Kraft und resultierender Geschwindigkeit (Clanton, Dixon, Drake & Gadek, 1987; Jakovljevic & McConnell, 2009). Durch den im Schwimmbecken auf dem Brustkorb lastenden Wasserdruck erhöht sich der inspiratorische Widerstand, was die Einatmung zusätzlich erschwert (McConnell, 2011). Die Anforderungen an die beteiligte Atemmuskulatur werden darüber hinaus dadurch weiter erhöht, dass diese in einer liegenden Position im Wasser rund 16 % weniger Kraft aufbringen kann als im aufrechten Zustand des Sportlers an Land (ebenda). Es ergibt sich daher die Notwendigkeit einer Atemstrategie, die sowohl die biomechanischen Vorteile einer reduzierten Atmung nutzt, als auch den physiologischen Erfordernissen durch die Energiebereitstellung unter körperlicher Belastung gerecht wird (Abb. 4).

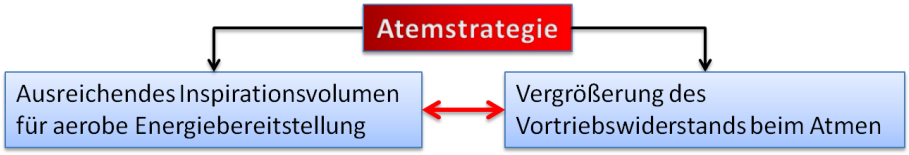


Abb. 4. Komponenten der Atemstrategie

Um das zuvor dargestellte Atemverhalten umsetzen zu können und den Anforderungen an die Atmung beim Freistilschwimmen gerecht zu werden, ist neben entsprechender technisch-koordinativer Fertigkeiten eine gewisse Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur selbst notwendig. Das Schwimmtraining führt bereits zu diversen morphologischen Anpassungserscheinungen des Atemtraktes. So wurden bei Schwimmern vergrößerte Lungenvolumina gemessen, insbesondere eine gesteigerte Vitalkapazität und damit einhergehend eine erhöhte Totalkapazität; auch die pulmonale Diffusionskapazität übersteigt im Allgemeinen die Sollwerte (Clanton et al., 1987; Mickleborough et al., 2008). Die Lungenfunktion von Schwimmern ist dabei nicht nur besser als die eines Untrainierten, sondern übertrifft auch die Werte von Athleten anderer

Sportarten (Mickleborough et al., 2008). Es wird vermutet, dass die Konditionierung der beteiligten Atemmuskulatur während des Schwimmtrainings durch den Wasserdruck gegen den Brustkorb, den erhöhten Atemwegswiderstand durch das Eintauchen des Körpers ins Wasser und die Veränderung der Atmung im Vergleich zu Belastungen an Land aufgrund der zeitlichen Kopplung von Atem- und Bewegungsfrequenz erfolgt. Infolgedessen kann es zu einer Verbesserung der respiratorischen Muskelkraft, einer Änderung der Dehnbarkeit des Brustkorbs, alveolärer Hyperplasie und isotropem Lungenwachstum kommen. Es liegen jedoch nur begrenzt Daten zu den genauen Mechanismen, die bei Schwimmern zu pulmonalen Adaptationen führen, vor (ebenda). Wie die Atemmuskulatur durch die Belastungen im Training und Wettkampf beansprucht wird, ist jedoch insofern unter leistungsphysiologischen sowie trainingswissenschaftlichen Gesichtspunkten relevant, als nachgewiesen werden konnte, dass es beim Schwimmen innerhalb weniger Minuten zu einer erheblichen Ermüdung der Atemmuskulatur kommen kann. Kurze, hochintensive Belastungen (200 m, 90-95 %) führen zu einer deutlichen Verringerung des maximalen Drucks, der bei der Inspiration durch die Atemmuskulatur erzeugt werden kann. Die im Vergleich zum Ausgangsniveau um 29 % gesunkenen Werte spiegeln die Ermüdung der beteiligten Muskulatur im Brustkorb und des Zwerchfells wider (Lomax & McConnell, 2003) und übertreffen den in anderen Sportarten beobachteten Druckabfall deutlich (McConnell, 2011, vgl. Abb. 5). Durch die hohen Anforderungen an die Atmung sind Schwimmer besonders anfällig für respiratorische Muskelermüdung (Brown & Kilding, 2011; McConnell, 2011). Die verminderte Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur steht dabei im Zusammenhang mit der Atemfrequenz, da eine Verringerung der Ventilation mit einer Erhöhung des Atemzugvolumens einhergeht und es infolgedessen zu einer geänderten muskulären Belastung und einer entsprechend beschleunigten Muskelermüdung kommt (Jakovljevic & McConnell, 2009).

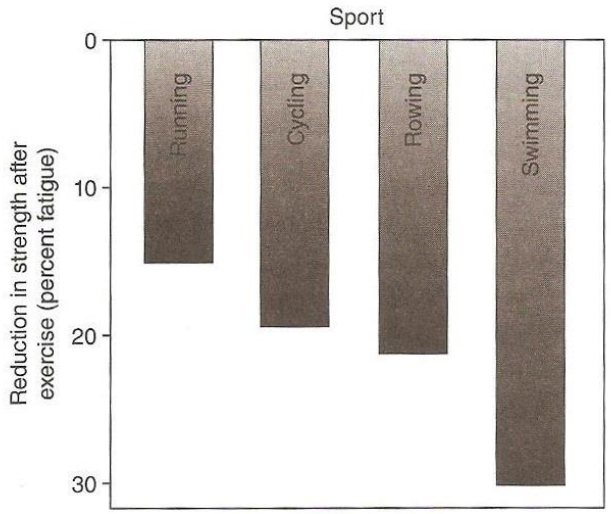


Abb. 5. Inspiratorische Muskelermüdung beim Schwimmen im Vergleich zu anderen Sportarten (McConnell, 2011)

Es liegen bereits Hinweise darauf vor, dass die Ermüdung der Atemmuskulatur ein leistungsbegrenzender Faktor beim Schwimmen sein kann (Wylegala, Pendergast, Gosselin, Warkander & Lundgren, 2007). Die Reduzierung des Atemminutenvolumens aufgrund eines verringerten Flows ist dabei auf den Atemwegswiderstand und die maximale Verkürzungsgeschwindigkeit zurückzuführen, wobei letztere unter Ermüdung zurückgeht (Clanton et al., 1987). Um dennoch eine adäquate Sauerstoffversorgung zu ermöglichen, kommt es infolgedessen zu einer Kompensation über eine Erhöhung der Zyklusfrequenz, was sich biomechanisch ungünstig auf den Vortrieb auswirkt und die Ökonomie der Gesamtbewegung verschlechtert (Lo-

max & Castle, 2011). Somit wird ausgehend von zu gering ausgeprägten energetisch-konditionellen Leistungsvoraussetzungen der Atemmuskulatur die Leistungsfähigkeit des Schwimmers begrenzt (Wylegala et al., 2007).

3.2 Bewegungsstruktur und Atemverhalten im Wettkampf

3.2.1 Vortriebsoptimierung im Freistilschwimmen

In Sportarten mit zyklischen Bewegungsformen stellt sich abhängig von der Belastungsdauer, der Geschwindigkeit und der Leistungsfähigkeit des Sportlers ein bestimmtes Verhältnis von Zyklusweg und Bewegungsfrequenz ein. Beim Laufen wählen Sportler bei vorgegebener Geschwindigkeit eine Kombination aus Schrittlänge und -frequenz, die die Sauerstoffaufnahme minimiert. Ähnliche Phänomene konnten auch für das Radfahren beobachtet werden, auch wenn hier zugunsten einer etwas höheren Frequenz vom Energieminimum abgewichen wird (McLean, Palmer, Ice, Truijens & Smith, 2010). Dadurch wird die muskuläre Belastung pro Zug verringert und lokalen Ermüdungszuständen vorgebeugt (Craig & Pendergast, 1979). Auch beim Schwimmen gilt die frei gewählte Zyklusfrequenz als Ausdruck eines energetischen Optimums bezogen auf die jeweilige Geschwindigkeit und Belastungsdauer, jedoch spielen aufgrund des zu minimierenden Vortriebswiderstands technische Aspekte eine deutlich größere Rolle für die Ökonomie des Sportlers. Die Vortriebswirkung ergibt sich als Resultat der Antriebsimpulse, die von Armen, Rumpf und Beinen erzeugt werden, und der kinetischen Energie des Schwimmers, gemindert um die Bremswirkung durch den Wasserwiderstand, der sich durch die Lage des Körpers und der Extremitäten im Wasser einstellt (Ball, Hahn & Mason, 1993; Küchler & Leopold, 2000). Schon geringe Veränderungen von Zugfrequenz und -länge können dabei große Auswirkungen auf den Wirkungsgrad der Bewegung und die resultierende Geschwindigkeit haben (Swaine & Reilly, 1983).

Eliteschwimmer beziehen ihren Leistungsvorsprung in diesem Zusammenhang aus ihrer besseren Ökonomie, die sich unter anderem in einer großen Zuglänge bei submaximalen Geschwindigkeiten äußert, auch wenn wie beim Radfahren vom theoretischen Energieminimum abgewichen wird, um die maximale Kraft und Beanspruchung pro Zug zu verringern. Dieser Effekt ist bei Frauen aufgrund des niedrigeren Maximalkraftniveaus stärker ausgeprägt als bei Männern (Craig & Pendergast, 1979). Entscheidend ist eine optimale Kombination aus Zyklusfrequenz und Zuglänge, die über den Rennverlauf hinweg stabil gehalten werden kann (Seifert, Chollet & Allard, 2005). Zugfrequenz und -länge interagieren dabei im Bestreben, eine höchstmögliche Geschwindigkeit für die jeweilige Streckenlänge zu erzielen (Swaine & Reilly, 1983). Eine Geschwindigkeitserhöhung wird dabei durch eine Kombination aus Frequenzsteigerung und Verringerung der Zuglänge realisiert. Leistungsstarke Schwimmer zeichnen sich in diesem Zusammenhang dadurch aus, dass sie auf submaximalen Geschwindigkeitsstufen mit einer vergleichsweise großen Zuglänge schwimmen und diese beim Anstieg der Geschwindigkeit weniger stark verringern als technisch weniger versierte Schwimmer (Craig & Pendergast, 1979). Auch wenn das Verhältnis aus Zyklusfrequenz und Zuglänge das Ergebnis langjähriger Erfahrungswerte ist, wählen auch Nicht-Eliteschwimmer bei freier Gestaltung des Bewegungszyklus vor allem bei Dauerbelastungen die niedrigste Frequenz bzw. die größte Zuglänge, die die Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$) bei der vorgegebenen Geschwindigkeit minimiert (McLean et al., 2010). Ein forciertes Abweichen von diesem Optimum nach oben oder unten konnte in einer Studie Veränderungen der $\dot{V}O_2$ um 60 % und der Herzfrequenz um 52 % bewirken (ebenda). Eine Verringerung

der frei gewählten Frequenz bei einer vorgegebenen Belastung liefert hingegen Hinweise auf Ökonomisierungsprozesse in Folge eines Trainings oder einer Technikumstellung (Swaine & Reilly, 1983).

Im Unterschied zum Laufen und Radfahren ist im Schwimmen der Anteil der Arme und Beine an der Gesamtbewegung unter Ökonomieaspekten entscheidend. So weicht z. B. das Verhältnis von Sauerstoffaufnahme und Herzfrequenz zur Zyklusfrequenz von der in den zuvor genannten Sportarten typischen U-Form ab, weil das Verhältnis zwischen der Beteiligung der oberen und der unteren Extremität nicht konstant bleibt (McLean et al., 2010, vgl. Abb. 6). Dabei geht eine Reduzierung der Armfrequenz mit einer deutlichen Steigerung der Beinfrequenz einher, bei einem Anstieg der Armfrequenz bleibt die Beinfrequenz dagegen nahezu konstant. Die unterschiedlich großen Anteile der Extremitäten machen sich auch im Hinblick auf die Sauerstoffaufnahme und die Herzfrequenz deutlich bemerkbar: Eine gesteigerte Beinfrequenz erhöht aufgrund der größeren eingesetzten Muskelmasse die Sauerstoffaufnahme erheblich (ebenda). Vergleicht man eine reine Arm- und Beinbelastung bei gleicher Sauerstoffaufnahme, ist die Herzfrequenz höher, wenn mit den Armen statt mit den Beinen gearbeitet wird (Swaine & Reilly, 1983).

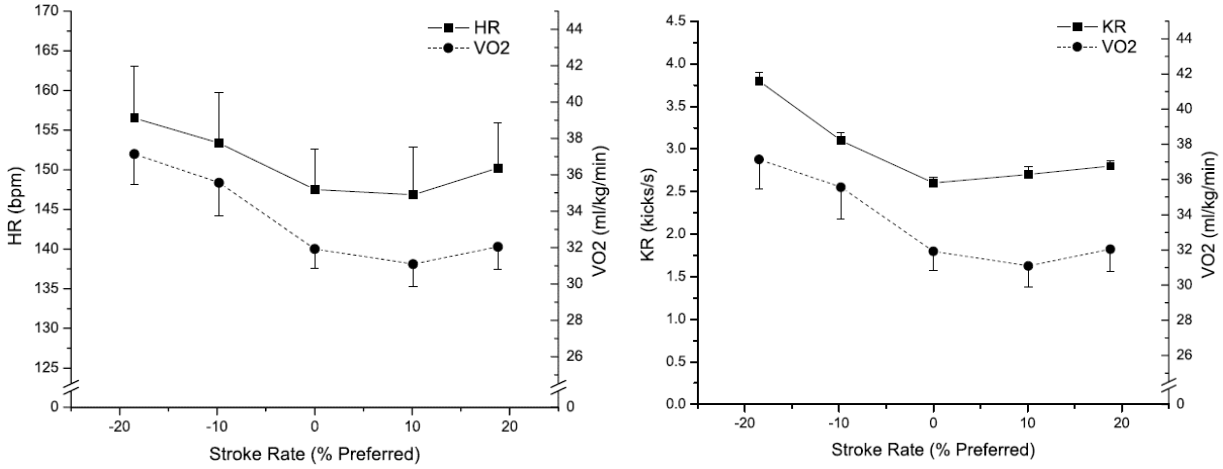


Abb. 6. Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), Herzfrequenz (HR) und Beinfrequenz (KR) in Abhängigkeit von der Zyklusfrequenz (McLean et al., 2010)

Durch die enge Kopplung zwischen Atem- und Bewegungsfrequenz ist im Schwimmen auch der Atemvorgang selbst unter ökonomischen Gesichtspunkten relevant und ein Indikator für das technische Können des Schwimmers: Während weniger versierte Schwimmer die Frequenz der Arme an die Zeitdauer des Atemvorgangs anpassen, zeichnen sich Eliteschwimmer dadurch aus, die Atmung schnell und technisch vorteilhaft durchzuführen und dadurch die Ausführung und Koordination der Ganzkörperbewegung nicht zu verändern (Mickleborough et al., 2008). Unter hoher Belastung und zunehmender Ermüdung ist zu beobachten, dass vor allem weniger leistungsstarke Schwimmer mit einer Erhöhung der Zyklusfrequenz reagieren, um die Zeitdauer bis zum nächsten Atemzug zu verkürzen. Diese Veränderung der Bewegungsstruktur stellt unter biomechanischen Aspekten eine Verschlechterung der Ökonomie des Vortriebs dar (Town & Vanness, 1990). Lomax und Castle (2011) zeigten, dass auch die Ermüdung der Atemmuskulatur zu einer unökonomischen Erhöhung der Zyklusfrequenz auf Kosten einer Verkürzung der Zuglänge führen kann. Dabei wirkt es sich besonders negativ auf die Bewegungsausführung aus, wenn von einer beidseitigen zu einer unilateralen Atmung gewechselt werden muss, da dies mit einer stärkeren Asymmetrie im Vortrieb verbunden ist. Der Atemmuskulatur kommt in diesem Zusammenhang eine doppelte Bedeutung zu: Da verschiedene Muskeln wie z. B. der M. pectoralis major, der M. latissimus dorsi, der obere

Anteil des M. trapezius und der M. serratus anterior sowohl für die Inspiration als auch für die Armbewegung des Freistilschwimmens benötigt werden, geht eine Ermüdung der Atemmuskulatur auch mit einem Verlust der Rumpfstabilität und einer Verschlechterung der Kraftübertragung einher (ebenda).

Seifert et al. (2005) wiesen im Zusammenhang mit der Ökonomie des Vortriebs auf die Bedeutung der zeitlichen Koordination der Zugphasen innerhalb der zyklischen Bewegung hin. Es besteht im Freistilschwimmen ein enger Zusammenhang zwischen dem Leistungsniveau des Sportlers und der Effizienz der Armkoordination in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Zur Quantifizierung der Phasenkoordination führten Chollet, Chalies und Chatard (2000) den *Index of coordination* (IdC) ein. Zu dessen Berechnung wird untersucht, welcher zeitliche Zusammenhang zwischen dem Ende der vortriebswirksamen Phasen (*Pull* und *Push*) des einen Arms und dem Beginn dieser Phasen beim anderen Arm besteht (*Lag time*). Eine Verzögerung zwischen der Push-Phase des einen Arms und der Pull-Phase des anderen entspricht dabei einer negativen Lag time, bei einer Überlappung der Vortriebsphasen ist die Lag time positiv. Dieser Parameter wird für beide Arme berechnet und als Prozentsatz des Armzyklus ausgedrückt; der Mittelwert der beiden Einzelwerte stellt die Antriebssituation beider Arme zusammen dar. Ungeachtet ihrer schwimmerischen Fertigkeiten weisen fast alle Schwimmer eine gewisse Koordinationsasymmetrie auf, d. h. es liegt auf einer Seite eine Antriebsüberlappung, auf der anderen eine Diskontinuität vor (Abb. 7). Diese ist unter anderem auf die Ausbildung einer Atemlateralität in Folge der Bevorzugung einer Seite zum Atmen zurückzuführen und korreliert meist mit einer Motorlateralität, d. h. der Ausprägung eines dominanten Arms (Seifert et al., 2005). Dies stellt jedoch nicht zwingend ein Qualitätskriterium dar, da sich erfahrene Schwimmer in diesem Zusammenhang dadurch auszeichnen, dass sie die Vortriebsphasen so koordinieren, dass ein möglichst konstanter intrazyklischer Geschwindigkeitsverlauf entsteht (Superpositionskoordination, IdC > 0). Technisch weniger effiziente Schwimmer weisen hingegen eine Verzögerung zwischen dem Antrieb des linken und des rechten Arms auf, die durch die Atmung noch verstärkt wird (Catch-up-Koordination, IdC < 0; ebenda). Auch Yanai und Hay (2000) konnten zeigen, dass auf der Atemseite eine längere Zugzeit benötigt wird als auf der Nichtatemseite.

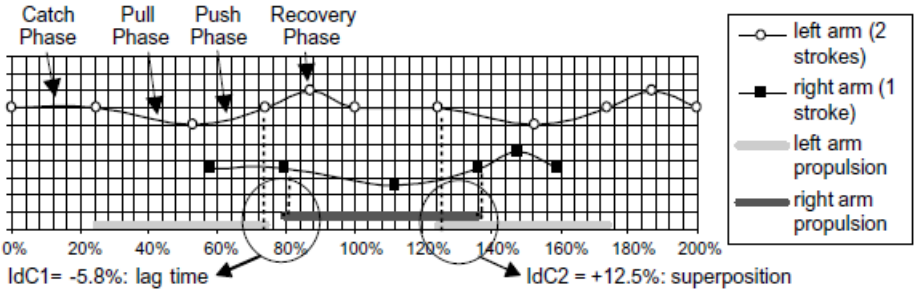


Abb. 7. Veranschaulichung des IdC: der gezeigte Sportler weist auf der einen Seite eine Antriebsüberlappung, auf der anderen eine Diskontinuität im Vortrieb auf (modifiziert nach Seifert et al., 2005)

Eine Veränderung dieser Arm- und Atemkoordination ergibt sich zwangsweise unter Ermüdung, kann im positiven Fall jedoch auch auf eine Technikverbesserung hinweisen. Diese wird über eine Verlängerung der Vortriebsphasen und eine Verkürzung der Nichtvortriebsphasen (v. a. *Entry & Catch*) erzielt und resultiert in einer Erhöhung des IdC (Seifert et al., 2005). Durch die enge Kopplung zwischen Bewegungs- und Atemfrequenz geht die Veränderung der Phasenkoordination mit Anpassungen der Atmung einher, was von technisch unterschiedlich versierten Schwimmern auf verschiedene Art und Weise realisiert wird: Während Eliteschwimmer die Inspirationsdauer verkürzen und die Exspiration sowie die Atempause zwischen Inspiration und Exspiration konstant halten, verlängern weniger leistungsstarke Schwimmer die

Atempause auf Kosten der Inspiration und der Exspiration. Letzteres wirkt sich bei steigender Geschwindigkeit und zunehmender Verkürzung der Atemzeit negativ auf den Gasaustausch aus (Lerda & Cardelli, 2003). Die verkürzte Inspirationsdauer wurde von mehreren Autoren übereinstimmend als Merkmal von Hochleistungsschwimmern gewertet (Lerda & Cardelli, 2003; Mickleborough et al., 2008; Pedersen & Kjendlie, 2006), da sie zu einer vorteilhaften Eingliederung der Atemtechnik in den Bewegungsablauf der Arme führt und der resultierende kontinuierlichere Vortrieb sich positiv auf die Geschwindigkeitsentwicklung auswirkt (Ball et al., 1993; Keskinen & Komi, 1994; Mickleborough et al., 2008). Um trotz der kürzeren Inspirationsdauer ein ausreichend hohes Atemminutenvolumen realisieren zu können, ist unter anderem die Verkürzungsgeschwindigkeit der Inspirationsmuskulatur ausschlaggebend (Clanton et al., 1987).

3.2.2 Atemrhythmen im Hochleistungssport

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit fanden sich in der Literatur nur vereinzelt Hinweise auf vorteilhafte Atemstrategien und -rhythmen im Wettkampf. Lediglich für die Sprintstrecken konnten bereits Empfehlungen ausgesprochen werden. So sollte auf der 50 m-Strecke nach Möglichkeit überhaupt nicht geatmet werden, während dies auf der 100 m-Strecke durch den gestiegenen oxidativen Anteil der Energiebereitstellung nicht mehr von Vorteil ist. Hier kann die Atemfrequenz bis auf eine 3er-Atmung gesteigert werden, ohne Nachteile hinsichtlich der Geschwindigkeit in Kauf nehmen zu müssen (Pedersen & Kjendlie, 2006). Die Autoren schränken den Gültigkeitsbereich ihrer Ergebnisse jedoch bereits dahingehend ein, dass für eine exakte Aussage individuelle Leistungsvoraussetzungen technischer, physiologischer und metabolischer Art berücksichtigt werden müssen. Auch Graumnitz und Küchler (2004) führen die gestiegene Wettkampfleistung international erfolgreicher Topathleten auf die Optimierung der Renngestaltung durch die Nutzung individueller Leistungsvoraussetzungen zurück. Bislang war jedoch unklar, wie Einzelsportler unter diesem Gesichtspunkt ihr Atemverhalten gestalten, und welche Atemrhythmen sich grundsätzlich vorteilhaft auf das Zustandekommen der Leistung auswirken. Auch eine umfassende Auswertung über die tatsächlich im Wettkampf eingesetzten Atemrhythmen über ein breites Spektrum an Streckenlängen hinweg und mit Bezug zu den zugrundeliegenden Erfordernissen der Energiebereitstellung fehlte bislang.

Es wurde daher anhand einer Videoanalyse der Freistilrennen der WM 2011 in Shanghai der Ist-Zustand in der Weltspitze ermittelt, um zu untersuchen, wie die weltbesten Schwimmer die Erfordernisse der Atemstrategie umsetzen und welche Mechanismen sich dabei vorteilhaft im Hinblick auf die erbrachte Leistung auswirken. Die Grundlage dieser Auswertung bildeten Videoaufzeichnungen, die im Rahmen der Wettkampfbeobachtung von den Leistungsdiagnostikern des Instituts für Angewandte Trainingswissenschaft Leipzig für den Deutschen Schwimmverband erstellt worden waren. Es wurden jeweils die Plätze 1-4 aller Freistilfinalrennen von 50 m bis 1500 m (inkl. Staffeln) der Männer und Frauen berücksichtigt. Als Untersuchungsparameter wurden die Anzahl der Arm- und der Atemzüge pro Bahn erfasst, außerdem wurde die Tauchzeit – die Zeitdauer, die der Schwimmer vor und nach der Wende unter Wasser, d. h. ohne Atmung verbringt – und die Anschwimmzeit – die Zeitdauer auf der letzten Bahn jedes Rennens vom Ende des letzten Atemzugs bis zum Anschlag an der Wand – berechnet (Abb. 8). Von der Anzahl der Arm- und Atemzüge pro Bahn wurden die Atemrhythmen abgeleitet, die mit Hilfe der Notation 1-2-3 dargestellt wurden (in diesem Beispiel hat der Sportler nach einem, nach zwei und dann nach drei Armzügen geatmet). Die folgenden Angaben zur Gestaltung des Atemrhythmus basieren auf den bereits als Witt, Matthaei, Berbalk, Graumnitz und Küchler (2014) publizierten Ergebnissen der Videoanalyse, die um weitere unveröffentlichte Daten ergänzt und in den Kontext der vorhandenen Literatur eingeordnet wurden.

Die Auswertung ergab, dass die Armzüge pro Bahn bei den Männern stetig mit der Streckenlänge abnahmen, was auf die sinkende Geschwindigkeit bzw. die verringerte Zyklusfrequenz bei den Langdistanzen zurückzuführen ist. Bei den Frauen zeigte sich bis einschließlich 400 m die gleiche Tendenz, die längeren Strecken wurden jedoch wieder mit mehr Zügen bzw. höheren Frequenzen geschwommen. Dies ist zum einen auf die im Vergleich zu den Sprinterinnen geringere Körperhöhe der auf den Langstrecken erfolgreichen Schwimmerinnen und die damit einhergehenden kürzeren Hebel durch die Extremitäten zurückzuführen, zum anderen auf einen geringeren Antrieb aus den Beinen und eine kürzere Tauchphase an den Wenden als bei den Sprintstrecken. Ähnliche Zusammenhänge fanden sich bei Leopold (2002), der die Finalisten der EM 2002 untersuchte: während die Frequenzen der Männer von 50 m bis 1500 m abnahmen, wurden die Rennen bei den Frauen ab 400 m mit gleichbleibenden Frequenzen geschwommen.

Die Atemzüge pro Bahn nahmen bei den Männern wie bei den Frauen mit der Streckenlänge zu, was auf den steigenden Anteil der aeroben Energiebereitstellung zurückzuführen ist. Dabei nimmt die 50-m-Strecke eine Sonderrolle ein: Aufgrund der kurzen Belastungsdauer von unter 25 Sekunden erfolgt die Energiebereitstellung vorwiegend anaerob-alaktazid über die Nutzung des muskeleigenen Adenosintriphosphats (ATP) und Kreatinphosphats. Dadurch können die Sportler eine große Sauerstoffschuld eingehen, was sich in einer äußerst niedrigen Atemfrequenz äußert: Bei den Männern wurde pro Rennen gar nicht oder lediglich einmal geatmet, bei den Frauen ein- bis dreimal. Da das Zeitfenster, das für die Atmung zur Verfügung steht, durch die hohe Bewegungsfrequenz maximal verkürzt ist, kann der Gasaustausch ohnehin nicht mehr effektiv gestaltet werden. Da außerdem der durch den Atemvorgang zusätzlich erzeugte Vortriebswiderstand mit der Geschwindigkeit steigt (Roth & Stahl, 2016), ist die Unterbrechung des Bewegungsablaufs zur Atmung auf dieser Strecke besonders nachteilig für die Schwimmleistung (Key et al., 2014). Die Atmung spielt daher auf der 50-m-Distanz nur eine untergeordnete Rolle. Auf der 100-m-Strecke kam es hingegen zu einem sprunghaften Anstieg der Atemzüge auf rund 10 pro Bahn. Pedersen und Kjendlie (2006) beobachteten bei den 100-m-Finalisten der norwegischen Langbahnmeisterschaften 2004 niedrige Atemfrequenzen auf der ersten Bahn (4er- bis 8er-Atmung), die in der zweiten Rennhälfte zugunsten einer 2er- oder 4er-Atmung aufgegeben wurden. Lediglich die Sieger konnten durchgehend mit einer 6er- bis 8er-Atemfrequenz schwimmen. Diese Ergebnisse konnten für die WM-Teilnehmer nicht bestätigt werden: Die untersuchten Sportler wählten leicht höhere Atemfrequenzen, von denen sie im Verlauf des Rennens von einigen zusätzlichen Atemzügen an der Wende abgesehen nicht abwichen. Beim 200-m-Rennen nahm die Zahl der Atemzüge erneut sprunghaft zu, was dem Anteil der aeroben Energiebereitstellung geschuldet ist, der bei dieser Streckenlänge bereits bei rund 40 % liegt (Neumann et al., 2013). Bei den längeren Strecken kam es zu einem weiteren Anstieg der Atemzüge, der bei den Frauen durch die höhere Zyklusfrequenz stärker ausfiel als bei den Männern.

Die Tauch- und Anschwimmzeit nahm sowohl bei den Männern als auch bei den Frauen mit der Streckenlänge ab, wobei die 50 m wieder gesondert zu betrachten sind. Durch die bereits angesprochene geringe Atemfrequenz war die Anschwimmzeit mit 21,5 s bei den Männern und 11,0 s bei den Frauen in dieser Disziplin deutlich länger als bei allen längeren Strecken. Eine Ausnahme stellte auch das 200-m-Rennen der Männer dar. Hier wichen beide Parameter deutlich nach oben vom Trend ab, was auf den Einfluss der Finalisten Michael Phelps und Ryan Lochte (beide USA) zurückzuführen ist. Beide Sportler führten durch eine besonders effektive Delphinbewegung eine deutlich längere Tauchphase als ihre Konkurrenten aus. Die Sportler auf den Langstrecken führten aufgrund der hohen aeroben Anforderungen nur eine kurze Tauchphase an der Wende durch und stießen sich weniger explosiv von der Wand ab. Die Werte für 400 m lagen dabei in einer ähnlichen Größenordnung wie die Atemanhaltezeit, die Craig (1986) für ein

500-Yard-Rennen berechnete (ca. 457 m; Frauen: 4,27 s, Männer: 4,39 s), weitere Vergleichswerte ließen sich nicht ermitteln.

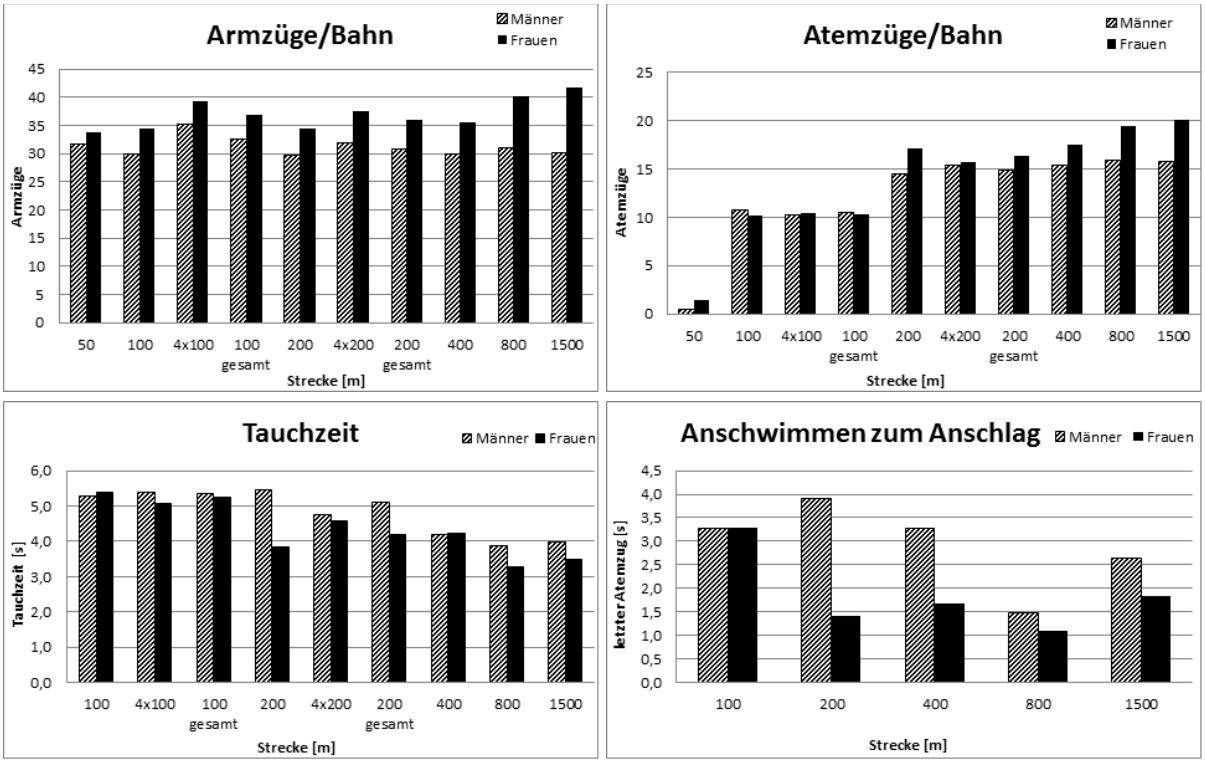


Abb. 8. Ergebnisse der Videoanalyse der Freistilrennen und -staffeln der WM 2011 in Shanghai (Witt et al., 2014)

Bei der Auswertung der Atemrhythmen wurde auf eine Mittelwertbildung verzichtet, da im Einzelnen häufig renntaktische Einflüsse bei der Gestaltung der Atmung festgestellt wurden. Im Folgenden soll daher anhand von Einzelbeispielen auf besondere Aspekte des Atemrhythmus auf der jeweiligen Wettkampfstrecke eingegangen werden. Bei den Männern kamen unabhängig von der Streckenlänge fast ausschließlich gerade Atemrhythmen zum Einsatz, d. h. es wurde immer zur gleichen Seite geatmet. Ab der 200-m-Strecke schwammen die Sportler fast durchgehend mit 2er-Atmung. Michael Phelps fiel in diesem Zusammenhang dadurch auf, dass er diesen Rhythmus schon weit vor der Wand beendete, um die Tauchphase einzuleiten. Diese wurde nach der Wende durch mehrere Delphin-Kicks fortgeführt, was in der hervorgehobenen langen Tauchzeit resultierte. Eine typische Teilstrecke seines 200-m-Rennens ist in Abb. 9 schematisch dargestellt. Dabei wurden sowohl die Armzüge (schwarze Striche) als auch die Anzahl und die Richtung der Atemzüge (blaue Pfeile) berücksichtigt. Ein Schwimmer, der sich deutlich und reproduzierbar von der Konkurrenz abhob, war Sun Yang. Der Chinese, der von 200 m (Staffel) bis 1500 m in allen Finalläufen vertreten war, unterbrach die 2er-Atmung, die auch er während der zyklischen Bewegung durchgehend ausführte, vor und nach der Wende zugunsten einer mehrfach wiederholten 1er-Atmung und verzichtete auf Delphin-Kicks im Übergang (Abb. 9). Dadurch kann er das Zeitfenster, in dem er ohne Sauerstoffzufuhr auskommen muss, minimieren. Es ist außerdem denkbar, dass er den geringeren Antrieb aus den Beinen durch die übermäßige Rotation während der mehrfachen beidseitigen Atemzüge ausgleicht. Séhel (2016) berichtete, dass eine 1er-Atmung grundsätzlich zwar als technisches Mittel zur Umgewöhnung von 2er- auf 3er-Atmung eingesetzt wird, von manchen Sportlern jedoch auch als Mittel zur Beschleunigung nach der Wende verwendet wird. Bemerkenswert ist, dass Sun Yang dieses Atemverhalten

auf allen geschwommenen Strecken einsetzte und dabei trotz des geringeren Antriebs durch lange Delphin-Kicks in der Lage war, seine Rennen zum Ende hin zu beschleunigen (*negative splits*). Auf der 1500-m-Strecke erhöhte er trotz der weiterhin regelmäßig durchgeführten 1er- bis 2er-Atmung auf den letzten 100m das Tempo derartig, dass er die letzten 5 m des Rennens in einer ähnlichen Zeit zurücklegte wie die Sprinter des 50-m-Rennens (Küchler et al., 2013).

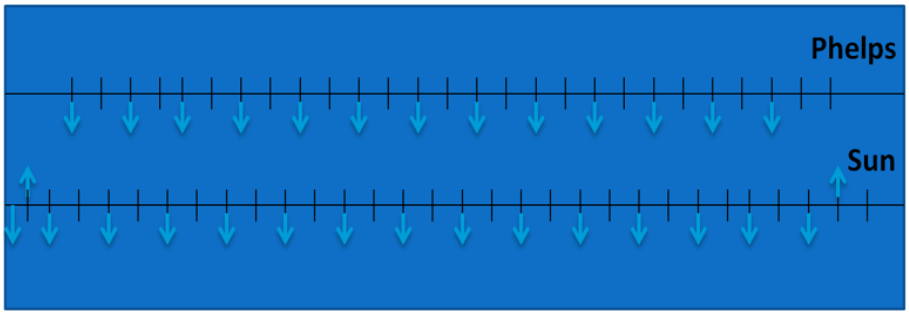


Abb. 9. Atemrhythmen 200 m Männer: M. Phelps (USA) und Y. Sun (China). Vereinfachte Darstellung einer 50m-Teilstrecke, Schwimmrichtung von links nach rechts (Witt et al., 2014)

Auch bei den Frauen gab es z. B. mit Camille Muffat (Frankreich) und Federica Pellegrini (Italien) Sportlerinnen, die durchgehend mit 2er-Atmung schwammen. Es war jedoch insgesamt eine große Variation an Atemrhythmen zu verzeichnen. Auch konnten taktische Atemmanöver beobachtet werden: So wechselte z. B. Pellegrini zur Mitte einer Teilstrecke zwischenzeitlich die Atemseite, was erkennbar der Orientierung im Hinblick auf die Konkurrenz diente (Abb. 10). Die 100-m-Strecke wurde von vielen Sportlerinnen mit einem 2-4-Rhythmus geschwommen, so z. B. von Inge Dekker (Niederlande), Jessica Hardy (USA) und Lisa Vitting (Deutschland). Auf der 200-m-Strecke konnte hingegen häufig der 2-3-Rhythmus beobachtet werden, der im Vergleich zur 2-4-Atmung zu mehr Atemzügen, jedoch auch zu einer konstanteren Sauerstoffversorgung führt und eine Orientierung zu beiden Seiten ermöglicht. Diese Strategie wurde u. a. von Kylie Palmer (Australien) und Quian Chen (China) gewählt (Abb. 10). Dagny Knutson (USA) variierte diesen Rhythmus auf der 200-m-Strecke dahingehend, dass sie abwechselnd mit 2-3 und 2-2-3 schwamm. Das gleiche Atemverhalten konnte auf der 800 m-Distanz bei der Siegerin Rebecca Adlington (Großbritannien) und der Drittplatzierten Kate Ziegler (USA) beobachtet werden. Die Variation der Atemrhythmen erstreckte sich bei den Frauen daher anders als bei den Männern auch auf die Strecken jenseits der 200 m.

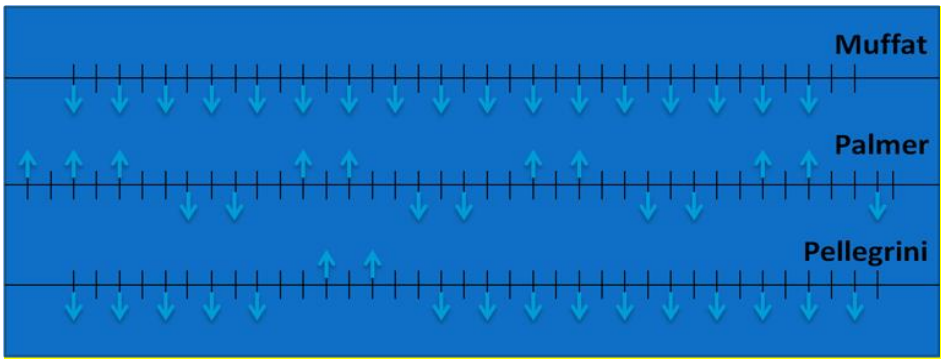


Abb. 10. Atemrhythmen 200 m Frauen: C. Muffat (Frankreich), K. Palmer (Australien) und F. Pellegrini (Italien). Vereinfachte Darstellung einer 50m-Teilstrecke, Schwimmrichtung von links nach rechts (Witt et al., 2014)

Da die USA und Australien seit vielen Jahren die erfolgreichsten Schwimmnationen darstellen (Graumnitz & Küchler, 2004, 2009; Küchler et al., 2013; Küchler & Graumnitz, 2001), wurde untersucht, ob es

Aspekte im Atemverhalten gibt, die die Sportler der jeweiligen Nationen verbindet. Die männlichen Sportler der USA fielen dabei durch ihre niederfrequente Atmung (v. a. auf den Sprintstrecken) in Verbindung mit einer langen Tauchphase an der Wende auf. Die Frauen des US-Teams einte der Umstand, dass sie trotz der Vielzahl an Atemrhythmen fast alle eine beidseitige Atmung in ihre Atemstrategie integriert hatten. Dies unterschied sie von den australischen Frauen, die mit Ausnahme von Kylie Palmer fast ausschließlich mit gradzahligen Atemrhythmen schwammen.

Zusammenfassend lassen sich folgende Aspekte ableiten, die vorteilhaft für den Vortrieb und das Zustandekommen der Leistung sind:

- Vermeidung der Atmung auf den Sprintstrecken
- Regelmäßige Atmung auf den längeren Strecken zur Deckung des Sauerstoffbedarfs
- Niederfrequente Atmung mit langer Tauchphase an den Wenden
- Beidseitige Atmung für mehr Flexibilität/Berücksichtigung renntaktischer Erfordernisse

Es lässt sich jedoch keine allgemeingültige Empfehlung für eine bestimmte Streckenlänge aussprechen, da immer auch eine Anpassung des Atemverhaltens an die Bedürfnisse und die individuellen Gegebenheiten bezüglich grundlegender Leistungsvoraussetzungen des Sportlers notwendig ist. Neben der Beweglichkeit spielen hierbei technische Fertigkeiten sowie metabolische und physiologische Parameter eine Rolle (Pedersen & Kjendlie, 2006). Da es möglich ist, bei erfolgreichen Athleten individuelle Rhythmen und Strategien zu ermitteln, scheint das Atemverhalten ein Aspekt zu sein, der im Training von Hochleistungssportlern eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt.

3.3 Atemphysiologie unter Belastung

3.3.1 Zentrale Steuerung und Reflexverarbeitung als Reaktion auf die Erfordernisse des Muskelstoffwechsels

Die Regulation der Atmung erfolgt zentral über verschiedene Neuronengruppen, die im verlängerten Mark des Hirnstamms (Medulla oblongata) lokalisiert sind. Die größte Bedeutung kommt dabei dem Atemzentrum zu, das als Schaltstelle und Koordinationszentrum dient (Bucher, 1952). Es befindet sich in der Formatio reticularis, einem nicht klar abgrenzbaren Neuronennetzwerk aus weißer und grauer Substanz (Faller, 1984). Der Grundrhythmus der Atmung wird dabei nicht durch spezielle Rhythmuszellen gesteuert, sondern kann vielmehr in jeder einzelnen Zelle entstehen. Das Atemzentrum koordiniert dabei die Einzelimpulse der verschiedenen Zellen und leitet sie an die entsprechenden Zielgebiete weiter (Bucher, 1952; Speckmann, Hescheler & Köhling, 2013). Es lassen sich jedoch abgrenzbare Bereiche für Inspiration und Exspiration identifizieren (Faller, 1984). Die Steuerung des Atemrhythmus erfolgt dabei über die Anregung des Atemzentrums durch die Formatio reticularis, die wiederum von höheren Strukturen aus dem zentralen Nervensystem (ZNS) und Afferenzen aus der Peripherie erregt wird. Die Inspiration wird durch die Aktivierung inspiratorischer Neuronen bei gleichzeitiger Hemmung aller anderen Atemneuronen eingeleitet; durch die Weiterleitung der Erregung zu den Motoneuronen der Inspiration kommt es zur Kontraktion der entsprechenden Inspirationsmuskulatur (Speckmann et al., 2013). Über den Nervus vagus, der u. a. die Lungenalveolen innerviert, kommt es zu einem Feedback über den Dehnungszustand derselben, der die Inspiration bei ausreichend hohem Füllungsgrad der Lunge beendet (Faller, 1984). Durch

nachlassende Unterdrückung der Aktivität der weiteren Atemneuronen kommt es zu einer postinspiratorischen Pause, bevor die Exspiration beginnt. Diese läuft vorwiegend passiv durch die Rückstellkräfte ab, die auf die Gewebe der gedehnten Lunge und des Thorax wirken. Bei Bedarf erfolgt eine aktive Exspiration durch die Anregung der exspiratorischen Neuronen, Motoneuronen und Muskeln (Speckmann et al., 2013). Dadurch, dass ab einem gewissen Minimal- bzw. Maximalvolumen von der Inspiration auf die Exspiration (und vice versa) umgeschaltet wird, ergibt sich eine Selbststeuerung der Atmung (Bucher, 1952; Faller, 1984).

Der mechanische Anteil des Atemvorgangs wird durch ein Zusammenspiel verschiedener Muskelgruppen realisiert. Dabei wird zwischen den Thoraxmuskeln (*eigentliche Atemmuskeln*) und zusätzlichen Atemmuskeln, die bei erhöhtem Atembedarf zugeschaltet werden können, unterschieden (Aumüller, 2007). Zur Ein- und Ausatmung werden unterschiedliche Muskeln angesteuert: während die Inspiration durch das Zwerchfell, die Mm. intercostales externi, Mm. intercostales intercartilaginei und bei Dyspnoe zusätzlich über die Mm. scaleni, sternocleidomastoidei, subclavii, pectorales und latissimus dorsi ausgeführt wird, kommt es bei der Exspiration zu einer Kontraktion der Mm. intercostales interni, Mm. transversi thoracis und bei hoher Belastung zu einer Nutzung der Mm. serrati postici, sacrospinales, quadrati lumborum und verschiedener Anteile der Bauchmuskulatur (Bucher, 1952). Eine herausragende Stellung nehmen dabei das Zwerchfell und die Interkostalmuskulatur ein. Ersteres wird durch den Nervus phrenicus innerviert und reagiert auf die Afferenzen des Atemzentrums mit einer radialen Kontraktion. Dadurch kommt es zu einer Vergrößerung des Bauchraumes und einem Ausdehnen des unteren Lungenrandes und durch den entstehenden Unterdruck zur Inspiration (Blasebalg-Prinzip). Wird die Kontraktion beendet, drängt das Zwerchfell elastisch halbkugelförmig nach oben und sorgt durch den entstehenden Druck im Bauchraum für eine passive Exspiration (Faller, 1984, vgl. Abb. 11).

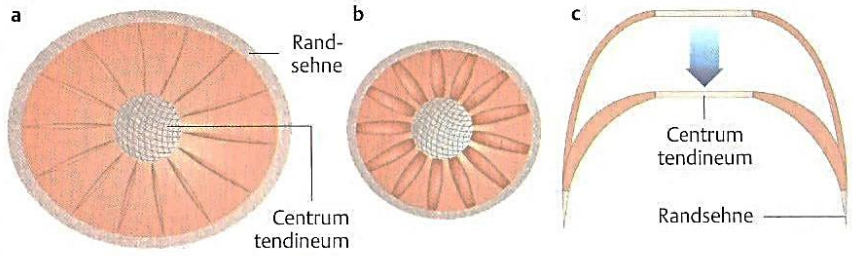


Abb. 11. Atemmechanische Funktionsweise des Zwerchfells. a: Ausdehnung im erschlafften Zustand, b: radiale Kontraktion der Muskelfasern, c: resultierende Verschiebung im Bauchraum in Folge einer Kontraktion (Aumüller, 2007)

Die Interkostalmuskulatur, die von den Zwischenrippennerven innerviert wird, unterstützt bei der Inspiration die Vergrößerung des Brustraums nach außen. Durch die antagonistische Arbeitsweise der inneren und äußeren Zwischenrippenmuskeln kommt es im kontinuierlichen Wechselspiel zwischen Kontraktion und Dehnung zu einer Anhebung und Senkung der Rippen (Aumüller, 2007, vgl. Abb. 12).

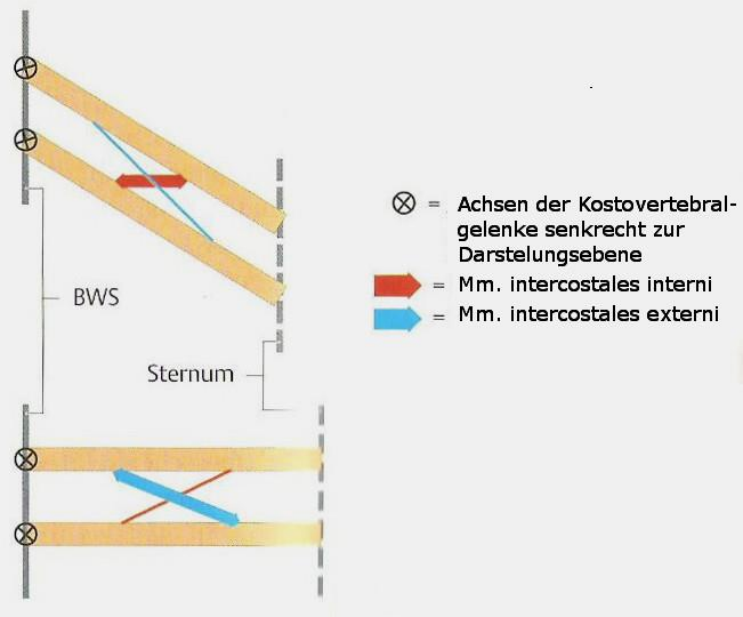


Abb. 12. Darstellung der Wirkungsweise der Interkostalmuskulatur (Aumüller, 2007)

Theoretisch ist eine Atmung, die ausschließlich durch die Interkostalmuskulatur ausgeführt wird, zwar möglich, durch den extrem niedrigen Wirkungsgrad kommt sie jedoch in der Praxis so gut wie nicht vor (Roussos & Macklem, 1982). Daraus ergibt sich eine kontinuierliche Nutzung des Zwerchfells und eine große Bedeutung dieses Muskels für die Effizienz der Atmung. Die genannten Muskeln gehören zur quergestreiften Muskulatur; sie sind daher morphologisch identisch mit der Skelettmuskulatur und können willkürlich beeinflusst werden (Rost, 2005). Die Kraft, die durch eine Kontraktion der Atemmuskeln erzielt werden kann, ist dabei abhängig von dem Füllungsgrad der Lunge bzw. dem resultierenden Dehnungsgrad der beteiligten Muskelgruppen (McConnell, 2011, vgl. Abb. 13).

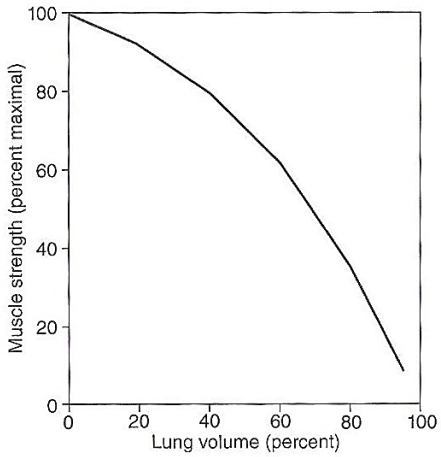


Abb. 13. Zusammenhang zwischen Füllungsgrad der Lunge und möglichem Kraftmaximum der Inspirationsmuskulatur (McConnell, 2011)

Bei Zuschaltung eines zusätzlichen Widerstands, der die Atmung erschwert, kommt es zu einer Sofortreaktion durch zwei Arten von Reflexen, die als Sicherheitsmechanismus gegen Ersticken fungieren. Zum einen reagiert das Atemzentrum über phasenverstärkende Widerstandsreflexe mit einer höheren Impuls-

frequenz an die Atemmuskulatur, um auf propriozeptivem Weg die Kontraktionskraft der Inspirationsmuskulatur zu erhöhen (*aktivierender Spannungsreflex*; Fleisch, 1929). Auch die Exspiration kann auf diese Art und Weise gezielt verstärkt werden. Der externe Widerstand wird in beiden Fällen durch die größere Spannung in Sehnen und Muskeln des Atemapparats detektiert. Zusätzlich kommt es durch Lungenvolumenreflexe zu einer Verlängerung der Atemphasen. Wird von den Vagusafferenzen aus der Lunge ein Volumen an das Atemzentrum gemeldet, das aufgrund des zusätzlichen Widerstands noch nicht dem vorgegebenen Wert entspricht, kommt es zu einer zeitlichen Ausdehnung der jeweiligen Atemphase. Durch den Grundwiderstand, der durch die zuführenden Atemwege entsteht, sind beide Reflexe auch unter Normalbedingungen wirksam (Bucher, 1952).

Wird eine körperliche Belastung aufgenommen, ergibt sich durch die Verrichtung der Muskelarbeit ein über den Ruheumsatz hinausgehenden Energiebedarf, der auf aerobem oder anaerobem Weg durch die Spaltung von ATP gedeckt wird. Dabei wird O_2 verbraucht und CO_2 sowie H^+ produziert (Weineck, 2004); die Konzentrationsveränderungen dieser Moleküle im Blut stellen einen Reiz für das Atemzentrum dar. Es kommt zu einer Verrechnung des zentral voreingestellten Atemrhythmus mit Afferenzen aus der Peripherie und in Folge dessen zu einer Modulation der Atemtätigkeit durch reflektorische Einflüsse (Jung, Brun, Becker & Bay, 2013), die die zentrale Vorgabe deutlich übersteigen (Bucher, 1952). Die zugrundeliegenden Reflexe haben den Zweck, die Lunge z. B. vor übermäßiger Dehnung zu schützen und den Gasaustausch an die Stoffwechselbedürfnisse des Körpers anzupassen. Man unterscheidet dabei zwischen chemischer und nervöser Steuerung, wobei erstere über zentrale und periphere Chemorezeptoren realisiert wird. Die zentralen Chemorezeptoren befinden sich auf der ventralen Oberfläche der Medulla oblongata und reagieren auf Veränderungen der CO_2- und der H^+-Konzentration im Blut mittels des zentralen Chemoreflexes. Die peripheren Chemorezeptoren sind im Aortenbogen und im Karotissinus verortet und lösen bei O_2-Konzentrationsänderungen den peripheren Chemoreflex aus (Speckmann et al., 2013). Dabei reagiert das Atemzentrum auf einen CO_2-Überschuss deutlich sensibler als auf einen O_2-Mangel (Bucher, 1952; Speckmann et al., 2013, vgl. Abb. 14). In beiden Fällen kommt es zu einer Erhöhung der Sympathikusaktivität und in Folge dessen zu einem Anstieg von Herzfrequenz, Blutdruck und Atemminutenvolumen. Letzteres wird über die Erhöhung von Atemfrequenz und Atemtiefe realisiert, wobei ein O_2-Mangel vorwiegend die Atemfrequenz beeinflusst, ein CO_2-Überschuss hingegen das Atemzugvolumen (Bucher, 1952).

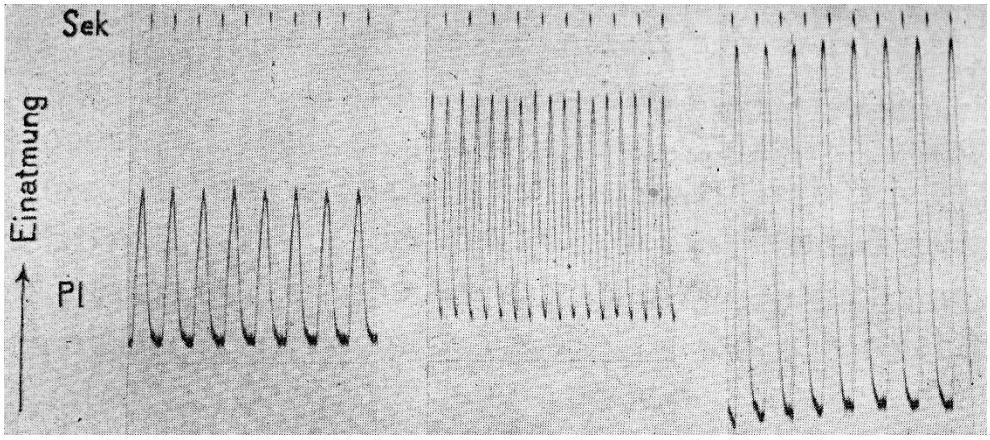


Abb. 14. Auswirkungen eines O_2-Mangels (Mitte) und eines CO_2-Überschusses (rechts) auf die Normalatmung eines Kaninchens (links; Bucher, 1952)

Der Gasaustausch ist umso besser, je tiefer geatmet werden kann – ist die Atmung zu flach, erhöht sich lediglich die Totraumventilation (Speckmann et al., 2013). Die Atemfrequenz spiegelt dabei jedoch nicht

ausschließlich die zugrundeliegende metabolische Situation wider, sondern kann auch an die Bewegungsfrequenz der ausgeführten Belastung gekoppelt sein (Roßkopf, 1996). Dies ist zum Beispiel im Freistilschwimmen der Fall.

Der Anregung der Atem- und Kreislauftätigkeit entgegengesetzt ist das negative Feedback durch die nervöse Steuerung. Bei zu hohen Atemvolumina wird durch Dehnungsrezeptoren in der Lunge der pulmonale Dehnungsreflex ausgelöst, der das Atemzugvolumen und somit die Ventilation begrenzt. Barorezeptoren, die sich v. a. in der Gefäßwand des Aortenbogens und des Karotissinus befinden, werden durch eine Wanddehnung gereizt und wirken über den arteriellen Baroreflex inhibitorisch auf die Zirkulation, wenn der durch die körperliche Belastung gesteigerte Blutdruck zu stark erhöht ist (Speckmann et al., 2013). Die Verarbeitung dieser Reize erfolgt dabei im Vasomotorenzentrum innerhalb des Kreislaufzentrums, das sich ebenfalls in der Medulla oblongata befindet (Faller, 1984). Eine Übersicht der genannten Reflexe ist in Abb. 15 dargestellt.

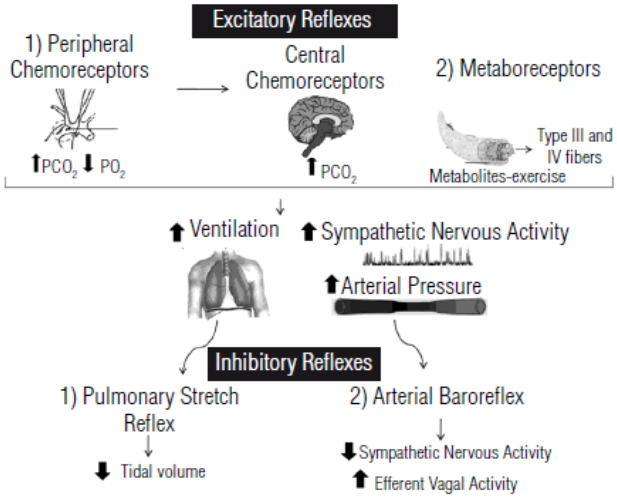


Abb. 15. Anregung und Hemmung der Atem- und Kreislauftätigkeit unter körperlicher Belastung durch verschiedene Reflexe (Ribeiro, Chiappa & Callegaro, 2012)

Die angesprochenen Reflexketten machen deutlich, dass keine isolierte Betrachtung der Atemtätigkeit möglich ist, sondern vielmehr eine enge Kopplung zum Herz-Kreislauf-System besteht. Die Verknüpfung von Ventilation und Zirkulation kommt nicht nur durch die räumliche Nähe von Atem- und Kreislaufzentrum in der Medulla oblongata zum Ausdruck, sondern auch durch den Umstand, dass der Tonus der Formatio reticularis neben den respiratorischen Neuronen auch den Erregungszustand des Sympathikus steuert. Es kommt dadurch zu einer parallelen Aktivierung der Ventilation und des Sympathikus und zu einer koordinierten Versorgung des Organismus über Atmung, Herz und Kreislauf (Speckmann et al., 2013). Dem Kreislauf kommt dabei die Funktion eines Hilfsmechanismus zu, der auf den Zellstoffwechsel der Arbeitsmuskulatur reagiert. Die Ziele der ventilatorischen und kardiovaskulären Regulation sind in diesem Zusammenhang die Versorgung der Muskelzelle mit Sauerstoff und Energie sowie der Abtransport von Stoffwechselprodukten (Weineck, 2004). Die Integration der verschiedenen Kontrollsysteme machen die Regulation der Ventilation und Zirkulation dabei zu einem komplexen Steuer- und Regelungsprozess (Ribeiro et al., 2012).

3.3.2 Muskulär ausgelöste Kreislaufreflexe und ihre Auswirkung auf die Atmung

Zusätzlich zu den genannten Regelkreisen lassen sich Reflexe identifizieren, die eine Auswirkung auf die Atmung haben, jedoch nicht in den Atemwegen oder innerhalb des Gefäßsystems ausgelöst werden. Grundsätzlich können Atemreflexe von jedem Organ ausgehen (Bucher, 1952), unter körperlicher Belastung sind aber vor allem jene ausschlaggebend, die der beteiligten Skelettmuskulatur entspringen. Es handelt sich dabei um komplexe Mechanismen, die durch die enge Kopplung der Ventilation und der Zirkulation auch Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System haben. Im Tierversuch konnte gezeigt werden, dass bereits das passive Bewegen der Beine zu einer beschleunigten Atmung führt (ebenda). Aus klinischen Studien mit Patienten, die unter chronischer Herzinsuffizienz leiden, ist der Ergoreflex bekannt (Mauch, 2011; McDonagh, Gardner, Clark & Dargie, 2011; Ribeiro et al., 2012), der unter körperlicher Belastung zu einer Sympathikusanregung und einer Ventilationssteigerung aufgrund mechanischer und metabolischer Veränderungen in der Arbeitsmuskulatur führt (Mauch, 2011; Vinogradova, Popov, Tarasova, Bravyi, Missina, Bersenev & Borovik, 2012). Man geht davon aus, dass auch dieser Reflex der adäquaten Sauerstoffversorgung der beteiligten Muskelgruppen dient (Ribeiro et al., 2012). Die Reflexstärke resultiert dabei aus der Summe der Anregung verschiedener Rezeptortypen. Mechanorezeptoren lösen einen muskulären Mechanoreflex aus, wenn die Nervenendigungen in der Arbeitsmuskulatur aufgrund der körperlichen Bewegung mechanisch verformt werden (Mauch, 2011). Durch die Erregung von Muskelspindeln und Sehnenrezeptoren kommt es dadurch zu einer Anregung der Atemtätigkeit (Speckmann et al., 2013) und einer Erhöhung des Blutdrucks. Insgesamt ist der Einfluss der Mechanorezeptoren jedoch als eher gering einzustufen (Mauch, 2011). Eine wesentlich stärkere Atem- und Kreislaufreaktion kann hingegen beobachtet werden, wenn sogenannte Metaborezeptoren – d. h. muskuläre Chemorezeptoren – angeregt werden. Diese reagieren auf eine Anhäufung von Stoffwechselprodukten und lösen über den muskulären Metaboreflex eine Steigerung der Atemtätigkeit und eine Sympathikusanregung sowie in Folge dessen eine Erhöhung des Blutdrucks und der Herzfrequenz aus (ebenda). Ist der Ergoreflex wie bei Patienten mit chronischer Herzinsuffizienz durch eine besonders hohe Sensitivität der Metaborezeptoren zu stark ausgeprägt, kommt es unter Belastung zu einer Hyperventilation (Ribeiro et al., 2012).

Witt, Guenette, Rupert, McKenzie und Sheel (2007) konnten zeigen, dass auch die Atemmuskulatur selbst Ursprung weitreichender Reflexe ist. Da ein Ausfall der Atmung lebensbedrohlich ist, hat der menschliche Organismus ein vitales Interesse daran, die Atemmuskulatur zu schützen, und weist – äquivalent zur konstant sichergestellten Blutversorgung des Gehirns – verschiedene Sicherungsmechanismen auf, die eine permanente Atmung garantieren sollen. Diese sind umso wichtiger, als nachgewiesen werden konnte, dass die Atemmuskulatur unter Belastung wie andere Skelettmuskeln auch erheblich ermüden kann (Enright & Unnithan, 2011; Johnson, Babcock, Suman & Dempsey, 1993; Lomax & Castle, 2011; Roussos & Macklem, 1982; Wylegala et al., 2007). *Respiratory muscle fatigue* (respiratorische Muskelermüdung) ist dabei definiert als das Unvermögen der Atemmuskulatur, die erforderliche Kraft zur Atmung aufzubringen bzw. den für die Einleitung der Inspiration nötigen Druck zu erzeugen. Sie tritt ein, wenn der Energieverbrauch der Muskulatur die Zufuhr durch das Blut übersteigt und auch die muskeleigenen Speicher erschöpft sind. Man unterscheidet dabei zwischen dem Versagen der Muskeln durch verringerte motorische Impulse aus dem Hirn (*central fatigue*) oder in der Peripherie an der neuromuskulären Verbindung bzw. in den Muskeln selbst (*peripheral fatigue*; Roussos & Macklem, 1982). Die Belastungsintensität bzw. -dauer, ab der die respiratorische Muskelermüdung eintritt, ist aus physiologischer Sicht von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu gehören neben dem Ausmaß der Atemarbeit und der Kraft der Atemmuskulatur auch die Effizienz derselben. Eine optimale Kombination aus Atemfrequenz und -tiefe ermög-

licht einen minimalen Energieverbrauch der Muskeln; wird davon abgewichen, verringert sich der Wirkungsgrad des Atemantriebs, was die Ermüdung der Muskulatur beschleunigt. Auch energetische Einflüsse spielen eine Rolle: Sind die Muskeln ernährungsbedingt oder durch eine Vorbelastung glykogenverarmt, erfolgt eine zu geringe Sauerstoffzufuhr oder läuft der Gasaustausch nicht effizient genug ab, verringert sich die Zeitdauer, über die eine geforderte Leistung der Atemmuskulatur erbracht werden kann. Roussos und Macklem (1982) konnten zeigen, dass die kritische Leistung, die zur Muskelermüdung führt, dem Produkt aus dem Volumenstrom des Blutes und der Effizienz entspricht. In Studien ließ sich bei reiner Atemarbeit eine Ermüdung der Atemmuskulatur feststellen, wenn bei einer achtminütigen Belastung mit einem zusätzlichen Widerstand von mindestens 60 % des maximalen inspiratorischen Drucks (MIP) gearbeitet wurde (Sheel, Derchak, Pegelow & Dempsey, 2002). Bei Ganzkörperbelastungen auf dem Laufband oder einem Radergometer trat respiratorische Muskelermüdung bei einer Dauerbelastung entsprechend 85 % der maximalen Sauerstoffaufnahme auf (Johnson et al., 1993). Bei Schwimmern führt ein submaximales 200-m-Rennen (Geschwindigkeit entsprechend 90 % der aktuellen persönlichen Bestzeit) zu einer Verringerung des MIP um 11 % bei 2er-Atmung und um 21 % bei 4er-Atmung (Jakovljevic & McConnell, 2009), was einer signifikanten Ermüdung entspricht. Um die Atemmuskulatur in einem solchen Fall zu schützen, wird von den beanspruchten Muskeln reflektorisch Feedback an das Atemzentrum zurückgegeben, um die neuronale Ansteuerung zu verringern. Durch die niedrigere Frequenz der Aktionspotentiale soll bei unzureichender Energiezufuhr von außen verhindert werden, dass der Muskel sich durch übermäßige ATP-Verarmung selbst beschädigt (Roussos & Macklem, 1982). Da jedoch infolgedessen auch die benötigte Atemkraft nicht mehr aufgebracht werden kann, wirkt die respiratorische Ermüdung leistungsbegrenzend bei der Durchführung einer sportlichen Belastung. Weil ein Teil der Atemmuskulatur auch für die Generierung einer ausreichenden Rumpfstabilität benötigt wird, ist bei Bewegungen der oberen Extremitäten die Kraftübertragung in Folge der inspiratorischen Muskelermüdung eingeschränkt. Beim Freistilschwimmen kann sich dadurch der Vortrieb verschlechtern (Lomax & Castle, 2011). Dies ist umso nachteiliger, als bei dieser Fortbewegungsart besonders hohe Anforderungen an das respiratorische System gestellt werden, was das Auftreten von inspiratorischer Ermüdung begünstigt (Brown & Kilding, 2011). Kommt es während einer Freistilbelastung zur Ermüdung der Atemmuskeln, wird eine regelrechte Kaskade physiologischer Reaktionen ausgelöst: Dadurch, dass die Kraft für eine adäquate Atemarbeit nicht mehr aufgebracht werden kann, verringert sich das Atemzugvolumen, was wiederum die Zyklusfrequenz erhöht und in Summe zu einem höheren energetischen Bedarf der Atmung führt, der nur auf Kosten der Versorgung anderer Muskeln gedeckt werden kann und die Leistungsfähigkeit weiter einschränkt (Wylegala et al., 2007). Die sinkende Ökonomie der Atemmuskulatur führt zu einem zunehmend steigenden Sauerstoffbedarf (Roussos & Macklem, 1982): Während die respiratorische Sauerstoffaufnahme bis zur ventilatorischen Schwelle noch linear ansteigt und der Anteil der Atmung am Gesamtverbrauch beispielsweise bei einer Belastung von 70 % der maximalen Sauerstoffaufnahme lediglich bei 4,6 % liegt, kann dieser unter Maximalbelastung auf bis zu 15 % ansteigen (Aaron, Seow, Johnson & Dempsey, 1992). Dieser hohe Wert ist unter anderem auch auf die zusätzliche Rekrutierung der Atemhilfsmuskulatur und die damit einhergehende Steigerung der beteiligten Muskelmasse zurückzuführen (Roussos & Macklem, 1982).

Durch den stark erhöhten Sauerstoffverbrauch steht die Atemmuskulatur unter Belastung in Konkurrenz zur an der Bewegung beteiligten Skelettmuskulatur (Harms, Babcock, McClaran, Pegelow, Nickele, Nelson & Dempsey, 1997; Witt, 2008). Ein solcher *Steal-Effekt* konnte bereits in den 1970er Jahren bei einer gleichzeitigen Belastung von Armen und Beinen beobachtet werden (Secher, Clausen, Klausen, Noer & Trap-Jensen, 1977; Secher, Ruberg-Larsen, Binkhorst & Bonde-Petersen, 1974). Durch die unterschiedlich großen Muskelpartien resultiert eine isolierte Belastung der Arme bzw. der Beine nicht in einer

identischen Sauerstoffaufnahme. Reine Armarbeit erreicht einen Wert, der beim Untrainierten ca. 70 % der Sauerstoffaufnahme einer reinen Beinarbeit beträgt. Beim Schwimmen und anderen Sportarten, die mit einem Training der oberen Extremität einhergehen, ist der Anteil deutlich höher. Bei einer kombinierten Arm- und Beinarbeit ergibt sich nahezu der Wert einer isolierten Belastung der unteren Extremität (Secher et al., 1974). Wird während der Durchführung einer reinen Beinarbeit eine zusätzliche Belastung der Arme aufgenommen, reduziert sich der Blutfluss in die Beine und in Folge dessen auch das Sauerstoffangebot für deren Muskulatur. Auch das Hinzufügen einer Beinarbeit zu einer bereits ausgeführten Armarbeit führt zu ähnlichen Effekten (Secher et al., 1977). Voraussetzung für die Umverteilung ist in beiden Fällen, dass es sich um submaximale oder maximale Belastungen handelt (Harms et al., 1997; Secher et al., 1974). Harms et al. (1997) konnten zeigen, dass auch die Atemmuskulatur in der Lage ist, die Sauerstoffversorgung der Arbeitsmuskulatur zu beeinträchtigen. Bei hoher Atemarbeit reduziert sich durch eine sympathisch regulierte Noradrenalin-Ausschüttung und die resultierende Erhöhung des peripheren Gefäßwiderstands die Durchblutung der Beine signifikant. Da die O_2-Extraktion nicht in gleichem Maße steigt, kann die Umverteilung nicht kompensiert werden; das Resultat ist eine verringerte Sauerstoffaufnahme der Beinmuskulatur. Auch ein gegenteiliger Effekt konnte erfasst werden: Wenn die Atemarbeit bei gleicher Belastung der unteren Extremität künstlich reduziert wird, erhöht sich der Blutfluss in die Beine (Harms et al., 1997; Roussos & Macklem, 1982). Die Bezeichnung der Blutgefäße der Skelettmuskulatur als *sleeping giant* (Secher & Volianitis, 2006) weist in diesem Zusammenhang auf die Bedeutung und das Potential des Gefäßwiderstands in Bezug auf die Regulation der Blutversorgung hin. Im Tierversuch konnte gezeigt werden, dass durch einen hohen Sauerstoffverbrauch der Atemmuskulatur sogar der Zufluss zu Leber und Hirn reduziert wird. Als Ursache werden Schutzmechanismen vermutet, die vom Atemzentrum eingeleitet werden, um die beteiligte Atemmuskulatur nicht in ihrer Funktionsweise zu beeinträchtigen (Roussos & Macklem, 1982).

Harms et al. (1997) zogen bereits eine Regulierung der Blutversorgung durch einen muskulären Chemoreflex der inspiratorischen Atemmuskulatur in Betracht. Durch Sheel et al. (2001) kam es analog zum muskulären Metaboreflex erstmalig zur Beschreibung eines inspiratorischen Metaboreflexes, der weitreichende neuronale und kardiovaskuläre Folgen hat. In den Folgejahren wurde in weiteren Studien die Plausibilität der dargestellten Reflexkette bestätigt und die der Atemmuskulatur entspringende Kreislaufregulation weiter erforscht (Lemaître, Cocquart, Chavallard, Castres, Mucci, Costalat & Chollet, 2013; McConnell, 2009; Ribeiro et al., 2012; Romer & Polkey, 2008; Sheel et al., 2002; Witt et al., 2007; Wylegala et al., 2007). Erfordert eine körperliche Belastung eine erhöhte Arbeit der Atemmuskulatur (v. a. des Zwerchfells), steigt deren Kontraktionsfrequenz und -amplitude. Durch die begrenzte Durchblutung bei isometrischer Kontraktion wird der maximal mögliche Flow durch den Muskel begrenzt, was bei hoher Arbeitsleistung dazu führen kann, dass die Sauerstoffversorgung nicht adäquat ist und auf anaerobe Energiebereitstellungsprozesse zurückgegriffen werden muss. Im Zwerchfell kommt es dabei schon durch eine willentlich erhöhte Ventilation in Ruhe zu einer Laktatakkumulation von 1 mmol/l (Roussos & Macklem, 1982). Bei Ganzkörperbelastungen kommt es in der Atemmuskulatur abgesehen von einem deutlich stärkeren Laktatanstieg zur Akkumulation von H^+ sowie weiteren Metaboliten in Folge der Muskelermüdung. Sinoway et al. (1994) konnten zeigen, dass der Ermüdungsmarker $H_2PO_4^-$ (Dihydrogenphosphat) in der Lage ist, die muskuläre sympathische Nervenaktivität signifikant zu erhöhen. Das Phosphat stellt dabei einen wesentlich größeren Reiz für die Muskelafferenzen dar als Laktat oder H^+ (ebenda) und gilt als einer der Auslöser des inspiratorischen Metaboreflexes (Ribeiro et al., 2012). Es kommt in Folge der Metabolitanreicherung der Atemmuskulatur zur Reizung der chemosensitiven Afferenzen vom Typ III und IV, die vor allem das Zwerchfell innervieren und mit einer Steigerung der Frequenz der Aktionspotentiale reagieren.

Über den Nervus phrenicus kommt es zur Weiterleitung des Reizes ans Gehirn und zur reflektorischen Steigerung der Sympathikusaktivität, was sich durch eine verstärkte Noradrenalin-Ausschüttung bemerkbar macht (ebenda). Daraus resultiert eine Vasodilatation der Atemmuskulatur (Vergrößerung des Querschnitts der Blutgefäße; Wylegala et al., 2007) und eine Vasokonstriktion (Gefäßverengung) der peripheren Muskulatur, vor allem in den Beinen. Durch den höheren Gefäßwiderstand verringert sich der Blutfluss in die betreffenden Muskeln und die Sauerstoffversorgung nimmt ab. Durch die entstehende beschleunigte Ermüdung der peripheren Muskelgruppen wirkt der inspiratorische Metaboreflex leistungsbegrenzend für das Gesamtsystem (Lemaître et al., 2013). Es wird vermutet, dass über die Einschränkung größerer Muskelpartien die Sauerstoffversorgung der Atemmuskulatur sichergestellt werden soll (Ribeiro et al., 2012). In Abb. 16 ist die Wirkungsweise des inspiratorischen Metaboreflexes schematisch dargestellt.

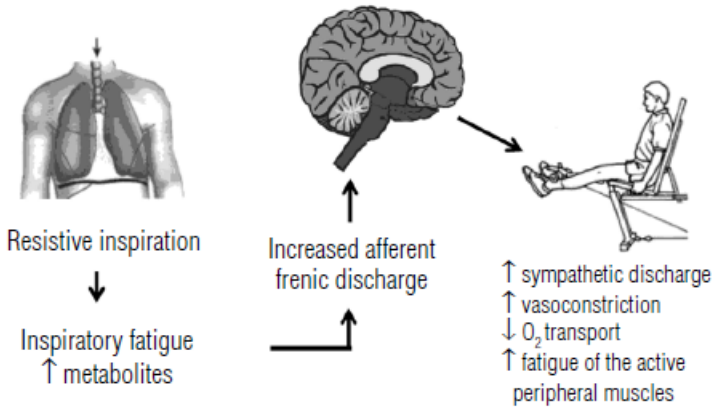


Abb. 16. Wirkungsweise des inspiratorischen Metaboreflexes (Ribeiro et al., 2012)

Sheel et al. (2002) postulierten aufgrund der Ergebnisse einer weiteren Studie ein Schwellenkonzept des inspiratorischen Metaboreflexes. Sie konnten erst ab einer Atemarbeit mit einer Intensität von 60 % des maximalen inspiratorischen Drucks eine reflektorische Reaktion im Sinne eines veränderten Beinwiderstands messen. Sie vermuten daher, dass der inspiratorische Metaboreflex erst ab einer bestimmten Reizschwelle ausgelöst wird und eine unterschwellige Belastung nicht zu den geschilderten Phänomenen führt. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass es bei niedrigen Belastungen nicht zu einem Steal-Effekt zwischen verschiedenen Teilkörperbelastungen kommt (Harms et al., 1997; Secher et al., 1974). Die Phänomene des Steal-Effekts und des inspiratorischen Metaboreflexes sind daher auf enge Weise miteinander verknüpft: Durch die Ermüdung der Atemmuskulatur kommt es zu einer unökonomischeren Arbeitsweise und einem erhöhten Sauerstoffbedarf, der auf Kosten der peripheren Arbeitsmuskulatur gedeckt werden muss. Dies wird durch die reflektorische Vasokonstriktion dieser Muskulatur aufgrund des Anstiegs von Ermüdungsmarkern in der Atemmuskulatur unterstützt.

3.4 Atemtraining

Aufgrund der geschilderten physiologischen Zusammenhänge und der leistungsbegrenzenden Wirkung der Atmung bei intensiven Belastungen bietet es sich an, die Atemmuskulatur isoliert zu trainieren, um

das unter 3.2.2 (vgl. S. 14) als vorteilhaft beschriebene Atemverhalten zu ermöglichen und von der Optimierung des Energieverbrauchs und des Vortriebs zu profitieren. Die Erschließung der Atmung als Leistungsreserve bietet die Möglichkeit, selbst im Hochleistungssport noch neue, bislang ungenutzte Reize zu setzen. Dies wird derzeit jedoch im deutschen Schwimmsport abgesehen von Übungen aus dem Bereich des Hypoventilationstrainings – d. h. Schwimmen mit reduzierter Atemfrequenz – noch eher sporadisch umgesetzt (Dinger, im Druck). Auch in der Nachwuchskonzeption des Deutschen Schwimmverbands (DSV) finden sich keine Handlungsanweisungen für die Gestaltung und das Training des Atemverhaltens, die über Hinweise bezüglich der technischen Ausführung des Atemvorgangs beim Freistilschwimmen hinausgehen. Dies ist umso nachteiliger, als die Adaptation der respiratorischen Muskelkraft im Kindesalter größer ist als im Erwachsenenbereich (Mickleborough et al., 2008) und eine Vernachlässigung dieses Leistungsfaktors im Nachwuchstraining ein weiteres Defizit im langfristigen Leistungsaufbau darstellt. Auch in Bezug auf die Atmung wird somit nicht spezifisch bzw. wettkampfnah genug trainiert, was bereits in Trainingsphasen angezeigt wäre, in denen die Grundlagenausdauer trainiert wird (Küchler & Graumnitz, 2001). Da die Atmung bei einem solchen Training mit niedriger Intensität nur unzureichend gefordert wird, reicht der Trainingsreiz nicht aus, um die beteiligte Muskulatur auf intensivere Belastungen vorzubereiten (Witt, 2008), wie sie typischerweise zu einem späteren Zeitpunkt im Trainings- und Wettkampfjahr absolviert werden. Es wäre wesentlich effizienter, das GA-Training durch höhere Spezifität zur Vorbereitung der wettkampfspezifischen Kraft bzw. Kraftausdauer zu nutzen – bezogen auf die Atmung würde dasbedeuten, schon in der Aufbauphase eines Trainingsjahrs ein Atemverhalten zu trainieren, das sich an der Belastung im Wettkampf orientiert.

Im folgenden Abschnitt soll dargestellt werden, welche Trainingsinhalte im Zusammenhang mit der Atmung genutzt werden können. Dazu gehört neben dem bereits angesprochenen Hypoventilationstraining, das sich Erkenntnisse aus dem Tauchsport zu Nutze macht, das isolierte Training der Atemmuskulatur durch spezielle Trainingsmittel. Da letztere (u. a. aus Kosten- und Zeitgründen) erst langsam Einzug in den Trainingsalltag halten, sollen sie an dieser Stelle vorrangig behandelt werden.

3.4.1 Tauch- und Hypoventilationstraining

Die physiologische Wirkung einer verringerten oder ausgesetzten Atmung unter Belastung im Wasser und die trainingswissenschaftliche Nutzung der beobachteten Effekte sind aus dem Tauchsport bekannt. Unter Apnoe wird der Tauchreflex (*diving response*) ausgelöst, der mit weitreichenden kardiovaskulären Regelungsprozessen einhergeht. Es handelt sich hierbei um eine Reihe von Effekten, die als Sauerstoffsparmechanismen dienen, darunter periphere Vasokonstriktion, Erhöhung des Blutdrucks, Verringerung des Auswurfvolumens des Herzens und Verringerung der Herzfrequenz. Auf diese Weise soll trotz des verringerten Sauerstoffangebots über eine Umverteilung des Blutes sichergestellt werden, dass sauerstoffsensitive Organe wie das Gehirn adäquat versorgt werden können (Delahoche, Delapille, Lemaître, Verin & Tourny-Chollet, 2005; Wein, Andersson & Erdéus, 2007). Die Größenordnung der physiologischen Veränderungen nimmt dabei mit der Zeit zu; so kann die Herzfrequenz um 70-80 % abnehmen (Schagatay, van Kampen, Emanuelsson & Holm, 2000). Es kommt darüber hinaus durch den ausbleibenden Gasaustausch in der Lunge zu einer zeitabhängigen Verringerung des O_2-Partialdrucks (pCO_2) sowie einem Anstieg des CO_2-Partialdrucks (pCO_2; Ringe, 2005, vgl. Abb. 17). Die Apnoe wird dabei durch den physiologischen *Breaking point*, einen individuell verschiedenen Schwellwert des pCO_2, in zwei Phasen unterteilt. Bei der Überschreitung dieses Werts wird die willentliche Apnoe beendet (Fowler, 1954) und es kommt zu unwillkürlichen Atembewegungen. Die erste Phase (*easy-going phase*) lässt sich in der Regel gut bewältigen, während die

zweite (*struggle phase*) hohe Anforderungen an die Willensstärke des Sportlers stellt (Dannhauer & Ulmer, 1983). Durch die Phasenstruktur lassen sich verschiedene Trainingsinhalte formulieren, die über die Nutzung verschiedener Mechanismen in der Lage sind, die Apnoedauer zu vergrößern. Die Zeitdauer bis zum Einsetzen unwillkürlicher Atembewegungen lässt sich durch physisches Training verlängern. Ein kurzfristiger Effekt kann dabei bereits durch Hyperventilation vor dem Tauchvorgang herbeigeführt werden: Da die Reizerregbarkeit der CO_2-sensitiven Chemorezeptoren durch das verstärkt abgeatmete Kohlendioxid und das über das Normalmaß hinaus oxigenierte Atemzentrum sinkt, wird die kritische pCO_2-Schwelle erst zu einem späteren Zeitpunkt überschritten (Bucher, 1952, vgl. Abb. 17). Für dauerhafte physiologische Anpassungsvorgänge ist hingegen ein spezielles Apnoetraining nötig. Infolgedessen kommt es bei gleichbleibendem pCO_2 vor Beginn der Belastung zu einer Verzögerung des Breaking point und zu einer stärkeren Tauchantwort. In diesem Fall verlängert sich die Apnoe durch eine Schwellwertverschiebung (Schagatay et al., 2000). Darüber hinaus können psychische Aspekte trainiert werden, um die zweite Phase der Apnoe zu verlängern. Dazu gehören der „Mut bzw. die Entschlossenheit, den Unannehmlichkeiten zu widerstehen, die das Atemanhalten mit sich bringt“ (Dannhauer & Ulmer, 1983, S. 29). Auf diesem Weg lässt sich die Atemanhaltezeit innerhalb kürzester Zeit deutlich verlängern, während sich physiologische Anpassungsvorgänge erst nach einem längeren Trainingszeitraum einstellen (ebenda).

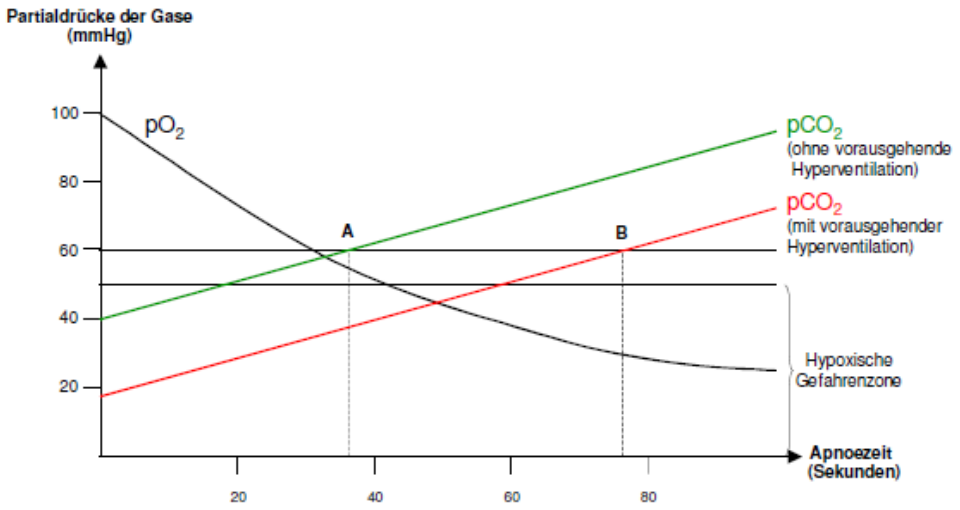


Abb. 17. Verlauf von pCO_2 und pO_2 unter Apnoe mit und ohne vorherige Hyperventilation; A: Breaking Point bei Tauchgang ohne vorausgegangene Hyperventilation, B: Breaking Point bei Tauchgang mit vorausgegangener Hyperventilation (Ringe, 2005)

Wird die Apnoe nicht statisch, sondern im Zusammenhang mit Unterwasserbewegungen ausgeführt, wie es z. B. beim Flossenschwimmen, Synchronschwimmen, Unterwasser-Rugby oder in den Sprint-Disziplinen beim Schwimmen der Fall ist, müssen die gegenläufigen Effekte von Apnoe und körperlicher Belastung berücksichtigt werden (Hoffmann, Smerecnik, Leyk & Essfeld, 2005). Während eine sportliche Betätigung wie in diesem Fall das Schwimmen mit einer Erhöhung der Herzfrequenz und des Schlagvolumens und einer Verringerung des peripheren Widerstands durch Mehrdurchblutung der verwendeten Arbeitsmuskulatur einhergeht, wirkt eine Atmungseinschränkung in die entgegengesetzte Richtung, weshalb die Kombination beider Anteile zu komplexen Kreislaufregulationsprozessen führt (Delahoche et al., 2005; Hoffmann, Smerecnik et al., 2005; Smerecnik, Hoffmann & Leyk, 2002). Je nach Belastungsprotokoll können die Ergebnisse dynamischer Apnoe sehr unterschiedlich ausfallen, da einer der gegenläufigen Effekte von körperlicher Belastung und Apnoe dominierend ist (Delahoche et al., 2005; Hoffmann, Smerecnik

et al., 2005). Eine Laborstudie mit Schwimmern zeigte, dass dabei nicht einmal die veränderten Blutgaskonzentrationen ausschlaggebend sind, sondern bereits die mechanische Blockierung der Atmung zu einer Erhöhung des arteriellen Widerstands und einer Verringerung der Herzfrequenz führt. Als Ursache hierfür wurde eine periphere Vasokonstriktion zur Einsparung von Sauerstoff angeführt. Eine isolierte Veränderung der O_2- und CO_2-Partialdrücke durch Rückatmung der verbrauchten Luft hatte im Hinblick auf die Kreislaufregulation die gleiche Wirkung wie eine normale Atmung. Außerdem zeigte sich, dass die Effekte, die unter Apnoe beobachtet werden konnten, bereits in den ersten fünf Sekunden auftraten (Hoffmann, Dräger, Özen & Çotuk, 2005; Hoffmann, Smerecnik et al., 2005). In anderen Studien war die durch den Tauchreflex induzierte Bradykardie so stark ausgeprägt, dass die physiologische Reaktion auf das Belastungsprotokoll nicht zum Tragen kam (Wein et al., 2007). Hoffmann und Dräger et al. (2005) konnten zeigen, dass die Herzfrequenz unabhängig von der Intensität abnimmt, wenn die Tauchtiefe vergrößert wird. Da auch der Kältereiz durch Gesichtsimmersion den Tauchreflex verstärkt, unterscheiden sich die Ergebnisse von Apnoe-Tests an Land und im Wasser (Schagatay et al., 2000). Durch diese Vielzahl von Einflussfaktoren lassen sich Studienergebnisse nicht ohne Weiteres von einer Belastungsform auf eine andere übertragen.

Das im Schwimmsport am weitesten verbreitete Trainingsmittel im Zusammenhang mit der Atmung stellt das sogenannte Hypoventilationstraining oder *Controlled frequency breathing* (CFB) dar (Stager & Tanner, 2008). Dabei wird die Atmung bewusst reduziert, um durch die verringerte Sauerstoffverfügbarkeit hohe Intensitäten zu simulieren und den anaeroben Stoffwechsel zu stimulieren (West, Drummond, Vanness & Ciccolella, 2005). Dabei werden im Schwimmtraining typischerweise Serien mit zunehmender Reduzierung der Atemfrequenz geschwommen, beispielsweise 5 x 100 m, bei denen die Atmung schrittweise von 2er- auf 6er-Atmung begrenzt wird. Alternativ besteht die Möglichkeit, längere Strecken in Teilabschnitten mit eingeschränkter Atmung zu schwimmen, beispielsweise 8 x 200 m, wobei jeweils 100 m im GA-I-Tempo, 50 m als GA-II-Belastung mit 7er-Atmung und 50 m locker geschwommen werden (Lüning, 2016). Der GA-I-Bereich entspricht dabei im Schwimmsport einer Belastung von 75-85 % (bezogen auf die Maximalgeschwindigkeit auf der jeweiligen Strecke), GA-II-Belastungen werden mit 85-95 % der Maximalgeschwindigkeit geschwommen (Bußmann et al., 2015). Ursprünglich vermutete man, auf diese Weise den Gasaustausch in der Lunge derart reduzieren zu können, dass die Arbeitsmuskulatur hypoxisch arbeiten muss und ähnliche kardiorespiratorische und metabolische Anpassungserscheinungen auftreten, wie sie bei einem Höhentraining beobachtet werden können (West et al., 2005). Dadurch soll sowohl der aerobe als auch der anaerobe Stoffwechsel stimuliert werden (Town & Vanness, 1990). Jedoch hatten diverse Autoren bereits in den 80er Jahren Zweifel daran geäußert, dass sich mit CFB eine Veränderung der Stoffwechsellage im Sinne eines „hypoxischen Trainings“ provozieren lässt. Dicker, Lofthus, Thornton und Brooks (1980) untersuchten, ob sich durch eine Verringerung des zur Verfügung stehenden Sauerstoffs im Lungen- bzw. Blutkreislauf (Hypoxämie) auch eine Minderversorgung der Arbeitsmuskulatur (Hypoxie) erreichen lässt, was die Voraussetzung für zelluläre Anpassungen und eine Stimulation des Herzkreislaufsystems sowie der Energiebereitstellungsprozesse wäre. Die Autoren konnten bei einer GA-I-Belastung auch bei einer Einschränkung der Atemfrequenz bis zur 5er-Atmung keine Verringerung der Sauerstoffsättigung des Blutes oder der Sauerstoffaufnahme feststellen. Town und Vanness (1990) konnten die Atemfrequenz sogar auf eine 8er-Atmung reduzieren, ohne dass die Sportler hypoxämisch wurden. In beiden Fällen konnte das geringere Atemminutenvolumen durch eine Steigerung des Atemzugvolumens und eine bessere O_2-Ausschöpfung kompensiert werden. Beide Autorengruppen schlussfolgerten daher, dass eine Einschränkung der Atemfrequenz nicht mit einer Verringerung der Sättigung des

Gewebes der Arbeitsmuskulatur und damit nicht mit der Reduzierung des aeroben Anteils der Energiebereitstellung einhergeht. Es wird daher keine Höhe simuliert, sondern eine höhere Intensität bei niedriger Schwimmgeschwindigkeit (West et al., 2005).

Die Wirkung des CFB-Trainings ist somit nicht auf Hypoxie, sondern auf Hyperkapnie (erhöhter CO_2-Gehalt im Blut) zurückzuführen. Da der pO_2 durch den eingeschränkten Gasaustausch wie unter Apnoe sinkt, während der CO_2-Partialdruck ansteigt (Town & Vanness, 1990), müssen die Sportler mit höheren CO_2-Konzentrationen schwimmen und eine entsprechende Toleranz entwickeln (Dicker et al., 1980). Trotz eines signifikant gesteigerten Atemzugvolumens – bei einer Frequenzeinschränkung von 2er- auf 8er-Atmung konnte eine Erhöhung um 180 % festgestellt werden – kann bei deutlicher Verringerung der Atemfrequenz keine adäquate Ventilationsleistung mehr erbracht werden (in der genannten Studie sank letztere um 54 %; Town & Vanness, 1990). Das führt dazu, dass sich die Sauerstoffaufnahme trotz besserer O_2-Ausschöpfung verringert (West et al., 2005). In derselben Studie kam es infolgedessen jedoch zu keiner Veränderung der Laktatwerte, was die Autoren aufgrund der zunehmend anaeroben Belastung jedoch erwartet hatten. Sie vermuteten daher eine veränderte Laktatkinetik aufgrund der Hyperkapnie oder ein verschlechtertes Austreten des Laktats aus dem Muskel ins Blut aufgrund der Hypoventilation (ebenda). Von mehreren Studien wurde übereinstimmend berichtet, dass eine Einschränkung der Atmung keine Auswirkungen auf die Herzfrequenz hat (Dicker et al., 1980; Town & Vanness, 1990). Hingegen nimmt die Zyklusfrequenz mit abnehmender Atemfrequenz signifikant zu (Town & Vanness, 1990, vgl. Abb. 18).

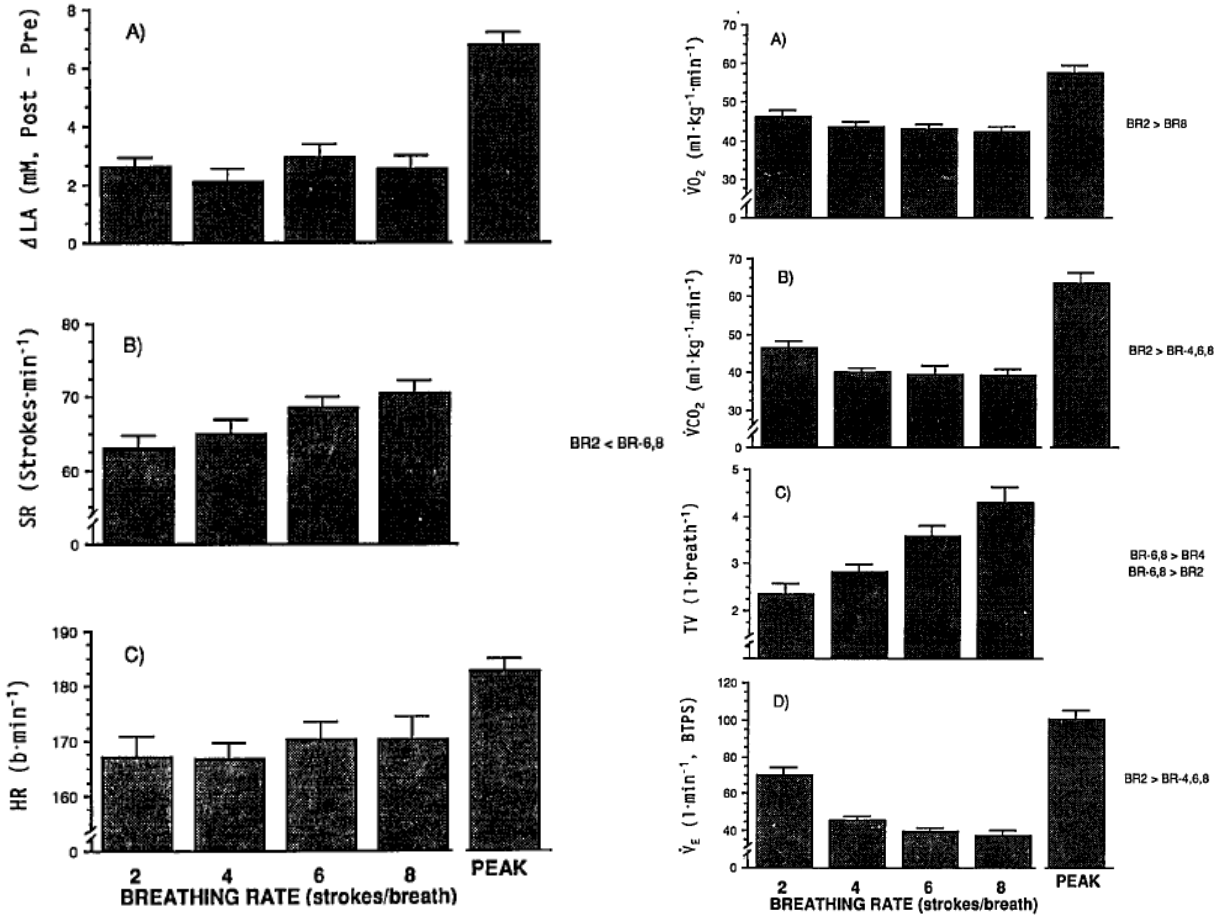


Abb. 18. Links: Laktat, Zugfrequenz und Herzfrequenz unter CFB (2er- bis 8er-Atmung); rechts: $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, Tidalvolumen (Atemzugvolumen) und Minutenvolumen im gleichen Testprotokoll (Town & Vanness, 1990)

Hier werden auch die Grenzen eines CFB-Trainings deutlich: Da die Schwimmer die Bewegungsfrequenz auf Kosten der Zuglänge erhöhen, um schneller wieder atmen zu können, wird der Vortrieb unökonomischer (ebenda). Dieses Verhalten ist umso stärker ausgeprägt, je niedriger das technische Niveau des Schwimmers ist (Mickleborough et al., 2008). Es muss daher im Training ein Kompromiss gefunden werden aus der Verringerung der Atemfrequenz als physiologischem Stimulus und einer Bewegungsstruktur, die nicht zu weit vom technischen Optimum abweicht. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die physiologischen Messgrößen nicht den Werten entsprechen, die bei freier Atmung erzielt werden; Normwerte zur Trainingssteuerung müssen daher angepasst werden (West et al., 2005).

3.4.2 Einsatz spezieller Trainingsmittel für das Atemtraining

Bereits in den 70er Jahren konnte in ersten Studien gezeigt werden, dass durch ein spezifisches Atemmuskeltraining Kraft und Ausdauer der respiratorischen Muskeln verbessert werden kann (Leith & Bradley, 1976). Das Aufkommen spezieller Trainingsmittel, die zu diesem Zweck eingesetzt werden können, ist hingegen erst eine Entwicklung der vergangenen 20 Jahre. Basierend auf dem Umstand, dass die Atemmuskulatur morphologisch und funktionell mit der Skelettmuskulatur identisch ist und daher in vergleichbarer Weise auf Training anspricht (Enright & Unnithan, 2011), sind die derzeit erhältlichen Geräte dabei auf verschiedene Trainingsziele ausgerichtet. Grundsätzlich wird zwischen Modellen für ein Ausdauer- und ein Kraft- bzw. Widerstandstraining unterschieden (Brown, Sharpe & Johnson, 2008; McConnell, 2011), wobei sich analog zum Training der Arbeitsmuskulatur verschiedene Intensitäten für die einzelnen Belastungsformen ableiten lassen. Arbeitet die Atemmuskulatur im Bereich von 80-90 % der maximal generierbaren Kraft – quantifizierbar anhand des maximalen inspiratorischen Drucks (MIP) –, sind Verbesserungen der Maximalkraft zu erwarten, während es bei einer Belastung von 60 % zu einem Training der Ausdauer kommt. Zwischen diesen beiden Belastungsbereichen liegt die Trainingszone, mit der die Kraftausdauer angesprochen wird (Enright & Unnithan, 2011).

Ein Ausdauertraining der Atemmuskeln wird dabei durch die Vorgabe einer entsprechend über das Ruhemaß gesteigerten Verkürzungsgeschwindigkeit realisiert, die über einen gewissen Zeitraum aufrechterhalten werden muss. Es muss nur gegen den Widerstand der Atemwege gearbeitet werden, eine äußere Last liegt nicht vor. Der Trainingsreiz entspricht damit einer freiwilligen Hyperventilation, was gleichzeitig das Problem dieser Belastungsform darstellt: Hinsichtlich der muskulären Beanspruchung ist dieses Atemverhalten nicht mit einer reflektorischen Ventilationssteigerung in Folge einer körperlichen Belastung gleichzusetzen. Außerdem ist, um die durch übermäßige Abatmung von Kohlendioxid resultierende Hyperkapnie und damit einhergehende Schwindelanfälle zu vermeiden, eine Rückatmungsvorrichtung zur Erhaltung der Isokapnie notwendig. Ein solches *Voluntary isocapnic hyperventilation*-Training (VIH) dauert rund 40 Minuten und wird von vielen Sportlern als unangenehm empfunden. Eine hohe Trainingsmotivation ist daher eine Grundvoraussetzung (McConnell, 2011). Als Trainingsresultat stellt sich eine verbesserte ventilatorische Ausdauer ein, die den Zeitraum, über den eine Dauerbelastung aufrechterhalten werden kann, verlängert und mit niedrigeren Laktatwerten einhergeht (Brown et al., 2008; Spengler, Roos, Laube & Boutellier, 1999). Bei Schwimmern konnte ein achtwöchiges respiratorisches Ausdauertraining Kraft und Ausdauer der Atemmuskulatur sowie die Lungenfunktion (forcierte Vitalkapazität (FVC), maximales Minutenvolumen in Ruhe (MVV) und MIP) signifikant verbessern. Durch den höheren Ermüdungswiderstand der Atemmuskeln sank auch das Belastungsempfinden, die Laktatwerte blieben hingegen unverändert (Lemaître et al., 2013). Auch Veränderungen der Lungenvolumina konnten im Allgemeinen erst bei einer höheren Belastung der Atemmuskulatur erzielt werden, wie es bei einem Krafttraining der Fall

ist (Enright & Unnithan, 2011). Bei dieser Trainingsform wird analog zur Belastung durch ein Gewicht, das bei einem Krafttraining der Skelettmuskulatur überwunden werden muss, ein zusätzlicher Atemwiderstand vorgegeben, gegen den geatmet werden muss. Dieser kann technisch auf unterschiedliche Weise realisiert werden: Beim *Flow resistive loading* (FRL) wird die Fläche, die für die Einatmung zur Verfügung steht, verkleinert (vergleichbar mit dem Atmen durch einen Strohhalm). Nachteilig ist dabei, dass die Belastung flowabhängig und dadurch schwer zu standardisieren ist, was die Trainingssteuerung erschwert (McConnell, 2011). Beim *Pressure threshold loading* (PTL) erfolgt die Atmung gegen ein druckbelastetes Ventil, das sich unabhängig von der Atemgeschwindigkeit erst öffnet, wenn der eingestellte Druck mittels einer Anspannung der Atemmuskulatur überwunden wurde. Zwar ist dabei grundsätzlich eine Belastung der Inspiration (IPTL), der Exspiration (EPTL) sowie eine Kombination aus beidem möglich, IPTL hat sich jedoch aufgrund vielfacher positiver Studienergebnisse als Methode der Wahl durchgesetzt. Es ist von den genannten Trainingsverfahren am vielseitigsten einsetzbar, kostengünstig sowie zeiteffizient und daher derzeit am weitesten verbreitet und am besten wissenschaftlich untersucht (ebenda). Als optimaler Trainingsreiz wird für diese Trainingsgeräte eine Belastung von unter 70 % des MIP angesehen, da bei einem höheren Widerstand die Zahl der Atemzüge sinkt, die unter der Zusatzlast verrichtet werden können. Außerdem verringert sich bei einer Steigerung der Last aufgrund der Beziehung zwischen Länge und Spannung der Atemmuskulatur die Atemtiefe und damit die Atemarbeit pro Atemzug (ebenda, vgl. Abb. 13). Eine zu langsame Arbeit gegen Widerstand, mit der eine zu hohe Belastung ebenfalls kompensiert werden könnte, hat sich darüber hinaus aufgrund der verminderten Blutzufuhr in die beteiligten Muskeln als ineffizient erwiesen (Witt et al., 2007). Bei einem Training mit moderater Belastung, die eine schnelle Kontraktion der Atemmuskeln ermöglicht, sind Verbesserungen der Kraft, der maximalen Verkürzungsgeschwindigkeit und der maximalen Leistung zu erwarten (McConnell, 2011, vgl. Abb. 19).

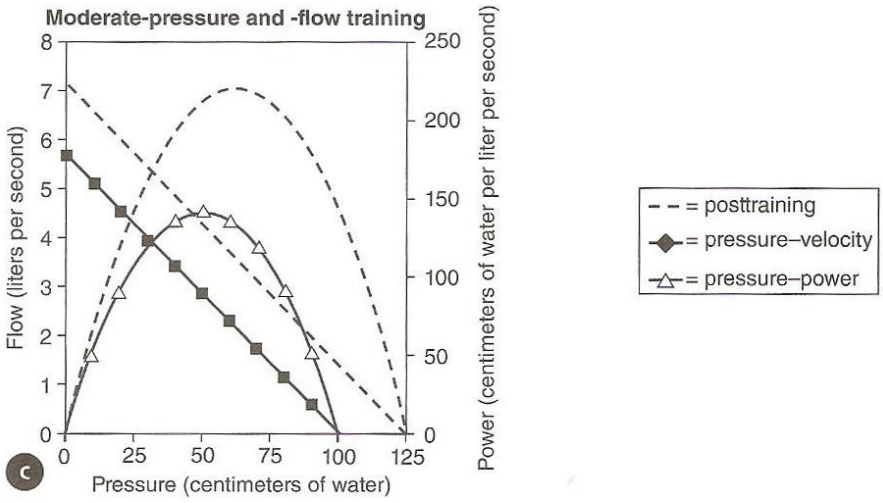


Abb. 19. Verbesserungen durch IPTL-Training hinsichtlich Kraft, maximaler Verkürzungsgeschwindigkeit und maximaler mechanischer Leistung (McConnell, 2011)

Dadurch, dass ein Teil der Atemmuskulatur auch für die Kraftentwicklung im Bereich des Rumpfes zuständig ist, beeinflusst die Leistungsfähigkeit dieser Muskelgruppen auch die Rumpf- und Beckenstabilisierung (Lomax & Castle, 2011; McConnell, 2011). Dem Zwerchfell kommt in diesem Zusammenhang eine ausgleichende Funktion zu: während rhythmischer Arm- oder Beinbewegungen, die den Gleichgewichtszustand des Rumpfes stören, kommt es zu kompensatorischen Kontraktionen des Zwerchfells, um einen gegenläufigen Impuls ausüben zu können. Eine Ermüdung der Atemmuskulatur geht dabei mit einer verminderten Rumpfstabilität einher (Tong, McConnell, Lin, Nie, Zhang & Wang, 2016). Daraus resultiert der

Ansatz, die Atemtätigkeit und die Rumpfkraft durch die Kombination eines Atemtrainings mit einem IPTL-Gerät mit Übungen aus dem Rumpfkrafttraining gleichzeitig zu trainieren und dadurch einen spezifischeren Trainingsreiz als bei einer isolierten Belastung zu erzielen (*Functional Training* nach McConnell, 2011). Die Wirksamkeit eines solchen Trainings ist derzeit noch nicht hinreichend wissenschaftlich belegt. In der einzigen Studie, die Functional Training als Interventionsmaßnahme einsetzt, konnten die Probanden nach sechs Wochen ihre 1-h-Laufleistung, die Laufökonomie und die Dauerleistung im Unterarmstütz verbessern (Tong et al., 2016). Da die Autoren jedoch verglichen, wie sich die Leistungsfähigkeit verändert, wenn im Rahmen eines Lauftrainings (Kontrollgruppe) zusätzlich ein Rumpfkraft- und Atemtraining (Interventionsgruppe) durchgeführt wird, lässt sich nicht differenzieren, auf welche Komponente der Intervention die gezeigten Veränderungen zurückzuführen sind. Es ist daher fraglich, ob der Effekt die Wirkung eines reinen Atem- oder Rumpfkrafttraining übersteigt und sich ein Zusatznutzen durch deren Kombination ergibt.

In Folge eines reinen Widerstandstrainings der Atemmuskulatur konnte hingegen ein vergrößertes Lungenvolumen (Vitalkapazität und totale Lungenkapazität) sowie eine verbesserte sportliche Leistung bei verschiedenen Belastungsformen – Laufen, Schwimmen, Radfahren – nachgewiesen werden (Enright & Unnithan, 2011). Die größte Bedeutung wird dabei der messbaren Hypertrophie des Zwerchfells um bis zu 12 % zugeschrieben, in Folge derer es zu einem besseren Blutfluss in die Extremitäten (Chiappa, Roseguini, Vieira, Alves, Tavares, Winkelmann, Ferlin, Stein & Ribeiro, 2008) und einer Erhöhung des MIP um bis zu 17 % kommt (Downey, Chenoweth, Townsend, Ranum, Ferguson & Harms, 2007; Enright, Unnithan, Heward, Withnall & Davies, 2006; Witt et al., 2007). McConnell und Lomax (2006) konnten zeigen, dass die Leistung der Wadenmuskulatur sich verringert, wenn der Belastung eine ermüdende Arbeit der Atemmuskulatur voranging, und dass sich dieser Effekt durch ein Widerstandstraining verringern lässt. Auch Chiappa et al. (2008) beobachteten, dass die Reduzierung des Blutflusses in die Extremitäten durch inspiratorische Belastung nach einem Atemtraining abgeschwächt war. Übereinstimmend mit diesen Ergebnissen berichteten Downey et al. (2007) von einer um 10 % verringerten Ermüdung des Zwerchfells nach einer Trainingsintervention. Es kam infolgedessen zu niedrigeren Laktatwerten bei reiner Atemarbeit (Brown et al., 2008) und Ganzkörperbelastungen (Enright & Unnithan, 2011; Griffiths & McConnell, 2007; McConnell, 2011; Romer, McConnell & Jones, 2002).

Eine der wenigen Studien mit Schwimmern berichtete von einer Steigerung des MIP um 10,8 % und einer Verbesserung der Ausdauer der Atemmuskulatur um 30,7 % nach einem vierwöchigen Widerstandstraining (Wylegala et al., 2007). Die Schwimmausdauer verbesserte sich signifikant und übertraf sogar die Wirkung eines parallel mit einem Teil der Probandengruppe durchgeführten Ausdauer-Atemtrainings. Es kam darüber hinaus zu einer Vergrößerung des Atemzugvolumens sowie einer Verringerung des Sauerstoffverbrauchs. Mickleborough et al. (2008) ließen international erfolgreiche Schwimmer ein 12-wöchiges Widerstandstraining absolvieren, konnten jedoch außer einer verbesserten Lungenfunktion, die sich im gleichen Maße entwickelte wie die der Kontrollgruppe, und einer leicht erhöhten Kontraktionsgeschwindigkeit der Atemmuskeln keine weiteren Trainingseffekte feststellen. Wilson et al. (2014) untersuchten die Wirksamkeit eines speziellen Aufwärmprogramms für die Inspirationsmuskulatur mittels eines IPTL-Geräts und konnten eine Verbesserung der 100-m-Leistung um 0,62 s feststellen. Aufgrund der unterschiedlichen Belastungs- und Trainingsprotokolle, der inhomogenen Probandengruppen bezüglich Alter und Leistungsniveau sowie der Länge der Bahn des Schwimmbeckens lassen sich die Ergebnisse der einzelnen Studien jedoch nur schwer vergleichen bzw. auf andere Zusammenhänge übertragen.

Als Ursache für die höhere Leistungsfähigkeit in Folge eines Atemtrainings wird vor allem eine Abschwächung des Metaboreflexes aufgrund des Kraftzuwachses und die daraus resultierende bessere Ökonomie der Atemmuskulatur angesehen. Durch die größere oxidative Kapazität und den verbesserten Ermüdungswiderstand der Respirationsmuskeln – insbesondere des Zwerchfells – kann eine den metabolischen Anforderungen unter Belastung entsprechende Durchblutung realisiert werden, was zu einer geringeren bzw. verzögerten Akkumulation von Stoffwechselprodukten (insbesondere Laktat, H^+ und $H_2PO_4^-$) führt. Eine gleichbleibende Last führt daher bei einer besser trainierten Atemmuskulatur zu einer geringeren Stimulation der für den Metaboreflex relevanten chemosensitiven Afferenzen – die Leistung kann in diesem Fall länger aufrechterhalten werden, weil der Reflex später ausgelöst wird (Brown et al., 2008; Lemaître et al., 2013) oder weniger stark ausfällt (McConnell, 2011; Ribeiro et al., 2012). Andere Autoren halten es für möglich, dass durch ein Atemtraining der Schwellwert, der zur Auslösung des Metaboreflexes führt, verschoben wird. In diesem Fall wird die Vasokonstriktion der Arbeitsmuskulatur nicht durch eine verringerte Akkumulation von Metaboliten, sondern durch die Erhöhung der ischämischen Schwelle bei gleichbleibendem Stoffwechsel in der Atemmuskulatur verzögert (Chiappa et al., 2008; McConnell & Lomax, 2006; Witt et al., 2007). In beiden Fällen ist das Resultat des Atemtrainings ein verringerter Anstieg des Gefäßwiderstands in der peripheren Muskulatur sowie eine Erhöhung des Blutflusses in die Extremitäten (Ribeiro et al., 2012, vgl. Abb. 20). Da es infolgedessen zu einer verbesserten Sauerstoffversorgung und einer geringeren Muskelermüdung in den Extremitäten kommt, hat das inspiratorische Krafttraining hier einen ergogenen Effekt (McConnell, 2011).

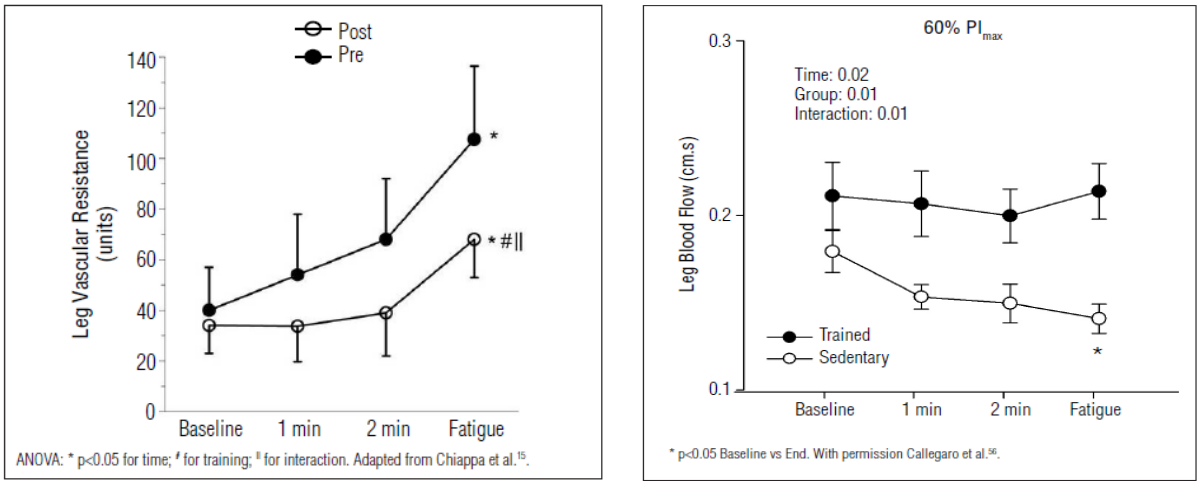


Abb. 20. Verringerter Beinwiderstand (links) und verbesserter Blutfluss in die Extremitäten (rechts) nach inspiratorischem Widerstandstraining (Ribeiro et al., 2012)

4 Forschungsdefizit

Die vorangegangene Darstellung des derzeitigen Forschungsstands zeigt, dass das Freistilschwimmen hohe Anforderungen an das respiratorische System und die beteiligte Muskulatur stellt. Durch die Forderung nach optimalen Sauerstoffversorgung aller leistungsbestimmenden Systeme bei gleichzeitiger Minimierung des Vortriebswiderstands ergibt sich die Notwendigkeit einer Atemstrategie. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die bei intensiven Belastungen eintretende Ermüdung der Atemmuskulatur leistungsbegrenzend wirkt. Sowohl die Leistungsreserven, die sich durch ein bestimmtes Atemverhalten erschließen lassen, als auch die Auswirkungen eines Atemtrainings, das sich leistungsfördernd auswirken soll, wurden im Zusammenhang mit Schwimmern bislang unzureichend untersucht. Dabei wurden verschiedene Aspekte identifiziert, die für eine differenziertere Betrachtungsweise herangezogen werden können.

Da im Freistilschwimmen eine enge Kopplung zwischen der Atem- und der Bewegungsfrequenz besteht und Teile der Atemmuskulatur auch für die Kraftübertragung vom Rumpf auf die obere Extremität und somit für den Vortrieb eingesetzt werden, ist aus trainingswissenschaftlicher Sicht die Wirkung eines Atemtrainings auf die zeitliche Koordination der Antriebsimpulse von Interesse. Sofern hier ein Zusammenhang besteht, könnte ein Atemtraining gezielt eingesetzt werden, um den Vortrieb zu optimieren. In der Literatur fanden sich dazu jedoch keine Untersuchungen. Auch konnte gezeigt werden, dass international erfolgreiche Sportler im Wettkampf ein Atemverhalten aufweisen, dass durch eine niedrige Atemfrequenz und lange Tauchphasen an der Wende gekennzeichnet ist. Bereits diese Analyse musste mangels Publikationen zu diesem Thema anhand eigener Videoaufzeichnungen durchgeführt werden. Es fanden sich naturgemäß auch keine Studien dazu, ob ein solches für die Wettkampfleistung vorteilhaftes Atemverhalten auch von Nachwuchssportlern umgesetzt werden kann und ob hier ein Atemtraining unterstützend wirken kann.

In diesem Zusammenhang ist insbesondere die komplexe physiologische Steuerung und Regelung der Atmung unter Belastung zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 3.3 dargestellt wurde, wird die Atemtätigkeit unter Belastung nicht ausschließlich willentlich gesteuert, sondern ist dem Einfluss zahlreicher zentraler und muskulärer Reflexe unterworfen, die eng mit der Steuerung des Herz-Kreislauf-System verbunden sind. Insbesondere der inspiratorische Metaboreflex wirkt dabei unter Ermüdung leistungsbegrenzend, da er bei Ermüdung der Atemmuskulatur eine reflektorische Vasokonstriktion in der Muskulatur der unteren Extremität auslöst und dort die Sauerstoffversorgung begrenzt. Bisherige Studien konzentrierten sich in diesem Zusammenhang auf die Veränderung einzelner Parameter (z.B. Ermüdungsmarker, Schwimmleistung) bei einer vorgegebenen Belastung, die von den Studienteilnehmern mit frei gewählter Atmungs- und Bewegungsfrequenz absolviert wurde. Es wurde bislang jedoch nicht untersucht, ob sich durch ein Atemtraining eine vorgegebene Belastung besser mit verringerter Atemfrequenz absolvieren lässt und welche Veränderungen sich dabei hinsichtlich der zugrundeliegenden zentralen und muskulär ausgelösten Kreislaufreflexe beobachten lassen.

Bezogen auf das Atemtraining ließ sich verschiedene Studien anführen, die das Training der Atmung sowohl durch Übungen im Wasser (CFB-Training) als auch isoliert mit Hilfe von Atemtrainingsgeräten analysierten. Durch eine Vielzahl von Trainings- und Belastungsprotokollen, die z.B. entweder die Ausdauer oder die Kraft der Atemmuskulatur trainierten bzw. testeten, ergaben sich unterschiedliche und zum Teil widersprüchliche Effekte. Eine umfassende Beschreibung der nach einem Atemtraining beobachtbaren Reaktion auf Belastung unter Berücksichtigung leistungsphysiologischer und biomechanischer Parameter fehlte jedoch. Manche Autoren postulierten darüber hinaus, dass das Schwimmtraining selbst durch die

zeitlich begrenzte Atmung bereits einen ausreichend großen Stimulus für das Atemsystem darstellt (Clanton et al., 1987; Mickleborough et al., 2008). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Wirkmechanismen eines Atemtrainings, die für das Zustandekommen einer sportlichen Leistung im Freistilschwimmen relevant sind, bislang nicht ausreichend differenziert untersucht wurden.

Aufgrund der durch die großen Trainingsumfänge bereits jetzt sehr hohen zeitlichen Belastung von Nachwuchsschwimmern ist vor der Einführung eines weiteren Trainingsinhaltes in Form eines speziellen Atemtrainings daher der Nachweis zu erbringen, dass sich dadurch zusätzliche Leistungspotentiale erschließen lassen. Es ist zu klären, welcher konkrete Nutzen sich dadurch ergibt und welche Athleten in besonderer Weise davon profitieren können. Es müssen Informationen über die zugrundeliegenden Wirkmechanismen vorliegen, um Trainingsempfehlungen ableiten und das Atemtraining bezogen auf Umfang und Zeitpunkt der Durchführung möglichst optimal in das Gefüge aller weiteren Trainingsinhalte integrieren zu können.

5 Fragestellung

Ausgehend von der Zielstellung, das Atemverhalten im Freistilschwimmen auf Potentiale zur Leistungssteigerung zu untersuchen, sollten im Rahmen dieser Arbeit mehrere Fragestellungen beantwortet werden. Als übergreifende Forschungsfragestellung war dabei zu prüfen, ob ein spezielles Atemtraining in der Ausbildung eines hohen Leistungsniveaus im Schwimmen als Leistungsreserve genutzt werden kann. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund relevant, dass Nachwuchsschwimmer durch die großen Trainingsumfänge bereits einer hohen zeitlichen Belastung ausgesetzt sind. Vor der Einführung eines weiteren Trainingsinhaltes in Form eines Atemtrainings war somit zunächst der Nachweis zu erbringen, dass sich dadurch ein zusätzlicher Nutzen ergibt.

Um die Trainingswirkung – sofern eine solche vorliegt – differenzierter beschreiben zu können, müssen die zugrundeliegenden Wirkmechanismen bekannt sein. Es ließ sich daher zunächst die Fragestellung ableiten, ob bestimmte leistungsphysiologische Parameter durch ein Atemtraining im Sinne einer verbesserten Ökonomie positiv beeinflusst werden. Sofern sich Veränderungen feststellen lassen, müssten diese einer genaueren Untersuchung unterzogen werden, um Empfehlungen für den Einsatz eines Atemtrainings in der Trainingspraxis ableiten zu können. Insbesondere war in diesem Zusammenhang die Fragestellung zu beantworten, welcher Zusammenhang zwischen einem Trainingseffekt durch das Atemtraining und der Intensität einer Schwimmbelastung besteht. Außerdem sollte erstmals untersucht werden, ob sich in Folge eines Atemtrainings eine veränderte Reaktion auf eine eingeschränkte Atemfrequenz feststellen lässt. Um das Atemtraining bezogen auf den Zeitpunkt der Durchführung möglichst optimal in das Gefüge aller weiteren Trainingsinhalte integrieren zu können, sollte darüber hinaus der Frage nachgegangen werden, ob sich zu verschiedenen Zeitpunkten innerhalb des Trainings- und Wettkampfjahres unterschiedliche Anpassungserscheinungen als Reaktion auf ein Atemtraining beobachten lassen.

Unter Nutzung des zuvor dargestellten Forschungsstands konnte die folgende Hypothese formuliert werden, die mit dieser Arbeit geprüft werden sollte:

Durch ein Atemtraining lässt sich bei Nachwuchssportlern eine Trainingswirkung erzielen, die sich anhand einer Veränderung leistungsphysiologischer oder biomechanischer Parameter als Ausdruck einer gesteigerten Leistungsfähigkeit beim Freistilschwimmen quantifizieren lässt.

Die Beantwortung der genannten Fragestellungen sollte auf Basis ausgewählter leistungsphysiologischer Parameter erfolgen, die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen erhoben wurden. Dazu gehörten neben der Laktatkonzentration und der Herzfrequenz auch die Sauerstoffaufnahme in Folge eines Belastungstests. Der Einfluss des Atemtrainings auf das respiratorische System sollte anhand von Lungenfunktionstests quantifiziert werden. Um Aussagen hinsichtlich der Bewegungsstruktur treffen zu können, wurde die Zyklusfrequenz herangezogen. Um eine standardisierte Belastungssituation zu schaffen, anhand derer die Leistungsfähigkeit der getesteten Sportler bewertet werden konnte, wurde der Parameter Intensität (bezogen auf eine bestimmte Belastungsdauer) bei Vorgabe einer festgelegten Atemfrequenz gewählt.

6 Methoden

6.1 Arbeitsschwerpunkte und Lösungsweg

Die Bearbeitung der wissenschaftlichen Aufgabenstellung erfolgte in drei Teilabschnitten:

1. Entwicklung eines leistungsdiagnostischen Untersuchungsdesigns

Im Rahmen der durchgeführten Studie sollte zu verschiedenen Testzeitpunkten innerhalb eines Trainings- und Wettkampfjahres die Leistungsfähigkeit ausgewählter Nachwuchssportler abgefragt werden. Dabei sollten sowohl trainings- als auch wettkampfrelevante Intensitätsbereiche berücksichtigt werden, um leistungsphysiologische Reaktionen zu erfassen, die zur Trainingssteuerung genutzt werden können. Innerhalb der einzelnen Tests sollte eine Variation der Atemfrequenz erfolgen, um die Belastungsantwort auf das gewohnte Atemverhalten der einer Reaktion auf eine verminderte Atmung gegenüberstellen zu können. Zwischen den Tests sollte während ausgewählter Trainingsphasen ein Atemtraining durchgeführt werden. Um die differenzierte Quantifizierung und Bewertung verschiedener Trainingsinhalte (Schwimm- und Atemtraining) zu ermöglichen, war die Einteilung des Probandenkollektivs in eine Interventions- und eine Kontrollgruppe angezeigt. Durch den wiederholten Einsatz des Testprotokolls innerhalb eines längeren Zeitraums sollte die Darstellung von Leistungsentwicklungen ermöglicht werden. Dabei war der Zeitraum des ersten Makrozyklus besonders zu berücksichtigen, da in dieser Trainingsphase der Großteil des GA-Trainings durchgeführt wurde. Es sollte ein Untersuchungsdesign entwickelt werden, das diesen Anforderungen gerecht wird.

2. Durchführung von Trainingsmaßnahmen

Für das Atemtraining sollte ein geeignetes Trainingsmittel gewählt werden, um einen Trainingsreiz zu setzen, der sich aufgrund seines Belastungsgefüges vorteilhaft auf die Schwimmleistung auswirkt. Das Training sollte sich daher inhaltlich an den Anforderungen an die Atmung beim Freistilschwimmen – schnelle, kurze Inspiration bei gleichzeitiger Realisierung großer Atemvolumina – orientieren. Bei der Wahl der Trainingsprogramme war darauf zu achten, dass diese sowohl einen adäquaten Reiz darstellen, als auch der Forderung nach geringen zeitlichen Umfängen gerecht werden, um eine möglichst hohe Akzeptanz bei Sportlern und Trainern zu erzeugen. Die Durchführung der Trainingsinhalte sollte in angemessenem Maße begleitet werden, um eine korrekte Ausführung abzusichern, bei Problemen regulierend eingreifen zu können und Lerneffekte in Folge der praktischen Umsetzung zu erzielen.

3. Bewertung der Trainingsinterventionen und Ableitung von Empfehlungen für die Trainingspraxis

Im Anschluss an die Studie sollte eine Evaluation der durchgeführten Trainingsmaßnahmen und der im Rahmen der leistungsdiagnostischen Tests geforderten Hypoventilationsbelastungen unter leistungsphysiologischen und trainingswissenschaftlichen Gesichtspunkten durchgeführt werden. Die Bewertung hinsichtlich Wirksamkeit und Nutzen sollte dabei auf der Entwicklung der innerhalb des diagnostischen Untersuchungsdesigns erhobenen leistungsphysiologischen und biomechanischen Parameter und der im

Rahmen des durchgeführten Atemtrainings ermittelten Kennzahlen basieren. Sofern sich Veränderungen dieser Parameter feststellen lassen, sollte eine Darstellung der zugrundeliegenden Mechanismen erfolgen, die unter der Berücksichtigung lokaler und systemischer Effekte zu einer Trainingswirkung geführt haben können. Anhand dieser Zusammenhänge sollten Empfehlungen für die grundsätzliche Gestaltung eines Atemtrainings (Einsatzzeitpunkt, Umfang und Intensität, geeignete Parameter für die Trainingssteuerung und -evaluation) ausgesprochen werden. Dabei sollte eine gesonderte Berücksichtigung individueller Parameter erfolgen, die für das Zustandekommen der Trainingswirkung infolge eines Atemtrainings relevant sind.

Zur Beantwortung der Fragestellung dieser Arbeit wurden Voruntersuchungen im Strömungskanal durchgeführt. Diese dienten der Entwicklung eines geeigneten Testprotokolls für die Hauptstudie und der praktischen Erprobung desselben. Im Rahmen der Hauptuntersuchung absolvierten 15 Nachwuchsschwimmer eine Trainingsintervention mit einem Atemtrainingsgerät und vier Stufentests im Strömungskanal, mit deren Hilfe die Wirksamkeit des Trainings bewertet werden sollte. Im folgenden Kapitel werden die teilnehmenden Probanden (Kapitel 6.3.1), das gewählte Studiendesign (Kapitel 6.3.2) sowie die durchgeführten Untersuchungen (Kapitel 6.2 und 6.3.2.2) und Trainingsinhalte (Kapitel 6.3.2.1) vorgestellt. Es folgt eine Übersicht aller verwendeten Geräte und der Testumgebung (Kapitel 6.3.3) sowie eine Beschreibung der eingesetzten Verfahren zur Datenaufbereitung und statistischen Auswertung der Ergebnisse (Kapitel 6.3.4).

6.2 Pilotstudie im Strömungskanal

Die Ergebnisse der in Kapitel 3.2.2 dargestellten Videoanalyse ließen den Schluss zu, dass im Freistilschwimmen Atmung und Atemrhythmus eine große Bedeutung im Sinne einer Leistungsreserve zukommt. Um diese besser erschließen zu können, sollte ein Test entwickelt werden, der Rückschlüsse auf Veränderungen der Energiebereitstellung durch eine Variation der Atemfrequenz ermöglicht.

Vor der Durchführung dieses Tests im Rahmen der Hauptuntersuchung erwies sich eine Erprobung des Belastungsprotokolls und des zu verwendenden Materials als zweckmäßig. Da der Ablauf des geplanten Tests von den im Schwimmsport standardmäßig durchgeführten Leistungstests abwich und hohe Anforderungen an den Sportler stellte, sollte in einer Pilotstudie überprüft werden, ob das Protokoll ausreichend hohe Reize für messbare Veränderungen setzt und von potentiellen Probanden bewältigt werden kann. Die Eignung der verwendeten Messgeräte für diesen spezifischen Test wurde ebenso getestet wie die Praktikabilität der Abläufe und deren Umsetzung durch das eingesetzte Testpersonal.

6.2.1 Hintergrund und Zielstellung

Die Videoauswertung der WM 2011 ergab, dass im Hochleistungsbereich auf kurzen Strecken feste Atemrhythmen vorherrschen, bei denen deutlich seltener als einmal pro Armzyklus geatmet wird. Besonders vorteilhaft erwies sich eine niederfrequente Atmung mit langer Tauchphase an der Wende. Im Rahmen der Pilotstudie sollte untersucht werden, wie eine derartig verminderte Atemfrequenz physiologische Parameter bei Nachwuchsschwimmern in verschiedenen Belastungsintensitäten beeinflusst, und ob sie sich überhaupt unter Belastung umsetzen lässt. Da die Wenden in Abhängigkeit von der Streckenlänge

20-40 % der Gesamtdauer ausmachen (Craig, 1986), sollte die Quantifizierung der Veränderungen in der Atemmechanik und im Energieumsatz sowohl anhand eines Testprotokolls mit kontinuierlichen Stufen als auch mit einem Protokoll mit intermittierender Belastung erfolgen. Während sich nach einer kontinuierlichen Belastung ein Steady State einstellen kann, der genauere Aussagen über den aktuellen physiologischen Status erlaubt, ist eine intermittierende Belastung durch die Simulation der Wende spezifischer für die zu testende Strecke.

Es sollte darüber hinaus geprüft werden, ob die Bestimmung der Sauerstoffaufnahme über die Nachatmungsmethode im Strömungskanal im Zusammenhang mit dem geplanten Testprotokoll umsetzbar ist. In bisherigen Studien wurde die Nachatmungsmethode vorrangig im Schwimmbecken angewandt (Capelli, Zamparo, Cigalotto, Francescato, Soule, Termin, Pendergast & di Prampero, 1995; Costill, Kovaleski, Porter, Kirwan, Fielding & King, 1985; Mohnke, 2008; Thompson, MacLaren, Lees & Atkinson, 2004) oder die Sauerstoffaufnahme kontinuierlich über den gesamten Versuchszeitraum aufgezeichnet (Adrian, Singh & Karpovich, 1966; Boitel, Vercruyssen, Alberty, Nesi, Bourdon & Brisswalter, 2010; Capelli, Pendergast & Termin, 1998). Der Vorteil einer Messung nach Ende der Belastung ist, dass die Schwimmtechnik während des Tests nicht durch zusätzliche Geräte eingeschränkt ist und die Atmung in gewohnter Weise zur Seite erfolgen kann. Es kann daher schon während des Tests überprüft werden, ob eine vorgegebene Atemfrequenz eingehalten werden kann. Allerdings erfordert dies, dem Sportler nach Belastungsende so schnell wie möglich eine Maske oder ein Mundstück und eine Nasenklammer aufzusetzen und die Zeitdauer, die dafür benötigt wird, exakt zu erfassen (im Folgenden als Maskenzeit bezeichnet). Im Kanal fällt dazu im Vergleich zum Becken, wo jeweils am Ende einer Bahn gemessen werden kann, eine zusätzlich zurückzulegende Distanz von der Schwimmposition zum Ende des Kanals an. Die Pilotstudie sollte klären, ob ein Zeitintervall von möglichst unter zehn Sekunden zwischen Belastungsende und Start der spiroergometrischen Messung realisierbar ist.

6.2.2 Ablauf

An der Untersuchung nahmen sechs Kadersportler des Bundesstützpunkts Nachwuchs in Leipzig teil (5 x w, 1 x m, Alter: 16,0 ± 1,4 Jahre, Größe: 173,2 ± 8,6 cm, Gewicht: 61,8 ± 5,2 kg, 23,1 ± 1,4 Trainingsstunden/Woche). In Anlehnung an den 8 x 200-m-Pansold-Test (Pokan, Förster, Hofmann, Hörtnagl, Ledl-Kurkowski & Wonisch, 2013) wurde ein Stufentest mit vier Stufen, bestehend aus je zwei Intervallen zu je 2:30 min, absolviert. Das Protokoll umfasste je zwei Intensitäten (GA I und GA II) und zwei Atemfrequenzen (2er- und 4er- bzw. 3er- und 5er-Atmung je nach Vorzugsseite des Sportlers). Dabei stellte die 2er- bzw. 3er-Atmung die gewohnte und die 4er- bzw. 5er-Frequenz eine leicht eingeschränkte Atmung dar. Zur besseren Lesbarkeit wird im Folgenden die Bezeichnung *Atemfrequenz 1* (AF 1) für die 2er- und 3er-Atmung und *Atemfrequenz 2* (AF 2) für die 4er- und 5er-Atmung verwendet. Um einen Steady State zu erreichen, wurde jede Stufe zweimal getestet, unterbrochen von einer einminütigen Pause und 1-5 Minuten Serienpause. Nach einer Pause von ca. 45 Minuten nach Ende des Protokolls wurde der Test mit Stufen intermittierender Belastung wiederholt. In diesem Fall bestand ein Schwimmintervall aus 4 x 30 Sekunden Belastung, unterbrochen von zehn Sekunden Pause (Abb. 21). Alle weiteren Parameter (Intensität, Atemfrequenz und Pausendauer) waren identisch zum Protokoll mit kontinuierlicher Belastung.

Die Bestimmung der Kanalgeschwindigkeiten erfolgte für jeden Sportler individuell anhand der aktuellen Saisonbestzeit über 200 m Freistil. Da die Sportler im Kanal nicht wie im Becken durch Start und Wenden beschleunigen konnten, wurde ein Zeitbonus von zwei Sekunden zur 200m-Zeit hinzugefügt.

Abb. 21. Belastungsprotokoll des Stufentests der Pilotstudie; oben: kontinuierliche Belastung, unten: intermittierende Belastung. Horizontale Zeitachse in Minuten, untereinander die Abfolge der Stufen inkl. Pausen und Messungen

Während des Tests wurde kontinuierlich über einen Brustgurt die Herzfrequenz erfasst (Acentas BM-CS5M Herzfrequenz Monitoring Brustgurt). Zur Mitte jedes Intervalls wurde mit einer Frequenzuhr (Unifit) mehrfach die aktuelle Zyklusfrequenz bestimmt. Die Einhaltung des vorgegebenen Atemrhythmus wurde während des laufenden Tests per Sichtprüfung kontrolliert. Die Messung der Sauerstoffaufnahme erfolgte unmittelbar nach Ende jeder Stufe anhand der Nachatmungsmethode. Dazu ließen sich die Sportler nach dem Schluss-Signal so schnell wie möglich an das hintere Ende des Kanals treiben, wo ihnen eine Nasenklammer und das Mundstück des Spiroergometriesystems (Cortex MetaMax 3B) aufgesetzt wurde. Die Messdauer betrug ab diesem Zeitpunkt eine Minute nach der ersten und drei Minuten nach allen weiteren Stufen. Parallel dazu stiegen die Sportler vorsichtig und unter Vermeidung von Spritzwasser aus dem Kanal, damit ihnen in sitzender Position Kapillarblut am Ohrläppchen zur Bestimmung der Laktatkonzentration abgenommen werden konnte. Dies erfolgte auf den GA-I-Stufen unmittelbar nach Belastungsende, nach den GA-II-Stufen zusätzlich zu Beginn der dritten und fünften Minute der Pause (Abb. 21).

Die verwendeten Testgeräte sowie das eingesetzte Material für die Laktatdiagnostik waren identisch zu denen der später durchgeführten Hauptuntersuchung. Eine detaillierte Darstellung erfolgt in Kapitel 6.3.3.

6.3 Hauptuntersuchung

6.3.1 Probanden

An der Untersuchung nahmen 15 Schwimmer des Bundesstützpunkts Nachwuchs in Leipzig teil. Sie absolvierten zum Zeitpunkt der Studie ein wöchentliches Trainingspensum von 23,1 ± 2,7 Stunden in zwei verschiedenen Trainingsgruppen (TG 1: 8./9. Klasse, 14-15 Jahre; TG 2: ab 10. Klasse, 16-22 Jahre). Bei einem

Trainingsalter von 7 ± 2 Jahren verfügten alle Sportler über Erfahrungen mit dem Schwimmkanal sowie die Durchführung von Stufentests mit Laktatdiagnostik. Drei Sportler hatten bereits an der Pilotstudie teilgenommen und waren mit dem Ablauf in Teilen vertraut. Unabhängig von ihrer Hauptschwimmart absolvierten alle Probanden den Großteil ihres Trainings in der Freistillage. Die Sportler wurden vor der Untersuchung über den Ablauf und die Inhalte der Studie informiert und erteilten schriftlich ihr Einverständnis zur Teilnahme und der Verarbeitung ihrer Daten im Rahmen dieser Dissertation.

Die Sportler wurden randomisiert einer Interventions- und einer Kontrollgruppe zugeordnet. Gemäß eines Crossover-Designs wurde nach der Durchführung einer ersten Interventionsmaßnahme und einer zehnwöchigen Pause die Gruppenzuordnung getauscht, so dass die erste Interventionsgruppe während der zweiten Intervention als Kontrolle diente und vice versa. Eine Übersicht über die Gruppenzugehörigkeit ist in Tab. 1 dargestellt. Tab. 2 zeigt die anthropometrischen Daten der einzelnen Gruppen.

Tab. 1. Gruppenzugehörigkeit der Probanden (mittels Probanden-ID anonymisiert); links erste Intervention, rechts zweite Intervention; rot: Interventionsgruppe, blau: Kontrollgruppe, gelb: Probanden, die nur an der zweiten Intervention teilgenommen haben

<table>
<tr><th colspan="2">1. Intervention</th><th colspan="2">2. Intervention</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1. Interventionsgruppe</td><td>1
2
3
4
5
6</td><td rowspan="2">1
2
3
4
5
6
7</td><td rowspan="2">2. Kontrollgruppe</td></tr>
<tr><td rowspan="2">1. Kontrollgruppe</td><td rowspan="2">7
8
9
10
11
12</td></tr>
<tr><td>8
9
10</td><td rowspan="2">2. Interventionsgruppe</td></tr>
<tr><td></td><td>13
14
15</td></tr>
</table>

Tab. 2. Anthropometrische Daten der Interventions- und Kontrollgruppen

	1. Interventionsgruppe	1. Kontrollgruppe	2. Interventionsgruppe	2. Kontrollgruppe
Geschlecht	w: 4	w: 3	w: 3	w: 3
	m: 2	m: 3	m: 3	m: 4
Alter [Jahre]	15,3 ± 1,1	16,5 ± 1,1	14,8 ± 0,7	15,3 ± 1,0
Größe [cm]	177,2 ± 11,6	178,0 ± 6,1	178,2 ± 5,9	177,3 ± 10,7
Gewicht [kg]	63,5 ± 10,1	66,0 ± 7,6	62,0 ± 5,1	64,1 ± 9,5

Durch verschiedene Umstände (Stützpunktwechsel, Ausscheiden aus dem Schwimmsport, Krankheit) standen drei Sportler der ersten Kontrollgruppe zum Zeitpunkt der zweiten Intervention nicht mehr für die Studie zur Verfügung, so dass weitere drei Sportler des Stützpunktes in den Testpool aufgenommen wurden. Einer der zunächst ausgeschiedenen Sportler konnte wider Erwarten doch an den Schwimmtests teilnehmen und wurde daher in beiden Interventionen der Kontrollgruppe zugeordnet. Aus Gründen des

Datenschutzes wurde jedem Probanden eine fortlaufende Nummer zugewiesen, mit Hilfe derer im Rahmen dieser Untersuchung auf Einzelergebnisse verwiesen werden soll.

6.3.2 Studiendesign

Die durchgeführte Untersuchung bestand aus zwei achtwöchigen Atemtrainingsinterventionen, die im Abstand von zehn Wochen durchgeführt wurden. Vor und nach jedem Trainingsblock, an dem jeweils sechs Sportler teilnahmen, wurde mit allen Sportlern ein Stufentest im Strömungskanal des Instituts für Angewandte Trainingswissenschaft (IAT) in Leipzig durchgeführt (Abb. 22).

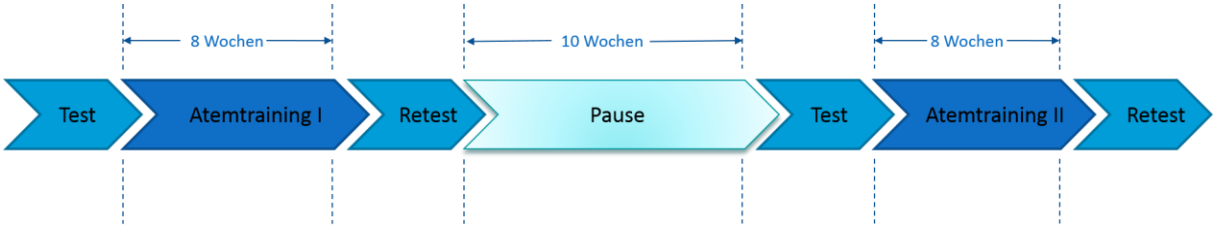


Abb. 22. Zeitlicher Ablauf der Studie mit zwei Interventionen, je einem Test/Retest und einer zehnwöchigen Pause zwischen den Interventionen

Der erste Test fand zu Beginn des Trainings- und Wettkampfjahrs nach den Sommerferien statt, der zweite in der Woche nach den Deutschen Kurzbahnmeisterschaften (Ende des ersten Makrozyklus). Im ersten Drittel des zweiten Makrozyklus (MZ) wurde der Ausgangstest für die zweite Intervention durchgeführt, der Retest folgte im letzten Drittel des zweiten Makrozyklus. Alle Sportler nahmen während des gesamten Zeitraums am regulären Schwimmtraining (bestehend aus Wasser- und Landeinheiten sowie Wettkämpfen) und am Schulsport ihrer Profilklassen am örtlichen Sportgymnasium teil. Im Zeitraum der ersten Intervention fand während der Herbstferien ein zweiwöchiges Heimtrainingslager mit deutlich gesteigertem Umfang statt. Die Sportler nahmen im Schnitt an fünf Wettkämpfen teil, wobei die Deutschen Kurzbahnmeisterschaften einen ersten Höhepunkt bildeten. Während der zweiten Intervention absolvierten die Probanden drei bis fünf Wettkämpfe und in den Winterferien ein weiteres zweiwöchiges Trainingslager vor Ort. In dieser Zeitspanne wurde der Trainingsumfang erneut erhöht, ebenso während der Osterfeiertage kurz vor Ende der Intervention. Um zu verdeutlichen, unter welchen Rahmenbedingungen (im Sinne einer Vorbelastung) die Belastungstests stattfanden, ist in Abb. 23 der Umfang und die Verteilung der Wasser-Einheiten auf die Intensitätsbereiche GA I, GA II und WSA (wettkampfspezifische Ausdauer) in den jeweiligen Testwochen dargestellt. Im Verlauf der Studie verlagert sich der Fokus des Trainings von der Grundlagenausdauer zu intensiveren und wettkampfspezifischeren Trainingsinhalten; der Gesamttrainingsumfang im Studienzeitraum findet sich ebenfalls in Abb. 23.

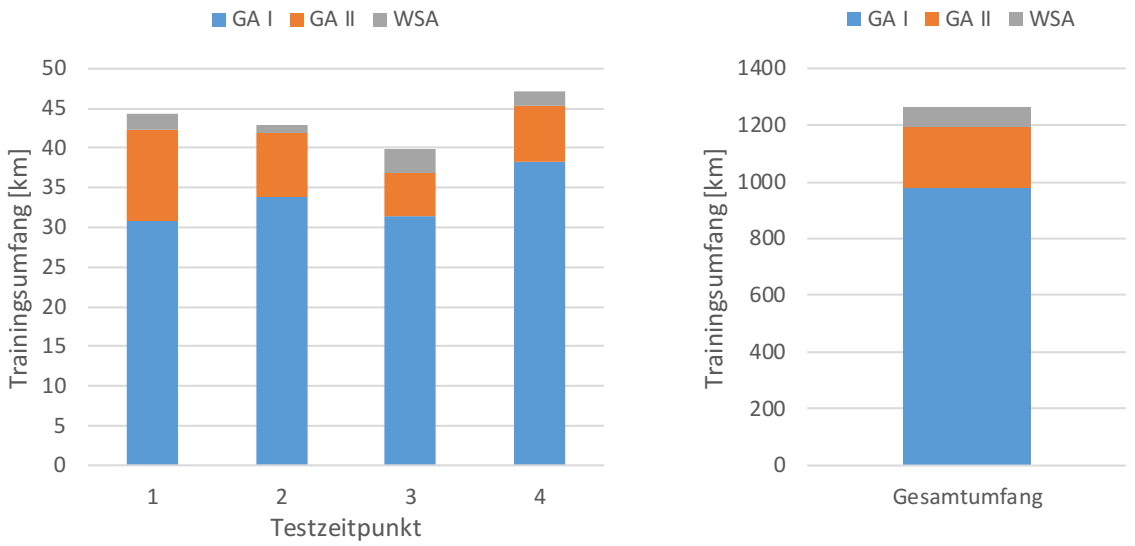


Abb. 23. Umfang und Verteilung der Wasser-Einheiten (in km) in den Wochen, in denen Stufentests im Strömungskanal durchgeführt wurden (links), und bezogen auf den gesamten Studienzeitraum (rechts; GA I: Grundlagenausdauer I, GA II: Grundlagenausdauer II, WSA: wettkampfspezifische Ausdauer)

6.3.2.1 POWERbreathe-Trainingsintervention

Zwischen dem ersten und zweiten sowie zwischen dem dritten und vierten Stufentest nahmen die sechs Sportler der Interventionsgruppe 1 bzw. 2 an einer Trainingsintervention teil. Diese beinhaltete ein spezielles Trainingsprogramm zur Kräftigung der Atemmuskulatur. Der dazu verwendete Atemtrainer (POWERbreathe K5) gehört zur Gruppe der Systeme, die auf Basis des *Inspiratory Pressure Threshold Loading*-Prinzips (IPTL) arbeiten. Das Gerät wird mit Hilfe eines Mundstücks zwischen den Zähnen gehalten, durch das Umschließen mit den Lippen wird es dabei luftdicht nach außen abgeschlossen (Abb. 24 Mitte). Im Inneren des POWERbreathe befindet sich eine Feder, die Druck auf ein Inspirationsventil ausübt und es dadurch verschließt. Um durch das Gerät einzuatmen, muss eine Inspirationskraft erzeugt werden, die mindestens dem Druck auf das Inspirationsventil entspricht. Dazu ist eine schnelle, kraftvolle Einatmung erforderlich. Die Exspiration erfolgt ohne Widerstand und sollte möglichst langsam durchgeführt werden, um Hyperventilation zu vermeiden. Die Trainingsleistung ist unabhängig von der Atemfrequenz und kann auf einem internen Chip gespeichert werden. Die durchgeführten Einheiten können manuell abgerufen und ausgelesen werden (Abb. 24 links).

Für jedes Training werden dabei die Messparameter *Load, Power, Volume* und *Energy* gespeichert. Zur besseren Lesbarkeit sollen im Rahmen dieser Arbeit die im Folgenden definierten deutschen Entsprechungen verwendet werden. *Load* (im weiteren Verlauf als Last bezeichnet) entspricht dem auf das Inspirationsventil aufgebrachten Druck in cm H_2O, der in der Lunge durch die Atemmuskulatur erzeugt wird. *Power* (Leistung P) bezeichnet die während der Inspiration erbrachte Arbeit pro Zeiteinheit in Watt, gemittelt über alle Atemzüge einer Trainingseinheit. Dieser Parameter erlaubt eine Aussage über die Kraft und Geschwindigkeit der Atembewegung: Eine starke Muskulatur ermüdet später oder realisiert höhere Geschwindigkeiten als eine weniger gut trainierte, sie erzielt daher eine höhere Leistung. *Volume* (Atemzugvolumen, AZV) gibt das mittlere inspiratorische Tidalvolumen in Litern an. Steigt dieses durch Training, kann auf eine tiefere Atmung rückgeschlossen werden. Ist der Wert dauerhaft zu niedrig, wurde – sofern Erkrankungen oder ähnliches ausgeschlossen werden können – mit einer zu hohen Last trainiert.

Energy (Arbeit W) entspricht der mechanischen Arbeit während der Atmung in Joule, aufsummiert über die gesamte Trainingseinheit. Dieser Parameter berücksichtigt sowohl die Kraft während der Einatmung als auch das erzeugte Inspirationsvolumen, eine Steigerung im Trainingsverlauf kann daher eine Erhöhung eines dieser Parameter oder eine Kombination aus beiden bedeuten (POWERbreathe International Ltd., 2011).

Bei der Planung einer Trainingseinheit sollte die Anzahl der Wiederholungen an die angestrebte Trainingsintensität angepasst werden, da die Menge der theoretisch möglichen Atemzüge mit zunehmender Last abnimmt. In Studien hat sich ein Programm mit 30 Atemzügen bei 60 % der Maximallast als optimale Kombination erwiesen. In diesem Belastungsbereich wird der inspiratorische Metaboreflex zuverlässig aktiviert, was eine Grundvoraussetzung für die Wirksamkeit des Atemtrainings ist (Griffiths, 2009; McConnell, 2011). Davon abgeleitet wurde das sogenannte *Foundation Training* entwickelt, das täglich morgens und abends je 30 Atemzüge mit dem POWERbreathe vorsieht. Beginnend mit der niedrigsten Einstellung, die sich am Gerät auswählen lässt, lautet das Trainingsziel, mit einer Last zu trainieren, die gerade noch 30 Atemzüge ermöglicht. Bei einer sich einstellenden Verbesserung des Trainingszustands soll die Belastung für die jeweils folgende Einheit kontinuierlich weiter erhöht werden. Für einen Einsatz im Schwimmsport wird für eine spezifischere Belastung nach einer Eingewöhnungsphase der Einsatz eines Gummibands um den Brustkorb empfohlen (Abb. 24 rechts). Da der Brustumfang durch die Atmung um rund 10 % zunimmt, werden die Zwischenrippenmuskeln auf diese Weise nicht nur von innen, sondern auch von außen belastet. Die Einatmung wird weiter erschwert, die Ausatmung jedoch erleichtert, was der Wirkung des Wasserdrucks beim Schwimmen nachempfunden ist (McConnell, 2011).

Abb. 24. Links: POWERbreathe mit Anzeige der absolvierten Einheiten und der aktuell eingestellten Last (eigene Darstellung). Mitte: Einsatz des POWERbreathe durch Umfassen des Mundstücks mit den Lippen (eigene Darstellung). Rechts: Eine spezifischere Belastung für den Einsatz beim Schwimmen kann durch ein um den Brustkorb gelegtes Gummiband erreicht werden (McConnell, 2011)

Die Sportler der Interventionsgruppe 1 bzw. 2 führten ein achtwöchiges Foundation Training mit dem POWERbreathe K5 durch. Die Trainingsdauer lag bewusst über den sechs Wochen, die für diese Trainingsart empfohlen werden, da von Trainingsausfall durch Wettkämpfe, externe Lehrgänge und Krankheitsfällen ausgegangen werden musste. Vorgegeben wurden 2 x 30 Atemzüge mit kurzer Serienpause einmal täglich vor dem Wassertraining bzw. im Rahmen der Erwärmung. Hier fand aus praktischen Gründen eine Zusammenlegung der für das Foundation Training empfohlenen täglichen zwei Einheiten statt, um den

Zeitaufwand für die Sportler so gering wie möglich zu halten. Eine reguläre Trainingswoche sah sechs Mal Wassertraining vor, so dass maximal 48 Trainingstage bzw. 96 Einheiten absolviert werden konnten.

Um eine korrekte Durchführung des Atemtrainings zu gewährleisten, fand eine Einweisung aller Sportler in die Funktionsweise des Geräts statt. Die Atemtrainer wurden personalisiert ausgegeben, d. h. für jeden Sportler waren Alter, Größe und Gewicht voreingestellt. Es wurde gemeinsam der Umgang mit dem Gerät geübt und die Einstellung des Trainingswiderstands durchgeführt. Ausgehend von 10 cm H_2O sollte jeder Sportler in der Lage sein, den Widerstand individuell zu erhöhen, wenn sich ein subjektiv empfundener Trainingsfortschritt einstellte. Die empfohlene Steigerung betrug 5-10 cm H_2O. Die wichtigsten Informationen wurden in Form eines kurzen Informationsblatts an die Sportler verteilt, für Detailfragen lag jedem Gerät ein Handbuch bei. Zusätzlich bestand die Möglichkeit, bei einem wöchentlichen Termin vor Ort in der Schwimmhalle Fragen und Probleme zu klären. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch die bis dahin absolvierten Trainingsergebnisse ausgelesen, eine Reinigung der Geräte durchgeführt und der Akkustatus überprüft. Bei Sportlern, die durch geringe Trainingshäufigkeit auffielen, wurde regelmäßig das persönliche Gespräch gesucht, um die Motivation zu erhöhen und ggf. vorhandene Probleme zu beheben. Um den Sportlern den Einstieg zu erleichtern und gemeinsam eine Trainingsroutine zu entwickeln, wurde das Atemtraining in der ersten Woche der Intervention komplett begleitet. Ab der dritten Woche wurde zusätzlich mit einem Thera-Band um den Brustkorb trainiert, um schwimmspezifischere Reize zu setzen. Während der kompletten Interventionsdauer wurden laufend Gespräche mit den Sportlern und den Trainern geführt, um die Rahmenbedingungen dahingehend zu optimieren, dass sich das Atemtraining möglichst störungsfrei in das reguläre Training einfügte. Bei technischen Störungen fand ein Austausch mit dem Service des Herstellers statt, um eine unterbrechungsfreie Nutzung der POWERbreathe-Geräte zu ermöglichen. Nach der zehnwöchigen Interventionspause wurde das Training mit identischen Vorgaben mit der zweiten Interventionsgruppe durchgeführt.

6.3.2.2 Kanaltests

Auf Basis der Ergebnisse der Voruntersuchungen (Kapitel 7.1) und angelehnt an den im Schwimmsport gängigen 8 x 200-m-Pansold-Test (Pokan et al., 2013) wurde zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Probanden ein Protokoll für einen Stufentest entworfen, das sowohl verschiedene Intensitäten als auch zwei unterschiedliche Atemfrequenzen umfasste:

- Gesamtumfang: 8 x 2:30 min
- Intensitäten: GA I (80 %), GA II (90 %) und 95 % (bezogen auf die Geschwindigkeit, die sich aus der aktuellen Bestzeit über 200m Freistil ergab)
- Je 1 x mit 2er-/3er-Atmung (AF 1) und 1x mit 4er-/5er-Atmung (AF 2) geschwommen (je nach Vorzugsatmung der Probanden)

Um einen Steady State zu erreichen, wurde die GA-I-Stufe zweimal geschwommen. Um den Einfluss der fortschreitenden Ermüdung gering zu halten und von der physiologischen Reaktion auf Hypoventilation abgrenzen zu können, wurde immer erst bei gleichbleibender Intensität die Atemfrequenz eingeschränkt, bevor die Intensität erhöht wurde. Die entsprechenden Stufengeschwindigkeiten (80, 90 und 95 %) wur-

den für jeden Sportler individuell anhand der aktuellen persönlichen Bestzeit über 200 m Freistil zum Zeitpunkt des ersten Tests berechnet (Anhang 13.1). Der steigenden Intensität im Testverlauf wurde mit zunehmender Pausendauer Rechnung getragen (Abb. 25).

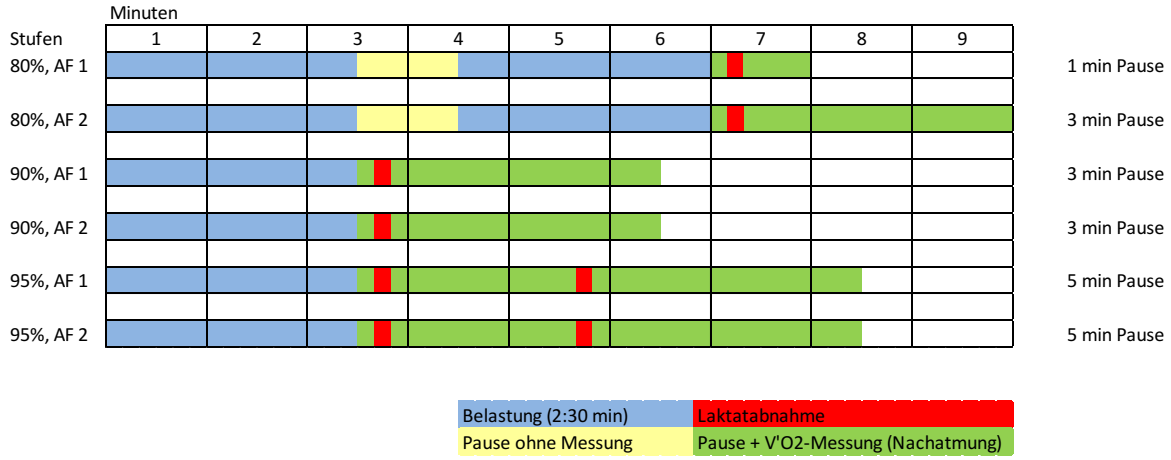


Abb. 25. Belastungsprotokoll des Stufentests im Strömungskanal (horizontale Zeitachse in Minuten, untereinander die Abfolge der Stufen inkl. Pausen und Messungen)

Für jede Belastungsstufe wurden Herzfrequenz (HF), Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), Laktat, Zyklusfrequenz (ZF), Beinschlag und subjektives Belastungsempfinden anhand der modifizierten Borg-Skala von eins bis zehn (Kroidl et al., 2014) erfasst. Zusätzlich wurden mit einem USB-Spirometer Lungenfunktionsparameter bestimmt (forcierte Vitalkapazität (FVC), Einsekundenkapazität (FEV1) und maximales Minutenvolumen in Ruhe (MVV)).

Vor dem Einschwimmen erfolgte eine Einweisung des Probanden in den Testablauf. Neben der Erfassung von eventuellen aktuellen Beschwerden und Medikamenten sowie der Unterzeichnung der Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Studie wurde dem Sportler das Protokoll erläutert und eine Vereinbarung getroffen, wie während des Tests, wenn der Sportler sich unter Wasser befindet, miteinander kommuniziert werden sollte. Für das Signalisieren von Testbeginn und -ende standen je nach Bedarf des Sportlers ein Unterwasserlicht und eine Hupe zur Verfügung. Um die Belastung durch das anströmende Wasser zu Beginn jeder Stufe zu standardisieren, wählte der Proband die Absprunghöhe im Kanal, die er während des gesamten Tests verwenden wollte. Alle Angaben wurden auf einem Erfassungsbogen für den Sportler bzw. auf einem Protokollbogen vermerkt. Zur Hyperämisierung wurde Finalgon-Salbe auf das Ohrläppchen aufgetragen, an dem während des Tests die Laktatabnahme vorgenommen werden sollte. Nach Erfassung des Ruhelaktats wurde ein Tiffeneau-Test im Stehen zur Bestimmung der forcierten Vitalkapazität und der Einsekundenkapazität durchgeführt (ndd Medical easy on-PC-Spirometer). Um den Einfluss der Streuung der Ergebnisse gering zu halten, wurden die Messwerte des besten von drei gültigen Versuchen verwendet. Zur Bestimmung des maximalen Minutenvolumens in Ruhe wurde dem Sportler in einem weiteren Lungenfunktionstest vorgegeben, während eines Zeitraums von 12 Sekunden so schnell und so tief wie möglich ein- und auszuatmen. Aufgrund der größeren Beanspruchung bei diesem Test wurde hier das Ergebnis des besseren von nur zwei gültigen Versuchen verwendet. Anschließend absolvierte der Sportler individuell sein gewohntes Aufwärmprogramm im Schwimmbecken.

Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Herzfrequenz wurde ein Brustgurt (Acentas BM-CS5M) verwendet, den der Sportler unmittelbar vor Testbeginn anlegte. Zur besseren Fixierung am Oberkörper und Verbes-

serung der Signalqualität wurde der Gurt bei den männlichen Probanden mittels eines elastischen Leibchens befestigt (Abb. 26). Der Pulsgurt verfügt über einen internen Chip, auf dem die gemessene Herzfrequenz gespeichert und nach Testende ausgelesen werden kann. Für die Überprüfung der Frequenz im Online-Modus wurde zusätzlich eine Telemetrie-Einheit verwendet. Die aktuellen Werte konnten zwar nur angezeigt werden, wenn der Sportler sich nicht unter Wasser befand, ermöglichten aber eine zeitnahe Beurteilung des Belastungszustands des Sportlers im laufenden Test.

Abb. 26. Elastisches Leibchen zur rutschsicheren Fixierung des Pulsgurtes am Oberkörper des Probanden

Während jeder Stufe wurde nach der Hälfte des Intervalls mit einer Frequenzuhr (Unifit) die durchschnittliche Zyklusfrequenz ermittelt. Es wurden Rhythmus und Intensität des Beinschlags bestimmt und es wurde durch Sichtprüfung kontrolliert, ob der vorgegebene Atemrhythmus eingehalten werden konnte. Zusätzliche Atemzüge wurden ebenso wie alle weiteren Abweichungen vom Protokoll auf dem Protokollbogen vermerkt. Vor allem zum Ende des Tests wurde fortlaufend überprüft, ob der Sportler in der Lage war, die vorgegebene Geschwindigkeit einzuhalten bzw. die Stufe komplett zu schwimmen, um gegebenenfalls schnell auf einen Testabbruch reagieren zu können.

Nach dem Ende jeder Stufe nahm der Sportler am hinteren Ende des Strömungskanals eine Position außerhalb des Wassers ein, die sowohl eine ausreichende Erholung als auch die Aufzeichnung der Sauerstoffaufnahme unmittelbar nach Ende der Belastung ermöglichte. Dazu schwamm der Sportler möglichst schnell nach hinten und ließ sich dort eine Nasenklammer und die Maske des Spiroergometriesystems (Cortex MetaMax 3B) aufsetzen. Das dazu benötigte Zeitintervall wurde auf dem Protokollbogen vermerkt. Anschließend setzte sich der Sportler unter Vermeidung von Spritzwasser an den oberen Rand des Strömungskanals. Um die Zeitdifferenz zwischen dem Ende der Belastung und dem Beginn der Sauerstoffmessung möglichst gering zu halten, wurde dieser Ablauf vorher mehrfach mit jedem Sportler eingeübt. Außerdem wurde statt der sonst üblichen Atemmaske das für den Sportler etwas weniger komfortable Mundstück mit zugehöriger Nasenklammer gewählt, weil damit die Zeit bis zum Beginn der Messung verkürzt und das Einströmen von Außenluft während der Aufzeichnung reduziert werden konnte. Die Dauer der spiroergometrischen Messung betrug 60 Sekunden. Da in unmittelbarer Nähe zum Strömungskanal kein Anschluss von elektrischen Geräten an das Stromnetz möglich war, wurde das Spiroergometriesystem im Akkubetrieb verwendet und auf die Online-Darstellung der Messwerte am PC verzichtet. Die Daten wurden im geräteinternen Logger gespeichert und nach Testende am PC über die zum Spiroergometriesystem gehörende Software ausgelesen.

Im Sitzen erfolgte zeitgleich zur Sauerstoffmessung die Abnahme von Kapillarblut am Ohrläppchen zur Bestimmung der Laktatkonzentration (Abb. 27). Die Probe wurde außer bei der GA-I-Belastung unmittelbar nach jedem Intervall, bei der 95 %-Stufe zusätzlich auch zu Beginn der dritten und der fünften Minute

der Pause genommen. Es wurde das subjektive Belastungsempfinden anhand der Borg-Skala von eins bis zehn abgefragt und die verbleibende Pausendauer sowie der nächste Abschnitt angesagt.

Abb. 27. Laktatabnahme und spiroergometrische Messung im Strömungskanal nach Ende der Belastung

6.3.3 Material und Testumgebung

Alle Stufentests fanden im Strömungskanal des IAT Leipzig statt (Technisches Zentrum, Entwicklungs-und Handelsgesellschaft mbH Leipzig, Leipzig, Deutschland, Abb. 28).

Abb. 28. Strömungskanal des IAT Leipzig mit Testprotokollanten zur Beobachtung und Betreuung des Schwimmers (links), Bedienung über den Kontrollraum (Bildhintergrund), Messstation für die Sauerstoffaufnahme (vorne links) und die Laktatabnahme (vorne rechts)

Der Kanal ist 19 m lang, 4,50 m breit und 5,50 m hoch, wovon für den Schwimmer eine Fläche von 4 m x 7 m bei einer Wassertiefe von 1,50 m zur Verfügung steht. Die Geschwindigkeit der Gegenstromanlage kann von 0,2 m/s bis 2,5 m/s reguliert werden (Technisches Zentrum Leipzig, 2016) und ist über die gesamte Wasserfläche konstant. Über ein Videosystem kann der Schwimmer von oben und durch ein Unterwasserfenster auch von der Seite aufgezeichnet werden, wodurch Technikanalysen möglich sind (Abb. 29). Die gesamte Steuerung des Kanals erfolgt über einen angrenzenden Bedienraum in Sichtweite (Institut für Angewandte Trainingswissenschaft, 2008), die aktuellen Vorgaben können auf einem für den Schwimmer sichtbaren Display angezeigt werden (Abb. 30).

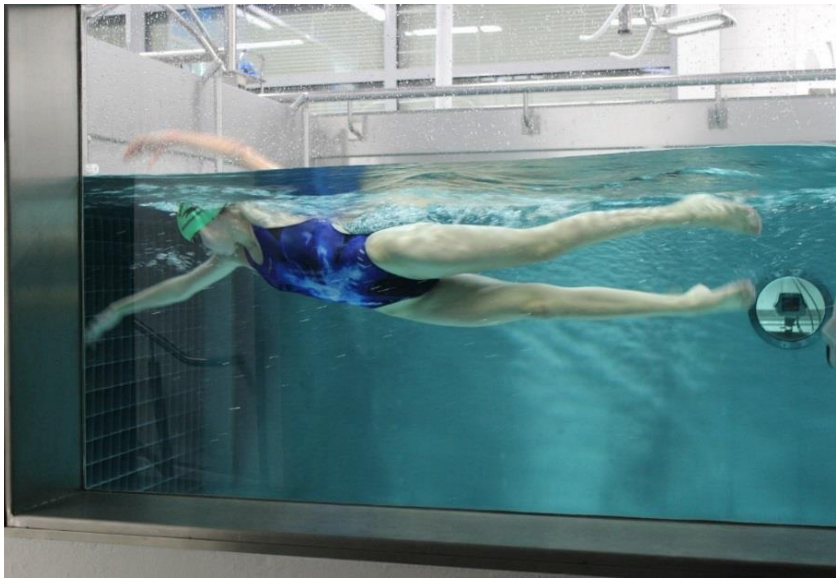


Abb. 29. Seitliches Unterwasserfenster zur technischen Analyse der Sportler

Abb. 30. Display zur Anzeige der aktuellen Vorgaben durch die Kanalsteuerung mit anliegender Geschwindigkeit (rechts) und aktuellem und folgendem Testabschnitt (links unten)

Die Lungenfunktionstests wurden mit dem easy on-PC-Spirometriesystem (ndd Medical Technologies Inc., Andover, USA) durchgeführt, das per USB mit einem Laptop (Lenovo Thinkpad T530, Lenovo Group Ltd., Hongkong) verbunden wurde.

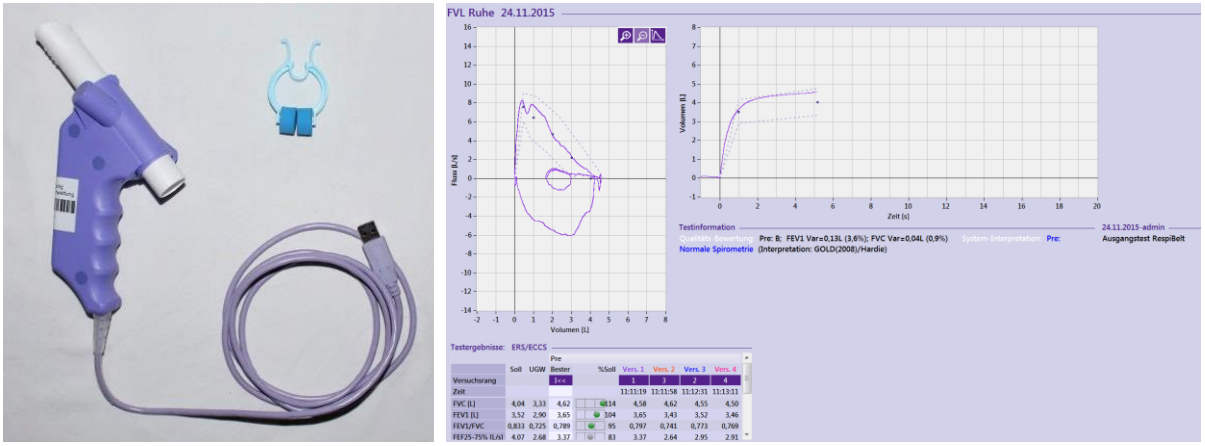


Abb. 31. Equipment für die Lungenfunktionstests: USB-Spirometer und Nasenklemme (links) und die zugehörige PC-Software (rechts)

Zur Laktatdiagnostik wurden Lanzetten vom Typ Accu-Chek Safe-T-Pro Uno (Roche, Mannheim, Deutschland), 2,0 ml Glucocapil Reaktionsgefäße mit 1000 µl Hämolysier-Systemlösung (Dr. Müller Gerätebau GmbH, Freital, Deutschland), Pur-Zellin Zellstofftupfer von der Rolle (Paul Hartmann AG, Heidenheim, Deutschland), Kodan Tinktur forte farblos (Schülke & Mayr GmbH, Norderstedt, Deutschland), Finalgon Wärmecreme stark (Boehringer Ingelheim Pharma GmbH & Co. KG, Ingelheim am Rhein, Deutschland) und Peha-soft nitrile FINO Puderfreie Einmal-Untersuchungshandschuhe (Paul Hartmann AG, Heidenheim, Deutschland) verwendet. Die Auswertung der Proben erfolgte am Sportmedizinischen Institut der Sportfakultät der Universität Leipzig.

Die Messung der Sauerstoffaufnahme wurde mit einem MetaMax 3B (Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Deutschland), einer Nasenklammer und einem Mundstück durchgeführt. Das Spiroergometriesystem wurde vor jedem Untersuchungstag entsprechend der Vorgaben des Herstellers kalibriert (Abb. 32). Es wurde die Gaskonzentration mit einem Prüfgas (15,9 % O_2, 5,0 % CO_2, Genauigkeit ± 1 % relativ, Rießner-Gase GmbH, Lichtenfels), der Luftdruck per Software (MetaSoft 3.9.7, Cortex Biophysik GmbH, Leipzig, Deutschland) und das Volumens mittels einer Volumenpumpe (Hans Rudolph Modell 5530, Volumen 3 l, Genauigkeit ± 0,5 % relativ, Hans Rudolph, Inc., Shawnee, USA) geprüft. Das Auslesen der Daten nach Testende sowie der Export nach Microsoft Excel 2016 (Microsoft, Redmond, USA) erfolgte ebenfalls über das Programm MetaSoft 3.9.7.

Abb. 32. Spiroergometrische Messung mit dem MetaMax 3B im Akkubetrieb mit Mundstück und Nasenklammer (links); Abgleich der Gassensorik vor Testbeginn mit der Umgebungsluft über die Software MetaSoft 3.9.7 (rechts)

Zur Aufzeichnung der Herzfrequenz wurden BM-CS5M Herzfrequenz Monitoring Brustgurte und das zugehörige Telemetriesystem sowie die Software ErgoGraph 0.9.0 der Firma Acentas verwendet (Acentas GmbH, Hörgertshausen, Deutschland, Abb. 33). Zur Fixierung des Gurts bei den männlichen Probanden wurde ein elastisches Leibchen (Hosand Technologies Srl, Verbania, Italien) benutzt. Die Bestimmung der Zyklusfrequenzen erfolgte mit einer Frequenzuhr (Unifit, SportScheck GmbH, München, Deutschland), weitere Zeitmessungen wurden mit einer Stoppuhr vorgenommen (Polar M31, Polar Electro Oy, Kempele, Finnland).

Für die Trainingsintervention wurden sechs Atemtrainingsgeräte vom Typ POWERbreathe K5 (POWERbreathe International Ltd., Warwickshire, UK) verwendet. Zum Aufbringen der zusätzlichen Last auf den Brustkorb ab der vierten Trainingswoche wurde mit blauen Thera-Band-Übungsbändern (The Hygenic Corporation, Akron, USA) gearbeitet.

Abb. 33. Kontinuierliche Aufzeichnung und Übertragung der Herzfrequenz mittels Brustgurt (links) und Telemetriesystem (rechts)

6.3.4 Datenaufbereitung und statistische Auswertung

6.3.4.1 Auswertung der Herzfrequenzmessung

Die auf den Brustgurten gespeicherten Daten wurden im hrm-Format ausgelesen und mit der Software Ergograph 0.9.0 ausgewertet. Da auf dem Chip des Pulsgurts nur eine Zeitmessung relativ zum Beginn der Aufzeichnung vorgenommen werden konnte, wurde zeitgleich zum Anfang des Tests eine Stoppuhr gestartet, so dass im Nachhinein eine zeitliche Zuordnung der Herzfrequenz-Daten zu den einzelnen Testintervallen möglich war. Die grafische Darstellung der Aufzeichnung in Verbindung mit einem Gitternetz und einer geeigneten Vergrößerung ermöglichte das punktgenaue Ablesen der Herzfrequenz (Abb. 34). Jedem Testintervall wurde jeweils der Maximalwert zum Ende der Belastung zugeordnet.

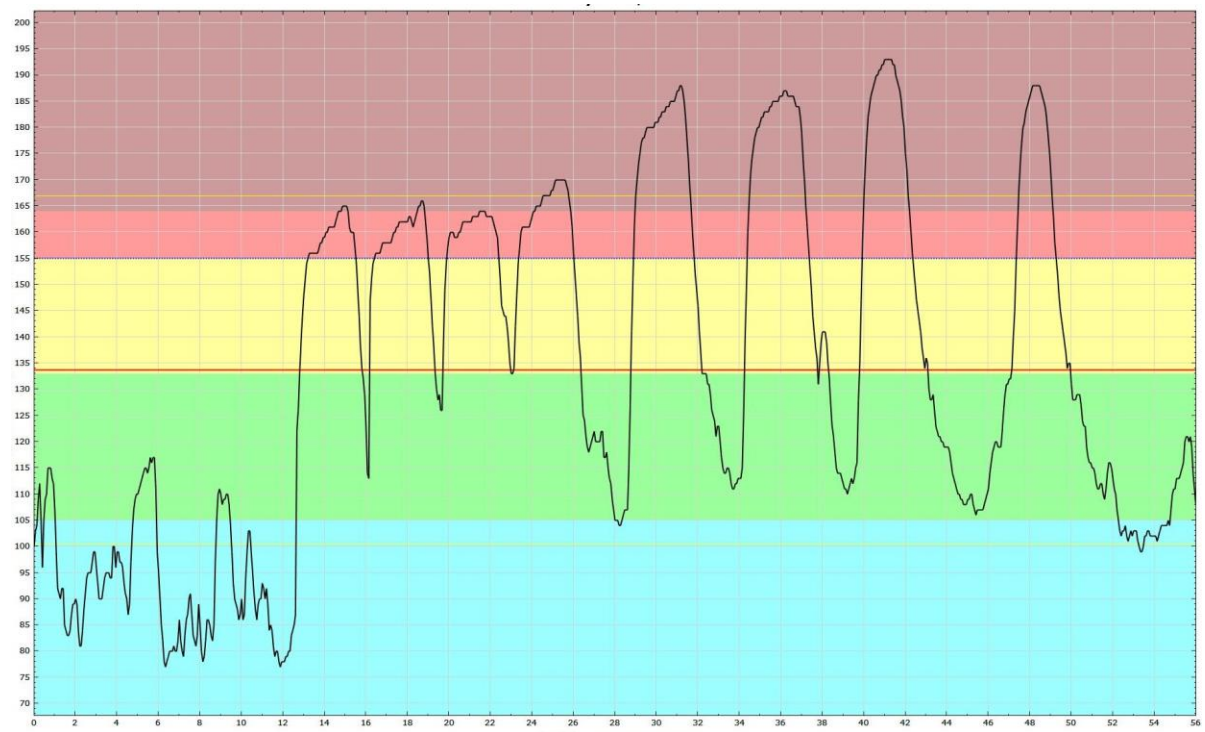


Abb. 34. Grafische Darstellung der Herzfrequenz im Programm Ergograph 0.9.0

6.3.4.2 Extrapolation der Sauerstoffaufnahme

Die aufgezeichneten breath-by-breath-Messdaten des MetaMax 3B (BxB, alle erfassten Parameter liegen für jeden einzelnen Atemzug vor) wurden ungemittelt und auf drei Nachkommastellen gerundet aus MetaSoft 3.9.7 nach Excel exportiert. Zur Berechnung der maximalen Sauerstoffaufnahme am Ende jedes Intervalls anhand der in der Nachbelastungsphase erhobenen Daten wurden die Messwerte der Sauerstoffaufnahme über das Zeitintervall zwischen Belastungsende und Beginn der Messung extrapoliert (*backward extrapolation* nach Léger, Seliger & Brassard, 1980). Dabei wurde ein in der Literatur beschriebenes Glättungsverfahren zur Verbesserung der Extrapolation verwendet (Witt, 2008). Da sich die erfassten Atemzüge hinsichtlich der Atemtiefe z. T. stark unterschieden oder Messwertausreißer enthielten, konnte die für die lineare Extrapolation benötigte Regressionsgerade nicht in allen Fällen exakt positioniert werden, was je nach gewählter Lösung zu einer großen Streuung der extrapolierten Sauerstoffaufnahme führen kann (Abb. 35 links). Auch unvollständige Atemzüge zu Beginn der Aufzeichnung können das Ergebnis der

Berechnung beeinflussen (Abb. 35 rechts). Im dargestellten Beispiel konnten die Originaldaten nicht ausreichend genau durch die Regressionsgerade extrapoliert werden (R^2 = 0,2422). Wiederholt man die Rechnung ohne den unvollständigen Atemzug am Anfang der Aufzeichnung, ließ sich zwar eine bessere Übereinstimmung zwischen den Daten und der Regressionsgeraden erzielen (R^2 = 0,8446), die extrapolierte Sauerstoffaufnahme lag jedoch rund 500 ml/min über der der Originaldaten.

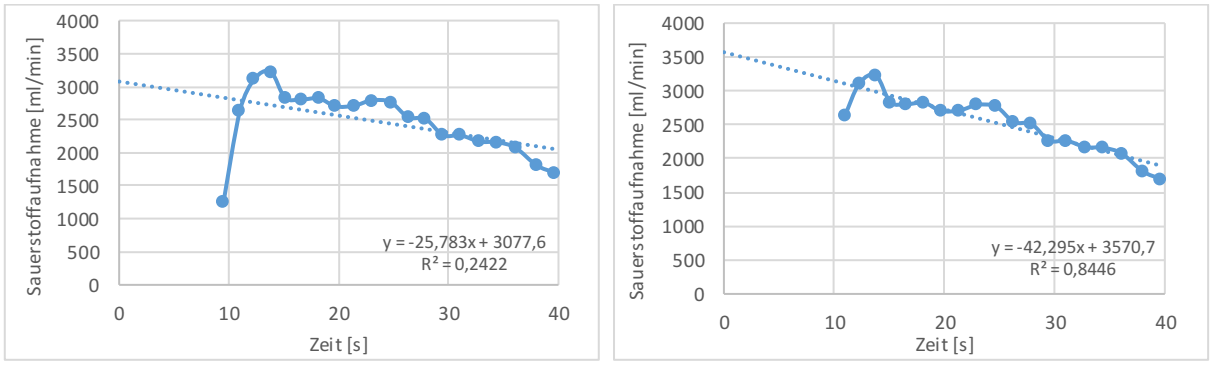


Abb. 35. Lineare Extrapolation der Sauerstoffaufnahme; Vergleich der Ergebnisse mit (links) und ohne unvollständigen Atemzug zu Beginn der Messung (rechts)

Diesem Problem wurde bei der im Rahmen dieser Studie verwendeten Methode durch die rechnerische Simulation eines Douglas-Sacks, der als Goldstandard der Spiroergometrie gilt (Kroidl et al., 2014), Rechnung getragen. Dazu wurde der über die Dauer des Auswertungsintervalls aufgenommene Sauerstoff aufsummiert, was einer Integration der Sauerstoffaufnahme über die Zeit entsprach. Aus den BxB-Messintervallen ließ sich die Dauer jedes einzelnen Atemzugs ermitteln; aus der softwareseitig berechneten Sauerstoffaufnahme zum gleichen Messzeitpunkt ergab sich die Menge des aufgenommenen Sauerstoffs während dieses Atemzugs. Stellt man die aufsummierte Sauerstoffmenge innerhalb des Messzeitraums unter Berücksichtigung des Zeitintervalls zwischen Testende und Beginn der Messung graphisch dar, erhielt man statt des linearen Verlaufs der Sauerstoffaufnahme ein Polynom zweiten Grades, das sich durch ein Regressionspolynom beschreiben ließ (Abb. 36 links, R^2 = 0,9998). Die erste Ableitung dieses Polynoms nach der Zeit ergab eine geglättete Darstellung der gemessenen Sauerstoffaufnahme, aus der sich der extrapolierte Wert zum Zeitpunkt t = 0 ablesen ließ (Abb. 36 rechts).

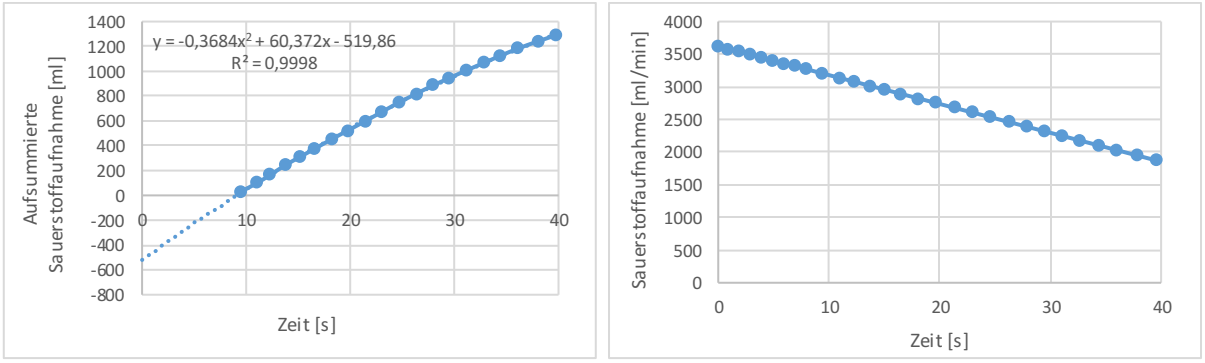


Abb. 36. Integration des pro Atemzug aufgenommenen Sauerstoffs über das Messintervall und Annäherung durch ein Polynom zweiten Grades (links); geglättete Sauerstoffaufnahme aus Differenzierung des Regressionspolynoms mit extrapolierten Werten bis zum Zeitpunkt t = 0 (rechts)

Die Methode ist robust gegenüber Ausreißern und entfernten, unvollständigen Atemzügen zu Beginn der Messung, wie eine Gegenüberstellung in Abb. 37 zeigt: Summiert man die Sauerstoffaufnahme über das Auswertungsintervall mit (links) und ohne Berücksichtigung des ersten, unvollständigen Atemzugs

auf (rechts), ergaben sich lediglich Unterschiede im y-Achsenabschnitt des Regressionspolynoms. Nach dem Ableiten des Polynoms ergab sich in beiden Fällen die gleiche Geradengleichung.

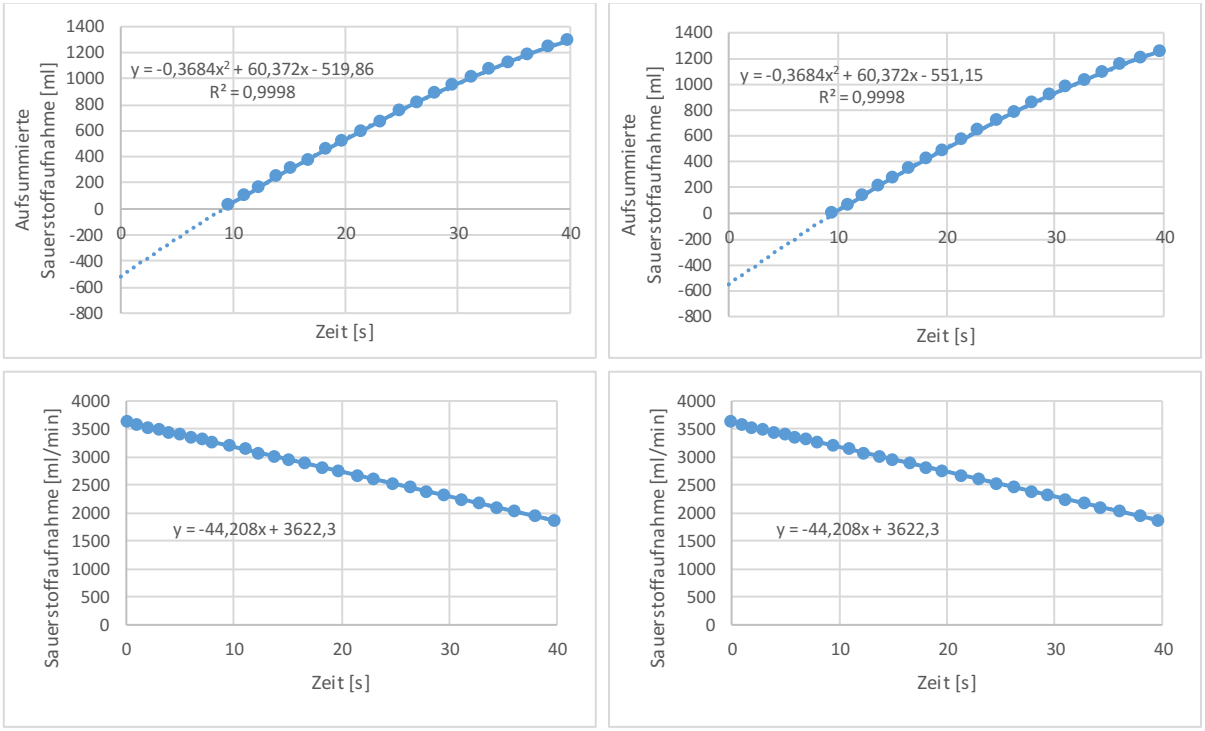


Abb. 37. Vergleich der Ergebnisse der Extrapolation mit (links) und ohne Berücksichtigung eines unvollständigen Atemzugs zu Beginn der Messung (rechts). Die unterschiedlichen Datensätze spiegeln sich im y-Achsenabschnitt des Regressionspolynoms wider, die resultierende Extrapolationsgerade nach der Differenzierung ist identisch.

6.3.4.3 Statistik

Die statistische Auswertung sowie die grafische Darstellung der Ergebnisse wurde mit Microsoft Excel 2016 (Microsoft, Redmond, USA) und IBM SPSS 23 (IBM, Armonk, USA) durchgeführt. Für alle erfassten Parameter (Probandendaten, Ergebnisse des Stufentests, des Lungenfunktionstests und des Atemtrainings) wurde der Mittelwert (MW) und die Standardabweichung (STABW) bezogen auf die jeweilige Interventions- bzw. Kontrollgruppe berechnet. Die Ergebnisse wurden als Boxplots dargestellt, wobei gemäß der gängigen Notation die Box den Bereich vom unteren bis zum oberen Quartil der Daten repräsentiert, der durch den Median in Form eines waagerechten Strichs geteilt wird. Die Whisker am oberen und unteren Ende der Box verdeutlichen die Datenpunkte bis zum 1,5fachen Interquartilsabstand, Werte darunter bzw. darüber werden als Ausreißer (○) oder Extremwerte (*) dargestellt.

Zur Auswahl eines geeigneten statistischen Testverfahrens wurden die erhobenen Daten auf Normalverteilung getestet. Alter, Größe und Gewicht der Probanden wurden nach Interventions- bzw. Kontrollgruppe getrennt mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Tests zum Signifikanzniveau $\alpha = 0{,}05$ analysiert. Mit Ausnahme des Alters und des Gewichts der ersten Kontrollgruppe waren alle Daten normalverteilt (Tab. 3).

Tab. 3. Wahrscheinlichkeitsverteilung von Alter, Größe und Gewicht der Probandengruppen (grün: Normalverteilung, rot: keine Normalverteilung)

	Alter	Größe	Gewicht
Interventionsgruppe 1			
Kontrollgruppe 1			
Interventionsgruppe 2			
Kontrollgruppe 2			

Auf gleiche Art und Weise wurden die Ergebnisse der Lungenfunktions- und der Stufentests ausgewertet. FVC, FEV1 und MVV sowie Laktat, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme und Zyklusfrequenz der vier Gruppen wurden jeweils vor und nach der Intervention erfasst und bezüglich dieses Zeitpunkts analysiert (Anhang 13.2).

Zwar waren 85% der Daten normalverteilt, Abweichungen von der Gauß-Kurve konnten jedoch für fast jeden Parameter gezeigt werden. Lediglich die Messwerte des MVV waren in jedem Fall normalverteilt. Aufgrund der nicht durchgehend vorhandenen Normalverteilung und der kleinen Stichprobengröße wurden für die weitere Auswertung nichtparametrische Verfahren verwendet.

Für alle verbundenen Stichproben wurde der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewendet. Unverbundene Stichproben wurden mittels des Mann-Whitney-U-Tests analysiert. Ab einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ wurden die Ergebnisse der statistischen Tests als signifikant akzeptiert. Im Text und in Abbildungen wurden folgende Abkürzungen bzw. Symbole verwendet (Bortz & Döring, 2016):

$p > 0{,}05$	nicht signifikant	n. s.
$p \leq 0{,}05$	signifikant	*
$p \leq 0{,}01$	hoch signifikant	**
$p \leq 0{,}001$	höchst signifikant	***

Zur Bewertung der praktischen Bedeutsamkeit wurde die Effektstärke r mittels der Approximation für nichtparametrische Verfahren aus dem z-Wert des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests und der Stichprobengröße N bestimmt (Bühner & Ziegler, 2009):

$$r = \frac{z}{\sqrt{N}}$$

Dabei galten folgende Untergrenzen zur Klassifikation der Effektstärken (Bortz & Döring, 2016):

r = 0,1	kleiner Effekt
r = 0,3	mittlerer Effekt
r = 0,5	großer Effekt

Um die Wiederholgenauigkeit der Messgeräte bzw. -methoden über die vier Untersuchungszeitpunkte hinweg zu bewerten, wurde mittels des Levene-Tests auf Homoskedastizität getestet. Dazu wurden jeweils die Varianzen von zwei Tests miteinander verglichen. Alle Parameter der Lungenfunktion sowie die Herzfrequenz, die Sauerstoffaufnahme und die Zyklusfrequenz wiesen über die vier Tests hinweg die gleichen Varianzen auf. Die Auswertung der Laktatwerte ergab Heteroskedastizität zwischen Test 1 und Test 3 ($p = 0{,}021$) sowie Test 1 und Test 4 ($p = 0{,}006$, Tab. 4).

Tab. 4. p-Werte des Levene-Tests für alle leistungsphysiologischen Parameter der vier Untersuchungen

	Test 1 und 2	Test 2 und 3	Test 3 und 4	Test 4 und 1	Test 1 und 3	Test 2 und 4
Laktat	n. s.	n. s.	n. s.	0,006	0,021	n. s.
Herzfrequenz	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
$\dot{V}O_2$	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
Zyklusfrequenz	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
FVC	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
FEV1	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.
MVV	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.	n. s.

6.4 Methodenkritik

Im vorliegenden Kapitel sollen einige kritische Anmerkungen bezüglich der Methodik der durchgeführten Tests und Trainingsinhalte gemacht werden, um auf systemimmanente Fehlerquellen hinzuweisen und aufzuzeigen, an welcher Stelle der Geltungsbereich der erarbeiteten Ergebnisse und der auf dieser Basis abgeleiteten Schlussfolgerungen eingeschränkt sein kann.

Im Zusammenhang mit den Stufentests im Strömungskanal waren verschiedene technische Herausforderungen zu bewältigen, die auf die jeweils verwendeten Messgeräte und den Umgang damit zurückzuführen waren. Bei der Durchführung der Lungenfunktionstests galt es zu berücksichtigen, dass das Ergebnis stark von der Motivation und der Erfahrung des Probanden abhing. Beim ersten Test waren einige Sportler nicht auf Anhieb in der Lage, das geforderte Testprozedere umzusetzen. Die daraus resultierende, zum Teil auch mehrfache Wiederholung des Tests kann zur Erschöpfung der beanspruchten Muskeln geführt haben. Auch kann ein Lerneffekt über die vier Tests hinweg nicht ausgeschlossen werden, der eine Verbesserung der Ergebnisse bewirken kann. Um die Test jedoch von Seiten der medizinischen Betreuung größtmöglich zu standardisieren, wurden alle Lungenfunktionstests von derselben Person angeleitet.

Dies ließ sich bei der Laktatabnahme nicht realisieren, so dass die Qualität der Proben und die Streuung der Messergebnisse von der Erfahrung des für die Durchführung Zuständigen abhingen. Vor allem im ersten Testintervall, in dem insgesamt nur eine Minute Pause für alle Messungen zur Verfügung stand, kam es daher bei weniger versierten Personen zu unvollständig abgenommenen Proben, die nicht für die Auswertung verwendet werden konnten. Bei Laktatabnahmen im Wasser besteht darüber hinaus grundsätzlich das Problem, dass das Ergebnis durch vom Kopf des Sportlers herunterfließendes Wasser verfälscht werden kann. Diesem Umstand wurde durch gründliches Abtrocknen von Ohr und Gesicht des Sportlers begegnet. Außerdem wurden die Sportler dazu verpflichtet, eine Badekappe zu tragen.

Bei der Messung der Herzfrequenz kam es beim ersten Test zu Datenverlusten, da die eingesetzten Brustgurte undicht geworden waren. Dieses Problem konnte nicht rechtzeitig erkannt werden, führte jedoch dazu, dass bei allen folgenden Tests eine Online-Kontrolle und eine manuelle Erfassung der Maximalwerte als Backup erfolgte. Diese wurde zur Sicherung einer guten Wiederholgenauigkeit immer von derselben

Person durchgeführt. Da die Brustgurte vor allem bei den männlichen Sportlern in gestreckter Haltung am Brustkorb herunterrutschten, wurde ein Leibchen zur Fixierung verwendet. Da das zuerst eingesetzte Modell z. T. zu groß für die Sportler war und unter Umständen beim Schwimmen behinderte, wurde bei den weiteren Tests eine kleinere Größe bereitgehalten. Eine Erfassung der Herzfrequenz war dennoch möglich.

Die Erfassung der Sauerstoffaufnahme über die Nachatmungsmethode erforderte im Schwimmkanal zwangsläufig, dass die Sportler sich zurück- und in Richtung des Spiroergometriesystems treiben ließen, was mit einer Zeitdifferenz von bis zu zehn Sekunden verbunden war. Da die exakte Erfassung der Zeitdauer zwischen dem Ende der Belastung und dem Start der Messung essentiell für eine korrekte Extrapolation der Sauerstoffaufnahme war, wurde bei allen Tests die gleiche Person mit der Zeitmessung betraut. Vor allem vor dem Hintergrund, dass die Sportler zum Ende der Belastung erschöpft waren und die Messung nach Testende so schnell wie möglich gestartet werden musste, stellte das Messverfahren hohe koordinative Anforderungen an alle Beteiligten. Um die Fehlerquellen zu minimieren, wurde auch die spiroergometrische Messung bei sämtlichen Tests von der gleichen Person durchgeführt und der Ablauf vor der Untersuchung mit allen Sportlern geübt. Dennoch konnte in einem Fall nicht verhindert werden, dass sich das Mundstück vom Spiroergometriesystem löste und die Messung erst verzögert gestartet werden konnte. Beim ersten Test stellte sich außerdem heraus, dass die Akkulaufzeit des verwendeten Mess-PCs nicht ausreichend war. Bei allen weiteren Tests musste daher auf eine Online-Kontrolle der aufgezeichneten Daten verzichtet werden. Stattdessen wurde die Messung vor Testbeginn mit am PC angeschlossenen Gerät gestartet und nach Durchführung einiger Kontroll-Atemzüge ohne PC weitergeführt. Die Aufzeichnung erfolgte dabei unter Nutzung des geräteinternen Datenloggers und nachträglichem Auslesen der Daten. Dieses Vorgehen hatte den Nachteil, dass während des Tests nicht überprüft werden konnte, ob das System trotz Spritzwassers weiterhin messfähig war. Die Auswertung der gespeicherten Daten ergab jedoch im Nachhinein eine lückenlose Aufzeichnung.

Über das verwendete Extrapolationsverfahren konnte die Sauerstoffaufnahme nur näherungsweise bestimmt werden, da keine Informationen über den Verlauf zwischen und jenseits der Stützstellen der zu integrierenden Funktion vorlagen. Im Rahmen dieser Studie wurde ein Glättungsverfahren eingesetzt, das es ermöglichte, die aufsummierte Sauerstoffaufnahme mit einem Polynom zu extrapolieren, das eine hohe Übereinstimmung mit den Originaldaten aufwies ($R^2 > 0{,}99$). Dennoch kann der aus der Nachatmungsmethode resultierende Fehler je nach Auswertungsintervall und Form der Extrapolationsfunktion bei bis zu 10 % liegen (Höltke, Degenhardt, Steuer, Starischka, Zeman & Jakob, 2007; Reer, Schmidt, Ziegler & Braumann, 2007; Ziegler, Guderjahn, Reer & Braumann, 2006). Um auch hier eine gute Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten, wurde für alle Tests das gleiche Spiroergometriesystem mit identischen Sensoren für die Sauerstoffmessung verwendet.

Aus der Summe dieser Fehlerquellen ergab sich eine nicht konstante Anzahl von Probanden, die in die Auswertung einbezogen werden konnten. Weitere Ausfälle resultierten aus der Jahreszeit des Studienzeitraums – da alle Untersuchungen im Herbst und Winter stattfanden, konnten mehrfach Sportler aus gesundheitlichen Gründen nicht am Stufentest teilnehmen. Infolgedessen war die Gruppengröße z. T. zu klein für statistisch belegbare Effekte. Aus diesem Grund wurde zusätzlich die Effektstärke bestimmt, da bei nichtsignifikanten Ergebnissen dennoch ein praktisch relevanter Effekt vorliegen kann (Windeler & Conradt, 1999).

Aus trainingswissenschaftlicher Sicht war die Berechnung einer individuell adäquaten Schwimmgeschwindigkeit für die einzelnen Teststufen problematisch. Als Grundlage wurde die zum Studienbeginn aktuelle Bestzeit über 200 m Freistil verwendet, die entweder kurz zuvor im Wettkampf erzielt oder durch den

Trainer abgeschätzt worden war. Anhand der erfassten leistungsphysiologischen Parameter stellte sich während der Stufentests heraus, dass ein Teil der Probanden zu hoch oder zu niedrig belastet worden war. Um die Vergleichbarkeit zwischen den vier Tests zu gewährleisten, wurde die Geschwindigkeit danach jedoch nicht mehr angepasst.

Während der POWERbreathe-Trainingsintervention erhöhten die Sportler die Belastung durch den Atemtrainer individuell im Laufe der Trainingswochen. Der Trainingsfortschritt war dadurch nicht standardisiert und abhängig von der Motivation des Sportlers bzw. der Bereitschaft, das Atemtraining zu intensivieren. In Fällen, in denen bei der wöchentlichen Kontrolle nur eine geringe Steigerung zu vermerken war, wurde daher Rücksprache mit dem Sportler gehalten. Der Umgang mit den eingesetzten Thera-Bändern wurde zwar zusammen eingeübt, die individuelle Belastung hing aber davon ab, wie fest der Sportler das Band an seinem Brustkorb befestigte. Eine Standardisierung der Belastung konnte nicht realisiert werden, allerdings fehlen diesbezüglich auch Empfehlungen des Herstellers der POWERbreathe-Geräte.

7 Ergebnisse

Im nachstehenden Kapitel erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen und Interventionen. Es werden die Resultate der Voruntersuchungen beschrieben, um zu zeigen, welche Schlussfolgerungen bezüglich der Durchführung und Optimierung der Hauptuntersuchung abgeleitet werden konnten (Kapitel 7.1). Die Auswertung der durchgeführten Trainingsstudie erfolgt nach Funktionssystemen: Zum einen werden die Ergebnisse des Atemtrainings und dessen unmittelbare Auswirkungen auf die Lungenfunktion dargestellt (Kapitel 7.2.1 und 7.2.2), zum anderen wird die Veränderung der im Rahmen der vier Stufentests erhobenen leistungsphysiologischen Parameter (Laktat, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme und Zyklusfrequenz) beschrieben. Letzteres geschieht zunächst am Beispiel der Ergebnisse des GA-II-Intervalls, das mit AF 1 geschwommen wurde, um exemplarisch die beobachteten Veränderungen durch Training über den gesamten Studienverlauf aufzuzeigen (Kapitel 7.3). Es schließt sich eine Darstellung des Einflusses der Intensität an (Kapitel 7.4), um der Frage nachzugehen, ob sich die leistungsphysiologischen Parameter in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsstufe, dem Testzeitpunkt und der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- bzw. Kontrollgruppe) in gleichem Maße veränderten oder ob sich eine Wirkung des Atemtrainings nachweisen ließ. Danach erfolgt eine Darstellung der Phänomene, die sich als Reaktion auf die Einschränkung der Atemfrequenz von der gewohnten Atemfrequenz (AF 1, 2er- bzw. 3er-Atmung) auf eine reduzierte Atemfrequenz (AF 2, 4er- bzw. 5er-Atmung) beobachten ließen (Kapitel 7.5). Auch hier werden die Ergebnisse im Hinblick auf einen möglichen Einfluss des Atemtrainings auf die leistungsphysiologischen Parameter analysiert. In Kapitel 7.6 erfolgt abschließend eine umfassende Analyse in Bezug auf Zusammenhänge zwischen ausgewählten leistungsphysiologischen und Lungenfunktionsparametern auf der einen und den Trainingsergebnissen der POWERbreathe-Intervention auf der anderen Seite. Durch diese differenziertere Betrachtungsweise der Wirksamkeit des Atemtrainings sollte untersucht werden, ob und wie sich die POWERbreathe-Parameter zur Trainingssteuerung nutzen lassen.

Die wesentlichen Ergebnisse der verschiedenen Auswertungen werden am Ende des jeweiligen Unterkapitels zusammengefasst. Eine detailliertere Darstellung der Messwerte erfolgt im Anhang, auf den jeweils an entsprechenden Stellen innerhalb der Ergebnisdarstellung verwiesen wird.

7.1 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Die im Strömungskanal durchgeführte Pilotstudie diente der Entwicklung und praktischen Überprüfung eines geeigneten Stufenprotokolls für die Hauptuntersuchung. Im Folgenden soll dargestellt werden, welche Ergebnisse das getestete Protokoll lieferte und welche Konsequenzen sich davon für die Gestaltung der Hauptuntersuchung ableiten ließen.

Um die Veränderung leistungsphysiologischer Parameter zu erfassen, die während des Stufentests der Voruntersuchung im Strömungskanal beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 auftraten, wurden die entsprechenden Stufen innerhalb des kontinuierlichen bzw. des intermittierenden Protokolls miteinander verglichen. Um die unterschiedliche Wirkung der Dauer- und der Intervallbelastung auf die Messparameter zu bewerten, wurden korrespondierende Stufen aus dem kontinuierlichen und dem intermittierenden Protokoll gegenübergestellt (Tab. 5). Da die Stichprobe sehr klein war und lediglich Erfahrungswerte in Vorbereitung der Hauptstudie gesammelt werden sollten, wurde auf eine statistische Auswertung verzichtet.

Tab. 5. Übersicht der durchgeführten Auswertungen; es erfolgte jeweils ein Vergleich der erfassten leistungsphysiologischen Parameter der gekennzeichneten Stufen innerhalb eines Protokolls und zwischen kontinuierlichem und intermittierendem Testprotokoll

	GA I, AF 1 kontinuierlich	GA I, AF 2 kontinuierlich	GA II, AF 1 kontinuierlich	GA II, AF 2 kontinuierlich	GA I, AF 1 intermittierend	GA I, AF 2 intermittierend	GA II, AF 1 intermittierend	GA II, AF 2 intermittierend
GA I, AF 1 kontinuierlich		x			x			
GA I, AF 2 kontinuierlich						x		
GA II, AF 1 kontinuierlich				x			x	
GA II, AF 2 kontinuierlich								x
GA I, AF 1 intermittierend						x		
GA I, AF 2 intermittierend								
GA II, AF 1 intermittierend								x
GA II, AF 2 intermittierend								

Auf den GA-II-Stufen des kontinuierlichen Protokolls konnte nach der Einschränkung der Atmung von AF 1 auf AF 2 ein deutlicher Laktatanstieg bei gleichbleibender Intensität beobachtet werden (Tab. 6). Der Mittelwert der Gruppe stieg um 13,1 % von 3,65 mmol/l auf 4,13 mmol/l. Die Einschränkung der Atmung um einen Atemzug pro Zyklus war somit ausreichend, um messbare Unterschiede zu bewirken. Gleichzeitig deutete die Größenordnung der Laktatwerte dieser Stufe darauf hin, dass die Intensität insgesamt zu niedrig gewählt worden war. Von den sechs Sportlern blieben fünf mit Maximalwerten zwischen 2,11 mmol/l und 4,44 mmol/l deutlich unter den im GA-II-Bereich geforderten 6-8 mmol/l. Lediglich Sportler D schien mit einem Laktatwert von 8,32 mmol/l adäquat belastet worden zu sein. Infolgedessen konnte für die Planung der Hauptuntersuchung abgeleitet werden, die Berechnung der Kanalgeschwindigkeiten zu überdenken und das Belastungsprotokoll um eine weitere Stufe höherer Intensität zu ergänzen. Auf diese Weise sollten differenziertere Messwerte erzielt und auch bei besser trainierten Sportlern Aussagen über den Einfluss des geänderten Atemverhaltens unter nahezu maximalen Bedingungen getroffen werden können.

Tab. 6. Laktatwerte [mmol/l] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A	1,27	1,11	2,27	2,99
B	4,17	3,83	7,26	8,32
C	2,03	1,20	3,82	4,37
D	1,67	1,59	4,38	4,44
E	1,98	1,74	2,02	2,54
F	1,19	0,83	2,16	2,11
MW	2,05	1,72	3,65	4,13

Es war jedoch z. B. durch die Gestaltung der Pausendauer darauf zu achten, dass das Protokoll dennoch bewältigt werden kann, da dies bereits während der Pilotstudie einigen Sportlern Probleme bereitete. Manche Probanden erhöhten während der Intervalle mit AF 2 die Zyklusfrequenz, um den Zeitraum bis zum nächsten Atemzug zu verkürzen. Auf der GA-II-Stufe wurden Frequenzen gemessen, die um 5,8 % höher lagen als die der gleichen Stufe mit AF 1 (Tab. 7). Besonders deutlich zeigte sich dieser Effekt bei Sportler D, der aufgrund des höheren Laktatwerts stärker belastet zu sein schien als der Rest der Gruppe. Bei der Auswertung der Herzfrequenz und der Sauerstoffaufnahme konnte kein Einfluss der Atemfrequenz festgestellt werden (Tab. 8 und Tab. 9). Die beschriebenen Phänomene ließen sich aufgrund der geringen Probandenzahl nicht verallgemeinern und waren in der Hauptuntersuchung mit einer größeren Stichprobe zu verifizieren. Die Pilotstudie lieferte jedoch bereits Hinweise darauf, dass die Umsetzung des in der Videoanalyse als vorteilhaft beschriebenen Atemverhaltens im aktuellen Trainingszustand der Sportler nicht ohne weiteres zu bewältigen war (erkennbar an der veränderten Bewegungsstruktur und der übermäßigen Erschöpfung einiger Probanden). Der Umstand, dass eine Modifikation des regulären Schwimmtrainings nicht möglich war, führte zu der Entscheidung, für die Hauptuntersuchung ein spezifisches Atemtraining einzusetzen, das mit vertretbarem Zeitaufwand vor dem Wassertraining durchgeführt werden kann.

Tab. 7. Zyklusfrequenzen [1/min] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A	29	30	33	34
B	32	34	38	39
C	35	35	38	40
D	27	29	33	38
E	30	31	32	33
F	30	29	34	35
MW	30	31	34	36

Tab. 8. Herzfrequenz [1/min] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls (fehlende Werte bei Proband A und D aufgrund technischer Probleme)

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A		148	164	167
B	186	192	202	203
C	165	170	188	189
D				
E	166	170	178	178
F	154	155	175	175
MW	168	167	181	182

Tab. 9. Sauerstoffaufnahme [l/min] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls (fehlende Werte bei Proband C und D aufgrund technischer Probleme)

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A	2,282	2,715	3,393	3,496
B	2,768	2,272	2,889	3,375
C	2,985	2,987	3,505	
D				
E	3,055	2,750	3,061	2,929
F	2,040	2,197	3,015	2,925
MW	2,626	2,584	3,173	3,181

Die Belastung durch das intermittierende Protokoll erwies sich sowohl aufgrund der Größenordnung der Absolutwerte als auch im relativen Vergleich zum kontinuierlichen Test als deutlich zu niedrig und somit als wenig aussagekräftig (Tab. 10 bis Tab. 13). Gegenüber dem kontinuierlichen Protokoll nahm die Laktatkonzentration auf den GA-I-Stufen im Durchschnitt um 33,5 % (AF 1) bzw. 43,8 % (AF 2), auf den GA-II-Stufen sogar um 52,1 % (AF 1) bzw. 56,3 % (AF 2) ab. Die Herzfrequenz lag über den gesamten Test drei bis sieben Schläge unter der der kontinuierlichen Belastung. Es zeigte sich, dass die zehnsekündige Pause zwischen den 30-s-Intervallen zu lang war und somit nicht die Belastung einer Wende abbildete, sondern für eine Erholung der Sportler sorgte. Eine Fortführung dieser Belastungsform in der Hauptuntersuchung wurde daher verworfen.

Tab. 10. Laktatwerte [mmol/l] der Probanden während des intermittierenden Protokolls

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A	0,82	0,99	1,29	1,49
B	2,07	1,28	2,83	3,00
C	2,01	1,09	1,72	1,84
D	0,96	0,69	2,20	2,16
E	1,53	1,17	1,21	1,10
F	0,79	0,57	1,25	1,23
MW	1,36	0,97	1,75	1,80

Tab. 11. Zyklusfrequenzen [1/min] der Probanden während des intermittierenden Protokolls

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A	29	29	33	33
B	35	34	38	38
C	35	36	36	41
D	28	28	31	33
E	29	29	30	31
F	28	28	34	36
MW	30	31	33	35

Tab. 12. Herzfrequenz [1/min] der Probanden während des intermittierenden Protokolls

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A	152	157	167	169
B	189	191	200	198
C	162	164	182	184
D				
E	153	155	163	162
F	150	154	176	177
MW	161	164	177	178

Tab. 13. Sauerstoffaufnahme [l/min] der Probanden während des intermittierenden Protokolls

Proband	GA I AF 1	GA I AF 2	GA II AF 1	GA II AF 2
A	3,108	3,182	3,495	3,442
B	3,128	1,960	3,594	3,161
C	2,934	2,643	3,108	3,158
D				
E	2,346	3,135	2,647	2,719
F	2,522	2,364	2,628	3,084
MW	2,808	2,657	3,094	3,113

Die Pilotstudie zeigte, dass die Abläufe für Sportler und Testpersonal grundsätzlich gut umsetzbar waren. Die Nachatmungsmethode zur Bestimmung der Sauerstoffaufnahme zum Zeitpunkt des Belastungsendes konnte im Kanal mit Maskenzeiten von 9 ± 2 Sekunden realisiert werden, was der Größenordnung anderer Untersuchungen entspricht, bei denen sich Spiroergometriesystem und Sportler nach Testende nicht in unmittelbarer Nähe zueinander befinden (di Prampero, Cortili, Mognoni & Saibene, 1976; Guderjahn, 2008; Höltke et al., 2007; Rüdrich, Lüdemann, Jost, Wüstenfeld & Wolfarth, 2016; Sleivert & Mackinnon, 1991). Als Auswertungsintervall der $\dot{V}O_2$-Daten wurde ein Zeitraum von 30 Sekunden ab Beginn der Messung gewählt, um nur die schnellen Anteile der Sauerstoff-Erholungskurve zu berücksichtigen (Léger et al., 1980). Die Messwerte wurden linear extrapoliert, was sich in verschiedenen Studien als exakteste Methode für kurze Auswertungsintervalle erwiesen hat (Costill et al., 1985; Guderjahn, 2008; Sleivert & Mackinnon, 1991) und den Rechenaufwand gering hält. Der Fehler, der aus der Bestimmung der

Sauerstoffaufnahme anhand der schnellen Komponente der Erholung resultieren kann, beträgt im Vergleich zur Berechnung mit schneller und langsamer Komponente unter 1,5 % (Léger et al., 1980).

Die Auswertung der berechneten Sauerstoffaufnahme zum Ende der Belastung ergab insgesamt nur kleine Veränderungen zwischen allen verglichenen Intervallen. Die größten Unterschiede zeigten sich mit +2,6 ml/min/kg zwischen der kontinuierlichen und der intermittierenden GA-I-Belastung mit AF 1. Mit +5,9 % lag jedoch selbst diese Differenz noch im Bereich der Messungenauigkeit der Nachatmungsmethode (Höltke et al., 2007; Reer et al., 2007; Ziegler et al., 2006). Für die Hauptuntersuchung musste daher das Auswertungsverfahren überarbeitet und das Probandenkollektiv vergrößert werden, um eindeutigere Ergebnisse zu erzielen.

Zusammenfassend ließen sich aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen folgende Schlussfolgerungen für die Durchführung der Hauptuntersuchung ableiten:

- Es sollten zusätzlich zum bisherigen Ablauf höhere Intensitäten getestet werden, um differenziertere Ergebnisse zu erhalten. Der höheren Belastung war durch eine Anpassung der Pausendauer Rechnung zu tragen.
- Da eine Umsetzung der aus der Videoauswertung abgeleiteten Empfehlungen nicht ohne Vorbereitung durch spezifische Trainingsinhalte möglich war, sollte ein geeignetes Atemtraining eingesetzt werden.
- Das intermittierende Testprotokoll lieferte keine verwertbaren Ergebnisse und sollte daher verworfen werden.
- Die geplanten Abläufe ließen sich gut im Kanal umsetzen. Dies galt insbesondere für die spiroergometrische Erfassung der Sauerstoffaufnahme über die Nachatmungsmethode.
- Da das Probandenkollektiv zu klein für statistische Auswertungen war, sollte für die Hauptuntersuchung eine größere Sportlergruppe gewählt werden.

7.2 Auswertung des Atemtrainings

Da die Regulation der Atmung ein komplexes System mit diversen Einflussgrößen darstellt, ist davon auszugehen, dass ein Eingriff in diese Mechanismen durch ein Training der Atemmuskulatur nicht nur lokale, sondern auch systemische Folgen hat. Als Grundlage für die im späteren Verlauf der Ergebnisdarstellung geschilderten Veränderungen des Gesamtsystems unter Training erfolgt an dieser Stelle zunächst eine Darstellung der absolvierten Trainingseinheiten mit dem POWERbreathe-Gerät und der dabei erzielten Ergebnisse im Verlauf der achtwöchigen Intervention. Da die Lungenfunktion eng an die Kraft und Funktionsweise der Atemmuskulatur gekoppelt ist, schließt sich eine Darstellung der Ergebnisse der Lungenfunktionstests an, die im Rahmen der Stufentests vor und nach dem Atemtraining durchgeführt worden waren.

7.2.1 Ergebnisse der POWERbreathe-Trainingsintervention

Die Ergebnisse der durchgeführten Atemtrainingseinheiten mit dem POWERbreathe wurden wöchentlich ausgelesen und nach Abschluss der Intervention ausgewertet. Dabei wurden nur vollständig durchgeführte Einheiten berücksichtigt. Einheiten, die aufgrund verstopfter Geräte abgebrochen worden waren,

wurden verworfen, da die Sportler in den meisten Fällen nach dem Zurücksetzen oder Reinigen des Geräts erneut mit einem Durchgang begannen.

Während der ersten Intervention wurden im Schnitt 59 Einheiten und damit 18 mehr als im zweiten Trainingszeitraum durchgeführt. Die Differenz erklärt sich durch eine Vielzahl von Krankheitsfällen während der zweiten Intervention: Da die Studie im Februar und März durchgeführt wurde, kam es jahreszeitlich bedingt zu vermehrten Erkältungen. Darüber hinaus fand das Training zum Teil an anderen Standorten statt, so dass die POWERbreathe-Geräte an diesen Tagen nicht zum Einsatz kamen. Weitere Einheiten entfielen durch Wettkämpfe im Untersuchungszeitraum.

Ausgehend von 10 cm H_2O konnten die Sportler der ersten Intervention den inspiratorischen Widerstand (Last) auf 59 ± 12 cm H_2O steigern. Die Probanden der zweiten Interventionsgruppe kamen nach acht Wochen Training auf 42 ± 13 cm H_2O. Die dabei erbrachte mechanische Leistung wurde im Mittel um 9 W auf 12,8 ± 2,5 W (erste Intervention) bzw. um 3,8 W auf 8,0 ± 3,1 W (zweite Intervention) gesteigert. Das mittlere Atemzugvolumen stieg bei fünf von sechs Sportlern der ersten Intervention an, was im Mittel einen Zuwachs von 0,4 l auf 2,4 ± 0,8 l ergab. Bei den Sportlern der zweiten Intervention sank das AZV hingegen um 0,2 l auf 2,4 ± 0,5 l. Die über alle Atemzüge einer Trainingseinheit gemittelte Arbeit stieg bei den Probanden der ersten Intervention um 194 J auf 291 ± 126 J, während der zweiten Intervention um 118 J auf 207 ± 60 J an (Tab. 14).

Aufgrund der geringeren Anzahl an Trainingseinheiten im zweiten Interventionszeitraum fiel die Steigerung sämtlicher Parameter in diesem Trainingsabschnitt geringer aus als während der ersten Intervention. Bei beiden Interventionsgruppen deutete der Anstieg der Leistung auf eine kraftvollere bzw. schnellere Inspiration gegen den zunehmend höheren Widerstand hin. Da trotz einer angestrebten Standardisierung des Atemtrainings durch ein begleitetes Training zu Beginn der Intervention Unterschiede in der Durchführung bestanden – manche Sportler atmeten nach dem inspiratorischen Trainingsimpuls lang und langsam, andere deutlich schneller aus –, ließ sich in Bezug auf das mittlere inspiratorische Atemzugvolumen (AZV) keine allgemeingültige Aussage treffen. Insgesamt waren die Veränderungen des Atemzugvolumens jedoch auch deutlich geringer als die der anderen Messparameter. Die verrichtete Arbeit stieg durch den erhöhten Inspirationswiderstand in beiden Interventionen deutlich an. Aufgrund der Größenordnung der Veränderungen von Leistung und Atemzugvolumen ist anzunehmen, dass durch das Training in erster Linie kraftvoller bzw. schneller und nicht tiefer eingeatmet wurde.

Um die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen, wurden im Folgenden die Probanden beider Interventionen zusammen betrachtet. Dass dies zulässig ist, wurde zuvor mittels eines Mann-Whitney-U-Tests überprüft. Es wurden die Ergebnisse des Atemtrainings beider Interventionsgruppen aus der jeweils ersten Interventionswoche gegenübergestellt. Der Intergruppenvergleich ergab, dass sich die beiden Gruppen zu diesem Zeitpunkt nicht signifikant unterschieden und die Probanden somit ausgehend vom gleichen Ausgangsniveau mit der Intervention begannen (Tab. 14). Gleiches galt auch für alle weiteren leistungsphysiologischen und Lungenfunktionsparameter mit Ausnahme der FEV1, bezogen auf den Zeitpunkt vor Beginn der ersten bzw. zweiten Intervention (Tab. 15). Die beiden Gruppen waren daher auch diesbezüglich vor dem jeweiligen Atemtraining als gleich anzusehen.

Tab. 14. Ergebnisse des POWERbreathe-Trainings der Einzelsportler sowie Mittelwert und Standardabweichung der jeweiligen Gruppe; p: Ergebnis des Mann-Whitney-U-Tests, bezogen auf die Trainingsdaten der jeweils ersten Interventionswoche. Proband 1-6: erste Intervention, Proband 8-15: zweite Intervention. POWERbreathe-Parameter (Leistung P, Atemzugvolumen AZV, Arbeit W): jeweils Maximalwert nach acht Wochen und Steigerung bezogen auf den Ausgangswert.

Proband	Einheiten	Last [cm H_2O]	P [W]	ΔP [W]	AZV [l]	ΔAZV [l]	W [J]	ΔW [J]
1	58	43	10,4	5,5	1,9	0,4	164	84
2	57	56	11,4	7,7	1,3	-0,5	164	100
3	73	50	9,7	6,1	2,6	0,3	240	120
4	88	80	16,4	11,1	2	0,8	276	176
5	39	70	14,8	11,6	2,7	0,4	388	300
6	41	57	14,3	11,7	3,8	0,7	516	384
8	42	28	5,8	2,6	3,2	0,9	188	96
9	31	40	8,4	5,4	2,4	-0,3	208	132
10	33	45	9,5	-0,7	3	-0,4	260	76
13	35	27	2,6	1	1,6	-0,6	92	44
14	58	65	12,4	7,8	2,0	-0,7	280	192
15	45	45	9,4	6,9	2,4	0,1	216	168
MW IG 1	59	59	12,8	9,0	2,4	0,4	291	194
STABW IG 1	17	12	2,5	2,6	0,8	0,4	126	111
MW IG 2	41	42	8,0	3,8	2,4	-0,2	207	118
STABW IG 2	9	13	3,1	3,1	0,5	0,5	60	51
p			0,416		0,154		0,413	

Tab. 15. p-Werte des Mann-Whitney-U-Tests für die leistungsphysiologischen Parameter beider Interventionsgruppen jeweils vor Beginn des Atemtrainings (Interventionsgruppe 1: Test 1, Interventionsgruppe 2: Test 3

	GA I		GA II		95 %	
Stufentest	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat	0,286	0,281	0,126	0,429	0,589	0,329
Herzfrequenz	0,914	0,719	0,871	0,710	0,914	0,460
Sauerstoffaufnahme	0,662	0,937	0,818	0,818	0,537	0,841
Zyklusfrequenz	0,139	0,193	0,952	0,825	0,994	0,444

Lungenfunktionstest	
FVC	0,102
FEV1	0,039
MVV	0,589

Stellt man für jeden Probanden der beiden Interventionen die Zahl der durchgeführten Einheiten und die resultierende Last nach Ende der Intervention gegenüber, so war ein individuelles Ansprechverhalten der einzelnen Sportler auf den Trainingsreiz erkennbar (Abb. 38). Zwar korrelierte die maximale Trainingshäufigkeit (88 Einheiten, Proband 4) auch mit der höchsten Last des gesamten Trainingskollektivs (80 cm H_2O), dennoch schien es Sportler zu geben, die mehr bzw. weniger stark auf das Training ansprachen. So hat zum Beispiel Sportler 3 verhältnismäßig viele Einheiten absolviert (57), kam jedoch mit 56 cm H_2O auf ein

Resultat, das unter dem Gruppenmittelwert lag. Im Gegensatz dazu hatten die Probanden 5 und 6 nur 39 bzw. 41 Mal trainiert, kamen damit jedoch auf 70 bzw. 57 cm H_2O. Die beiden Sportler hatten damit innerhalb der ersten Intervention am wenigsten Einheiten absolviert, schnitten aber fast am besten ab (übertroffen nur noch von Proband 4). Dieser scheinbare Widerspruch war darauf zurückzuführen, dass es sich um die einzigen beiden männlichen Probanden dieser Trainingsgruppe handelte. Diese Tendenz ließ sich auch für Sportler der zweiten Interventionsgruppe bestätigen, hier erzielten mit Proband 10, 14 und 15 die männlichen Sportler die höchsten Werte. Stellt man Sportler 10 (33 Einheiten, 45 cm H_2O, männlich) einem vergleichbaren weiblichen Sportler der gleichen Gruppe (Proband 13, 35 Einheiten, 27 cm H_2O) gegenüber, so schnitt der männliche Proband bei gleicher Trainingshäufigkeit besser ab. Diese Tendenz zeigte sich auch beim Vergleich männlicher und weiblicher Probanden aus unterschiedlichen Interventionsgruppen (z. B. Sportler 1: 58 Einheiten, 43 cm H_2O, weiblich; Sportler 14: 58 Einheiten, 65 cm H_2O, männlich). In Einzelfällen traten jedoch auch Unterschiede zwischen vergleichbaren weiblichen Probanden auf: So stammten die gleichaltrigen Probandinnen 1 und 2 aus der gleichen Schwimm- und Atemtrainingsgruppe und hatten nahezu gleich viel trainiert (58 bzw. 57 Einheiten), konnten sich aber in unterschiedlichem Maße steigern (43 bzw. 56 cm H_2O).

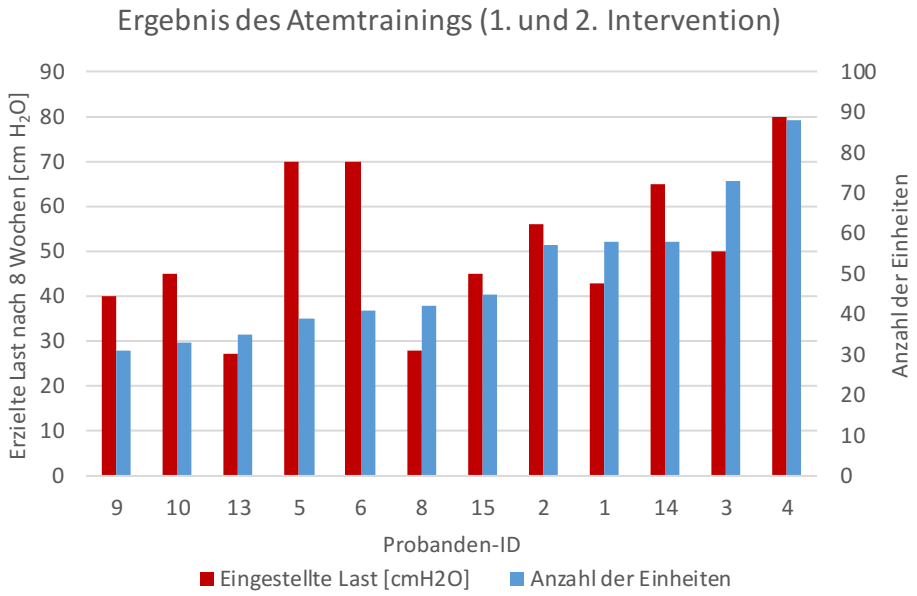


Abb. 38. Anzahl der durchgeführten Einheiten und erzielte Last [cm H_2O] nach acht Wochen Atemtraining für jeden Probanden der beiden Interventionen, aufsteigend nach Anzahl der absolvierten Trainingseinheiten

7.2.2 Veränderung der Lungenfunktion

Da das POWERbreathe-Training als Krafttraining für die Atemmuskulatur angelegt war, wurden vor und nach der Intervention Lungenfunktionstests durchgeführt, um die muskulären Veränderungen quantifizieren zu können. Um die Effekte des Atemtrainings von denen des Schwimmtrainings abzugrenzen, wurden die Ergebnisse der Interventionsgruppen jeweils mit denen der korrespondierenden Kontrollgruppe verglichen.

Die erste Interventionsgruppe zeigte durch das Atemtraining im Mittel eine geringfügige Steigerung der forcierten Vitalkapazität (FVC) um 0,34 l, während die Werte der Kontrollgruppe nahezu unverändert blieben (-0,14 l, $p > 0,05$, $r = 0,19$). Dabei war die Veränderung der FVC der ersten Interventionsgruppe zwar nicht signifikant, entsprach aber einem großen Effekt ($r = 0,51$). Während der zweiten Intervention konnten nahezu keine Veränderungen bezüglich der FVC beobachtet werden (IG 2: +0,06 l, $p > 0,05$, $r = 0,19$; KG 2: -0,12 l, $p > 0,05$, $r = 0,43$; Tab. 16 und Abb. 39). Alle Veränderungen durch die Intervention waren somit nicht signifikant. Der Vergleich der FVC-Werte der Interventions- und der Kontrollgruppe ergab für keinen der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Probandenkollektiven. Die Werte der ersten Kontrollgruppe lagen vor Beginn der Intervention über denen der Interventionsgruppe (+0,94 l), nach Abschluss des achtwöchigen Trainings unterschied sich die forcierte Vitalkapazität beider Gruppen nur noch geringfügig (um 0,46 l). Vor Beginn des zweiten Trainingsblocks zeigte sich ein unverändertes Bild, nach Abschluss der zweiten Intervention fielen die Ergebnisse beider Gruppen nahezu identisch aus.

Tab. 16. FVC [l] aller teilnehmenden Probanden, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte.

Proband	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1	4,16	4,42	4,50	4,39
2	4,07	4,74	4,48	4,27
3	3,98	3,89	4,05	4,03
4	4,48	4,64	4,74	4,42
5	5,93	5,95	6,26	6,10
6	5,02	6,07	6,37	6,19
7	4,80	4,75	5,00	5,18
8	4,75	4,75	5,04	4,78
9	4,57	4,81	4,69	5,06
10	6,03	5,89	6,16	6,03
11	4,75	4,78		
12	8,40	7,46		
13			4,32	4,32
14			6,19	6,44
15			5,02	5,19
MW IG 1	4,61	4,95		
MW KG 1	5,55	5,41		
MW IG 2			5,24	5,30
MW KG 2			5,06	4,94
p	0,132	0,240	0,731	0,445

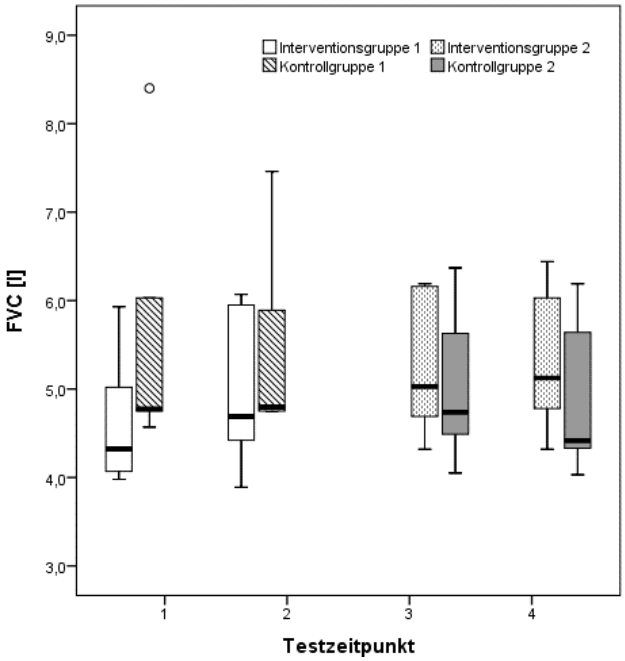


Abb. 39. FVC der Interventions- und Kontrollgruppen vor und nach dem Atemtraining (Zeitraum der Interventionen: zwischen Test 1 und 2 sowie zwischen Test 3 und 4)

Die Einsekundenkapazität (FEV1) wurde im Rahmen der ersten Intervention durch das Atemtraining nur geringfügig verbessert (+0,27 l), was einem mittleren Effekt entsprach (r = 0,39), während die Werte der Kontrollgruppe im gleichen Zeitraum unverändert blieben (r = 0,03; Tab. 17 und Abb. 40). Auch während der zweiten Intervention zeigten sich keine Veränderungen der FEV1 bei Interventions- oder Kontrollgruppe. Sämtliche Veränderungen der Einsekundenkapazität innerhalb der Gruppen waren über den gesamten Untersuchungszeitraum nicht signifikant. Der Vergleich der FEV1-Werte der Interventions- und der Kontrollgruppe ergab für keinen der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Probandenkollektiven. Die Ergebnisse der ersten Kontrollgruppe lagen vor Beginn der Intervention über denen der Interventionsgruppe (+0,61 l), nach Abschluss des achtwöchigen Trainings unterschied sich die Einsekundenkapazität beider Gruppen nur noch geringfügig (um 0,36 l). Vor Beginn des zweiten Trainingsblocks zeigte sich ein unverändertes Bild, nach Abschluss der zweiten Intervention erreichte die zweite Interventionsgruppe im Mittel eine um 0,45 l größere FEV1 als die zweite Kontrollgruppe.

Tab. 17. FEV1 [l] aller teilnehmenden Probanden, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte

Proband	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1	3,29	3,44	3,50	3,70
2	3,42	4,02	3,93	3,63
3	3,42	3,23	3,30	3,63
4	3,73	3,85	4,06	2,92
5	4,86	5,03	5,28	5,30
6	4,00	4,80	5,10	4,99
7	4,14	4,02	4,23	4,45
8	4,00	3,82	4,15	4,17
9	3,63	4,25	4,10	4,54
10	4,92	4,53	4,79	4,56
11	4,00	4,05		
12	5,71	5,84		
13			4,02	3,95
14			5,29	5,55
15			4,25	4,47
MW IG 1	3,79	4,06		
MW KG 1	4,40	4,42		
MW IG 2			4,43	4,54
MW KG 2			4,20	4,09
p	0,093	0,394	0,366	0,234

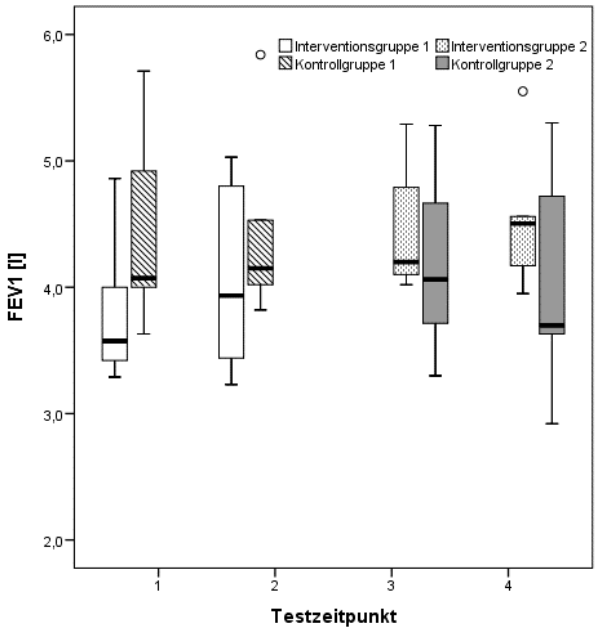


Abb. 40. FEV1 der Interventions- und Kontrollgruppen vor und nach dem Atemtraining (Zeitraum der Interventionen: zwischen Test 1 und 2 sowie zwischen Test 3 und 4)

Die erste Interventionsgruppe konnte das maximale Minutenvolumen (MVV) durch das Atemtraining signifikant verbessern (+13,3 l/min, r = 0,64), während sich die Kontrollgruppe im gleichen Zeitraum um 11,9 l/min verschlechterte ($p < 0,05$, r = 0,64; Tab. 18 und Abb. 41). Die zweite Interventionsgruppe konnte sogar eine Steigerung um 33,8 l/min im Interventionszeitraum realisieren, während die zweite Kontrollgruppe sich um 7,1 l/min verbesserte (beide Veränderungen waren signifikant und entsprachen mit r = 0,64 bzw. r = 0,63 einem großen Effekt). Die Prä-Post-Differenz der Kontrollgruppe war deutlich geringer als die der Interventionsgruppe im gleichen Zeitraum, offensichtlich konnten aber alle Sportler, die zuvor bereits am Atemtraining teilgenommen hatten, ihre Leistung in Bezug auf den MVV-Test im zweiten Trainingszeitraum trotz des nicht mehr weitergeführten Trainings mit dem POWERbreathe erhalten oder sogar steigern.

Der Vergleich der MVV-Werte der Interventions- und der Kontrollgruppe ergab für keinen der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Probandenkollektiven. Die Werte der ersten Kontrollgruppe lagen vor Beginn der Intervention über denen der Interventionsgruppe (+16,6 l/min), nach Abschluss des achtwöchigen Trainings überstieg das Ergebnis der Interventionsgruppe das der Kontrollgruppe um 8,6 l/min (Tab. 18). Vor Beginn des zweiten Trainingsblocks fiel das maximale Minutenvolumen der zweiten Interventionsgruppe etwas schlechter aus als zuvor, nach Abschluss der zweiten Intervention unterschieden sich die Ergebnisse der beiden Probandenkollektive nur noch geringfügig.

Tab. 18. MVV [l/min] aller teilnehmenden Probanden, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte

Proband	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1	131,3	136,3	116,1	137,1
2	94,2	113,7	133,5	139,0
3	113,6	129,5	134,1	136,1
4	110,1	129,2	127,8	128,7
5	173,2	175,8	185,1	185,2
6	104,0	121,7	111,2	124,3
7	157,6	132,4	160,9	167,9
8	114,3	112,9	101,2	110,6
9	113,2	106,4	78,1	134,6
10	147,6	142,4	139,6	148,7
11	114,3	110,2		
12	178,9	150,6		
13			118,4	147,9
14			117,0	165,5
15			92,7	142,1
MW IG 1	121,1	134,4		
MW KG 1	137,7	125,8		
MW IG 2			107,8	141,6
MW KG 2			138,4	145,5
p	0,180	0,589	0,101	0,945

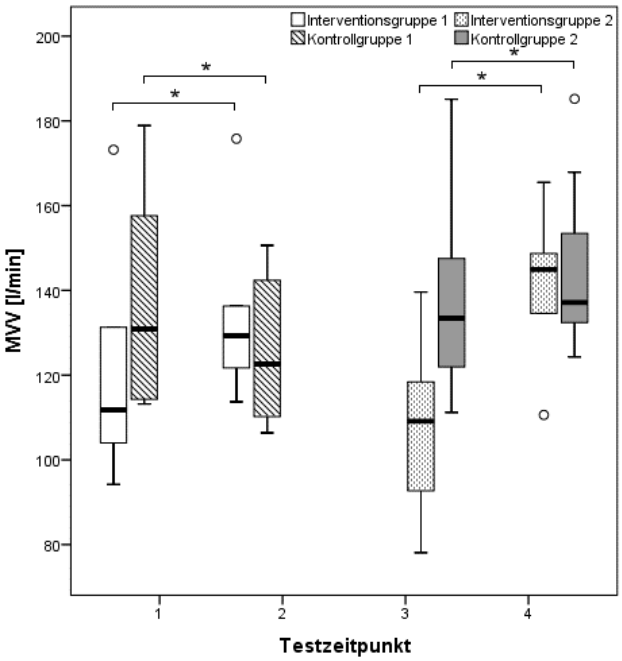


Abb. 41. MVV der Interventions- und Kontrollgruppen vor und nach dem Atemtraining (Zeitraum der Interventionen: zwischen Test 1 und 2 sowie zwischen Test 3 und 4)

Auf den einzelnen Sportler bezogen ließ sich feststellen, dass alle Interventionsteilnehmer eine Verbesserung des maximalen Minutenvolumens zeigten. Die größte absolute Steigerung erzielten die Sportler aus der zweiten Interventionsgruppe. Im Gegensatz dazu veränderten sich FVC und FEV1 bei den meisten Probanden unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit kaum. Es zeigte sich eine individuell verschiedene Reaktion auf das Atemtraining, da sich nicht alle Sportler in gleichem Maße steigern konnten. Manche Teilnehmer der Trainingsinterventionen verbesserten sich nur geringfügig; die größten Trainingseffekte erzielten während des ersten Trainingsabschnitts die Probanden 2 (FVC +0,67 l, FEV1 +0,6 l, MVV +19,5 l/min) und 6 (FVC +1,05 l, FEV1 +0,80 l, MVV +17,7 l/min), während der zweiten Intervention die Probanden 14 (MVV + 48,5 l/min) und 15 (MVV +49,4 l/min).

Aus den Ergebnissen des Atemtrainings und der Lungenfunktionstests ließen sich folgende Aussagen ableiten:

- Die untersuchten Sportler konnten sich durch acht Wochen POWERbreathe-Training hinsichtlich des Widerstands des Geräts (Last), der erzielten Leistung und der dabei verrichteten Arbeit steigern, während das mittlere Atemzugvolumen nahezu unverändert blieb.
- Das Atemtraining forcierte daher in erster Linie eine schnellere bzw. kraftvollere Inspiration, weniger eine tiefere Einatmung.
- Es war ein individuelles Ansprechverhalten der einzelnen Sportler auf den Trainingsreiz erkennbar.
- Unabhängig von der Trainingshäufigkeit schnitten die männlichen Probanden absolut gesehen am besten ab.
- FVC und FEV1 zeigten keine signifikanten Veränderungen durch das Atemtraining.
- MVV verbesserte sich bei allen Interventionsteilnehmern signifikant bei großer Effektstärke.

- Alle Sportler, die während der ersten Intervention am Atemtraining teilgenommen hatten, konnten ihr maximales Minutenvolumen in Ruhe im zweiten Trainingszeitraum trotz des nicht mehr weitergeführten Trainings mit dem POWERbreathe erhalten oder sogar weiter steigern.

7.3 Leistungsphysiologische Veränderungen durch Training am Beispiel der GA-II-Belastung mit normaler Atemfrequenz

Nach der Darstellung der Veränderungen, die sich in Folge des Atemtrainings auf lokaler Ebene im Sinne einer veränderten Atemmuskel- und Lungenfunktion eingestellt haben, soll im nächsten Schritt auf die systemischen Veränderungen eingegangen werden, die sich für den Gesamtorganismus ergeben. Dazu soll im folgenden Kapitel anhand der während der vier Stufentests erhobenen Parameter dargestellt werden, welche leistungsphysiologischen Veränderungen sich im Interventionszeitraum eingestellt haben und welche sich davon auf die POWERbreathe-Trainingsintervention zurückführen lassen.

Die Anpassungsvorgänge, die im menschlichen Organismus als Reaktion auf körperliches Training ablaufen, müssen als multifaktorielles System verstanden werden, in dem das Ergebnis jeder Leistungskontrolle das Resultat einer Überlagerung von (zum Teil gegenläufigen) Effekten darstellt. Im Fall der durchgeführten Studie sind als Einflussfaktoren das Schwimmtraining (und unter Umständen eine daraus resultierende Vorbelastung zum Testzeitpunkt), das zusätzliche Atemtraining für jeweils einen Teil der Gruppe, die individuelle Reaktion der Sportler auf die einzelnen Trainingsreize und die biologische Varianz zu nennen. Im Folgenden sollen die Veränderungen der Testresultate der verschiedenen Interventions- und Kontrollgruppen beispielhaft an einer geeigneten Teilstrecke des Stufentests dargestellt werden. Dazu wurde eine Intensität gewählt, die aus trainingswissenschaftlicher Sicht relevant ist, d. h. die nicht so weit von der Wettkampfgeschwindigkeit entfernt ist, als die Schwimmtechnik unökonomisch werden könnte. Bezüglich der Atemfrequenz wurde mit Hinblick auf die Anwendbarkeit der Ergebnisse im Trainingsbetrieb die normale Atmung (d. h. 2er- bzw. 3er-Atmung) favorisiert. Außerdem kam nur eine Stufe in Frage, die möglichst viele Probanden absolviert hatten und bei der Anfangseffekte durch die Gewöhnung an das Testprotokoll keine Rolle mehr spielten. Aus diesem Grund wurden die Ergebnisse des GA-II-Intervalls mit AF 1 ausgewertet.

Zu Beginn der Studie lagen die Laktatwerte der ersten Interventions- und Kontrollgruppe in einer ähnlichen Größenordnung (Tab. 19). Nach acht Wochen Atemtraining hatte sich die Laktatkonzentration der Interventionsgruppe deutlich, jedoch nicht signifikant reduziert (von 4,63 mmol/l auf 2,64 mmol/l). Die Differenz entsprach mit einer Effektstärke von 0,55 einem großen Effekt. Die Werte der Kontrollgruppe sanken im gleichen Zeitraum etwas weniger stark (von 4,91 mmol/l auf 3,78 mmol/l, $p < 0,05$, $r = 0,64$; Abb. 42). Im Zeitraum zwischen den Interventionen kam es bei der ersten Interventionsgruppe und späteren zweiten Kontrollgruppe nur zu geringen Veränderungen der Mittelwerte, während die Laktatwerte der ersten Kontrollgruppe bzw. zweiten Interventionsgruppe um 0,93 mmol/l abnahmen. Im gleichen Zeitraum änderte sich auch die Gruppenzusammensetzung, so dass sich zu Beginn des zweiten Trainingsblocks drei neue Sportler in der zweiten Interventionsgruppe befanden und ebenso viele ausgeschieden waren. Im Gegensatz dazu blieb die erste Interventionsgruppe nahezu unverändert und wurde während der zweiten Intervention lediglich um einen weiteren Sportler ergänzt. Ein Vergleich der Ergebnisse der Einzelsportler, die sowohl an Test 2 als auch an Test 3 teilgenommen hatten, ergab für alle Probanden bis auf je einen

aus der Interventions- und der Kontrollgruppe weiter sinkende Laktatwerte. Die zweite Intervention führte in beiden Gruppen zu weitaus geringeren Veränderungen – während der Mittelwert der zweiten Interventionsgruppe leicht anstieg (+0,23 mmol/l, r = 0,00), blieb der Laktatwert der zweiten Kontrollgruppe unverändert (r = 0,00). Alle Prä-Post-Differenzen waren nicht signifikant. Auch der Vergleich der Laktatwerte der Interventionsgruppe mit denen der Kontrollgruppe ergab für keinen der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede. Jedoch entsprach der Gruppenunterschied nach der ersten Intervention einem mittleren Effekt, wohingegen zu jedem anderen Zeitpunkt lediglich kleine Effektstärken für den Vergleich zwischen Interventions- und Kontrollgruppe bestimmt werden konnten.

Tab. 19. Laktat [mmol/l] aller teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte

Proband	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1	6,53	4,28	4,76	4,31
2	5,15	1,76	1,68	2,16
3	4,06	1,67	1,30	0,98
4	1,81	2,42	1,30	1,11
5	6,02	3,09	2,66	2,71
6	4,23		4,12	3,80
7	8,89	7,15	5,38	6,22
8	3,29	2,21	1,60	3,82
9	2,82	1,96	1,57	1,68
10	5,47	4,95	6,25	5,66
11	3,73	3,19		
12	5,23	3,19		
13			1,62	1,44
14				2,82
15			3,20	
MW IG 1	4,63	2,64		
MW KG 1	4,91	3,78		
MW IG 2			2,85	3,08
MW KG 2			3,03	3,04
p	0,937	0,247	1,000	0,876
r	0,05	0,39	0,02	0,07

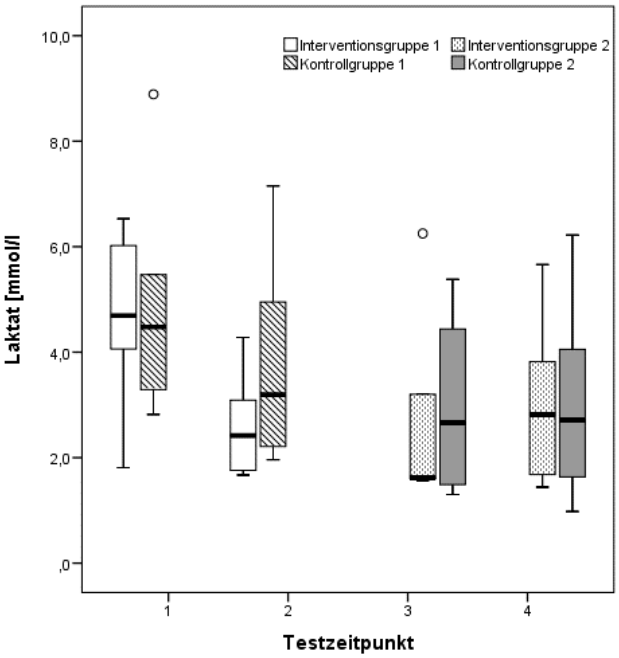


Abb. 42. Laktatwerte [mmol/l] der Interventions- und Kontrollgruppe für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte

Zum Zeitpunkt des ersten Tests lag die Herzfrequenz der Interventionsgruppe im Mittel fünf Schläge unter der der Kontrollgruppe (Tab. 20 und Abb. 43). Da sich die Pulswerte unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit im ersten Interventionszeitraum nicht änderten (Interventionsgruppe -2/min, r = 0,26; Kontrollgruppe -1/min, r = 0,65), ergab sich zum zweiten Testzeitpunkt ein identisches Bild. Die Prä-Post-Differenzen waren nicht signifikant. Nach dem interventionsfreien Zeitraum bis Test 3 hatte sich der Mittelwert der jetzigen Kontrollgruppe 2 leicht auf 169/min verringert, während die Herzfrequenz der zweiten Interventionsgruppe um 7/min gefallen war. Letzteres war im Wesentlichen auf die geänderte Gruppenzusammensetzung zurückzuführen. Eine Analyse der Einzeldaten ergab dennoch für jeden Sportler bis auf Proband 7 sinkende Pulswerte. Im zweiten Interventionszeitraum kam es zu unsystematischen Veränderungen in beiden Gruppen, infolgedessen der Mittelwert der zweiten Interventionsgruppe um 5 Schläge pro Minute auf 175 Schläge pro Minute stieg und der der zweiten Kontrollgruppe unverändert blieb (beide Prä-Post-Differenzen waren nicht signifikant, r = 0,21 bzw. r = 0,05). Der Vergleich der Herzfrequenz der Interventionsgruppe mit der der Kontrollgruppe ergab für keinen der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Probandenkollektiven; die Effektstärken für den Gruppenvergleich bewegten sich mit Ausnahme von Test 3 im mittleren Bereich.

Tab. 20. Herzfrequenz [1/min] für alle teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte

Proband	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1	176	183	184	181
2	177	169	156	162
3	181	168	158	161
4	156	162	153	147
5		173	171	189
6			169	173
7		165	189	168
8	178	171	165	182
9		187	143	164
10		192	187	176
11	177	176		
12	179	171		
13			165	183
14			189	169
15			170	
MW IG 1	173	171		
MW KG 1	178	177		
MW IG 2			170	175
MW KG 2			169	169
p	0,400	0,329	0,836	0,343
r	0,34	0,33	0,06	0,30

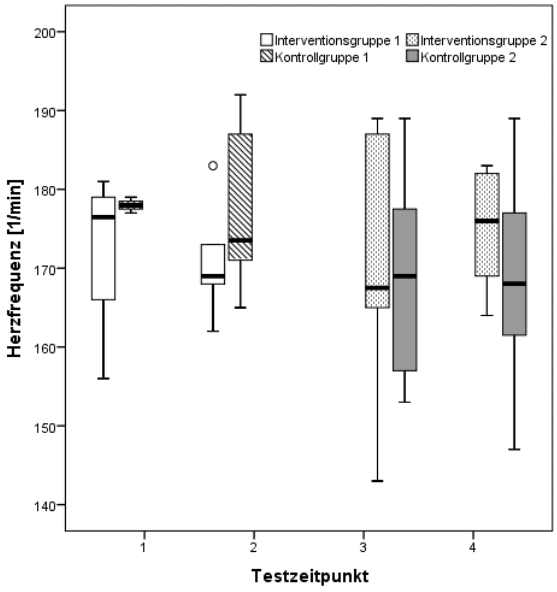


Abb. 43. Herzfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte

Die Auswertung der Sauerstoffaufnahme der beiden Gruppen ergab zum Testzeitpunkt 1 eine leicht niedrigere $\dot{V}O_2$ der Interventionsgruppe (3,947 l/min) im Vergleich zu der der Kontrollgruppe (4,356 l/min, Tab. 21). Während der ersten Intervention kam es unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit nur zu geringen Veränderungen bei geringer Effektgröße (r = 0,05 bzw. r = 0,15, beide Differenzen nicht signifikant, Abb. 44). Während des interventionsfreien Zeitraums zwischen Test 2 und 3 kam es im Mittel zu einer deutlichen Verringerung der Sauerstoffaufnahme der Kontrollgruppe 1 bzw. Interventionsgruppe 2 (-1,028 l/min). Diese Änderung war in erster Linie auf die geänderte Gruppenzusammensetzung der zweiten Interventionsgruppe im Vergleich mit der ersten Kontrollgruppe zurückzuführen, die Auswertung der Einzelergebnisse ergab jedoch unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit eine deutliche Reduzierung der Sauerstoffaufnahme in diesem Zeitraum. Dies machte sich bezogen auf den Mittelwert der Interventionsgruppe 1 bzw. Kontrollgruppe 2 nicht bemerkbar, da einer der Sportler (Proband 6) zum Testzeitpunkt 2 verletzt war und nur beim dritten Test einbezogen werden konnte. Nach der zweiten Intervention konnte für die zweiten Interventionsgruppe keine Veränderung der $\dot{V}O_2$ festgestellt werden (r = 0,21), während sich der Mittelwert der zweiten Kontrollgruppe im gleichen Zeitraum signifikant um 0,318 l/min erhöhte, was mit r = 0,63 einem großen Effekt entsprach. Der Vergleich der Sauerstoffaufnahme der Interventionsgruppe mit der der Kontrollgruppe ergab für keinen der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Probandenkollektiven; auch konnten für alle vier Tests nur geringe Effektgrößen bestimmt werden.

Tab. 21. $\dot{V}O_2$ [l/min] aller teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte

Proband	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1	3,380	3,397	2,628	3,241
2	3,558	3,632	3,025	3,587
3	3,420	3,316	3,140	3,209
4	2,467	3,261	2,153	2,645
5	5,874	5,517	4,822	5,106
6	4,981		5,813	5,857
7	5,114	5,603	5,382	5,546
8	3,179	3,017	2,672	3,370
9	2,998	3,190	2,494	2,936
10	4,122	3,835	4,438	4,815
11	4,647	4,415		
12	6,076	7,376		
13			2,567	2,896
14			5,461	3,674
15			3,640	
MW IG 1	3,947	3,825		
MW KG 1	4,356	4,573		
MW IG 2			3,545	3,538
MW KG 2			3,852	4,170
p	0,699	0,662	0,731	0,530
r	0,14	0,17	0,12	0,21

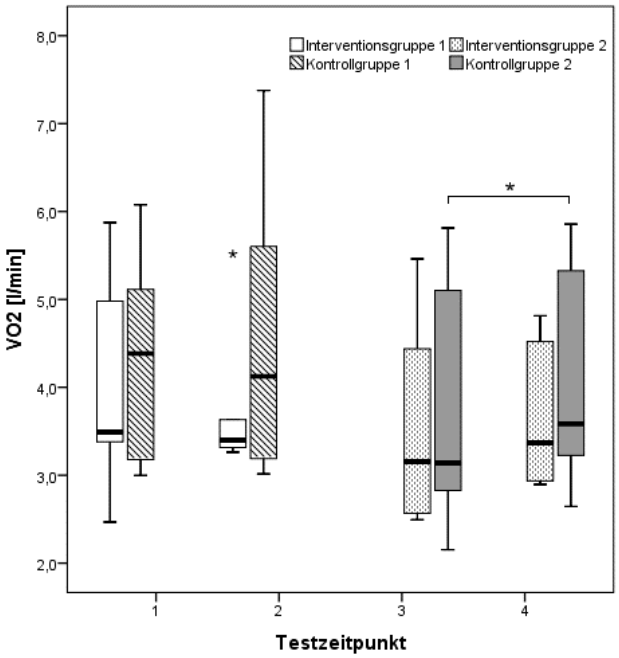


Abb. 44. $\dot{V}O_2$ [l/min] der Interventions- und Kontrollgruppen für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte

Die Zyklusfrequenzen der beiden Gruppen unterschieden sich weder vor noch nach der ersten Intervention und veränderten sich in diesem Zeitraum nicht (r = 0,36 bei der ersten Interventionsgruppe, r = 0,59 bei der ersten Kontrollgruppe; Tab. 22 und Abb. 45). Nach dem interventionsfreien Zeitraum zwischen Test 2 und Test 3 konnte die zweite Kontrollgruppe die Zyklusfrequenz von 32/min auf 30/min leicht reduzieren, während die Frequenz der zweiten Interventionsgruppe unverändert blieb. Auch durch die zweite Intervention konnte keine Veränderung der Frequenz der zweiten Interventionsgruppe erzielt werden (r = 0,26), die Frequenz der Kontrollgruppe blieb im gleichen Zeitraum ebenfalls konstant (r = 0,29). Der Prä-Post-Vergleich der Ergebnisse einer Interventions- oder Kontrollgruppe lieferte weder für die erste noch für die zweite Intervention signifikante Veränderungen. Der Vergleich der Zyklusfrequenz der Interventionsgruppe mit der der Kontrollgruppe ergab für keinen der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede zwischen den beiden Probandenkollektiven; die Teststärke bewegte sich im niedrigen bis mittleren Bereich.

Tab. 22. Zyklusfrequenz [1/min] aller teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte

Proband	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
1	36	35	35	36
2	30	30	27	27
3	31	30	27	33
4	33	34	34	37
5	32	29	29	29
6			30	29
7	33	32	28	28
8	30	29	27	32
9	31	31	32	32
10	35	34	35	35
11	37	36		
12	34	32		
13			32	31
14			35	36
15				
MW IG 1	32	32		
MW KG 1	33	32		
MW IG 2			32	33
MW KG 2			30	31
p	0,537	0,662	0,343	0,432
r	0,19	0,17	0,31	0,24

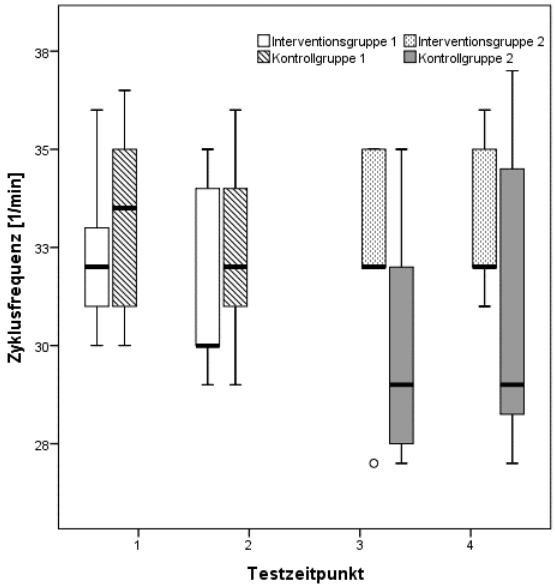


Abb. 45. Zyklusfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppen für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte

Zusammenfassend ließen sich anhand der Veränderungen, die sich bei den erhobenen leistungsphysiologischen Parametern im Verlauf der vier Stufentests im GA-II-Bereich unter AF 1 einstellten, folgende Ergebnisse für diesen Testabschnitt ableiten:

- Die Laktatwerte sanken nach dem ersten Atemtraining verglichen mit den Daten des Ausgangstests bei der Interventionsgruppe um 1,99 mmol/l (nicht signifikant), bei der Kontrollgruppe nur um 1,13 mmol/l ($p < 0,05$). Während der zweiten Intervention veränderten sich die Laktatwerte nur geringfügig.
- Die Herzfrequenz und die Sauerstoffaufnahme sanken auf dieser Stufe unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit kontinuierlich von Test 1 bis Test 3 und nahmen zu Test 4 wieder zu.
- Die Zyklusfrequenz veränderte sich bei dieser Intensität über den Zeitraum der Studie nicht.

7.4 Einfluss der Intensität auf leistungsphysiologische Parameter

Nachdem im vorherigen Kapitel beispielhaft die Veränderungen der leistungsphysiologischen Parameter von Test 1 bis Test 4 dargestellt worden sind, soll im Folgenden der Einfluss der Intensität innerhalb eines Stufentests erläutert werden. Dabei soll der Frage nachgegangen werden, ob sich die leistungsphysiologischen Parameter in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsstufe, dem Testzeitpunkt und der Gruppenzugehörigkeit (Interventions- bzw. Kontrollgruppe) in gleichem Maße verändern oder ob sich eine Wirkung des Atemtrainings nachweisen lässt.

Stellt man die im Strömungskanal erhobenen Parameter in Abhängigkeit von der Intensität dar, ergab sich erwartungsgemäß ein Anstieg von Laktat, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme und Zyklusfrequenz mit zunehmender Intensität. Dies ist in Tab. 23 und Abb. 46 exemplarisch für den ersten Test dargestellt und zeigte, dass die Messwerte grundsätzlich valide waren. Eine Darstellung der Ergebnisse aller vier Tests findet sich in Anhang 13.3.

Tab. 23. Laktat (oben links, in mmol/l), Herzfrequenz (oben rechts, in 1/min), $\dot{V}O_2$ (unten links, in l/min) und Zyklusfrequenz (unten rechts, in 1/min) aller an Test 1 teilnehmenden Probanden sowie Mittelwerte (MW) für die erste Interventions- und Kontrollgruppe (IG bzw. KG)

Proband	GA I	GA II	95 %
1	1,83	7,37	11,70
2	1,46	5,10	6,59
3	0,98	4,07	7,26
4	0,99	1,66	4,08
5	1,47	7,08	10,31
6	2,70	4,52	7,46
7	4,96	9,95	12,25
8	1,18	3,05	6,32
9	1,14	3,00	5,59
10	2,17	5,47	10,42
11	1,33	3,78	7,33
12	2,56	6,68	12,75
MW IG 1	1,57	4,96	7,90
MW KG 1	2,22	5,32	9,11

Proband	GA I	GA II	95 %
1	153	175	177
2	153	173	169
3	155	180	188
4	138	154	173
5			
6			
7			
8	151	178	187
9			
10			
11	152	177	187
12	156	178	185
MW IG 1	150	170	177
MW KG 1	153	177	186

Proband	GA I	GA II	95 %
1	2,847	3,375	3,455
2	2,258	3,513	3,522
3	3,007	3,394	3,530
4	1,961	2,288	0,000
5	4,764	6,460	5,626
6	5,041	5,150	5,692
7	5,368	4,977	5,007
8	2,120	3,140	3,379
9	2,091	3,153	3,248
10	3,922	4,118	4,805
11	2,984	4,090	3,678
12	4,392	6,190	5,870
MW IG 1	3,313	4,030	3,637
MW KG 1	3,480	4,278	4,331

Proband	GA I	GA II	95 %
1	31	37	40
2	27	31	33
3	27	32	38
4	31	34	39
5	26	33	39
6	29	40	36
7	28	34	37
8	26	31	36
9	26	31	37
10	25	35	37
11	33	36	39
12	29	35	42
MW IG 1	29	34	37
MW KG 1	28	33	38

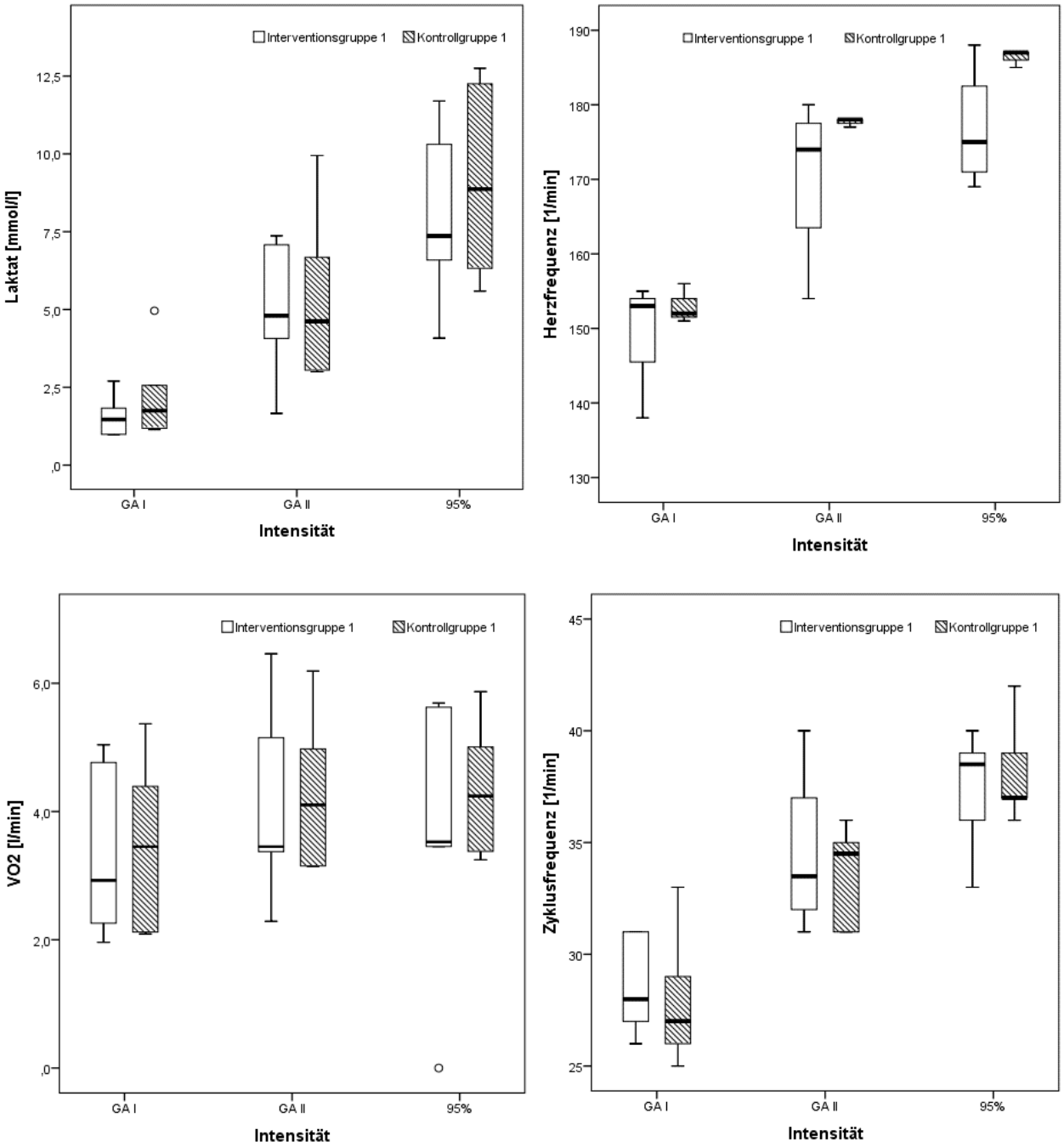


Abb. 46. Laktat (links oben), Herzfrequenz (rechts oben), $\dot{V}O_2$ (links unten) und Zyklusfrequenz (rechts unten) des ersten Tests für Interventions- und Kontrollgruppe

Um zu untersuchen, ob die Sportler bei jedem Test in gleichem Maße auf die zunehmende Intensität reagierten oder ob sich Trainings- bzw. Ökonomisierungseffekte zeigten, wurde der Anstieg der erfassten Parameter von einer Stufe zur nächsten und dessen Entwicklung über den Studienzeitraum hinweg ausgewertet.

Die Untersuchung der erhobenen Laktatwerte zeigte, dass der Anstieg von GA I auf GA II mit einer Ausnahme immer kleiner war als der von GA II auf 95 %. Dieses Verhalten ließ sich durch die unterschiedliche Steigung der Laktatleistungskurve unterhalb der anaeroben Schwelle (GA I), im aerob-anaeroben Übergangsbereich (GA II) und oberhalb der anaeroben Schwelle erklären (letzteres betraf hier die 95 %-Stufe; Schurr, 2013). Die erste Interventionsgruppe konnte nach Ende des Atemtrainings den Anstieg des Laktats von der GA-I- zur GA-II-Belastung deutlich reduzieren (von 3,4 mmol/l auf 1,82 mmol/l). Der Anstieg von der GA-II-Stufe zur 95 %-Belastung blieb jedoch gleich. Die Laktatwerte der ersten Kontrollgruppe zeigten grundsätzlich das gleiche Verhalten, der Anstieg von GA I auf GA II konnte jedoch weniger stark reduziert werden. Die Zunahme des Laktats von der GA-II- zur 95 %-Stufe blieb auch hier unverändert (Tab. 24). Auch im Vergleich der Ergebnisse von Test 3 und 4 zeigte sich, dass die Interventionsgruppe 2 in stärkerem Maße in der Lage war, den Laktatanstieg von einer Teststufe zur nächsten zu reduzieren. Bei beiden Gruppen kam es in diesem Zeitraum auch zu einer Verringerung des Anstiegs von der GAII- zur 95 %-Stufe.

Tab. 24. Laktatwerte [mmol/l] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) sowie Laktatanstieg [mmol/l] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %)

	GA I	GA II	95%	GA I → GA II	GA II → 95%
Test 1					
IG 1	1,57	4,96	7,90	3,40	2,94
KG 1	2,22	5,32	9,11	3,10	3,79
Test 2					
IG 1	1,09	2,91	5,87	1,82	2,97
KG 1	1,41	3,96	7,73	2,54	3,78
Test 3					
IG 2	1,07	3,35	6,35	2,28	3,00
KG 2	1,16	3,29	5,53	2,13	2,24
Test 4					
IG 2	1,32	3,27	5,43	1,96	2,16
KG 2	1,44	3,38	5,82	1,94	2,44

Die Herzfrequenz stieg beim Wechsel von der GA-I- zur GA-II-Stufe in allen Fällen mindestens doppelt so stark an wie bei der Steigerung der Intensität von GA II auf 95 % (Tab. 25). Dieses Verhalten entsprach, da die Intensität beim ersten Stufenwechsel um 10 %, beim zweiten nur um 5 % zunimmt, dem linearen Anstieg der Herzfrequenz in Abhängigkeit von der Intensität mit Abflachen der Kurve oberhalb der anaeroben Schwelle (Weineck, 2004). Unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit nahm die Zunahme der Herzfrequenz von der GA-I- zur GA-II-Belastung von Test 1 bis Test 4 leicht ab.

Tab. 25. Herzfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) sowie Frequenzanstieg [1/min] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %)

	GA I	GA II	95%	GA I → GA II	GA II → 95%
Test 1					
IG 1	150	170	177	21	6
KG 1	153	177	186	25	9
Test 2					
IG 1	147	170	181	23	11
KG 1	155	177	186	22	10
Test 3					
IG 2	149	171	180	21	9
KG 2	149	168	177	19	9
Test 4					
IG 2	159	175	182	16	7
KG 2	149	168	176	19	8

Die Auswertung der Zunahme der $\dot{V}O_2$ von einer Stufe zur nächsten ergab einen deutlich größeren Anstieg vom GA I- zum GA-II-Bereich als beim Wechsel von der GA-II- zur 95 %-Belastung (Faktor 2-8, Tab. 26). Die Ergebnisse entsprachen damit dem linearen Anstiegsverhalten der Sauerstoffaufnahme mit der Intensität, im Bereich der hohen Intensitäten war z. T. schon das unter Ausbelastung auftretende Abflachen der $\dot{V}O_2$-Kurve zu erkennen (Kroidl et al., 2014). Die Messwerte zeigten unabhängig von der Gruppe über den gesamten Studienzeitraum ein ähnliches Verhalten, die Absolutwerte veränderten sich dabei nur geringfügig.

Tab. 26. Sauerstoffaufnahme [l/min] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) sowie $\dot{V}O_2$-Anstieg [l/min] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %)

	GA I	GA II	95%	GA I → GA II	GA II → 95%
Test 1					
IG 1	3,313	4,030	3,637	0,717	-0,393
KG 1	3,480	4,278	4,331	0,799	0,053
Test 2					
IG 1	3,088	3,932	4,161	0,844	0,229
KG 1	3,742	4,708	4,686	0,965	-0,022
Test 3					
IG 2	2,934	3,685	4,082	0,751	0,397
KG 2	3,284	3,887	4,433	0,603	0,547
Test 4					
IG 2	3,194	3,860	4,157	0,665	0,297
KG 2	3,333	4,146	4,277	0,812	0,131

In allen Gruppen war ein größerer Anstieg der Zyklusfrequenz bei der Steigerung der Intensität von GA I auf GA II als beim Wechsel von der GA-II- zur 95 %-Stufe zu beobachten (Tab. 27). Dieses Verhalten entsprach annähernd einer prozentual in gleichem Maße wie die Geschwindigkeit gesteigerten Frequenz (Schramm, 1987). Die erste Interventions- und spätere zweite Kontrollgruppe konnte von Test 1 bis Test 3 sowohl die absolute Größe der Frequenz als auch den Anstieg von der GA-I- zur GA-II-Belastung kontinuierlich reduzieren. So betrug die Frequenzzunahme von der ersten zur zweiten Stufe im ersten Test +6/min, im dritten Test nur noch +3/min. Im vierten Test stiegen die Werte absolut und relativ wieder leicht an. Im Gegensatz dazu kam es bei der ersten Kontroll- bzw. zweiten Interventionsgruppe während Test 1-4 nur zu unsystematischen Veränderungen.

Tab. 27. Zyklusfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) und Frequenzanstieg [1/min] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %)

	GA I	GA II	95%	GA I → GA II	GA II → 95%
Test 1					
IG 1	29	34	37	6	3
KG 1	28	33	33	6	4
Test 2					
IG 1	28	32	32	5	4
KG 1	28	33	33	6	5
Test 3					
IG 2	26	33	33	7	4
KG 2	27	30	30	3	3
Test 4					
IG 2	28	34	34	6	3
KG 2	28	32	32	4	3

Zusammenfassend ließen sich aufgrund der Betrachtung der leistungsdiagnostischen Parameter in Abhängigkeit von der Intensität folgende Aussagen ableiten:

- Die erhobenen Messdaten waren grundsätzlich valide.
- Der Anstieg der Laktatwerte von einer Intensität zur nächsten nahm bei allen Sportlern von einem Test zum nächsten ab, bei der jeweiligen Interventionsgruppe jedoch stärker als bei der Kontrollgruppe. Dies betraf während der ersten Intervention nur den Stufenwechsel von der GA-I- zur GA-II-Belastung, während der zweiten Intervention auch den Wechsel von der GA-II- zur 95 %-Stufe.
- Die Herzfrequenz stieg beim Wechsel von GA-I- zur GA-II-Belastung unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit im Verlauf der Studie zunehmend weniger stark an.
- Die Sauerstoffaufnahme veränderte sich über den Gesamtzeitraum der Untersuchung nur geringfügig.
- Die erste Interventions- bzw. zweite Kontrollgruppe konnte den Anstieg der Zyklusfrequenz bei der Steigerung der Intensität von GA I auf GA II von Test 1 bis Test 3 kontinuierlich verringern.

7.5 Einfluss der Atemfrequenz auf leistungsphysiologische Parameter

Nachdem im vorhergehenden Kapitel beschrieben wurde, in welchem Maße die erhobenen leistungsphysiologischen Parameter mit der Intensität anstiegen, soll nun dargestellt werden, wie sich innerhalb der drei Intensitätsstufen die Einschränkung der Atemfrequenz auf das Laktat, die Herzfrequenz, die Sauerstoffaufnahme und die Zyklusfrequenz auswirkte. Die grundsätzliche leistungsphysiologische Reaktion auf eine eingeschränkte Atmung wird dabei am Beispiel der Messwerte des gesamten Probandenkollektivs im ersten Stufentest erläutert. Um den Einfluss der POWERbreathe-Intervention zu bewerten, wird im weiteren Verlauf des Kapitels auf die Reaktion der leistungsphysiologischen Parameter in Abhängigkeit von der Gruppenzugehörigkeit und deren Veränderung im Verlauf der Studie eingegangen.

7.5.1 Betrachtung der Gesamtgruppe vor Studienbeginn

Da zum Zeitpunkt des ersten Stufentests noch kein Atemtraining stattgefunden hatte, war eine Betrachtung des Probandenkollektivs als Gesamtgruppe zulässig. Es bot sich daher an, anhand der Daten des ersten Tests das grundsätzliche Verhalten der erfassten leistungsphysiologischen Parameter unter eingeschränkter Atmung zu untersuchen. Dazu wurden innerhalb der drei Intensitätsstufen jeweils die Ergebnisse des Intervalls, das mit AF 1 geschwommen wurde, mit dem entsprechenden AF-2-Intervall verglichen.

Im GA-I-Bereich konnte bei zehn von zwölf Probanden ein Rückgang des Laktats beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 ermittelt werden. Der Mittelwert der Gruppe sank signifikant von 2,12 mmol/l auf 1,67 mmol/l (r = 0,56; Tab. 28). Auf den beiden folgenden Geschwindigkeitsstufen stieg der Laktatwert jedoch durch die Einschränkung der Atmung an (Abb. 47), auf der 95 %-Stufe sogar signifikant von 7,83 mmol/l auf 9,18 mmol/l, was einem großen Effekt entsprach (r = 0,62). Hier erzielten alle Einzelsportler unter AF 2 eine höhere Laktatkonzentration als unter AF 1.

Tab. 28. Laktat [mmol/l] aller Probanden von Test 1 für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2), Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2

	GA I		GA II		95 %	
Proband	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
1	2,16	1,49	6,53	8,21	11,3	12,1
2	1,9	1,02	5,15	5,04	6,55	6,63
3	1,22	0,73	4,06	4,07	5,83	8,69
4	1,07	0,9	1,81	1,5	3,33	4,82
5	1,72	1,21	6,02	8,14	9,92	10,7
6	2,66	2,73	4,23	4,8	6,09	8,82
7	5,09	4,82	8,89	11,0	12,1	12,4
8	1,57	0,79	3,29	2,80	5,96	6,67
9	1,01	1,26	2,82	3,17	5,1	6,07
10	2,51	1,83	5,47		9,44	11,4
11	1,69	0,96	3,73	3,82	6,71	7,95
12	2,86	2,25	5,23	8,12	11,6	13,9
MW Gesamtgruppe	2,12	1,67	4,77	5,52	7,83	9,18
p		0,003		0,083		0,000
r		0,56		0,38		0,62

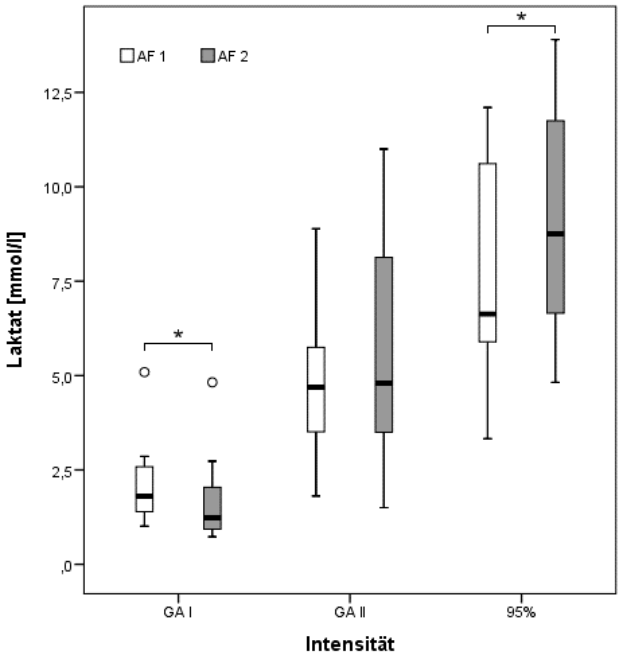


Abb. 47. Laktat [mmol/l] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2)

Die Herzfrequenz blieb unter Einschränkung der Atmung im GA-I-Bereich unverändert und sank auf den beiden folgenden Stufen bei sechs der sieben erfassten Sportler (Tab. 29 und Abb. 48). Dies bedeutete im GA-II-Bereich eine Reduzierung der Pulsfrequenz von 175 auf 172 Schläge pro Minute sowie auf der 95 %-Stufe eine Senkung von 183 auf 178 Schläge pro Minute beim Wechsel von AF 1 zu AF 2. Beide Veränderungen waren signifikant und entsprachen mit r = 0,59 einem großen Effekt.

Tab. 29. Herzfrequenz [1/min] aller teilnehmenden Probanden zum Zeitpunkt des ersten Tests für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2), Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2

	GA I		GA II		95 %	
Proband	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
1	152	153	176	173	182	172
2	150	156	177	169	171	166
3	154	156	181	179	188	188
4	137	138	156	152	176	169
5						
6						
7						
8	156	146	178	177	188	185
9						
10						
11	152	151	177	177	188	185
12	157	155	179	176	187	182
MW Gesamtgruppe	151	151	175	172	183	178
p		1,000		0,031		0,031
r		0,02		0,59		0,59

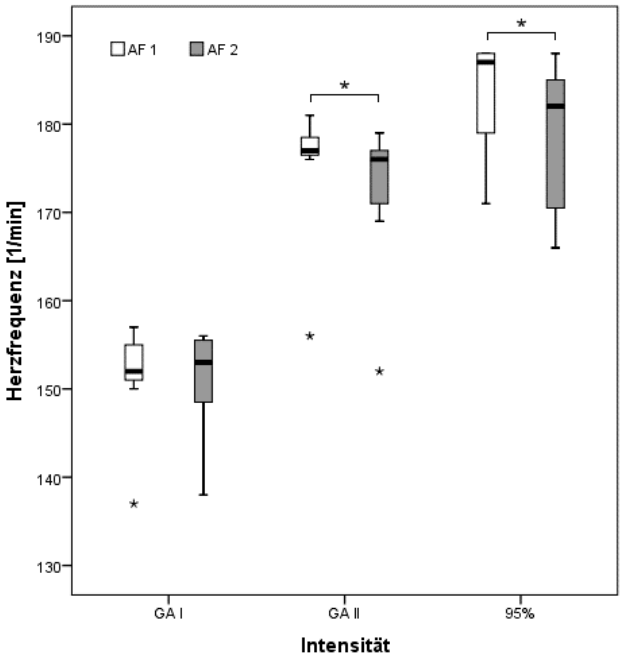


Abb. 48. Herzfrequenz [1/min] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2)

Die Ergebnisse der Sauerstoffaufnahme blieben von der Einschränkung der Atemfrequenz nahezu unberührt (Abb. 49). Im GA-I-Bereich stieg der Mittelwert der Gruppe beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 leicht von 3,183 l/min auf 3,455 l/min (Tab. 30), die Werte der beiden folgenden Stufen unterschieden sich nur geringfügig. Alle Veränderungen waren nicht signifikant bei kleiner oder mittlerer Effektstärke.

Tab. 30. $\dot{V}O_2$ [l/min] aller teilnehmenden Probanden zum Zeitpunkt des ersten Tests für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2), Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2

	GA I		GA II		95 %	
Proband	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
1	3,004	2,691	3,380	3,371	3,473	3,438
2	2,746	1,770	3,558	3,468	3,429	3,615
3	3,108	2,905	3,420	3,369	3,638	3,421
4	2,061	1,862	2,467	2,108		
5	4,504	5,023	5,874	7,046	5,706	5,546
6		5,041	4,981	5,320	5,683	5,700
7	4,894	5,842	5,114	4,841	4,796	5,219
8	2,042	2,198	3,179	3,101	3,282	3,477
9	1,861	2,321	2,998	3,307	3,114	3,381
10	3,568	4,276	4,122	4,113	4,629	4,980
11	2,957	3,011	4,647	3,534	3,703	3,653
12	4,263	4,520	6,076	6,305	5,807	5,932
MW Gesamtgruppe	3,183	3,455	4,151	4,157	4,296	4,397
p		0,465		0,791		0,206
r		0,17		0,06		0,28

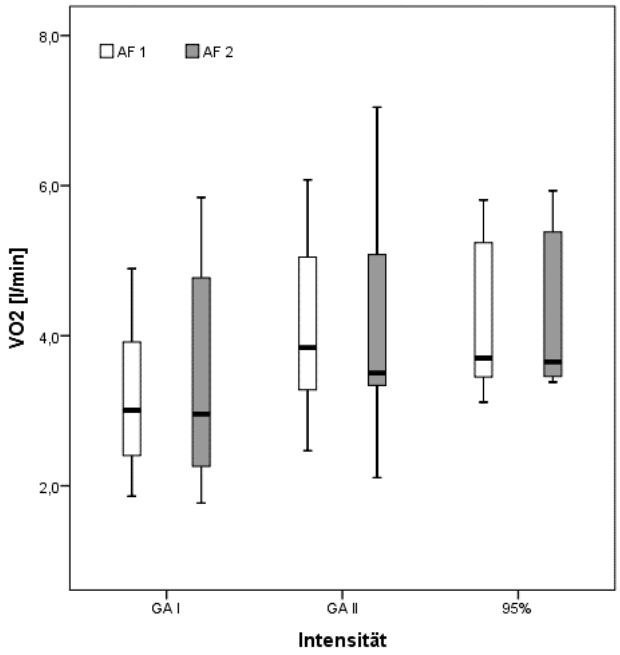


Abb. 49. $\dot{V}O_2$ [l/min] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2)

Die Zyklusfrequenz stieg beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 bei allen Intensitäten im Mittel um 1/min an (Tab. 31 und Abb. 50). Dabei konnte lediglich Sportler 11 die Frequenz auf allen Stufen reduzieren, die Werte der übrigen Sportler blieben z. T. konstant bzw. stiegen um bis zu 5/min an (Sportler 8). Alle Veränderungen, die aus der Einschränkung der Atmung resultierten, waren nicht signifikant bei mittlerer Effektgröße.

Tab. 31. Zyklusfrequenz [1/min] aller teilnehmenden Probanden zum Zeitpunkt des ersten Tests für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2), Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2

	GA I		GA II		95 %	
Proband	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
1	31	31	36	37	40	40
2	27	28	30	31	33	
3	26	27	31	32	37	38
4	31	32	33	34	38	39
5	27	26	32	34	37	41
6	28	31		40	36	36
7	28	29	33	34	36	37
8	26	26	30	31	33	38
9	25	27	31	31	35	38
10	24	26	35	35	40	34
11	34	32	37	35	39	39
12	27	30	34	35	40	43
MW Gesamtgruppe	28	29	33	34	37	38
p		0,088		0,117		0,172
r		0,36		0,39		0,30

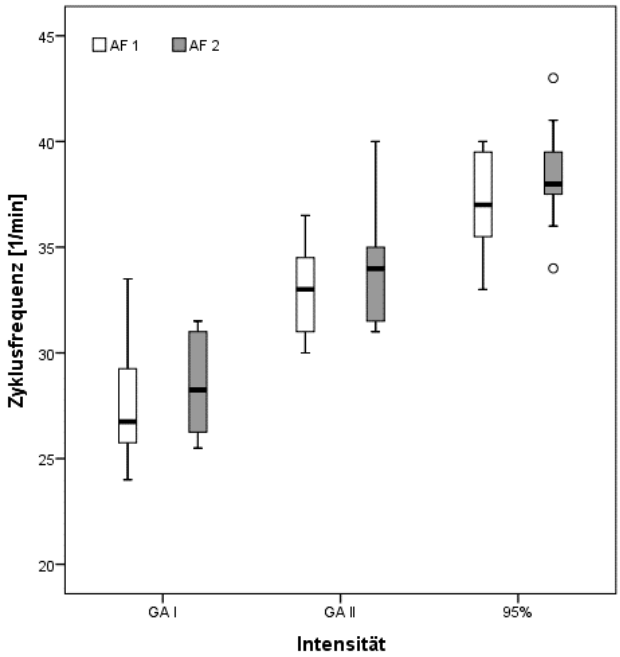


Abb. 50. Zyklusfrequenz [1/min] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2)

7.5.2 Entwicklung der leistungsphysiologischen Reaktion im Studienverlauf

Um zu bewerten, ob das Atemtraining eine Änderung der im vorhergehenden Abschnitt dargestellten leistungsphysiologischen Reaktionen auf eine Atmungseinschränkung bewirkt hat, wurde die Entwicklung der vier erfassten Parameter über die vier Tests hinweg in Abhängigkeit von der Gruppenzugehörigkeit untersucht. Dazu wurden für jeden Test, jede Interventions- bzw. Kontrollgruppe und jede Intensitätsstufe jeweils Laktatkonzentration, Herzfrequenz, Sauerstoffaufnahme und Zyklusfrequenz unter AF 1 dem entsprechenden Messwert unter AF 2 gegenübergestellt.

Die Auswertung der Laktatwerte ergab für die GA-I-Belastung bei Interventions- und Kontrollgruppe im ersten und zweiten Test eine leichte Reduzierung der Laktatwerte beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 (Tab. 32). Die Probanden der Interventionsgruppe konnten dabei das Laktat etwas stärker reduzieren (-0,56 mmol/l im ersten, -0,46 mmol/l im zweiten Test) als die Kontrollgruppe (-0,23 mmol/l bzw. -0,21 mmol/l). Während des dritten und vierten Tests kam es hingegen zu unsystematischen Veränderungen. Im GA-II-Bereich konnte unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit ein leichter Anstieg der Laktatwerte unter eingeschränkter Atmung beobachtet werden. Diese Tendenz veränderte sich im Laufe der vier Tests nicht. Die deutlichsten Effekte der Atmungseinschränkung auf das Laktat zeigten sich auf der letzten Geschwindigkeitsstufe (95 %). Sowohl Interventions- als auch Kontrollgruppe reagierten zum Zeitpunkt des ersten Tests mit einem signifikanten Laktatanstieg auf den Wechsel von AF 1 zu AF 2. Nach dem ersten Atemtraining (Test 2) konnte eine ähnliche Zunahme der Laktatkonzentration gemessen werden; dieser war bei der ersten Interventionsgruppe nicht mehr signifikant, bei der ersten Kontrollgruppe hingegen schon. Die ersten Interventions- bzw. spätere zweite Kontrollgruppe konnte darüber hinaus den Laktatanstieg auf der 95 %-Stufe von Test 1 bis Test 4 kontinuierlich verringern (von +1,46 mmol/l auf +0,93 mmol/l, Test 3 und 4 signifikant). Im Gegensatz dazu wies die erste Kontroll- bzw. zweite Interventionsgruppe zum Test 4 wieder

einen Anstieg der Laktatdifferenz von AF 1 zu AF 2 auf (Test 3 und 4 nicht signifikant). Unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit und dem Testzeitpunkt führte die Einschränkung der Atemfrequenz im GA-I-Bereich und bei der 95%-Belastung zu großen, auf der GA-II-Stufe zu mittleren Effekten hinsichtlich der Veränderung des Laktats. Zu keinem der vier Testzeitpunkte bestand ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

Tab. 32. Mittelwerte des Laktats [mmol/l] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe)

	GA I				GA II				95 %			
	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r
Test 1												
IG 1	1,90	1,35	0,063	0,58	4,63	5,29	0,313	0,33	7,17	8,63	0,031	0,64
KG 1	2,46	2,22	0,063	0,58	4,91	5,78	0,313	0,38	8,49	9,73	0,031	0,64
Test 2												
IG 1	1,39	0,93	0,125	0,65	2,64	3,17	0,313	0,38	5,18	6,57	0,063	0,64
KG 1	1,57	1,36	0,063	0,64	3,78	3,64	0,625	0,19	7,12	8,35	0,031	0,64
Test 3												
IG 2		1,06			2,76	3,07	0,188	0,47	5,92	6,69	0,125	0,55
KG 2	1,52	1,17	0,063	0,64	3,03	3,55	0,125	0,43	4,90	6,16	0,031	0,64
Test 4												
IG 2	0,91	1,16	0,063	0,64	3,15	3,49	0,188	0,47	5,03	5,83	0,063	0,64
KG 2	1,56	1,46	0,188	0,47	3,04	3,73	0,219	0,36	5,43	6,37	0,031	0,59

Die Herzfrequenz war unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit bei eingeschränkter Atmung (AF 2) niedriger als bei normaler Atemfrequenz (AF 1). Diese Tendenz zeigte sich grundsätzlich über alle vier Tests hinweg, war aber nicht in allen Intensitätsbereichen gleichermaßen ausgeprägt (Tab. 33). Im GA-I-Bereich kam es zu abweichenden Veränderungen, da z. B. die Herzfrequenz der ersten Interventionsgruppe im ersten und zweiten Test beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 anstieg. Dies traf beim ersten Test auch auf die Kontrollgruppe zu; zu diesem Zeitpunkt entsprach die Einschränkung der Atemfrequenz bei beiden Gruppen einem großen Effekt (r = 0,65). In allen weiteren Tests kam es hingegen bei beiden Gruppen zur angesprochenen Pulsfrequenzverringerung bei der Reduzierung der Atemfrequenz, was kleinen bis mittleren Effekten entsprach. Auf den GA-II-Stufen war die Pulsfrequenz durchgehend bei beiden Gruppen im mit AF 2 geschwommenen Abschnitt niedriger als im AF 1-Intervall, wobei die erste Interventions- bzw. zweite Kontrollgruppe in allen Tests in der Lage war, eine größere Reduktion der Frequenz zu realisieren als die andere Hälfte des Probandenkollektivs. Auch bei dieser Intensität war der Effekt der Hypoventilation auf die Herzfrequenz beim ersten Test besonders groß (r = 0,65 bei der ersten Interventionsgruppe, r = 0,55 bei der ersten Kontrollgruppe), sank hingegen bei allen weiteren Tests auf kleine bis mittlere Werte. Auch auf der letzten Stufe (95 %) konnten beide Gruppen in allen vier Tests die Herzfrequenz unter AF 2 verringern, ein Einfluss der Gruppenzugehörigkeit zeigte sich dabei nicht. Bei dieser Intensität ließen sich für alle Untergruppen große Effektstärken nachweisen. Alle genannten Veränderungen waren nicht signifikant. Darüber hinaus bestand zu keinem der vier Testzeitpunkte ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen.

Tab. 33. Mittelwerte der Herzfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe)

	GA I				GA II				95 %			
	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r
Test 1												
IG 1	148	151	0,125	0,65	173	168	0,125	0,65	179	174	0,250	0,57
KG 1	155	151	0,250	0,65	178	177	0,500	0,55	188	184	0,250	0,67
Test 2												
IG 1	147	148	0,750	0,12	171	168	0,500	0,29	182	179	0,125	0,58
KG 1	149	145	0,188	0,43	173	172	0,688	0,20	184	183	0,094	0,55
Test 3												
IG 2	151	150	0,813	0,12	170	168	1,000	0,03	181	180	0,125	0,58
KG 2	150	148	0,203	0,39	169	165	0,719	0,15	178	177	0,250	0,44
Test 4												
IG 2	159	158	0,500	0,29	175	175	0,875	0,12	184	179	0,125	0,65
KG 2	149	149	0,469	0,21	169	166	0,531	0,23	177	175	0,094	0,51

Die Sauerstoffaufnahme zeigte unter Einschränkung der Atemfrequenz in beiden Gruppen unsystematische Veränderungen sowohl bezogen auf die Intensität als auch auf den Studienverlauf, was sich auch in der Größenordnung der Effektstärke widerspiegelte (Tab. 34). Beim Vergleich der jeweiligen AF-1- und AF-2-Intervalle konnte lediglich ein leichter Anstieg der Werte bei den meisten Abschnitten des Stufentests festgestellt werden. Die größten Veränderungen beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 waren dabei bei der ersten Kontrollgruppe im ersten Test (+0,430 l/min im GA-I-Bereich, $p < 0,05$, $r = 0,64$) sowie bei der zweiten Interventionsgruppe im dritten Test (+0,634 l/min, ebenfalls GA I, nicht signifikant, $r = 0,58$) zu verzeichnen. Mit der Intensität nahm die Größenordnung der Differenzen zwischen Abschnitten, die mit AF 1 geschwommen wurden, und AF 2-Abschnitten ab, so dass die Veränderungen auf der 95 %-Stufe in allen Tests und bei beiden Gruppen unter 0,26 l/min lagen. Mit einer Ausnahme (Kontrollgruppe 1, Test 1, GA I) waren alle gemessenen Differenzen beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 nicht signifikant. Auch der Vergleich der beiden Gruppen untereinander ergab zu keinem der vier Testzeitpunkte signifikante Unterschiede.

Tab. 34. Mittelwerte der Sauerstoffaufnahme [l/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe)

	GA I				GA II				95 %			
	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r
Test 1												
IG 1	3,085	2,850	0,438	0,30	3,740	3,872	1,000	0,03	4,061	4,005	0,625	0,21
KG 1	3,264	3,695	0,031	0,64	4,356	4,200	0,688	0,15	4,107	4,285	0,063	0,58
Test 2												
IG 1	3,046	3,131	1,000	0,04	3,825	4,040	0,313	0,38	4,170	4,286	0,313	0,38
KG 1	3,756	3,729	0,563	0,21	4,573	4,843	0,438	0,27	4,726	4,646	0,438	0,30
Test 3												
IG 2	2,617	3,252	0,063	0,58	3,545	3,824	0,156	0,45	3,929	4,190	0,438	0,30
KG 2	3,245	3,322	0,219	0,36	3,852	3,921	0,469	0,23	4,302	4,565	0,094	0,51
Test 4												
IG 2	3,054	3,335	0,125	0,55	3,707	4,012	0,125	0,55	4,199	4,115	0,625	0,21
KG 2	3,156	3,511	0,078	0,50	4,170	4,122	0,688	0,14	4,251	4,303	0,469	0,23

Die Zyklusfrequenz nahm bei allen Tests bei beiden Gruppen in allen drei Intensitätsbereichen zu oder blieb konstant, wenn die Atemfrequenz von AF 1 auf AF 2 reduziert wurde (Tab. 35). Mit Ausnahme von drei Werten konnten dabei mittlere bis große Effektstärken berechnet werden. Die Frequenzzunahme stieg dabei mit der Intensität an, so dass auf der 95 %-Stufe die größten Differenzen zwischen AF-1- und AF-2-Abschnitten zu verzeichnen waren. Im GA-I- und GA-II-Bereich nahm die Zyklusfrequenz unabhängig von der Gruppe in allen vier Tests um 0-2/min zu. Der einzige signifikante Anstieg wurde dabei im vierten Test von der zweiten Kontrollgruppe erreicht (Steigerung von 31/min auf 33/min, r = 0,60). Auf der letzten Geschwindigkeitsstufe (95 %) konnte die erste Interventions- und spätere zweite Kontrollgruppe den Anstieg der Zyklusfrequenz unter Atmungseinschränkung kontinuierlich von +3/min (Test 1) auf +1/min (Test 4) verringern. Die erste Kontroll- und zweite Interventionsgruppe zeigte hingegen über alle vier Tests hinweg ein ähnliches Verhalten beim Wechsel der Atemfrequenz von AF 1 zu AF 2. Der Anstieg von 32 auf 35 Schläge pro Minute im dritten Test war dabei signifikant. Bei allen weiteren genannten Veränderungen konnte ebenso wenig Signifikanz nachgewiesen werden wie beim Vergleich der beiden Gruppen untereinander zum Testzeitpunkt 1 bis 4.

Tab. 35. Mittelwerte der Zyklusfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe)

	GA I				GA II				95 %			
	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r	AF 1	AF 2	p	r
Test 1												
IG 1	28	29	0,313	0,36	32	34	0,063	0,67	37	40	0,250	0,52
KG 1	27	28	0,375	0,31	33	34	1,000	0,11	37	38	0,625	0,20
Test 2												
IG 1	27	28	0,375	0,41	32	33	0,125	0,59	36	38	0,063	0,65
KG 1	28	28	1,000	0,03	32	34	0,063	0,59	37	39	0,250	0,42
Test 3												
IG 2	26	27	0,500	0,34	32	34	0,063	0,65	37	38	0,500	0,36
KG 2	26	28	0,063	0,53	30	31	0,250	0,35	32	35	0,031	0,64
Test 4												
IG 2	28	27	1,000	0,12	33	35	0,250	0,47	36	38	0,250	0,48
KG 2	27	28	0,063	0,54	31	33	0,031	0,60	34	35	0,188	0,44

Zusammenfassend ließen sich anhand der Darstellung der Ergebnisse der vier Stufentests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz folgende Aussagen treffen:

- Zum Zeitpunkt des ersten Tests nahm im GA-I-Bereich bei fast allen Sportlern der Gesamtgruppe das Laktat ab, wenn die Atemfrequenz von AF 1 auf AF 2 reduziert wurde.
- Hingegen zeigte sich auf der GA-II- und der 95 %-Stufe eine z. T. signifikant höhere Laktatkonzentration beim Wechsel von AF 1 zu AF 2. Gleichzeitig sank auf diesen Stufen die Herzfrequenz signifikant bei Einschränkung der Atemfrequenz.
- In allen drei Intensitätsbereichen nahm die Zyklusfrequenz beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 um 1/min zu.
- Die Auswertung der Ergebnisse aller vier Tests ergab, dass die erste Interventionsgruppe vor dem Atemtraining auf der 95 %-Stufe mit signifikant höherem Laktat auf die Einschränkung der Atemfrequenz reagierte, nach dem Atemtraining hingegen nicht mehr. Die Laktatwerte der Kontrollgruppe stiegen bei beiden Tests signifikant.
- Die Herzfrequenz war unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit und vom Testzeitpunkt unter AF 2 niedriger als unter AF 1.
- Hingegen stieg die Zyklusfrequenz in den AF 2-Intervallen bei beiden Gruppen in allen Tests an. Die erste Interventions- bzw. zweite Kontrollgruppe konnte auf der 95 %-Stufe den Frequenzanstieg von Test 1 bis Test 4 kontinuierlich reduzieren, während die Ergebnisse der anderen Hälfte des Probandenkollektivs in einer ähnlichen Größenordnung blieben.

7.6 Zusammenhänge zwischen leistungsphysiologischen Parametern und den Ergebnissen des POWERbreathe-Trainings

Die in den vorhergehenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse beleuchten jeweils Teilaspekte der sich im Studienverlauf ändernden körperlichen Leistungsfähigkeit der teilnehmenden Sportler. Um die genannten Faktoren in einen Gesamtkontext zu bringen und über die Kenntnis von Abhängigkeiten die Wirkung eines Atemtrainings mittels Vorgabe von wirksamen Reizen lenken zu können, wurden die erfassten leistungsphysiologischen und Lungenfunktionsparameter sowie die Ergebnisse des POWERbreathe-Trainings auf Zusammenhänge untersucht.

Das Ziel war dabei insbesondere die Ermittlung eines aussagekräftigen Parameters, der zur Trainingssteuerung genutzt werden kann. Dies erfolgte auf Basis der Parameter, bei denen sich im Lungenfunktions- oder Stufentest eine deutliche Veränderung als Reaktion auf das Atemtraining nachweisen ließ. Zur Bewertung der Auswirkungen der POWERbreathe-Intervention auf die Lungenfunktion wurde das maximale Minutenvolumen (MVV) ausgewählt, da sich bezogen auf die untersuchten Lungenfunktionswerte bei diesem Parameter die größten Veränderungen gezeigt hatten. Für die Auswertung wurden die Prä-Post-Differenzen des MVV berechnet. Um zu untersuchen, ob Zusammenhänge zwischen dem Umfang des durchgeführten Atemtrainings und der beobachteten Laktatsenkung bestanden, wurde die Prä-Post-Differenz der Laktatwerte in den drei Belastungsbereichen GA I, GA II und 95 % herangezogen. Darüber hinaus sollte eine Auswertung der Differenz der Zyklusfrequenzen zwischen Prä- und Post-Test bzw. der davon abgeleiteten Zykluszeit (Zeit, die für einen Bewegungszyklus benötigt wird) zeigen, ob der Trainingsumfang des POWERbreathe-Trainings sich auf die Bewegungsstruktur während des Stufentests ausgewirkt hat. Bei allen Parametern wurden die Ergebnisse aller Teilnehmer der beiden Interventionen zusammen ausgewertet. Dass dies zulässig ist, ist bereits in Kapitel 7.2 (Auswertung des Atemtrainings) mittels eines Mann-Whitney-U-Tests gezeigt worden.

Mit einem Mediansplit wurden die Prä-Post-Differenzen des MVV, der Laktatwerte und der aus der Zyklusfrequenz berechneten Zykluszeit dichotomisiert und in einer Kreuztabelle der Anzahl der durchgeführten Einheiten, der nach acht Wochen mit dem POWERbreathe-Gerät erreichten Leistung und der Steigerung der Leistung, bezogen auf den Ausgangswert (ΔP), gegenübergestellt (auch diese Parameter wurden jeweils per Mediansplit unterteilt). Die Daten der untersuchten Parameter wurden dabei jeweils in eine Gruppe mit geringer Veränderung bzw. Steigerung (Werte, die kleiner oder gleich dem Median waren) und eine mit großer Veränderung bzw. Steigerung (Werte, die größer als der Median waren) unterteilt. Hierbei wurden drei verschiedene Parameter des Atemtrainings berücksichtigt, um zu ermitteln, welcher der Messwerte die Veränderung leistungsphysiologischer Zusammenhänge durch Training am besten abbildet. Der Bezug zur Anzahl der durchgeführten Einheiten war angezeigt, um den Trainingsumfang abzubilden. Dieser sagt jedoch unter Umständen nichts über die Wirksamkeit des Trainings aus, da die Sportler zwar angehalten waren, die Belastung kontinuierlich zu steigern, das Vorliegen eines adäquaten Reizes jedoch nicht kontrolliert werden konnte. Da eine besser trainierte Atemmuskulatur sich unter anderem dadurch auszeichnet, eine schnellere Inspiration realisieren zu können, wurde zusätzlich die nach Abschluss der Intervention erzielte Leistung sowie die Steigerung zum Ausgangswert in die Auswertung einbezogen.

Um vorab zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der absolvierten Einheiten und der erzielten Leistung nach acht Wochen bestand, wurden zunächst Leistung und Leistungssteigerung der Trainingshäufigkeit gegenübergestellt. Die resultierenden Kreuztabellen zeigten, dass 66,6 % der Sportler, die

nur wenig trainiert haben, auch nur eine geringe Leistung bzw. Leistungssteigerung erreichen konnten. Bei den Sportlern mit hoher Trainingshäufigkeit erzielten 66,6 % auch eine hohe Leistung sowie eine große Leistungssteigerung (Tab. 36). Die Sportler mit geringer Trainingshäufigkeit erreichten dabei im Mittel eine Leistung von 9,2 ± 4,3 W und eine Steigerung in Bezug auf den Ausgangswert um 5,3 ± 4,9 W. Dagegen konnten sich die Sportler, die viel trainiert hatten, eine Leistung von 11,6 ± 2,4 W erzielen, was einer Steigerung um 7,5 ± 1,8 W entsprach (Tab. 37).

Tab. 36. Kreuztabellen mit Mediansplit der Leistung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Leistungssteigerung bezogen auf die Trainingshäufigkeit (unten). Geringe Leistung: Leistung ≤ Median der Leistung, hohe Leistung: Leistung > Median der Leistung; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Trainingshäufigkeit		
Leistung	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainingshäufig-keit**	**Gesamt**
geringe Leistung	4 66,7 %	2 33,3 %	6 50,0 %
hohe Leistung	2 33,3 %	4 66,7 %	6 50,0 %
Gesamt	6 100,0 %	 100, 0 %	12 100,0 %

	Trainingshäufigkeit		
Leistungssteigerung	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainingshäufig-keit**	**Gesamt**
geringe Steigerung	4 66,7 %	2 33,3 %	6 50,0 %
große Steigerung	2 33,3 %	4 66,7 %	6 50,0 %
Gesamt	6 100,0 %	6 100,0 %	12 100,0 %

Es fiel auf, dass innerhalb der beiden Interventionsgruppen immer diejenige Hälfte der Sportler besser (im Sinne einer höheren Leistung bzw. einer größeren Leistungssteigerung) abschnitt, die alle oder mehr männliche Probanden enthielt. Diese Tendenz zeigte sich unabhängig von der Trainingshäufigkeit. Insgesamt ließ sich aber ein Zusammenhang zwischen der Trainingshäufigkeit und der Leistung bzw. der Leistungssteigerung feststellen.

Tab. 37. Leistung [W] und Leistungssteigerung [W] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

	Trainingshäufigkeit	
	gering	hoch
Leistung [W]		
MW	9,2	11,6
STABW	4,3	2,4

Leistungssteigerung [W]		
MW	5,3	7,5
STABW	4,9	1,8

Stellt man die Prä-Post-Differenz des MVV den absolvierten Einheiten sowie der Leistung nach acht Wochen und der Leistungssteigerung in diesem Zeitraum gegenüber, ergab sich in der Kreuztabellen-Auswertung ein Zusammenhang zwischen Trainingshäufigkeit und Steigerung des MVV. 66,6 % der Sportler, die wenig trainiert hatten, konnten ihr maximales Minutenvolumen nur wenig steigern. Dem gegenüber stehen 66,6 % der Sportler, die viele Einheiten absolvierten und in Folge dessen eine hohe MVV-Steigerung erzielen konnten. Die gleiche Verteilung der Sportler ergab sich, wenn man die MVV-Steigerung mit der Leistungssteigerung nach acht Wochen vergleicht; eine Gegenüberstellung von absoluter Leistung und Steigerung des maximalen Minutenvolumens ergab keinen Zusammenhang (Tab. 38 und Tab. 39).

Tab. 38. Kreuztabellen mit Mediansplit der MVV-Steigerung bezogen auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der MVV-Steigerung in Bezug auf die Leistung (unten). Geringe MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV ≤ Median der Prä-Post-Differenz des MVV, große MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV > Median der Prä-Post-Differenz des MVV; äquivalente Berechnung für die Parameter Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistung

	Trainingshäufigkeit		
Steigerung MVV	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe Steigerung	4	2	6
	66,7 %	33,3 %	50,0 %
große Steigerung	2	4	6
	33,3 %	66,7 %	50,0 %
Gesamt	6	6	12
	100,0 %	100,0 %	100,0 %

	Leistung		
Steigerung MVV	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe Steigerung	3	3	6
	50,0 %	50,0 %	50,0 %
große Steigerung	3	3	6
	50,0 %	50,0 %	50,0 %
Gesamt	6	6	12
	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Tab. 39. Kreuztabelle mit Mediansplit der MVV-Steigerung bezogen auf die Leistungssteigerung. Definition geringe MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV ≤ Median der Prä-Post-Differenz des MVV, große MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV > Median der Prä-Post-Differenz des MVV; äquivalente Berechnung für den Parameter Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Leistungssteigerung		
Steigerung MVV	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe Steigerung	4 66,7 %	2 33,3 %	6 50,0 %
große Steigerung	2 33,3 %	4 66,7 %	6 50,0 %
Gesamt	6 100,0 %	6 100,0 %	12 100,0 %

Die Mittelwerte der einzelnen Untergruppen bestätigten die zuvor ermittelten Zusammenhänge: Während sich die Prä-Post-Steigerung des maximalen Minutenvolumens bei einer Differenzierung nach der Leistung in beiden Hälften des Probandenkollektivs kaum unterschied (13,5 ± 6,2 l/min bei geringer Leistung, 13,1 ± 7,5 l/min bei großer Leistung), ließen sich sowohl mit hoher Trainingshäufigkeit (26,2 ± 16,8 l/min) als auch mit hoher Leistungssteigerung (26,1 ± 17,1 l/min) deutlich größere Verbesserungen bezüglich des MVV erzielen als bei geringerer Ausprägung des jeweiligen Parameters (Tab. 40). Auch beim maximalen Minutenvolumen wurden die größten absoluten Steigerungen von den männlichen Probanden erzielt, unabhängig von der Anzahl der Trainingseinheiten oder der erzielten Leistung.

Tab. 40. Prä-Post-Steigerung des MVV [l/min] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

	Trainingshäufigkeit		Leistung		Leistungssteigerung	
	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Differenz MVV [l/min]						
MW	20,8	26,2	13,5	13,1	20,9	26,1
STABW	18,1	16,8	6,2	7,5	17,8	17,1

Bei der Gegenüberstellung von Laktatwerten und Zahl der Trainingseinheiten, Leistung und Leistungssteigerung standen durch Messausfälle bei der Laktatabnahme im Prä- oder Posttest weniger Daten zur Verfügung als bei den vorhergehenden Auswertungen. So wurden statt zwölf je nach Intensität nur acht bis zehn Sportler ausgewertet. Die Auswertung der Kreuztabellen für die Prä-Post-Differenz der Laktatwerte im GA-I-Bereich ergab einen Zusammenhang zur Trainingshäufigkeit und zur Leistung. In der Gruppe der Sportler, die viel trainierten bzw. nach acht Wochen eine hohe Leistung erzielten, konnten 75 % ihre Laktatwerte nach dem Atemtraining deutlich senken. Dagegen zeigte sich in der Gruppe der Sportler, die weniger trainierten bzw. eine niedrige Leistung im POWERbreathe-Training erbrachten, eine entgegengesetzte Tendenz. Die Veränderungen des Laktats bezogen auf die Leistungssteigerung bestätigten die genannten Zusammenhänge (Tab. 41). Es war jedoch zu berücksichtigen, dass für diese Belastungsstufe nur Daten von acht Sportlern vorlagen.

Tab. 41. Kreuztabellen mit Mediansplit der Laktatsenkung bei GA-I-Belastung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben), der Laktatsenkung bei GA-I-Belastung bezogen auf die Leistung (Mitte) und der Laktatsenkung bei GA-I-Belastung in Bezug auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten), Leistung und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Trainingshäufigkeit		
Laktatsenkung GA I	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainingshäu-figkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	3 75,0 %	1 25,0 %	4 50,0 %
große Laktatsenkung	1 25,0 %	3 75,0 %	4 50,0 %
Gesamt	4 100,0 %	4 100,0 %	8 100,0 %

	Leistung		
Laktatsenkung GA I	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	3 75,0 %	1 25,0 %	4 50,0 %
große Laktatsenkung	1 25,0 %	3 75,0 %	4 50,0 %
Gesamt	4 100,0 %	4 100,0 %	8 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Laktatsenkung GA I	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	3 75,0 %	1 25,0 %	4 50,0 %
große Laktatsenkung	1 25,0 %	3 75,0 %	4 50,0 %
Gesamt	4 100,0 %	4 100,0 %	8 100,0 %

Die Berechnung der Mittelwerte der einzelnen Untergruppen ergab für alle drei Atemparameter ebenfalls eine leichte Reduzierung des Laktats bei umfangreicherem bzw. leistungsstärkerem Atemtraining, jedoch wiesen die Daten insgesamt eine hohe Streuung auf (Tab. 42).

Tab. 42. Prä-Post-Differenz des Laktats im GA-I-Bereich [mmol/l] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

	Trainingshäufigkeit		Leistung		Leistungssteigerung	
	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Differenz Laktat GA I [mmol/l]						
MW	0,2	-0,2	0,2	-0,2	0,2	-0,3
STABW	0,5	0,2	0,4	0,2	0,4	1,7

Im GA-II-Bereich zeigten sich ähnliche Tendenzen bei der Auswertung der Kreuztabellen. Auch für die zweite Stufe des Belastungstests konnte ein Zusammenhang zwischen Trainingsumfang, Leistung oder Leistungssteigerung und der Reduzierung des Laktats vom Prä- zum Posttest ermittelt werden. In der Gruppe der Sportler, die viel trainiert bzw. eine hohe Leistung und Leistungssteigerung erzielt hatten, kam es bei 75 % der Probanden zu einer hohen Laktatreduzierung. Bei den Sportlern mit geringerem Trainingsumfang und denen, die nur eine niedrige Leistung bzw. Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training erreichten, sanken die Laktatwerte von 60 % der Gruppe nur in geringem Maße (Tab. 43).

Tab. 43. Kreuztabellen mit Mediansplit der Laktatsenkung bei GA-II-Belastung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben), der Laktatsenkung bei GA-II-Belastung bezogen auf die Leistung (Mitte) und der Laktatsenkung bei GA-II-Belastung in Bezug auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten), Leistung und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Trainingshäufigkeit		
Laktatsenkung GA II	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	3 60,0 %	1 25,0 %	4 44,4 %
große Laktatsenkung	2 40,0 %	3 75,0 %	5 55,6 %
Gesamt	5 100,0 %	4 100,0 %	9 100,0 %

	Leistung		
Laktatsenkung GA II	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	3 60,0 %	1 25,0 %	4 44,4 %
große Laktatsenkung	2 40,0 %	3 75,0 %	5 55,6 %
Gesamt	5 100,0 %	4 100,0 %	9 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Laktatsenkung GA II	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	3 60,0 %	1 25,0 %	4 44,4 %
große Laktatsenkung	2 40,0 %	3 75,0 %	5 55,6 %
Gesamt	5 100,0 %	4 100,0 %	9 100,0 %

Wie schon auf der ersten Stufe des Tests bestätigten die Mittelwerte der Laktatdifferenz im GA-II-Bereich für die einzelnen Gruppen die stärkere Laktatreduzierung bei hohem Trainingsumfang und größerer Leistung bzw. Leistungssteigerung. Die Unterschiede zur Gruppe mit weniger absolvierten Trainingseinheiten

bzw. geringerer Leistung und Leistungssteigerung fielen größer aus als im GA-I-Bereich. Die Daten waren jedoch ebenfalls mit einer großen Streuung behaftet (Tab. 44).

Tab. 44. Prä-Post-Differenz des Laktats im GA-II-Bereich [mmol/l] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

	Trainingshäufigkeit		Leistung		Leistungssteigerung	
	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Differenz Laktat GA II [mmol/l]						
MW	-0,4	-1,8	-0,2	-2,1	-0,5	-2,0
STABW	2,0	1,6	1,6	1,8	1,7	2,1

Die Kreuztabellen für die Laktatreduzierung bei der 95 %-Belastung verglichen mit den Parametern des Atemtrainings zeigten ebenfalls einen Zusammenhang zur Trainingshäufigkeit, zur Leistung und zur Leistungssteigerung (Tab. 45 und Tab. 46). Wie schon im GA-I- und im GA-II-Bereich erreichte in der Gruppe der Sportler, die viel trainiert oder eine hohe Leistung bzw. Leistungssteigerung erzielt hatten, die überwiegende Mehrheit (80 %) nach acht Wochen Atemtraining eine große Reduzierung des Laktats, während die Sportler mit geringerem Trainingsumfang und niedrigerer Leistung und Leistungssteigerung zu 80 % eine geringe Laktatsenkung aufwiesen.

Tab. 45. Kreuztabellen mit Mediansplit der Laktatsenkung bei 95 %-Belastung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Laktatsenkung bei 95 %-Belastung bezogen auf die Leistung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistung

	Trainingshäufigkeit		
Laktatsenkung 95 %	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	4 80,0 %	1 20,0 %	5 50,0 %
große Laktatsenkung	1 20,0 %	4 80,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistung		
Laktatsenkung 95 %	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	4 80,0 %	1 20,0 %	5 50,0 %
große Laktatsenkung	1 20,0 %	4 80,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 46. Kreuztabelle mit Mediansplit der Laktatsenkung bei 95 %-Belastung in Bezug auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für die Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Leistungssteigerung		
Laktatsenkung 95 %	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Laktatsenkung	4	1	5
	80,0 %	20,0 %	50,0 %
große Laktatsenkung	1	4	5
	20,0 %	80,0 %	50,0 %
Gesamt	5	5	10
	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Übereinstimmend mit dem Ergebnis der Kreuztabellenanalyse sanken die Laktatwerte der 95 %-Stufe der trainingsfleißigeren Sportler bzw. derjenigen, die eine hohe Leistung oder Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training erbringen konnten, im Vergleich zum Ausgangstest nach dem Atemtraining stärker als bei den Sportlern mit geringerem Trainingsumfang und niedrigerer Leistung bzw. Leistungssteigerung (Tab. 47). Die Tendenzen lagen in einer ähnlichen Größenordnung wie die der GA-II-Belastung, auch hier muss jedoch auf die große Streuung hingewiesen werden.

Tab. 47. Prä-Post-Differenz des Laktats bei 95 %-Belastung [mmol/l] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

	Trainingshäufigkeit		Leistung		Leistungssteigerung	
	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Differenz Laktat 95 % [mmol/l]						
MW	-0,7	-2,3	-1,0	-2,0	-1,2	-1,9
STABW	1,7	1,6	2,0	1,5	1,9	1,6

Die Analyse der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit in Abhängigkeit von der Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung ergab insgesamt nur geringe Veränderungen (Mittelwerte im Bereich von 0,01 s bis 0,10 s). Die größten absoluten Veränderungen betrugen 0,24 s (Proband 5) bzw. -0,45 s (Proband 13). Aufgrund von Testausfällen konnten nur zehn der zwölf Interventionsteilnehmer in die Auswertung einbezogen werden. Zur besseren Lesbarkeit sind im Folgenden nur die Kreuztabellen abgebildet, in denen die beschriebenen Zusammenhänge dargestellt sind. Eine vollständige Darstellung der Tabellen befindet sich in Anhang 13.4.

Im GA-I-Bereich kam es zu einer Verbesserung im Sinne einer längeren Zykluszeit nach der Intervention bei derjenigen Hälfte des Probandenkollektivs, die den größeren Trainingsumfang, die höhere Leistung und die größere Leistungssteigerung aufwies. So konnten 60 % der leistungsstärkeren Gruppe im ersten Intervall des Retests (GA-I-Belastung, AF 1) mit einer längeren Zykluszeit als im Ausgangstest schwimmen, während 100 % der Sportler, die eine geringere Leistung im POWERbreathe-Training erzielten, den Test mit höherer Frequenz und somit mit einer kürzeren Zykluszeit absolvierten (Tab. 48). Im GA-I-Intervall mit eingeschränkter Atmung (AF 2) schwammen 60 % der Sportler, die mehr trainiert und eine höhere Leis-

tungssteigerung erzielt hatten, mit einer relativ zum Ausgangstest verlängerten Zykluszeit. Bei den Sportlern mit geringerem Trainingspensum und niedrigerer Leistungssteigerung im Atemtraining zeigte sich eine entgegengesetzte Tendenz: 60 % schwammen in diesem Testabschnitt mit gleicher oder längerer Zykluszeit verglichen mit dem Stufentest vor Beginn der Intervention (Tab. 49). Stellt man die Prä-Post-Differenzen der Zykluszeit dem Absolutwert der mit dem POWERbreathe-Gerät erzielten Leistung gegenüber, verbesserten sich sogar 80 % der leistungsstärkeren Sportler im Hinblick auf die Zykluszeit, während das in der Gruppe der Sportler mit geringer Leistung nur 20 % gelang (Tab. 50).

Tab. 48. Kreuztabelle mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung mit AF 1 bezogen auf die Leistung. Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für die Leistung

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 1	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	5 100,0 %	2 40,0 %	7 70,0 %
große Zykluszeitverlängerung	0 0,0 %	3 60,0 %	3 30,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 49. Kreuztabellen mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung und AF 1 in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung und AF 1 bezogen auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 2	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 2	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 50. Kreuztabelle mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung und AF 1 in Bezug auf die Leistung. Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für die Leistung

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 2	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	4 80,0 %	1 20,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	1 20,0 %	4 80,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

In den Gruppen mit den Sportlern mit hohem Trainingsumfang, hoher Leistung und großer Leistungssteigerung konnte die mittlere Zykluszeit in allen Fällen im Vergleich zum Ausgangstest verlängert werden. In den Gruppen, die bezogen auf den jeweiligen Parameter des Atemtrainings unter dem Median lagen, verkürzte sich die mittlere Zykluszeit hingegen durchgehend (Tab. 51).

Tab. 51. Prä-Post-Differenz der Zykluszeit [s] bei GA-I-Belastung und AF 1 bzw. 2 bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

		Trainingshäufigkeit		Leistung		Leistungssteigerung	
		gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Differenz Zykluszeit [s] GA I							
AF 1	MW	-0,07	0,03	-0,10	0,06	-0,08	0,04
	STABW	0,15	0,07	0,12	0,08	0,15	0,08
AF 2	MW	-0,05	0,03	-0,08	0,06	-0,06	0,04
	STABW	0,18	0,04	0,16	0,02	0,17	0,05

Die Auswertung der GA-II-Stufen ergab einen Zusammenhang zwischen der Zykluszeitverlängerung nach der Intervention und der Leistungssteigerung beim POWERbreathe-Training im gleichen Zeitraum. Von den zehn ausgewerteten Sportlern konnten sich 60 % der Gruppe, die die größeren Leistungssteigerungen vorzuweisen hatte, im Sinne einer Zykluszeitverlängerung verbessern. In der Gruppe der Sportler mit geringerer Leistungssteigerung blieb die Zykluszeit bei 80 % konstant oder verkürzte sich (Tab. 52). Die Mittelwerte bezogen auf die Leistung bestätigten diese Tendenz (Tab. 53), es konnte jedoch kein Zusammenhang mittels Kreuztabelle festgestellt werden. Auch über den Bezug zur Trainingshäufigkeit konnte auf dieser Stufe keine Differenzierung zwischen den Gruppen vorgenommen werden. In allen Fällen, in denen sich Unterschiede zwischen den durch den Mediansplit definierten Teilgruppen ermitteln ließen, kam es bei der leistungsstärkeren Gruppe zu einer Verlängerung der Zykluszeit, während in der leistungsschwächeren Gruppe nach Ende der Intervention mit einer gleichbleibenden oder verkürzten Zykluszeit geschwommen wurde (Tab. 53). Sowohl die Prä-Post-Differenzen der einzelnen Gruppen als auch die Intergruppenunterschiede fielen jedoch deutlich geringer aus als im GA-I-Bereich.

Tab. 52. Kreuztabelle mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-II-Belastung und AF 2 in Bezug auf die Leistungssteigerung. Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit), große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit); äquivalente Berechnung für Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung GA II AF 2	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	4	2	6
	80,0 %	40,0 %	60,0 %
große Zykluszeitverlängerung	1	3	4
	20,0 %	60,0 %	40,0 %
Gesamt	5	5	10
	100,0 %	100,0 %	100,0 %

Tab. 53. Prä-Post-Differenz der Zykluszeit [s] bei GA-II-Belastung und AF 1 bzw. 2 bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

		Trainingshäufigkeit		Leistung		Leistungssteigerung	
		gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Differenz Zykluszeit [s] GA II							
AF 1	MW	-0,02	0,00	-0,04	0,03	-0,05	0,03
	STABW	0,18	0,05	0,15	0,09	0,15	0,09
AF 2	MW	0,00	0,00	-0,02	0,02	-0,06	0,06
	STABW	0,23	0,09	0,21	0,13	0,20	0,13

Auf der letzten Stufe des Tests, die mit einer 95 %-Belastung geschwommen wurde, fielen die Veränderungen der Zykluszeit vom Prä- zum Posttest weniger systematisch und geringer aus als im GA-I- bzw. GA-II-Bereich. In den Intervallen, die mit AF 1 absolviert wurden, konnte für die Sportler mit größerem Trainingsumfang, höherer Leistung und größerer Leistungssteigerung im Atemtraining eine Verlängerung der Zykluszeit ermittelt werden (Tab. 55). Bezogen auf die Trainingshäufigkeit und die Leistungssteigerung konnte ein Zusammenhang mittels Kreuztabelle nachgewiesen werden. Sowohl ein hoher Trainingsumfang als auch eine große POWERbreathe-Leistungssteigerung führte bei 60 % der Sportler zu einer Verbesserung der Zykluszeit im Sinne einer Verlängerung nach Ende der Intervention (Tab. 54). Die Werte der jeweils schwächeren Gruppe blieben im gleichen Zeitraum bezogen auf alle untersuchten Parameter des Atemtrainings nahezu identisch. Auch die Ergebnisse der Intervalle, die mit eingeschränkter Atmung (AF 2) geschwommen wurden, unterschieden sich sowohl bezogen auf den Ausgangstest als auch im Intergruppenvergleich nur geringfügig (Tab. 55). Über alle Intensitäten und Atemfrequenzen hinweg ließ sich am häufigsten ein Zusammenhang zwischen der Zykluszeitverlängerung und der Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training ermitteln. Die Mittelwerte der durch den Mediansplit erzeugten Gruppen wiesen über alle Intensitäten und Atemfrequenzen eine ähnliche Tendenz auf, die Intergruppendifferenz lag durchgehend bei 0,08 s bis 0,12 s.

Tab. 54. Kreuztabellen mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei 95 %-Belastung und AF 1 in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Zykluszeitverlängerung bei 95 %-Belastung und AF 1 bezogen auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung)

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 1	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 1	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 55. Prä-Post-Differenz der Zykluszeit [s] bei 95 %-Belastung und AF 1 bzw. 2 bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung

		Trainingshäufigkeit		Leistung		Leistungssteigerung	
		gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
Differenz Zykluszeit [s] 95 %							
AF 1	MW	-0,02	0,09	0,02	0,06	-0,01	0,09
	STABW	0,17	0,07	0,19	0,05	0,18	0,08
AF 2	MW	0,02	0,02	0,04	-0,01	0,01	0,03
	STABW	0,11	0,10	0,13	0,05	0,11	0,10

Zusammenfassend konnten durch die Prüfung auf Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen des POWERbreathe-Trainings und der Entwicklung der im Stufentest erhobenen Parameter folgende Ergebnisse formuliert werden:

- Eine hohe Trainingshäufigkeit mit dem POWERbreathe-Gerät ging bezogen auf das Atemtraining mit einer hohen Leistung bzw. Leistungssteigerung einher.
- Von den untersuchten POWERbreathe-Parametern ließ sich die Leistungssteigerung (bezogen auf den Ausgangswert) am besten zur Prognose der Entwicklung der Parameter MVV, Laktat und Zykluszeit einsetzen. Alternativ war dies auch über die Trainingshäufigkeit möglich; die Absolutwerte der Leistung waren hingegen weniger aussagekräftig.
- Unabhängig von der Trainingshäufigkeit erzielten die männliche Probanden absolut betrachtet die größeren Steigerungsraten. Auch dies sprach für die Verwendung eines relativen Bezugs zur Bewertung des Trainingsfortschritts.

8 Diskussion

Die Bandbreite der Aspekte, die im vorangegangenen Kapitel im Zusammenhang mit der Darstellung der Ergebnisse genannt wurden, weist bereits darauf hin, dass die Frage nach der Wirkungsweise und Nutzbarkeit eines Atemtrainings nicht monokausal beantwortet werden kann. Im vorliegenden Kapitel erfolgt daher eine differenzierte Diskussion der zugrundeliegenden leistungsphysiologischen Mechanismen und die Ableitung entsprechender Konsequenzen für die Trainingspraxis. Nach einer Darstellung der physiologischen Hintergründe der beobachteten Veränderungen in Folge des Trainings wird aus biomechanischer Sicht dargelegt, welche Konsequenzen sich daraus für den Bewegungsablauf ergeben. Die Erörterung der Möglichkeiten, die sich aus den zuvor genannten Mechanismen für den Einsatz im Schwimmtraining ergeben, erfolgt wiederum aus einem trainingswissenschaftlichen Blickwinkel.

Die Darstellung der Teilaspekte erfolgt dabei analog zur Struktur des Ergebniskapitels. Ausgehend von der in Kapitel 7.2 aufgezeigten Veränderung der Atemmuskulatur und der pulmonalen Parameter in Folge des Atemtrainings erfolgt in Kapitel 8.1 eine Darstellung der Wirkungsweise des lokalen Krafttrainingsreizes, den das POWERbreathe-Training auf die Atemmuskulatur ausübt. Dabei wird zunächst eine Betrachtung der zugrundeliegenden Mechanismen bei isolierter Belastung vorgenommen. Daran anknüpfend erfolgt in Kapitel 8.2 die Interpretation der in Kapitel 7.3 dargestellten Veränderungen durch Training vor dem Hintergrund, dass die lokalen Adaptationen der Inspirationsmuskulatur als Reaktion auf das POWERbreathe-Training unter körperlicher Belastung Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben. In diesem Zusammenhang wird auch der in Kapitel 7.4 angeführte Einfluss der Intensität, vor allem auf den Anstieg der Laktatkonzentration, thematisiert. Die Veränderungen, die sich in Folge einer eingeschränkten Atemfrequenz beobachten ließen (Kapitel 7.5), werden in Kapitel 8.3 dahingehend diskutiert, welche Wirkmechanismen der leistungsphysiologischen und biomechanischen Reaktion zugrunde liegen und inwiefern diese Effekte durch ein Atemtraining abgeschwächt werden können. Der im Verlauf der Studie zunehmend schwächere Anstieg der Zyklusfrequenz beim Anstieg der Belastung, der ebenfalls in Kapitel 7.4 thematisiert wurde, wird in Kapitel 8.4 im Hinblick auf die Auswirkungen auf die Bewegungsstruktur diskutiert, wobei ein Rückgriff auf die Schlussfolgerungen aus Kapitel 8.1 erfolgt. In Kapitel 8.5 wird abschließend eine umfassende Bewertung aller Ergebnisse der durchgeführten Studie aus trainingswissenschaftlicher Perspektive vorgenommen, wobei unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit der Trainingsinhalte Empfehlungen für den Einsatz und die Gestaltung eines Atemtrainings in der Trainingspraxis abgeleitet werden.

8.1 Wirkung eines lokalen Krafttrainingsreizes auf die Atemmuskulatur und auf pulmonale Parameter

Als Grundlage für alle weiteren beobachteten leistungsphysiologischen und trainingswissenschaftlichen Phänomene soll im folgenden Kapitel die Wirkung des lokalen Krafttrainingsreizes auf die Inspirationsmuskulatur durch das Atemtraining diskutiert werden. Die Veränderungen, die sich nach der achtwöchigen Intervention einstellten, ließen sich dabei sowohl anhand der respiratorischen Trainingsparameter als auch der Ergebnisse der Lungenfunktionstests bestimmen.

Das durchgeführte POWERbreathe-Training umfasste 30 Wiederholungen pro Set und zwei Sets pro Einheit bei einer Belastung von ca. 60 % der Maximallast, die von der Atemmuskulatur überwunden werden mussten. Es ist daher in den Bereich des lokalen Kraftausdauertrainings einzuordnen (Weineck, 2004). Ab Intensitäten von 50 % erfolgt während eines Krafttrainings ein Verschluss der zuführenden Blutgefäße der betroffenen Muskeln, weshalb dabei vorrangig die anaerobe laktazide Energiebereitstellung trainiert wird (van den Berg & Arendt-Nielsen, 2007; Weineck, 2004). Die Sportler konnten nach acht Wochen Atemtraining die am POWERbreathe zu überwindende Last (IG 1: 49 cm H_2O, IG 2: 32 cm H_2O), die dabei verrichtete Arbeit (194 J bzw. 118 J) und die resultierende Leistung (9,0 W bzw. 3,8 W) deutlich steigern. Unter Nutzung der physikalischen Zusammenhänge ($p = {}^{F}/_{A}$ mit Druck p, Kraft F und Fläche A) folgte aufgrund der unveränderlichen Abmessungen des Atemtrainers eine steigende Kraft, die von den Inspirationsmuskeln aufgebracht werden musste. Die Ergebnisse der Sportler entsprachen den Erwartungen der Entwicklerin des Atemgeräts, die als Ergebnis eines mehrwöchigen Trainings nach dem genannten Belastungsprotokoll eine Verbesserung der Muskelkraft, der Leistung sowie der Beziehung zwischen Druck und Atemflow bzw. Druck und Leistung postuliert (McConnell, 2011, vgl. Abb. 19). So sind bei jungen Erwachsenen Verbesserungen der Muskelkraft um bis zu 45 % zu erwarten. Andere Studien berichten von einer Erhöhung der Inspirationskraft um 24 % in vier Wochen bzw. um 41 % in acht Wochen (Downey et al., 2007) und einer grundsätzlichen Verbesserung der Atemkraft nach einem Widerstandstraining (Lemaître et al., 2013; Ramirez-Sarmiento, Orozco-Levi, Guell, Barreiro, Hernandez, Mota, Sangenis, Broquetas, Casan & Gea, 2002; Witt et al., 2007; Wylegala et al., 2007). In Übereinstimmung mit Brown et al. (2008), die nach sechs Wochen POWERbreathe-Training keine Veränderung des Atemzugvolumens feststellen konnten, blieb auch das mittlere Atemzugvolumen der im Rahmen dieser Studie getesteten Sportler während der Intervention nahezu unverändert. Da dennoch eine steigende Leistung erzielt werden konnte, waren die Sportler am Ende der Trainingsintervention somit in der Lage, eine vorgegebene (und zunehmende) Last bei gleichbleibendem „Hubweg“ (entsprach hier dem Atemzugvolumen) zu verrichten, ohne dass dies zu Lasten der Ausführungsgeschwindigkeit der Übung ging. Es ist davon auszugehen, dass die gemessene Leistungsverbesserung durch eine schnellere Inspiration erzielt wurde. Von einer solchen Verbesserung der maximalen Verkürzungsgeschwindigkeit der Atemmuskulatur nach Inspirationstraining berichten auch Mickleborough et al. (2008). Die bei einem Kraftausdauertraining zu erwartende Verbesserung der Muskelausdauer wurde von McConnell (2011) ebenfalls als Wirkung eines POWERbreathe-Trainings beschrieben. Wylegala et al. (2007) führten eine Studie mit Tauchern durch, bei der die Effekte eines Maximalkraft- und eines Ausdauertrainings für die Atemmuskulatur gegenübergestellt wurden, und stellten fest, dass das Maximalkrafttraining – zumindest in Bezug auf die durchgeführten Belastungstests – die Ausdauerleistung stärker verbesserte als das reine Ausdauertraining. Ramirez-Sarmiento et al. (2002) stellten im Rahmen ihrer Untersuchungen fest, dass selbst die Muskulatur von Patienten mit chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung (COPD), die hinsichtlich Kraft und Ausdauer stark eingeschränkt ist, auf Training mit funktionellen und strukturellen Veränderungen im Sinne einer Ausdauerverbesserung reagiert. Eine Verbesserung der respiratorischen Muskelausdauer bei den Teilnehmern der achtwöchigen Intervention ist daher realistisch, es wurden jedoch keine Tests zur Überprüfung durchgeführt.

Dass sich die verbesserten Kraftfähigkeiten in einer Verbesserung der Lungenfunktion widerspiegelten, zeigte der signifikante Anstieg des maximalen Minutenvolumens (MVV) bei allen Teilnehmern des Atemtrainings (im Gegensatz zu den Sportlern der Kontrollgruppe). Dieser Effekt trat auch bei den Untersuchungen von McConnell (2011) auf, die von einer Verbesserung der maximalen freiwilligen Hyperventilation berichtete. Andere Studien wiesen ebenfalls eine MVV-Steigerung nach, das durchgeführte Atemtraining zielte jedoch vorrangig auf eine Verbesserung der Muskelausdauer ab (Boutellier, 1996; Lemaître et al.,

2013; Spengler et al., 1999; Wylegala et al., 2007). Die forcierte Vitalkapazität (FVC) und die Einsekundenkapazität (FEV1) zeigten hingegen nach acht Wochen POWERbreathe-Training keine signifikanten und kaum absolute Veränderungen, was sich mit den Ergebnissen von Kilding, Brown und McConnell (2010) nach einer sechswöchige POWERbreathe-Intervention deckt. Lemaître et al. (2013) konnten mit acht Wochen Spirotiger-Training eine Verbesserung der forcierten Vitalkapazität und der Einsekundenkapazität erzielen, auch bei Wylegala et al. (2007) erzielten die Sportler nach vier Wochen eine höhere FVC. In beiden Fällen wurde jedoch ein reines Ausdauertraining durchgeführt, weshalb die Ergebnisse nicht unmittelbar vergleichbar sind. Mickleborough et al. (2008) zeigten anhand von College-Schwimmern, dass sich FVC und FEV1 innerhalb von zwölf Wochen signifikant verbesserten, allerdings unabhängig davon, ob ein Atemtraining durchgeführt wurde. Die Autoren vermuteten jedoch, dass der Trainingsreiz nicht groß genug war.

Als Ursache für eine Leistungssteigerung in Folge eines Krafttrainings ist zunächst die Verbesserung der neuromuskulären Koordination zu nennen. Die Adaptationen in diesem Bereich stellen den ersten wirksamen Faktor für einen Kraftzuwachs dar (Weineck, 2004). McConnell (2011) überträgt dieses Prinzip auf das Atemmuskeltraining und sieht in der verbesserten Koordination und einer besseren maximalen Aktivierung der Atemmuskeln einen möglichen Grund für die Steigerung der Inspirationskraft nach einem POWERbreathe-Training. Auch Enright und Unnithan (2011) führten den Kraftzuwachs ihrer Probanden nach acht Wochen Atemtraining auf eine Verbesserung neuromuskulärer Ansteuerungsmechanismen zurück. Dies deckt sich insofern mit den Ergebnissen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie, als die Sportler nach Abschluss des Atemtrainings deutlich besser in der Lage waren, den technisch anspruchsvollen MVV-Test zu bewältigen.

Im weiteren Verlauf eines Krafttrainings kommt es je nach Umfang und Intensität zu einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Muskelhypertrophie (Weineck, 2004). Im Zusammenhang mit Atemmuskulaturtraining ist dabei zu berücksichtigen, dass eine Biopsie zum Nachweis des Dickenwachstums der Muskulatur nicht routinemäßig durchgeführt wird. Eine Indikation zu einem solchen Eingriff ist vorwiegend im klinischen Bereich angezeigt, so dass nur wenige Vergleichsstudien zur Verfügung stehen. Ramirez-Sarmiento et al. (2002) konnten durch eine Biopsie der äußeren Interkostalmuskulatur zeigen, dass es bei COPD-Patienten nach einem fünfwöchigen inspiratorischen Muskelausdauertraining zu einem signifikanten Anstieg des Anteils an Typ-I-Muskelfasern (+38 %) und einer signifikanten Vergrößerung der Typ-II-Fasern (+21 %) kam. Downey et al. (2007) stellten auch bei jungen gesunden Probanden eine Verdickung des Zwerchfells um 12 % nach vier bis acht Wochen Widerstandstraining für die Inspirationsmuskulatur fest. Die Hypertrophie konnte in diesem Fall mit Hilfe von Ultraschall erfasst werden. Strukturelle Veränderungen des Zwerchfells oder anderer Atemmuskeln in Folge des Atemtrainings sind daher denkbar, eine quantitative oder qualitative Erfassung dieser Adaptationsvorgänge war im Rahmen der durchgeführten Studie jedoch nicht möglich.

Unterschiedliche Auffassungen bestehen darüber, ob ein Kraftzuwachs nach Durchführung eines Atemtrainings durch Transfereffekte im Zusammenspiel mit anderen Muskeln zustande kommt. Aus der Tatsache, dass die bei Downey et al. (2007) gezeigte Zwerchfellverdickung bereits nach vier Wochen bestand und sich in den folgenden vier Wochen der Studie nicht mehr steigerte, die gemessene Atemkraft jedoch weiter zunahm, folgerte McConnell (2011), dass die weitere Verbesserung durch das Training der Atemhilfsmuskulatur unterstützt wurde. Ramirez-Sarmiento et al. (2002) zeigten hingegen anhand der Biopsie eines Muskels, der als Kontrolle für ihre Studie diente, dass keine Transfereffekte auf andere Atemmuskeln (z. B. auf die Exspirationsmuskeln) auftraten, und postulierten eine sehr spezifische Wirkung des durchgeführten Atemtrainings, die auf die direkt trainierten Muskeln begrenzt ist. Auch hierzu konnten

aufgrund des Studiendesigns und der Messmethodik keine Aussagen getroffen werden. Die im späteren Verlauf dieses Kapitels dargestellten Auswirkungen auf die Bewegungsstruktur (Kapitel 8.4) deuten jedoch darauf hin, dass für die Leistung beim Freistilschwimmen die zeitliche Koordination der Kraftimpulse ausschlaggebender ist.

Zusammenfassend ließ sich anhand der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen ein Kraftzuwachs der Inspirationsmuskulatur feststellen, der mit einer Verbesserung der Verkürzungsgeschwindigkeit der betreffenden Muskeln einherging. Vor diesem Hintergrund profitierten die Sportler insofern von dieser Trainingsform, als sie die beim Kraulschwimmen nötige schnelle und kraftvolle Einatmung unterstützte (Jakovljevic & McConnell, 2009). Eine Verbesserung der neuromuskulären Koordination ist als Ursache des Kraftzuwachses plausibel, der Nachweis einer Muskelhypertrophie konnte nicht erbracht werden. Darüber hinaus konnte keine Veränderung des mittleren Atemzugvolumens beim Training mit dem POWERbreathe-Gerät festgestellt werden; das Atemtraining hat somit keine Auswirkungen auf die Atemtiefe.

8.2 Systemische Effekte eines Atemtrainings auf leistungsphysiologische Parameter

Nachdem im vorhergehenden Kapitel diskutiert wurde, welchen Effekt das Atemtraining im Sinne eines lokalen Krafttrainingsreizes bei einer isolierten Belastung der Atemmuskulatur hat, soll nun auf die veränderte physiologische Reaktion dieser Muskulatur während einer Ganzkörperbelastung und die resultierenden Auswirkungen auf das Gesamtsystem als Reaktion auf die POWERbreathe-Intervention eingegangen werden.

Unter den erfassten leistungsphysiologischen Parametern nahm das Laktat im Hinblick auf die Veränderungen zwischen den Tests vor und nach der Intervention eine herausragende Stellung ein. Bei beiden Interventionsgruppen ließ sich eine Verringerung der Laktatwerte feststellen, die über das erwartbare Maß im Verlauf des Trainingsjahres aufgrund des Schwimmtrainings – quantifizierbar anhand der Entwicklung der Kontrollgruppe – hinausging. Dies betraf vor allem die Intervalle des Stufentests, die mit hoher Intensität geschwommen wurden (GA II und 95 % im ersten, 95 % im zweiten Interventionszeitraum). Niedrigere Laktatwerte bei Ganzkörperbelastungen in Folge eines Atemtrainings wurden bereits in anderen Studien ermittelt (Brown et al., 2008, 2008; Griffiths & McConnell, 2007; McConnell, 2011; Romer et al., 2002; Spengler et al., 1999), allerdings noch nicht im Zusammenhang mit Schwimmern (Kilding et al., 2010; Wells, Plyley, Thomas, Goodman & Duffin, 2005). Die Autoren der beiden letztgenannten Studien vermuteten einen zu geringen Trainingsreiz bzw. einen zu stark ausgeprägten Trainingszustand der Probanden als Ursache für die fehlende Laktatreduzierung. Es stellt sich jedoch auch die Frage, ob der Rückgang grundsätzlich auf die Atemmuskulatur zurückzuführen sein kann. Da die erfasste Laktatkonzentration im Blut als Ausdruck der Gesamtvorgänge im Organismus zu werten ist und nicht zwingend mit dem Muskellaktat übereinstimmt (Town & Vanness, 1990), ist eine Aussage über die Vorgänge im einzelnen Muskel über das Gesamtlaktat nicht ohne weiteres möglich. Spezifischere Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die Atemmuskulatur prinzipiell in der Lage ist, Laktat zu bilden (Roussos & Macklem, 1982), und zwar in einem Maße, dass eine isolierte Belastung der respiratorischen Muskulatur ausreicht, um den Blutlaktatspiegel signifikant zu erhöhen (Brown et al., 2008). Wenn dieser Effekt nach einem Atemtraining weniger stark ausgeprägt ist, kommen im Hinblick auf die Atemmuskulatur eine geringere Laktatproduktion oder eine bessere Laktatelimination in Frage (Spengler et al., 1999).

Die Sportler der vorliegenden Studie hatten durch den respiratorischen Trainingsreiz in Form eines Kraftausdauertrainings eine Leistungsverbesserung im Sinne eines Kraftzuwachses erfahren, der sich bei isolierter Belastung der Inspirationsmuskulatur in einer verbesserten Kraftentwicklung manifestierte. Untersucht man das Laktatanstiegsverhalten im durchgeführten Stufentest im Sinne eines „Niveaus der Kraftfähigkeiten“ und der sportlichen Technik (Zinner, Pansold & Buckwitz, 1993, S. 22), deutete der verringerte Laktatanstieg beim Wechsel von einer Stufe zur nächsten – nach der ersten Intervention nur im GA-Bereich, nach der zweiten über den gesamten Test hinweg – darauf hin, dass die Effekte des Atemtrainings auch unter Belastung zum Tragen kamen. Auch bei erhöhten Anforderungen an die Atemmuskulatur in Form einer längeren Belastungsdauer kann eine verbesserte Kraftentwicklung realisiert werden.

Es zeigten sich somit auch während einer Ganzkörperbelastung die positiven Folgen eines Kraftausdauertrainings der Atemmuskulatur; die geringeren Laktatwerte nach der Intervention waren in diesem Fall Ausdruck einer Verbesserung der anaeroben laktaziden Energiebereitstellung (van den Berg & Arendt-Nielsen, 2007). Einen solchen Zusammenhang fanden Johnson, Sharpe und Brown (2007) bereits bei Radsportlern. Auch eine trainingsbedingte Vergrößerung des Muskelglykogen- und des Phosphatspeichers sowie eine Verbesserung der Pufferkapazität durch eine Erhöhung der Bicarbonate sind zu erwarten (Friedrich, 2005; Hollmann & Strüder, 2009; Weineck, 2004). Brown et al. (2008) vermuteten als Ursache für gesunkene Laktatwerte nach einem Atemtraining hingegen eine höhere oxidative Kapazität bzw. eine Verschiebung der Belastung in den aeroben Bereich. Durch eine morphologische Veränderung der Atemmuskulatur im Sinne einer Erhöhung des Anteils an Typ I-Fasern und eine erhöhte Aktivität oxidativer Enzyme käme es zur eingangs erwähnten verringerten Laktatproduktion (Brown et al., 2008; Ramirez-Sarmiento et al., 2002; Witt et al., 2007). Spengler et al. (1999) halten diese Möglichkeit hingegen für weniger wahrscheinlich, wenn mit der Laktatreduzierung nicht auch eine Erhöhung der Sauerstoffaufnahme einhergeht. Dies traf auch auf die Ergebnisse der vorliegenden Studie zu – die Sauerstoffaufnahme veränderte sich mit Prä-Post-Differenzen von unter 0,3 l/min nur geringfügig. Daher ist vor allem im Zwerchfell eine bessere Laktatelimination bzw. stärkere Nutzung als energetisches Substrat zur Schonung der Glykogenvorräte realistischer (Spengler et al., 1999). Die Untersuchungen von Fregosi und Dempsey (1986) unterstützen dieses Argument: Sie stellten im Tierversuch fest, dass unter Belastung das Laktat in der Arbeitsmuskulatur am Unterschenkel (M. plantaris) unter Reduzierung der Glykogenspeicher steigt, selbige jedoch zeitgleich in der Interkostalmuskulatur und im Zwerchfell trotz ebenfalls steigender Laktatkonzentrationen unangetastet bleiben. Als Ursache für diesen Spareffekt vermuteten die Autoren ebenfalls eine in der Atemmuskulatur stärker als in der Arbeitsmuskulatur ausgeprägte energetische Ausnutzung des Laktats, die zur Verringerung der Laktatnettoproduktion im Muskel führt.

Die verringerten Laktatwerte, die die Sportler dieser Studie nach der Durchführung des Atemtrainings aufwiesen, können darüber hinaus auch Ausdruck einer veränderten Stoffwechselsituation des Gesamtorganismus gewesen sein. Da die Atemmuskulatur über wichtige Reflexketten verfügt (Witt et al., 2007), von denen in diesem Zusammenhang vor allem der inspiratorische Metaboreflex relevant ist, haben trainingsbedingte Veränderungen der respiratorischen Muskulatur auf diesem Wege auch Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems. Kommt es in Folge der verbesserten Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur zu einer geringeren Akkumulation von Stoffwechselprodukten, wird deren Schwellwert zur Auslösung des Metaboreflexes erst nach einer längeren Belastungsdauer erreicht (Lemaître et al., 2013; Ribeiro et al., 2012). Alternativ kann auch durch eine geringere Sensitivität der afferenten Fasern in der Atemmuskulatur eine Erhöhung der Schwelle selbst erfolgt sein (Chiappa et al., 2008; McConnell & Lo-

max, 2006; Witt et al., 2007). Durch beide Mechanismen kommt es zu einer Abschwächung oder Verzögerung des Metaboreflexes, was mit einem verringerten Anstieg des peripheren Gefäßwiderstands und einer Erhöhung des Blutflusses in die Extremitäten einhergeht (Ribeiro et al., 2012).

Aus dem Zusammenspiel einer unter Belastung ökonomischer arbeitenden Atemmuskulatur und einer verzögerten oder abgeschwächten Vasokonstriktion der Extremitäten aufgrund einer reduzierten Metaboreflexaktivität lässt sich eine geringere Ausprägung des Steal-Effekts ableiten, der im untrainierten Zustand durch den unter Belastung ab der ventilatorischen Schwelle überproportional ansteigenden Sauerstoffbedarf der Atemmuskulatur entsteht (Aaron et al., 1992). Hohe Intensitäten werden im Schwimmen mit zunehmend stärkerer Beinarbeit realisiert, was wiederum zeitgleich den Sauerstoffverbrauch in den großen Muskelgruppen der unteren Extremität erhöht. Im ungünstigsten Fall konkurrieren somit zwei zunehmend unökonomischer arbeitende Systeme um den verfügbaren Sauerstoff und tragen gegenseitig zur Ermüdung der jeweils anderen Muskelgruppe bei. Da die Sportler ihre Sauerstoffaufnahme durch das Atemtraining nicht steigerten, stand nach der Intervention zur Bewältigung des Stufenprotokolls absolut betrachtet die gleiche Menge an Sauerstoff für den Gesamtorganismus zur Verfügung. Es kann sich jedoch eine veränderte Verteilung auf die einzelnen Systeme eingestellt haben. Zwar konnte der Sauerstoffverbrauch der Atemmuskulatur nicht isoliert erfasst werden, die verbesserte Kraftentwicklung durch die muskuläre Ökonomisierung nach einem Atemtraining lässt jedoch einen im Vergleich zum Test vor der Intervention niedrigeren Sauerstoffbedarf auf gleichen Belastungsstufen erwarten. Ausgehend von einer Atemmuskulatur, die aufgrund ihres verbesserten Trainingszustands auch unter steigender Belastung ökonomischer als zuvor arbeitet bzw. später ermüdet und dadurch erst verzögert die Vasokonstriktion der Arbeitsmuskulatur auslöst, steht damit nach der Intervention vor allem den großen Muskelgruppen in den Beinen mehr bzw. über einen längeren Zeitraum ausreichend Sauerstoff zur Verfügung. Diese Argumentation wird von den Studienergebnissen von Harms et al. (1997) gestützt, die zeigen konnten, dass es zu einem signifikanten Anstieg des Blutflusses in die Beine kommt, wenn während einer maximalen Belastung die Atemarbeit verringert wird. Die daraus resultierende veränderte Stoffwechselsituation führt dann zu einer geringeren Laktatproduktion in der Arbeitsmuskulatur und zu den insgesamt niedrigeren Laktatwerten.

Zusammenfassend sind daher verschiedene Mechanismen zu nennen, die in Folge des Atemtrainings zur Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter führten:

- Geringere Laktatproduktion oder bessere -elimination in der Atemmuskulatur infolge des Trainingsreizes im Sinne eines Kraftausdauertrainings
- Verzögerte oder abgeschwächte Umverteilung des Blutvolumens durch eine veränderte Aktivität bzw. Sensitivität des Metaboreflexes
- Veränderung der Stoffwechselsituation in den Beinen im Sinne einer Verschiebung in den aeroben Bereich durch einen weniger stark ausgeprägten Steal-Effekt.

8.3 Konsequenzen einer Atmungseinschränkung für die Energiebereitstellung und die sportliche Leistung vor und nach einem Atemtraining

Im folgenden Abschnitt soll diskutiert werden, inwieweit ein tägliches Atemtraining über einen Zeitraum von acht Wochen einen Nachwuchssportler dazu befähigt, die für das Erzielen eines verringerten Vor-

triebswiderstands vorteilhafte niederfrequente Atmung auch unter steigenden Belastungen besser umzusetzen. Dazu sollen im ersten Teil die im Rahmen dieser Studie unter Apnoe beobachteten Phänomene unter leistungsphysiologischen Gesichtspunkten eingeordnet werden, um dann im weiteren Verlauf des Kapitels die Veränderungen dieser Effekte nach Abschluss des Atemtrainings zu bewerten.

8.3.1 Grundsätzliche physiologische Reaktion auf eine Atemfrequenzverringerung

Im Stufentest wurde jede zweite Stufe mit verminderter Atemfrequenz geschwommen, wodurch angelehnt an das CFB-Training (*Controlled frequency breathing*) eine Erhöhung der Intensität bei gleicher Geschwindigkeit erzielt werden sollte. Der erhöhte Energiebedarf müsste sich aufgrund der limitierten Verfügbarkeit von Sauerstoff in Folge der Hypoventilation durch eine Erhöhung der Laktatkonzentration bemerkbar machen (West et al., 2005).

Sowohl in der Vor- als auch in der Hauptuntersuchung konnten zu Beginn des Tests auf der GA-I-Stufe zum Teil signifikant niedrigere Laktatwerte unter AF 2 als unter AF 1 ermittelt werden. Dies deckte sich mit den Ergebnissen von Town und Vanness (1990) sowie West et al. (2005), die durch eine Einschränkung der Atemfrequenz in einem ähnlichen Belastungsbereich konstant gebliebene oder gesunkene Laktatkonzentrationen erhielten. Als Ursache für diesen Effekt wurde vermutet, dass die Intensität nicht hoch genug gewesen sei, um einen Einfluss auf die Laktatkonzentration zu haben. Auch könnte die eingeschränkte Atmung den Übergang des Laktats vom Muskel in das Blut verhindert haben, was zu erhöhten Laktatwerten in der Nachbelastungsphase führen würde. Letzteres wurde in der Studie von Key et al. (2014) widerlegt. Plausibler ist in diesem Zusammenhang eine erhöhte Laktatakkumulation zu Beginn des Tests aufgrund der zeitlichen Koordination der verschiedenen Energiebereitstellungswege. So musste durch das verzögerte Einsetzen des aeroben Stoffwechsels zu Beginn der Belastung der Energiebedarf zunächst anaerob gedeckt werden, was sich auf die Ergebnisse des ersten Testabschnitts auswirkte. Im zweiten Abschnitt, der mit AF 2 geschwommen wurde, ist aufgrund der noch vergleichsweise niedrigen Intensität trotz der eingeschränkten Atemfrequenz von einer überwiegend aeroben Energiebereitstellung auszugehen, weshalb die Laktatwerte im Vergleich zum ersten Abschnitt wieder sanken. Auch sind Anfangseffekte wie Gewöhnung an die Testbedingungen sowie Nervosität der Sportler zu berücksichtigen, die zu einer unökonomischeren Bewegungsausführung im ersten Testabschnitt führen können.

Auf den höheren Stufen (GA II in der Voruntersuchung, GA II und 95 % in der Hauptstudie) konnte dann der von West et al. prognostizierte Laktatanstieg beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 beobachtet werden, im Fall der 95 %-Stufe kam es zu signifikanten Veränderungen. Eine mit dem Protokoll der Hauptuntersuchung vergleichbare Studie kam hingegen auch bei einer 90 %-Belastung über 200 m zu sinkenden Laktatwerten, wenn die Atemfrequenz von einer 2er- auf eine 4er-Atmung eingeschränkt wurde (Jakovljevic & McConnell, 2009). In einer weiteren Studie wurden bei maximal geschwommenen 100 Yards (ca. 91,44 m) ebenfalls sinkende Laktatwerte bei Einschränkung der Atemfrequenz von 2er- oder 3er- auf 7er-Atmung festgestellt (Key et al., 2014). Da es im Rahmen dieser Studie nicht zu einer Veränderung der Sauerstoffaufnahme in Folge der Atmungseinschränkung kam, wird übereinstimmend mit Dicker et al. (1980) und Town und Vanness (1990) geschlussfolgert, dass die Sportler während des Tests keiner hypoxischen Belastung ausgesetzt waren. Für die Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter war vielmehr die verschlechterte Abatmung von Kohlendioxid, die damit einhergehende Veränderung der Partialdrücke der Atemgase und die resultierende Hyperkapnie ausschlaggebend (Dicker et al., 1980; Jakovljevic & McConnell, 2009).

Daneben ist in den Augen der beiden Autoren ausschlaggebend, dass die auch hier festgestellte Vergrößerung des Atemzugvolumens unter 4er-Atmung durch eine zusätzliche Längenänderung der betroffenen Inspirationsmuskeln realisiert werden muss, die mechanisch ungünstig ist. Da die Atemmuskulatur mit steigendem Füllungsgrad der Lunge zunehmend weniger Kraft generieren kann (Clanton et al., 1987; McConnell, 2011, vgl. Abb. 13, S. 20), bewirkt das zusätzlich benötigte Atemzugvolumen (endinspiratorisches Reservevolumen) eine erhöhte Atemarbeit und infolgedessen eine im Vergleich zur 2er-Atmung erhöhte Ermüdung der Inspirationsmuskulatur. Diese wird durch die Hyperkapnie zusätzlich gesteigert (Jakovljevic & McConnell, 2009) und löst die in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Phänomene aus: durch eine Aktivierung des Metaboreflexes kommt es zu einer Vasokonstriktion der Arbeitsmuskulatur, wodurch in den Beinen weniger Sauerstoff zur Verfügung steht und die Laktatakkumulation des Gesamtsystems steigt. Die höheren Laktatwerte, die die Sportler beim Schwimmen mit AF 2 aufwiesen, kamen in diesem Fall nicht durch das initial geringere Sauerstoffangebot, sondern durch die Umverteilung des Gesamtsauerstoffs als Reaktion auf die Ermüdung der Atemmuskulatur zustande, die durch die respiratorische Azidose zusätzlich befördert wurde. Bei den angeführten Studien anderer Autoren wurde darüber hinaus die Atemfrequenz innerhalb eines Testdurchlaufs konstant gehalten, während die Intensität anstieg, und die eingeschränkte Atmung mit einem zweiten Protokoll getestet. Hingegen schwammen die Sportler im Rahmen dieser Studie innerhalb des gleichen Stufentests immer zuerst mit AF 1, dann mit AF 2. Der Anstieg der Laktatkonzentration beim Wechsel von AF 1 zu AF 2 kann daher auch Ausdruck der fortschreitenden Ermüdung des Sportlers innerhalb des Stufentests gewesen sein.

Ein weiteres Ergebnis der Hauptuntersuchung war die im Vergleich zu den AF 1-Abschnitten durchgehend niedrigere Herzfrequenz in den AF-2-Intervallen. Diverse Studien bestätigen diese Tendenz (Dicker et al., 1980; Key et al., 2014; Town & Vanness, 1990; West et al., 2005). Lediglich Jakovljevic und McConnell (2009) erzielten abweichend bei Einschränkung der Atemfrequenz von 2er- auf 4er-Atmung auf einer 200-m-Schwimmstrecke keine Veränderung der Herzfrequenz. Als Ursache für die Bradykardie unter eingeschränkter Atmung wurden Effekte angeführt, die dem Tauchreflex ähneln. Während des Stufentests lag zwar keine dauerhafte Apnoe vor, West et al. (2005) konnten jedoch zeigen, dass bereits eine Reduzierung der Atemfrequenz umfangreiche Kompensationsmechanismen des Herz-Kreislauf-Systems provoziert. Die Einflüsse einzelner Mechanismen und Reflexe, die den Ergebnissen der durchgeführten Studie zugrundelagen, waren dabei nicht ohne weiteres klar abzugrenzen, zumal sich beim durchgeführten Stufentest die gegenläufigen Effekte von körperlicher Belastung und einer Atmungseinschränkung überlagerten. Die Kombination aus kreislaufanregenden und -hemmenden Faktoren, die mit diesen beiden Komponenten einhergehen, führt zu weiteren komplexen Kreislaufregulationsprozessen (Delahoche et al., 2005; Hoffmann, Smerecnik et al., 2005; Smerecnik et al., 2002). In einer Laborstudie mit Schwimmern konnte gezeigt werden, dass die Effekte, die in diesem Zusammenhang unter Apnoe beobachtet werden können, bereits in den ersten fünf Sekunden des Atemanhaltens auftreten (Hoffmann, Dräger et al., 2005; Hoffmann, Smerecnik et al., 2005). Da dies je nach Stufe in etwa der Zeit zwischen zwei Atemzügen unter AF 2 im durchgeführten Stufentest entsprach, können bei den Tests der Hauptuntersuchung ähnliche Phänomene eine Rolle gespielt haben. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die Rolle des Baroreflexes hingewiesen, der bei steigendem Blutdruck die Herzfrequenz verringert und vice versa. In diesem Fall ist ist die Herzfrequenzsenkung – ausgelöst über die mechanosensiblen Baro- und Pressorezeptoren im Aortenbogen und Karotissinus – als Reaktion auf die periphere Vasokonstriktion und den damit einhergehenden gesteigerten Blutdruck erklärbar (Smerecnik et al., 2002). Die Frequenzregulation kann auch chemischen Ursprungs sein, da eine enge Kopplung zwischen der Herzfrequenz und der Sauerstoffsättigung besteht. Die benötigten Informationen bezüglich des durch die Hypoventilation steigenden CO_2-Partialdrucks und

des sinkenden O_2-Partialdrucks werden in diesem Fall von arteriellen Chemorezeptoren geliefert (Smerecnik et al., 2002). West et al. (2005) berichteten dabei von einem Zusammenhang zwischen Hyperkapnie und Reduzierung der Herzfrequenz. In Summe ist von einem komplexen Zusammenspiel von Apnoe- und Belastungseffekten auf Basis von chemischen oder Druckveränderungen auszugehen. Auch eine Überlagerung der Effekte der ermüdeten Atemmuskulatur und der Kreislaufreaktion auf die eingeschränkte Atmung ist denkbar, da es in beiden Fällen zu einer Vasokonstriktion der Arbeitsmuskulatur kommt.

Als Reaktion auf die zunehmende metabolische Belastung unter Einschränkung der Atmung erhöhte sich die Zyklusfrequenz über den gesamten Intensitätsbereich sowohl der Vor- als auch der Hauptuntersuchung. Dieser Effekt wurde übereinstimmend von mehreren Studien beobachtet (Jakovljevic & McConnell, 2009; Lomax & Castle, 2011; Town & Vanness, 1990; West et al., 2005). Town und Vanness (1990) zeigten, dass ein Zusammenhang zwischen dem Grad der Atmungseinschränkung und der Steigerung der Zyklusfrequenz besteht. Lomax und Castle (2011) wiesen außerdem darauf hin, dass dieser Effekt durch eine Ermüdung der Atemmuskulatur noch verstärkt werden kann. Als Ursache wurde durchgehend die Verkürzung der Zeitdauer bis zum nächsten Atemzug angeführt, um möglichst schnell wieder Sauerstoff aufnehmen und Kohlendioxid abatmen zu können. Die teilnehmenden Sportler bestätigten diesen Zusammenhang, den sie selbst an sich beobachtet hatten.

Abschließend sei noch auf den Zusammenhang zu den steigenden Laktatwerten unter eingeschränkter Atmung verwiesen: da eine reflektorische Erhöhung der Atemfrequenz als Reaktion auf eine körperliche Belastung beim Freistilschwimmen durch die enge Kopplung zwischen Atem- und Bewegungsfrequenz nur unter Beeinflussung der Zyklusfrequenz möglich ist, kann der in der Literatur genannte Effekt durch die höheren Laktatwerte unter AF 2 noch verstärkt worden sein (diese traten in den Vergleichsstudien nicht auf).

8.3.2 Veränderte Reaktion auf eine Atmungseinschränkung nach einem Atemtraining

Zur Einordnung der Ergebnisse, die die Sportler nach Abschluss des Atemtrainings im Stufentest bei einer Einschränkung der Atmung erzielten, lagen zum Zeitpunkt der Entstehung dieser Arbeit kaum Vergleichsstudien mit Schwimmern vor. Andere Autoren untersuchten entweder den Einfluss eines Atemtrainings auf die sportliche Leistung (Kilding et al., 2010; Wells et al., 2005), führten ein CFB-Protokoll ohne Trainingsintervention durch (Dicker et al., 1980; Town & Vanness, 1990; West et al., 2005) oder testeten die Reaktion ihrer Probanden auf eine Atmungseinschränkung nach einem speziellen Apnoe-Training (Mohnke, 2008). Eine Untersuchung, die ein CFB-Protokoll mit einer Atemtrainingsintervention kombinierte, konnte nicht als Vergleich herangezogen werden. Mit Einschränkung lassen sich Parallelen zu den Ergebnissen der Hypoxiestudie von Downey et al. (2007) oder der Tauchstudie von Wylegala et al. (2007) ziehen.

Die im Rahmen dieser Studie beobachteten Veränderungen waren insgesamt eher gering. Es sollen mit den daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen daher auch nur Hinweise auf Tendenzen gegeben werden, die in weiteren Tests tiefergehend untersucht werden sollten. Bezogen auf die Veränderung des Laktats unter eingeschränkter Atmung zeigte sich bei der ersten Interventionsgruppe nach dem Atemtraining im 95 %-Bereich immer noch ein Anstieg beim Wechsel von AF 1 zu AF 2, dieser war jedoch nicht mehr signi-

fikant. Zusätzlich konnte diese Hälfte des Probandenkollektivs die Laktatzunahme unter Atmungseinschränkung im 95 %-Bereich kontinuierlich von Test 1 bis Test 4 verringern. Die erste Kontrollgruppe wies auch zum Zeitpunkt des zweiten Tests auf dieser Stufe einen signifikanten Laktatanstieg auf und konnte sich durch die Trainingsintervention, die zwischen Test 3 und 4 stattfand, nicht im Sinne eines geringeren Anstiegs verbessern. Dies lieferte bereits Hinweise darauf, dass die Intervention zu verschiedenen Zeitpunkten im Trainingsjahr unterschiedlich wirksam war. Auf diesen Aspekt soll in Kapitel 8.5.2 näher eingegangen werden.

Dass die Laktatwerte der Interventionsgruppe im Bereich der höchsten Belastung nicht mehr signifikant stiegen, war auf die bessere Kraftentwicklung der Inspirationsmuskulatur im mechanisch ungünstigen Bereich – bezogen auf die Längenänderung der Muskulatur und die dabei geforderte Kraft (vgl. Abb. 13) – zurückzuführen. Die Wirkung des POWERbreathe-Trainings bestand in diesem Zusammenhang darin, dass durch die tiefe und schnelle Atmung gezielt eine Beanspruchung der Atemmuskulatur gefordert wurde, die bei einem normalen Atemverhalten nicht auftritt. Dieses Atemmanöver wurde während der ersten Woche der Trainingsintervention mit den Sportlern eingeübt und im Verlauf des Trainings immer wieder kontrolliert und ggf. korrigiert. Da die Sportler während der acht Wochen immer ein ähnliches Atemzugvolumen erzielten, wurde das Training grundsätzlich technisch korrekt ausgeführt und ein großer Bereich des möglichen Lungenvolumens abgedeckt. Die Vergrößerung des Atemzugvolumens unter Belastung als Reaktion auf AF 2 kann daher bei den Sportlern der ersten Interventionsgruppe nach der Trainingsintervention zu einer geringeren relativen Ermüdung der Atemmuskulatur geführt haben. Daraus resultierte eine verzögerte Auslösung des Metaboreflexes, wodurch der verringerte Laktatanstieg unter intensiver Belastung (95 %) zustande kam.

Das Verhalten der Sauerstoffaufnahme und der Herzfrequenz unter Einschränkung der Atmung veränderte sich durch das POWERbreathe-Training nicht. Unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit blieb die $\dot{V}O_2$ nahezu konstant, während die Herzfrequenz weiterhin unter AF 2 niedriger war als unter AF 1. Die oben beschriebenen Wirkmechanismen im Zusammenhang mit körperlicher Belastung unter eingeschränkter Atmung sind komplexer Natur und scheinen die Effekte des Atemtrainings deutlich zu überwiegen. Einer der ausschlaggebenden Faktoren für die Regulation war dabei die Größenordnung der Partialdrücke von O_2 und CO_2. Da die Sportler sowohl im Atemtraining als auch bei den nach der Intervention durchgeführten Lungenfunktionstests keine Vergrößerung der Lungenvolumina erzielten, ließ sich bereits ableiten, dass das POWERbreathe-Training nicht zu einer generellen Vertiefung der Atmung geführt hat, d. h. die Atemtiefe im AF 1-Intervall war nach der Intervention genauso groß wie davor (und entsprechend für AF 2). Dadurch hatte die Atmungseinschränkung bezogen auf die Blutgaskonzentrationen nach der Intervention die gleiche Wirkung wie davor und ginge mit ähnlich stark ausgeprägten Kreislaufregulationsmechanismen bzw. einer vergleichbaren Bradykardie einher.

Die Zyklusfrequenz zeigte ein ähnliches Verhalten wie die Laktatkonzentration: Ein Anstieg der Zyklusfrequenz unter AF 2 war besonders im 95 %-Bereich auch nach dem Atemtraining noch vorhanden; während die erste Interventionsgruppe diesen jedoch von Test 1 bis 4 kontinuierlich verringern konnte, blieben die Ergebnisse der anderen Hälfte der Probandengruppe über den gesamten Studienzeitraum in einer ähnlichen Größenordnung. Daraus ergab sich auch hier ein Hinweis auf die unterschiedliche Wirksamkeit des Atemtrainings zu verschiedenen Zeitpunkten im Trainingsjahr. Es liegt aufgrund der in Kapitel 8.3.1 geschilderten Zusammenhänge nahe, die verringerte Zyklusfrequenzsteigerung auf die niedrigeren Laktatwerte zurückzuführen. Über die oben beschriebene verbesserte Kraftentwicklung auch im mechanisch ungünstigen Bereich konnte das größere Atemzugvolumen unter AF 2 besser toleriert werden, was sich in

einer geringeren relativen Ermüdung der Atemmuskulatur und infolge der verzögerten Metaboreflexaktivität in niedrigeren Laktatwerten äußerte. Sowohl aufgrund der geringeren Atemarbeit als auch als Reaktion auf die niedrigeren Laktatwerte nach der Intervention ist es denkbar, dass die Sportler der ersten Interventionsgruppe infolgedessen nach dem POWERbreathe-Training weniger stark das Bedürfnis hatten, die Zeit bis zum nächsten möglichen Atemzug zu verkürzen.

Denkbar ist auch der Einfluss einer psychischen Komponente: Unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit hatten alle Sportler im Verlauf der Intervention eine zunehmend genauere Erwartungshaltung bezüglich der Belastung im Stufentest. Da das durchgeführte Protokoll nicht den im Schwimmsport üblichen Untersuchungen entsprach, ist von einer erheblichen Lernkurve im Verlauf der vier Tests auszugehen. Vor allem bei den ersten Tests berichteten Sportler sichtlich erstaunt, wie leicht es ihnen fiel, mit AF 2 zu schwimmen. Sie bekamen im Strömungskanal ein direktes Feedback über ihre Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Atemfrequenz, da eine Vergrößerung des Vortriebswiderstands durch den Atemvorgang je nach technischer Ausführung unmittelbar mit einem Zurücktreiben im Kanal verbunden war. Dannhauer und Ulmer (1983) berichteten im Zusammenhang mit einem Training der Atemanhaltezeit von einer dominanten Rolle psychischer Aspekte. Die gesteigerte Bereitschaft, die Unannehmlichkeiten der Atmungsbeschränkung zu ertragen, und das Wissen, dass dies auch tatsächlich möglich ist, führte innerhalb kürzester Zeit zu einer erheblichen Verbesserung der Atemanhaltezeit bzw. der Tauchstrecke. Für physiologische Anpassungen müsse jedoch ein deutlich längeres Zeitfenster eingeplant werden (ebenda). Während diese Lerneffekte für alle Sportler galten, berichteten die Teilnehmer des Atemtrainings zusätzlich von einer subjektiv erleichterten Atmung während des regulären Schwimmtrainings. Die Kombination beider Effekte kann somit ebenfalls zu der beobachteten geringeren Zyklusfrequenzsteigerung der ersten Intervention nach Abschluss des Atemtrainings beigetragen haben.

Zusammenfassend ließen sich folgende Zusammenhänge als Reaktion auf eine Atmungseinschränkung ableiten:

- Eine Verringerung der Atemfrequenz von AF 1 auf AF 2 führte im 95 %-Bereich zu signifikanten Veränderungen leistungsphysiologischer Parameter.
- Dabei war die resultierende Hyperkapnie entscheidender als die Hypoxie, da erstere zu verstärkter Ermüdung der Atemmuskulatur und Metaboreflex-Aktivität führte. Die Atmungseinschränkung hatte jedoch keine Auswirkung auf die Sauerstoffaufnahme.
- Es konnte eine Reduzierung der Herzfrequenz aufgrund von O_2-Sparmechanismen (Veränderung der Blutgaspartialdrücke, periphere Vasokonstriktion) beobachtet werden.
- Zur Verkürzung des Zeitraums bis zum nächsten Atemzug erhöhten die Sportler mit steigender Intensität zunehmend mehr die Zyklusfrequenz.

Nach Abschluss eines Atemtrainings zeigten sich vor allem bei der ersten Interventionsgruppe die folgenden Veränderungen bezüglich des Verhaltens unter eingeschränkter Atemfrequenz:

- Insgesamt war nur eine geringe Veränderung der Stoffwechselsituation in Folge des Atemtrainings zu beobachten; die Trainingswirkung des Schwimmtrainings war in diesem Zusammenhang deutlich ausschlaggebender.
- Es kam zu einer gesteigerten Toleranz der Erhöhung des Atemzugvolumens unter Atmungseinschränkung durch eine verbesserte Kraftentwicklung auch im mechanisch ungünstigen Bereich der Inspirationsmuskulatur. Dadurch ergaben sich Vorteile im Sinne einer geringeren Ermüdung der

Atemmuskulatur und weniger starker Auslösung der Metaboreflex-Kette, die unter Einschränkung der Atmung zusätzlich leistungsbegrenzend wirkt.

- Die bei beiden Gruppen unveränderte Bradykardie in Folge der Atmungseinschränkung wies darauf hin, dass das Atemtraining keinen Einfluss auf die komplexe Kreislaufregulation der Herzfrequenz hatte.
- Der veränderte Trainingszustand der ersten Interventionsgruppe zeigte sich auch anhand einer kontinuierlichen Verringerung der Zyklusfrequenz in den Belastungsbereichen, in denen die Atmungsbegrenzung am stärksten wirksam war (95 %).

8.4 Wirkung des Atemtrainings auf die Bewegungsstruktur

Nachdem im vorhergehenden Kapitel dargelegt wurde, inwiefern die Zyklusfrequenz durch die Atemfrequenz beeinflusst wurde, soll nun darauf eingegangen werden, wie sich die Bewegungsfrequenz im Verlauf des Untersuchungszeitraums entwickelte und welche Mechanismen diesen Veränderungen zugrunde lagen. In diesem Zusammenhang soll auch der Einfluss des Atemtrainings auf die Bewegungsstruktur im Sinne einer Folgewirkung der veränderten Kraftvoraussetzungen der Inspirationsmuskulatur diskutiert werden.

Während unter Einschränkung der Atemfrequenz eine Erhöhung der Zyklusfrequenz in Folge der metabolischen Situation zu beobachten war, zeigte sich im Verlauf der ersten drei Tests bei der ersten Interventions- und späteren zweiten Kontrollgruppe eine Verringerung der Frequenzen sowohl bezüglich der Intensität als auch im Hinblick auf den Anstieg beim Wechsel von der GA-I- zur GA-II-Belastung. So konnte nach dem Atemtraining auf allen Stufen eine deutliche Verringerung der Frequenzen realisiert werden, die sich mit der Intensität vergrößerte. Dabei waren die Veränderungen im GA-I-Bereich signifikant, bei 95 % mit -3,3/min absolut gesehen am größten. Diese Tendenz setzte sich über den interventionsfreien Zeitraum bis zum Test 3 fort. Hingegen konnte die erste Kontrollgruppe weder zwischen Test 1 und 2 noch nach der zweiten Intervention eine ähnliche Tendenz vorweisen; hier zeigten sich im ersten Interventionszeitraum keine Unterschiede und zum vierten Test nur unsystematische Veränderungen bezogen auf den dritten Test. Mögliche Effekte des Atemtrainings traten daher vorrangig bei der ersten Interventionsgruppe im Zeitraum von Test 1 bis Test 3 auf; der Fokus der weiteren Betrachtung richtet sich daher primär auf die Ergebnisse dieser Sportler.

Die im Rahmen dieser Untersuchung gezeigten Frequenzänderungen gingen nicht mit Veränderungen der Sauerstoffaufnahme einher; die Herzfrequenz sank gruppenunabhängig leicht im Verlauf der vier Tests, was dem zu erwartenden Effekt des Schwimmtrainings im gleichen Zeitraum entsprach. Bei beiden Parametern ist ein Einfluss des Atemtrainings auf die Entwicklung im Studienverlauf daher unwahrscheinlich. Da sich die Zyklusfrequenz der ersten Interventions- bzw. zweiten Kontrollgruppe jedoch trotz der nicht vorhandenen Veränderung der Sauerstoffaufnahme und der nicht von der Kontrollgruppe abweichenden Entwicklung der Herzfrequenz verringert hatte, können hier ökonomische Aspekte eine Rolle gespielt haben. Die frei gewählte Zyklusfrequenz entspricht einem energetischen Optimum bezogen auf die jeweilige Geschwindigkeit und Belastungsdauer; schon geringe Veränderungen von Zugfrequenz und -länge können dabei große Auswirkungen auf den Wirkungsgrad der Bewegung und die resultierende Geschwindigkeit haben (Swaine & Reilly, 1983). Die Verringerung der Zyklusfrequenz kann daher das Ergebnis einer veränderten Stoffwechselsituation und Ausdruck eines neuen energetischen Optimums gewesen sein.

Eine Reduzierung der Zyklusfrequenz kann im Schwimmen grundsätzlich darauf hindeuten, dass sich die Anteile der Arm- und Beinarbeit an der Gesamtbewegung verändert haben. Aufgrund der angesprochenen unveränderten Sauerstoffaufnahme und nicht gruppenspezifischen Veränderung der Herzfrequenz ist jedoch davon auszugehen, dass die Verringerung der Zyklusfrequenz der ersten Interventionsgruppe nicht das Resultat einer höheren bzw. stärker ausgeprägten Beinfrequenz war. Zwar geht bei gleichem Trainingszustand eine Reduzierung der Armfrequenz mit einer deutlichen Steigerung der Beinarbeit einher, diese würde jedoch aufgrund der größeren eingesetzten Muskelmasse die Sauerstoffaufnahme und die Herzfrequenz erheblich erhöhen (McLean et al., 2010). Dass in dieser Untersuchung keine derartige Veränderung festzustellen war, weist auf einen konstant bleibenden Anteil der Beine an der Gesamtbewegung hin. Dies deckte sich auch mit den Messungen bzw. Beobachtungen, die während der Stufentests im Strömungskanal hinsichtlich Rhythmus und Ausprägungsgrad der Beinarbeit gemacht worden waren.

Durch die bessere Kraftausdauer der Atemmuskulatur, die die Probanden dieser Studie nach der Durchführung der POWERbreathe-Intervention aufwiesen, waren sie weniger durch die negativen Folgen der inspiratorischen Muskelermüdung beeinträchtigt. Bei einem weniger guten Trainingszustand führt die enge Kopplung zwischen Atem- und Bewegungsfrequenz dazu, dass bei vorgegebener Atemfrequenz die Zyklusfrequenz erhöht wird, um die Zeit bis zum nächsten Atemzug zu verkürzen (Town & Vanness, 1990). Hier konnte hingegen ein entgegengesetzter Effekt beobachtet werden, der durch die Doppelfunktion der Atemmuskulatur erklärt werden konnte: Wenn die Muskeln, die zusätzlich zur Inspiration auch zur Rumpfstabilität und Kraftübertragung beitragen, weniger stark ermüden, kann der Vortrieb auch unter länger andauernder und erhöhter Belastung effektiv gestaltet werden. Die verringerte Zyklusfrequenz war somit Ausdruck der länger stabil bleibenden Leistung der Atemmuskulatur sowie einer dadurch besseren Kraftübertragung der doppelt eingesetzten Muskeln.

Die Sportler, die im Rahmen dieser Studie an einem Atemtraining teilnahmen, konnten sich nach acht Wochen hinsichtlich des überwundenen Atemwiderstands des POWERbreathe-Geräts deutlich steigern, veränderten aber die Atemtiefe während des Trainings nicht. Auch die Lungenfunktion zeigte keine Volumenänderungen bezüglich FVC und FEV1. Die deutliche Steigerung der mit dem Atemtrainer erzielten Leistung bzw. der dabei verrichteten Atemarbeit nach Abschluss des Trainings ließ sich daher weniger auf eine Erhöhung des Atemzugvolumens, sondern vielmehr auf eine schnellere Einatmung zurückführen. Eine verkürzte Inspirationsdauer wurde von mehreren Autoren übereinstimmend als vorteilhaft für die Leistungsentwicklung gewertet (Lerda & Cardelli, 2003; Mickleborough et al., 2008; Pedersen & Kjendlie, 2006), da sie zu einer optimalen Eingliederung der Atemtechnik in den Bewegungsablauf der Arme führt und der resultierende kontinuierlichere Vortrieb sich positiv auf den Geschwindigkeitsverlauf auswirkt (Ball et al., 1993; Keskinen & Komi, 1994; Mickleborough et al., 2008). Die signifikant verbesserten Ergebnisse des MVV-Tests bei allen Interventionsteilnehmern ließen den Schluss zu, dass die Sportler durch das Atemtraining und die damit einhergehende verbesserte intramuskuläre Koordination in der Lage waren, eine höhere Verkürzungsgeschwindigkeit der Inspirationsmuskulatur zu realisieren. Dies ist nach Clanton et al. (1987) nötig, um trotz einer kürzeren Inspirationsdauer ein ausreichend hohes Atemminutenvolumen zu erreichen.

Durch die enge Kopplung von Veränderungen der Atmung und Anpassungen der Phasenstruktur (Lerda & Cardelli, 2003) können die Sportler nach dem Atemtraining in der Lage gewesen sein, die Inspiration zugunsten einer früher einsetzenden Vortriebsphase zu verkürzen. Sie konnten dadurch ihren Koordinationsindex im Sinne einer geringeren Diskontinuität bzw. einer stärkeren Superposition durch die breitere Über-

lappung der Vortriebsphasen des linken und des rechten Arms erhöhen, was einer technischen Verbesserung entsprach. Das Ergebnis des Atemtrainings war in diesem Fall eine Veränderung der Zyklusstruktur durch eine verbesserte zeitliche Koordination der Atem- und Bewegungsphasen. Wenn dadurch der Vortrieb verbessert und der intrazyklische Geschwindigkeitsverlauf konstanter gehalten werden kann, erreicht der Sportler eine höhere Gesamtgeschwindigkeit. Da die Geschwindigkeit der einzelnen Stufen für jeden Sportler von Test 1 bis 4 konstant gehalten wurde, konnte die gleiche Stufe nach einem erfolgreich absolvierten Atemtraining mit niedrigerer Zyklusfrequenz geschwommen werden. Es ist auch denkbar, dass die Sportler dadurch, dass weniger Zeit für die Inspiration benötigt wurde, in der Lage waren, den Kopf nach der Einatmung früher wieder ins Wasser einzutauchen, was zu einer Reduzierung des Vortriebswiderstands führt. Diese Erfahrung machten einige Sportler tatsächlich bereits im ersten Test, da sie nach Abschluss des Stufenprotokolls berichteten, beim Schwimmen mit AF 2 im Kanal zumindest im GA-Bereich deutlich weniger stark nach hinten getrieben worden zu sein. Auch empfanden sie die Atmung beim Schwimmen nach dem Atemtraining subjektiv leichter als zuvor. Zwar darf in diesem Zusammenhang der Einfluss des regulären Schwimmtrainings nicht vernachlässigt werden; der Umstand, dass die genannten Phänomene bei der ersten Interventionsgruppe auftraten, bei der entsprechenden Kontrollgruppe hingegen nicht, ließ jedoch auf einen Einfluss des Atemtrainings auf die Zyklusfrequenz schließen. Dass eine Verringerung des Frequenzanstiegs im GA-Bereich möglich war, bei der 95 %- Belastung hingegen nicht, kann dabei der zeitlichen Dauer der Trainingsintervention geschuldet gewesen sein. Nach Lomax und Castle (2011) tritt erst ab einer Schwimmgeschwindigkeit von 85 % der Maximalgeschwindigkeit eine Ermüdung der Inspirationsmuskulatur auf. Die GA-I-Stufen wurden daher in dieser Hinsicht nahezu unbeeinträchtigt absolviert, während im GA-II-Bereich erste Ermüdungserscheinungen auftraten, die sich auf der 95%-Stufe weiter verstärkten. Die Effekte des Atemtrainings konnten bereits zu einer Umstellung des Bewegungs- und Atemverhaltens unter GA-II-Intensitäten führen, waren aber unter Umständen nicht groß genug, als diese auch unter hochintensiven Belastungen mit zunehmend stärkerer Ermüdung aufrechterhalten werden könnten.

Zusammenfassend ließen die Ergebnisse auf einen Folgeeffekt der Ökonomisierung der Atmung auf die zeitliche Organisation der Phasen der zyklischen Bewegung schließen. Es kam dabei zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades des Vortriebs, der sich in einer verringerten Zyklusfrequenz bei einer vorgegebenen Belastung manifestierte.

Für den zugrundeliegenden Wirkmechanismus waren folgende Aspekte relevant:

- Dass die Zyklusfrequenzänderung der Interventionsgruppe nicht mit einer Veränderung der Sauerstoffaufnahme einherging und die Veränderung der Herzfrequenz mit jener der Kontrollgruppe übereinstimmte, deutet auf eine veränderte Stoffwechselsituation unter Belastung als Ausdruck eines neuen energetischen Optimums hin.
- Als Ursache der Frequenzveränderung konnte aus den gleichen Gründen eine veränderte Beteiligung der Beine an der Gesamtbewegung ausgeschlossen werden.
- Die nach dem Atemtraining leistungsfähigeren Muskeln, die sowohl an der Atmung als auch an der Rumpfstabilität beteiligt sind, konnten für eine bessere Kraftübertragung bei der zyklischen Bewegung sorgen.
- Das POWERbreathe-Training veränderte in erster Linie die Inspirationsgeschwindigkeit, weniger die Atemtiefe. Ersteres wirkte sich positiv auf die Zyklusstruktur aus, da eine kürzere Inspiration zu weniger Störungen im Bewegungsablauf führte.

- Die verbesserte zeitliche Koordination der Atmung mit den Bewegungsphasen sorgte für einen kontinuierlicheren Vortrieb und geringere intrazyklische Geschwindigkeitsschwankungen. Die resultierende höhere Grundgeschwindigkeit führte zur beobachteten Verringerung der Zyklusfrequenz bei vorgegebener Belastung.
- Wenn die Sportler durch die schnellere Inspiration in der Lage waren, den Kopf nach dem Atemvorgang schneller wieder unter Wasser zu bringen, ist eine Verringerung des Vortriebswiderstands denkbar. In diesem Fall konnte die Zyklusfrequenz dadurch gesenkt werden, dass die Sportler weniger stark im Kanal zurücktrieben.

8.5 Trainingswissenschaftliche Aspekte

Nach der Analyse der Studienergebnisse unter leistungsphysiologischen und biomechanischen Aspekten sollen im folgenden Kapitel die Resultate des Stufentests und die sich daraus ergebende Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter aus trainingswissenschaftlicher Sicht thematisiert werden. Es erfolgt eine Einordnung der Entwicklung der Laktatwerte, der Herzfrequenz und der Sauerstoffaufnahme über den gesamten Studienzeitraum hinweg im Hinblick auf das absolvierte Schwimmtraining. Tiefergehende Trainingsanalysen des zugrundeliegenden Datenmaterials wurden im Rahmen einer Masterarbeit ausgewertet und in einer gesonderten Publikation erfasst (Dinger, im Druck). In dieser Auswertung soll hingegen verstärkt auf die Abweichungen von der erwarteten Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter eingegangen werden, die sich auf einen Einfluss des Atemtrainings zurückführen ließen.

Daran anschließend erfolgt eine Diskussion der Aspekte, die innerhalb der vorliegenden Studie als Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit des Atemtrainings identifiziert wurden. Anhand des Einsatzzeitpunkts, der von den POWERbreathe-Parametern abgeleiteten Prädiktoren zur Prognose der Leistungsentwicklung und einer Übersicht über individuelle Einflüsse soll dargestellt werden, unter welchen Voraussetzungen ein Atemtraining besonders effektiv wirken kann.

8.5.1 Leistungsphysiologische Entwicklung im Längsschnitt

Die Erfassung der Entwicklung der Laktatwerte, der Herzfrequenz und der Sauerstoffaufnahme über vier Tests hinweg bildete den Momentanzustand der Leistungsfähigkeit der Sportler zum jeweiligen Testzeitpunkt ab. Dieser war das Resultat einer Überlagerung von verschiedenen Faktoren, die leistungssteigernd oder -mindernd wirken. Grundsätzlich war von einer Verbesserung des Trainingszustands durch das von allen Sportlern absolvierte Schwimmtraining mit Land- und Wassereinheiten und das von den Interventionsgruppen zusätzlich durchgeführte Atemtraining auszugehen, sofern ein adäquater Reiz für die beteiligten Funktionssysteme vorlag. Einzelne Sportler profitierten darüber hinaus individuell vom Längenwachstum, das in der untersuchten Altersgruppe (14-17 Jahre) je nach Entwicklungsstand eine mehr oder weniger große Rolle spielte. Durch Längen- und Gewichtsveränderungen von bis zu 3 cm bzw. 5 kg (Proband 2) ergaben sich Leistungsverbesserungen aufgrund der strukturellen Anpassungsvorgänge der leistungsbestimmenden Systeme (Lemaître et al., 2013). So wurden z. B. die größten relativen Verbesserungen des MVV von den vier jüngsten Sportlern der Gruppe erzielt, die in einem Alter waren, in dem die größten

Wachstumssprünge zu verzeichnen sind (Weineck, 2004). Leistungsmindernd wirkten sich hingegen Vorbelastungen durch das Schwimmtraining aus. Eine ausreichend große Pause zwischen den regulären Einheiten und den Stufentests im Strömungskanal wäre wünschenswert gewesen, ließ sich jedoch in der Trainingspraxis nicht immer umsetzen. Daher die Testergebnisse durch zuvor absolvierte Wettkämpfe, Tests innerhalb des Schwimmtrainings und die grundsätzlichen Trainingsumfänge beeinflusst. Die Sportler absolvierten den zweiten Test in der Woche nach den Deutschen Kurzbahnmeisterschaften, die einen ersten Wettkampfhöhepunkt innerhalb der Saison darstellten. In der Woche vor dem dritten Test wurde der Umfang des Schwimmtrainings reduziert, der Anteil des WSA-Trainings jedoch deutlich erhöht. Den vierten Test absolvierten die Sportler unmittelbar nach einem über die Osterfeiertage stattfindenden Heimtrainingslager. Im Zeitraum zwischen dem dritten und dem vierten Test traten darüber hinaus jahreszeitlich bedingt diverse Krankheitsfälle auf, die zu Trainingsausfall und einem vorübergehenden Leistungsabfall führten. Auch diese Faktoren wirkten sich negativ auf die Testergebnisse im Strömungskanal aus. Eine Berücksichtigung sämtlicher individueller Einzelwirkungen ist Bestandteil einer für die Trainingssteuerung nutzbaren Leistungsdiagnostik; im Folgenden sollen jedoch nur die Tendenzen bewertet werden, die für die gesamte Gruppe bzw. die Teilgruppen galten. Dabei war die Entwicklung der ersten Kontrollgruppe bzw. zweiten Interventionsgruppe insofern nicht als kontinuierlicher Prozess zu verstehen, als sich bei dieser Hälfte der untersuchten Sportler die Zusammensetzung der Gruppe zwischen Test 2 und 3 erheblich veränderte.

Über den gesamten Studienzeitraum ließ sich unabhängig vom Atemtraining eine Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter beobachten, die der erwarteten Wirkung des vorwiegend ausdauerorientierten Schwimmtrainings entsprach. Diese äußerte sich bei allen Sportlern in einer Verringerung der Laktatwerte bei einer vorgegebenen Geschwindigkeit und einer tendenziellen Reduzierung der Herzfrequenz von Test 1 zu Test 4 (ebenda). Die Sauerstoffaufnahme blieb hingegen nahezu konstant, auch wenn vor allem zwischen Test 1 und 2 eine Reduzierung auf submaximalen Stufen als Zeichen der verbesserten Bewegungsökonomie zu erwarten gewesen wäre (Hottenrott, Neumann & Brettschneider, 2016). Wenn eine Veränderung der Sauerstoffaufnahme stattgefunden hat, war sie zu gering, um sie von der Streuung der Ergebnisse aufgrund der Messungenauigkeit der Extrapolation aus der Nachatmung abzugrenzen. Im Folgenden können jedoch Einzelaspekte thematisiert werden. Die Lungenfunktionswerte, die im Kinder- und Jugendbereich eng an die Körperabmessungen gekoppelt sind (Bar-Or, Rost & Rost, 2013), entwickelten sich in unterschiedlichem Ausmaß. Während das maximale Minutenvolumen in Ruhe bei allen Sportlern nach dem Atemtraining signifikant anstieg, veränderten sich die forcierte Vitalkapazität und die Einsekundenkapazität nur geringfügig. Letzteres entspricht der Beobachtung, dass sich im Kinder- und Jugendalter die Lungenfunktion auch nach mehrjährigem intensiven Training nur wenig verändert und die Entwicklungen vorwiegend auf die Wirkung der Wachstumsphase zurückzuführen sind (Hebestreit & Beneke, 2002).

Vor dem Hintergrund der zeitlichen Einordnung der vier Belastungstests in den Verlauf des Trainings- und Wettkampfjahres war es plausibel, dass sich vor allem die Laktatwerte am stärksten zwischen dem ersten und dem zweiten Test, d. h. im ersten Makrozyklus (MZ), veränderten. Der Ausgangstest fand kurz nach der mehrwöchigen Trainingspause in den Sommerferien zu einem Zeitpunkt statt, zu dem die Sportler erst vier Wochen Wassertraining absolviert hatten. Das Training war dementsprechend auf allgemeine und Grundlagenausdauer ausgerichtet und enthielt wenige hochintensive Belastungen sowie eine geringe Wettkampfdichte. Infolgedessen hatten viele Sportler Probleme, das Protokoll komplett zu absolvieren, und reagierten mit entsprechend erhöhten Laktatwerten. Beim zweiten Test, der acht Wochen später

stattfand, zeigte das umfangreiche Ausdauertraining bereits seine Wirkung, was sich in einer z. T. signifikanten Verringerung des Laktats und der Herzfrequenz äußerte. Die „Entwicklung allgemeiner und spezieller Leistungsvoraussetzungen“ im ersten Makrozyklus (Neumann, Pfützner & Hottenrott, 2010, S. 148) führte vor allem im GA-Bereich unabhängig von der Gruppenzugehörigkeit auch zu einem geringeren Anstieg der Herzfrequenz beim Wechsel von einer Stufe zur nächsten. Das gleiche Phänomen ließ sich auch bezüglich der Laktatwerte feststellen, wobei der Effekt bei der Interventionsgruppe größer war als bei der Kontrollgruppe. Beurteilt man das Anstiegsverhalten im Sinne des „Niveaus der Kraftfähigkeiten“ und der sportlichen Technik (Zinner et al., 1993, S. 22), ließ sich für diesen Abschnitt eine Ökonomisierung im GA-Bereich feststellen, was den Trainingsvorgaben entsprach.

Zu Beginn des Jahres startete der zweite Makrozyklus, was dazu führte, dass sowohl am Ende des ersten MZ als auch am Anfang des zweiten MZ aufgrund der Feier- und Ferientage weniger trainiert wurde. Ein Teil der Sportler absolvierte darüber hinaus ein Winterlager, in dem bezogen auf das Schwimmen unspezifisch trainiert wurde. Das erklärt, warum sich die erfassten Parameter trotz des höheren Anteils an Krafttraining (v. a. Schnellkraft und Kraftausdauer) sowie höherer Umfänge des Wassertrainings im zweiten MZ zwischen dem zweiten und dem dritten Test nur geringfügig veränderten. In diesem Zeitraum setzte sich im Wesentlichen der Trend der sinkenden Herzfrequenz- und Laktatwerte fort. Da der zweite Makrozyklus im Sinne der „Ausprägung der Wettkampfleistung“ (Neumann et al., 2010, S. 148) deutlich kraft- und umfangsorientierter gestaltet war, kam es vor allem im GA-II-Bereich zwischen dem dritten und dem vierten Test zu einem leichten Anstieg der Herzfrequenz und der Sauerstoffaufnahme. Diese Entwicklung war Ausdruck der geänderten Rekrutierung von Muskelfasern in Vorbereitung der Wettkampfleistung (Hottenrott et al., 2016). Die Laktatwerte nahmen in diesem Zeitraum sowohl absolut als auch bezogen auf den Anstieg von einer Stufe zur nächsten weiter ab, wobei dieser Effekt wieder bei der Interventionsgruppe größer als bei der Kontrollgruppe war, aber anders als im ersten Makrozyklus jetzt auch bei der 95 %-Stufe zu beobachten war. Übereinstimmend mit den Trainingsinhalten kam es im zweiten Makrozyklus auch zu einer Ökonomisierung in höheren Belastungsintensitäten.

Bezogen auf die einzelnen Interventions- und Kontrollgruppen ließ sich feststellen, dass die Veränderungen der Sauerstoffaufnahme und der Herzfrequenz über den Gesamtzeitraum betrachtet größtenteils gruppenunabhängig waren und hier die Wirkung des Schwimmtrainings die des Atemtrainings deutlich überwog. Während der zweiten Intervention kam es außerdem zwischen den beiden Gruppen insgesamt zu weniger deutlichen Unterschieden als im ersten Makrozyklus. Umso beachtlicher war es daher, dass die absolut größten MVV-Steigerungen während der zweiten Intervention erzielt wurden (Proband 14 und 15). Außerdem ließen sich bei der ersten Interventionsgruppe Folgeeffekte des Atemtrainings im zweiten Interventionszeitraum beobachten, in dem diese Sportler als Kontrollgruppe dienten. So konnten sich alle Teilnehmer des ersten Atemtrainings nach einer signifikanten Verbesserung des MVV zwischen Test 1 und Test 2 im zweiten Interventionszeitraum erneut steigern. Zwar fiel die Verbesserung dieser Gruppe zwischen Test 3 und Test 4 geringer aus als die der zweiten Interventionsgruppe, es handelte sich dennoch um einen signifikanten Effekt. Es bestand kein Zusammenhang zur Veränderung von FVC und FEV1; beide Parameter blieben im selben Zeitraum gleich oder verschlechterten sich. Studien zeigten, dass nach Ende eines POWERbreathe-Trainings der aufgebaute Kraftzuwachs innerhalb von neun Wochen um ein Drittel, nach 18 Wochen um zwei Drittel zurückgeht (Romer & McConnell, 2003). Letzteres entsprach dem Zeitraum vom Ende des Atemtrainings der ersten Interventionsgruppe bis zur Durchführung des vierten Tests, weshalb die Sportler dieser Gruppe im zweiten Interventionszeitraum trotz des nicht mehr weitergeführten Atemtrainings über ein höheres Grundniveau der Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur als vor Beginn der Studie verfügten. Sie profitierten von den koordinativen Lerneffekten und dem Kraftzuwachs

durch das vorangegangene POWERbreathe-Trainings dahingehend, dass sie die in Kapitel 8.4 angesprochene Änderung der Bewegungsstruktur im Sinne einer schnelleren Inspiration im regulären Schwimmtraining weiter fortführen konnten. Dafür spricht auch, dass sie anders als die Kontrollgruppe in der Lage waren, den Anstieg der Zyklusfrequenz bei der Steigerung der Intensität von GA I auf GA II vom ersten bis zum dritten Stufentest kontinuierlich zu verringern. In diesem Fall konnte das Atemtraining einen zusätzlichen Beitrag zu der Ökonomisierung im GA-Bereich, die in diesem Zeitraum durch das Schwimmtraining erreicht wurde, leisten. Dass die Zyklusfrequenz zum vierten Test wieder anstieg, kann der größeren Vorbelastung durch das unmittelbar vor dem Stufentest absolvierte Heimtrainingslager geschuldet gewesen sein. Es ist davon auszugehen, dass die Sportler diesen Test nicht im erholten Zustand schwammen. Eine Überlagerung der Effekte des Atemtrainings durch allgemeine Ermüdungserscheinungen war somit wahrscheinlich.

Die Sportler der ersten Interventionsgruppe konnten darüber hinaus die Laktatzunahme unter Atmungseinschränkung im 95 %-Bereich von Test 1 bis Test 4 kontinuierlich verringern. Auch hier spielt das höhere Leistungsniveau der Inspirationsmuskulatur eine Rolle: Die bessere Kraftentwicklung dieser Muskeln im endinspiratorischen Bereich, der durch die große Längenänderung bei gleichzeitiger hoher Kraftanforderung mechanisch ungünstig ist, wirkte sich vor allem bei diesem Intervall, das sowohl durch sehr hohe Atemminutenvolumina als auch ein hohes Atemzugvolumen gekennzeichnet ist, vorteilhaft aus. Die Sportler verfügten somit bereits vor Beginn des zweiten Makrozyklus, der den ersten MZ hinsichtlich Umfang und Intensität des Trainings überstieg, über eine Atemmuskulatur, die auf eine solche Belastung vorbereitet war. Das Atemtraining war in diesem Zusammenhang in der Lage, die im zweiten Makrozyklus angestrebte Ökonomisierung in höheren Belastungsbereichen zu unterstützen bzw. vorzubereiten.

Zusammenfassend waren aus trainingswissenschaftlicher Sicht folgende Aspekte im Hinblick auf die Entwicklung der Testergebnisse im Studienverlauf relevant:

- Es kam während der vier Tests zu einer Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter, die der der Erwartung bezüglich der Wirkung des überwiegend ausdauerorientierten Schwimmtrainings entsprach. Dabei fand im ersten Makrozyklus vorwiegend eine Ökonomisierung im GA-Bereich statt, was sich auf das umfangreiche Grundlagentraining zurückführen ließ. Im zweiten Makrozyklus erfolgte ein deutlich umfangreicheres und kraftorientierteres Training, wodurch sich auch Anpassungserscheinungen im höheren Intensitätsbereich feststellen ließen.
- Die Sportler der ersten Interventionsgruppe profitierten auch nach Ende des Atemtrainings von der verbesserten Koordination und Kraft der Inspirationsmuskulatur, da die erzielten Trainingseffekte nicht unmittelbar zurückgingen.
- Es konnten verschiedene Folgeeffekte abgeleitet werden:
    - Die gesteigerte Kraft und die verbesserte intramuskuläre Koordination der Inspirationsmuskulatur ermöglichte eine weitere signifikante MVV-Steigerung im Studienverlauf.
    - Durch eine schnellere Inspiration wurde die Ökonomisierung im GA-Bereich unterstützt, ausgedrückt durch niedrigeren Zyklusfrequenzanstieg beim Wechsel von GA I zu GA II.
    - Es kam durch das Atemtraining im ersten Makrozyklus zu einer Vorbereitung der Atemmuskulatur auf die hohen Intensitäten im zweiten MZ, was sich durch einen kontinuierlich verringerten Laktatanstieg in Bereichen höchster Beanspruchung im Stufentest zeigte (Einschränkung der Atmung von AF 1 auf AF 2 bei 95 %).

8.5.2 Wirksamkeit des Atemtrainings in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Durchführung und der Trainingshäufigkeit

Vor dem Hintergrund des zusätzlichen zeitlichen Aufwands, der einem Atemtraining im ohnehin schon eng getakteten Trainingsalltag eines Schwimmers eingeräumt werden muss, stellte sich die Frage, unter welchen Voraussetzungen ein solches Zusatztraining eine besonders große Wirkung entfalten kann. Zwar stellt der Zusammenhang zwischen einem Atemtraining und der Steigerung der Schwimmleistung ein komplexes System dar (Kilding et al., 2010), es ließen sich jedoch verschiedene Aspekte ermitteln, die im Verlauf dieser Studie relevant für die Effektivität der Trainingsintervention wurden. Dazu gehörte der Einsatzzeitraum innerhalb des Trainings- und Wettkampfjahres (TWJ), der durch das Crossover-Design sowohl in den ersten als auch in den zweiten Makrozyklus integriert werden konnte. Darüber hinaus konnten Zusammenhänge zwischen der Anzahl der im Rahmen des POWERbreathe-Training absolvierten Einheiten bzw. der nach acht Wochen erzielten Leistung und der Verbesserung der Sportler im Stufentest ermittelt werden. Über diese gruppenspezifischen Effekte hinaus spielte auch die individuelle Reaktion auf den Trainingsreiz eine Rolle.

Die Sportler der ersten Interventionsgruppe erzielten nach dem Atemtraining eine signifikante Reduzierung der Laktatwerte, die größer ausfiel als bei der Kontrollgruppe, einen geringeren Anstieg des Laktats und der Zyklusfrequenz beim Wechsel von GA I zu GA II sowie eine signifikante Steigerung des MVV. Die zweite Intervention hatte hingegen einen geringeren und unsystematischeren Einfluss auf die Laktatkonzentration. Darüber hinaus profitierten die Sportler der ersten Interventionsgruppe auch nach Abschluss des Atemtrainings, d. h. zum Zeitpunkt des dritten und vierten Tests, von den Folgeeffekten, die der bessere Trainingszustand der Inspirationsmuskulatur nach sich zog. Dazu gehörten eine weitere, signifikante Steigerung des maximalen Minutenvolumens in Ruhe, eine Fortsetzung der Verringerung des Zyklusfrequenzanstiegs beim Wechsel von GA I zu GA II sowie ein weiter verringerter Anstieg der Laktatkonzentration auf der 95 %-Stufe bei der Einschränkung der Atmung von AF 1 auf AF 2. Diese Effekte waren, wie bereits in Kapitel 8.5.1 dargestellt wurde, dadurch möglich, dass die Trainingswirkung des POWERbreathe-Trainings nach Abschluss der Intervention nicht unmittelbar zurückgeht. Unter diesem Gesichtspunkt empfiehlt sich ein Einsatz des Atemtrainings zu Beginn der Saison, zumal in dieser Trainingsphase der Fokus bewusst auf das Grundlagentraining gelegt wird und entsprechende Zeitfenster für diese Trainingsinhalte reserviert werden. Wenn sich die in Kapitel 8.4 dargestellte Veränderung der Bewegungsstruktur im Sinne einer verkürzten Inspiration und einer Änderung der zeitlichen Koordination der Vortriebsphasen eingestellt hat, ist es ebenfalls ratsam, den Sportlern die Möglichkeit zu geben, diese zunächst im Rahmen der weniger intensiven Inhalte des ersten Makrozyklus zu verfestigen. Auch der Umstand, dass das Atemtraining die Möglichkeit bietet, die Atemmuskulatur im ersten Makrozyklus auf die höheren Intensitäten im weiteren Verlauf des TWJ vorzubereiten, spricht für einen Einsatz des POWERbreathe-Trainings während der ersten Trainingswochen nach der Sommerpause. Dies stimmt mit der Empfehlung überein, die Lemaître et al. (2013) auf Basis ihrer Studienergebnisse aussprachen.

Auch wenn die Auswirkungen des Atemtrainings auf die Laktatwerte nach der ersten Intervention deutlicher ausfielen als bei der zweiten, kam es doch auch bei letzterer zu leistungsphysiologischen Reaktionen. So verringerte sich der Anstieg des Laktats von einer Intensität zur nächsten bei der zweiten Interventionsgruppe stärker als bei der zweiten Kontrollgruppe, anders als nach der ersten Intervention betraf dies hingegen nicht nur den Wechsel von der GA-I- zur GA-II-Stufe, sondern auch den Wechsel von der GA-II- zur 95 %-Belastung. Darüber hinaus konnte auch nach diesem Trainingsintervall das maximale Mi-

nutenvolumen signifikant gesteigert werden; auch konnten während dieser Intervention die absolut größten Prä-Post-Differenzen des MVV erzielt werden (Proband 14 und 15). Kilding et al. (2010) berichteten übereinstimmend von Leistungsverbesserungen nach einem POWERbreathe-Training während der frühen Wettkampfphase und empfehlen einen solchen Trainingsreiz als Ergänzung zum Schwimmtraining. Der Einsatz zu einem späteren Zeitraum im TWJ blieb somit nicht wirkungslos, da auch zu diesem Zeitpunkt eine Verbesserung der Lungenfunktion und der Laktatwerte bewirkt werden konnte. Allerdings kamen dadurch bei den Sportlern der zweiten Intervention die dargestellten Folgeeffekte nicht zum Tragen. Ob die Sportler in anderer Weise oder zu einem späteren Zeitpunkt von einem Atemtraining zur Mitte des TWJ profitieren, müsste in einer ganzjährigen Studie untersucht werden.

Bei bisherigen Trainingsstudien mit dem POWERbreathe-Gerät wurde – wenn überhaupt – nach Abschluss der Intervention lediglich die Trainingshäufigkeit evaluiert, um das Vorliegen eines adäquaten Trainingsumfangs zu belegen (z. B. bei Kilding et al., 2010). Im Rahmen dieser Untersuchung wurden hingegen die im Rahmen des Atemtrainings erhobenen Parameter genutzt, um Zusammenhänge zu einer Verbesserung der Leistung der Sportler im Stufentest zu ermitteln. Dieses Vorgehen ermöglichte die Ableitung eines geeigneten Leistungsprädiktors, anhand dessen bei einem zukünftigen Einsatz des Atemtrainings in der Trainingspraxis die Verbesserung leistungsphysiologischer Parameter prognostiziert werden kann, und somit die gezielte Nutzung der POWERbreathe-Ergebnisse als Ergänzung für die Trainingssteuerung.

Führt man die Ergebnisse aller in der Kreuztabellenanalyse ausgewerteten Parameter zusammen, so ließ sich zunächst ableiten, dass mit höherem Trainingsumfang sowohl die resultierende POWERbreathe-Leistung als auch die Leistungssteigerung bezogen auf den Ausgangswert stieg. Die MVV-Steigerung konnte über die Parameter Trainingshäufigkeit und Leistungssteigerung prognostiziert werden, die Verringerung der Laktatwerte unabhängig von der Intensität über alle drei untersuchten Prädiktoren. Diese Zusammenhänge traten in Bezug auf die Zykluszeit weniger deutlich in Erscheinung, auch hier zeigte sich aber tendenziell eine Verbesserung im Sinne einer Zykluszeitverlängerung bei der Hälfte der Gruppe, die mehr trainiert, eine größere Leistung und eine stärkere Leistungsverbesserung erzielt hatte. Am deutlichsten wurden diese Unterschiede im GA-I-Bereich. Über alle Parameter hinweg konnte die leistungsphysiologischen Veränderung am häufigsten mit der erreichten Leistungssteigerung in Verbindung gebracht werden, die daher bezogen auf die untersuchte Gruppe, den zur Bewertung der Veränderung herangezogenen Stufentest und die ausgewählten Parameter (MVV, Laktat und Zykluszeit) als Leistungsprädiktor herangezogen werden kann. Der Median, der zur Einteilung der Gruppen der Kreuztabelle geführt hatte, lag bei 6,5 W; ab einer Leistungssteigerung, die diesen Wert überstieg, konnte beim vorliegenden Datenmaterial mit den in Kapitel 7.6 dargestellten Wahrscheinlichkeiten davon ausgegangen werden, dass der Sportler sich in Folge des Atemtrainings im Sinne einer MVV-Steigerung, einer Laktatverringerung und einer Zykluszeitverlängerung verbesserte.

Auch der Trainingsumfang selbst bot sich zur Prognose der Wirkung des POWERbreathe-Trainings an. Zum einen konnte auch für diesen Parameter vielfach ein Zusammenhang zur Veränderung der leistungsphysiologischen Parameter ermittelt werden, außerdem zeigte sich der Einfluss der Trainingshäufigkeit beim Vergleich der Größenordnung der Prä-Post-Differenzen der ersten bzw. der zweiten Intervention: Für das Atemtraining im ersten Makrozyklus standen aufgrund äußerer Bedingungen insgesamt mehr Trainingstage zur Verfügung als für die zweite Intervention, was sich in einer größeren Steigerung aller POWERbreathe-Parameter äußerte. Dies bestätigte noch einmal den bereits durch die Kreuztabellendarstellung ermittelten Zusammenhang zwischen Trainingsumfang und erzielter Leistung bzw. Leistungssteigerung, zeigte aber auch, dass für den Fall, dass die Leistungssteigerung nicht erfasst werden kann, ebenso gut der

Trainingsumfang zur Bewertung des Trainingsfortschritts herangezogen werden kann. Im Rahmen dieser Studie war ab einer Trainingshäufigkeit von 44 POWERbreathe-Einheiten innerhalb von acht Wochen bei einem Großteil der Sportler einer Verbesserung im Stufentest zu erwarten, was einer Durchführung von rund 45 % der maximal möglichen Einheiten entsprach. Der Geltungsbereich dieses Werts ist analog zu dem des genannten Medians der Leistungssteigerung begrenzt auf die Rahmenbedingungen des Studiendesigns.

Die zuvor genannten Aspekte zur zeitlichen Planung und Quantifizierung des Trainingsfortschritts können zur Planung eines Atemtrainings einer Gruppe hinreichend sein, berücksichtigen aber nicht zwingend die individuelle Reaktion des einzelnen Sportlers auf den Trainingsreiz. Anhand der exemplarischen Gegenüberstellung von drei Sportlern, die durch große Trainingsumfänge oder hohe Leistungssteigerungen bezogen auf das Atemtraining auffielen, soll verdeutlicht werden, welche Faktoren grundsätzlich zur Leistungsentwicklung beitragen (Tab. 56). Alle Probanden gehörten zur Gruppe der Sportler, deren Trainingsumfang deutlich über dem Median von 44 Einheiten lag, Proband 4 erzielte diesbezüglich den Maximalwert der gesamten Gruppe. Trotz der Unterschiede bezüglich Geschlecht, Hauptstrecke und Zeitpunkt der Intervention konnten sie den Atemwiderstand im POWERbreathe-Gerät deutlich steigern, was mit einer entsprechend großen Leistungssteigerung (ΔP) einherging. Proband 14 erzielte dabei eine signifikante MVV-Verbesserung, die die Werte von Proband 2 und 4, die im direkten Vergleich in einer ähnlichen Größenordnung lagen, deutlich überstieg. Mit Proband 2 verband diesen Probanden eine ähnliche Entwicklung der Laktatwerte im Sinne einer mit der Intensität zunehmenden Reduzierung, während die Laktatkonzentration bei Sportler 4 auf den meisten Stufen unverändert blieb und z. T. sogar anstieg. Proband 2 konnte hingegen als einziger eine durchgehende Verlängerung der Zykluszeit realisieren, während dieser Parameter bei den anderen beiden Sportlern sank (Proband 4) oder sich unsystematisch veränderte (Proband 14). In allen drei Fällen konnte man den Probanden übereinstimmend mit Kilding et al. (2010) einen ergogenen Nutzen durch das zusätzliche Atemtraining bescheinigen, der jedoch individuell verschieden ausfiel.

Tab. 56. Exemplarische Gegenüberstellung von drei Probanden mit großem Trainingsumfang bzw. großer Leistungssteigerung

	Proband 2	Proband 4	Proband 14
Geschlecht	w	w	m
Hauptstrecke	50 m Brust	400 m-1500 m FS	200 m/400 m Lagen
Intervention	1	1	2
Einheiten	57	88	58
Last nach 8 Wochen [cm H_2O]	56	80	65
ΔP [W]	7,7	11,1	7,8
MVV [l/min]	19,5	19,1	41,5
Laktat [mmol/l]	Maximale Differenz: -3,47	Gleich oder leicht höher (+1,39)	Maximale Differenz: -3,54
Zykluszeit [s]	bis +0,14	gleich bis -0,14	-0,08 bis +0,12

Bereits die Auswertung der Ergebnisse der POWERbreathe-Parameter zeigte ein höchst unterschiedliches Ansprechverhalten der einzelnen Sportler auf den geforderten Trainingsreiz. So gab es z. B. sowohl Sportler, die trotz hoher Trainingsumfänge nur eine geringe Laststeigerung innerhalb der acht Wochen realisieren konnten, und vice versa. Unabhängig von der Trainingshäufigkeit schnitten die männlichen Probanden bezogen auf die Leistungssteigerung und die MVV-Verbesserung am besten ab. Dies stand im Widerspruch zu den Ergebnissen von Mickleborough et al. (2008), die keine geschlechtsspezifischen Unterschiede im

Zusammenhang mit einem Atemtraining feststellen konnten. Es ist jedoch aufgrund der prinzipiell höheren Maximalkraftwerte bei männlichen Sportlern denkbar, dass sich die männlichen Probanden dieser Studie relativ betrachtet weniger stark verbesserten als die Sportlerinnen. In zukünftigen Untersuchungen könnte dieser Fragestellung mit Hilfe einer Maximalkraftbestimmung mit dem POWERbreathe-Gerät vor und nach der Intervention nachgegangen werden. Angesichts des Alters der untersuchten Probanden erscheint auch eine unterschiedliche Reaktion auf das Atemtraining aufgrund verschiedener hormoneller Voraussetzungen plausibel (Lemaître et al., 2013). Bei männlichen Probanden führt die gesteigerte Ausschüttung der Keimdrüsen- und Nebennierenrinden-Hormone ab dem Einsetzen der Pubertät zu einer besonders guten Trainierbarkeit und infolgedessen zu einem deutlichen Leistungszuwachs (Braun, 1983). Mickleborough et al. (2008) wiesen außerdem darauf hin, dass die Adaptation der inspiratorischen Muskelkraft im Kindesalter größer ausfällt als bei Jugendlichen und jungen Erwachsenen. Diese graduelle Abnahme erklärt z. B. die großen Leistungssteigerungen von Proband 2 und 14, die zu den jüngsten der gesamten Gruppe gehörten.

Es traten jedoch auch Unterschiede zwischen vergleichbaren Probanden gleichen Alters und gleichen Geschlechts auf: So hatte Proband 1 in Bezug auf Trainingshäufigkeit und Umfang sowohl im Wasser auch im POWERbreathe-Training nahezu identische Grundvoraussetzungen wie Proband 2, konnte sich jedoch statt auf 56 cm H_2O nur auf 43 cm H_2O steigern. Die Ursache dafür kann das im Verlauf der Studie bei diesem Probanden diagnostizierte Belastungsasthma gewesen sein, das in Studien bereits für höhere Laktatwerte und eine höhere Belastung der Atemmuskulatur verantwortlich gemacht werden konnte (Roussos & Macklem, 1982). Es ist denkbar, dass eine solche Beeinträchtigung der Atemwege die Leistungsentwicklung im POWERbreathe-Training hemmt.

Aufgrund der kleinen Gruppengröße ließ sich keine Differenzierung der Atemtrainingsergebnisse nach der im Erhebungsbogen angegebenen bevorzugten Streckenlänge vornehmen. Bei den jüngeren Sportlern, die sich noch im Aufbautraining befanden, war dies vorrangig auf die Forderung zurückzuführen, in diesem Alter noch nicht mit einer zu frühen Spezialisierung zu beginnen (Bußmann et al., 2015), was abgesehen von der persönlichen Vorliebe der Sportler auf einen vielseitig ausgebildeten Trainingszustand rückschließen ließ. Jedoch konnte sich auch bei den älteren Sportlern keine systematische Reaktion auf das Atemtraining in Abhängigkeit von der Eignung für Ausdauer- oder Sprintbelastungen festgestellt werden. Es ist denkbar, dass Sportler je nach bevorzugter Streckenlänge von unterschiedlichen Effekten des durchgeführten Atemtrainings profitierten: Auf den Sprintdistanzen wirken sich die größere inspiratorische Verkürzungsgeschwindigkeit, die schnellere Einatmung und der reduzierte Anstieg des Laktats und der Zyklusfrequenz in Folge eines POWERbreathe-Trainings vorteilhaft auf die Leistungsentwicklung aus. Dem Ausdauersportler steht zwar ein längeres Zeitfenster für die Atmung zur Verfügung, wodurch der Atemvorgang nicht mit maximaler Geschwindigkeit durchgeführt werden muss. Durch die niedrigere Atemfrequenz und die längere Belastungsdauer erhöht sich hingegen die Anzahl der Atemzüge innerhalb des Wettkampfs, weshalb auf den Ausdauerdistanzen die durch das Atemtraining verbesserte Ökonomie des einzelnen Atemzugs ausschlaggebender ist. Bei der untersuchten Gruppe wurden diese Effekte jedoch, sofern sie bestanden, von anderen Einflussfaktoren überlagert. Entscheidender für die Leistungsentwicklung war neben den bereits genannten Aspekten die Motivation bzw. Compliance der Sportler. So steigerte sich z. B. Proband 13, der nur unter erheblichem Aufwand für das Atemtraining gewonnen werden konnte, innerhalb von acht Wochen nur von 10 auf 27 cm H_2O und erzielte mit einer Leistungssteigerung von lediglich einem Watt das schlechteste Ergebnis der Gesamtgruppe. Sportler 14 fiel hingegen durch eine besonders hohe Motivation auf, was in den oben dargestellten großen Leistungsentwicklungen vor allem in Bezug auf das maximale Minutenvolumen resultierte.

Die Darstellung der Einzelergebnisse zeigte, dass die Verbesserung der schwimmerischen Leistung ein multifaktorielles System darstellt, bei dem sich einzelne Einflussfaktoren nur schwer isolieren lassen (Lemaître et al., 2013). Grundsätzlich sollten folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Es sollte ein möglichst frühzeitiger Einsatz des Atemtrainings innerhalb des Trainings- und Wettkampfjahrs angestrebt werden, um die Atemmuskulatur in Phasen niedriger Belastungsintensitäten auf die später zu bewältigenden höheren Belastungen vorzubereiten und von verschiedenen Folgeeffekten zu profitieren.
- Als Leistungsprädiktor empfahl sich die Leistungssteigerung im Umgang mit dem POWERbreathe-Gerät bezogen auf den Ausgangswert (ΔP). Eine Prognose war darüber hinaus auch über den absolvierten Trainingsumfang möglich.
- Zu den individuellen Einflussfaktoren, die auf die Leistungsentwicklung der Sportler einwirken, gehörten neben Alter und Geschlecht (und der damit verbundenen hormonellen Situation) gesundheitliche Einschränkungen der Atemwege sowie die Motivation, zusätzliche, über das reguläre Schwimmtraining hinausgehende Trainingsinhalte zu absolvieren.

9 Fazit

9.1 Empfehlungen für die Durchführung eines Atemtrainings

Abschließend sollen die im Rahmen dieser Studie gewonnenen praktischen Erfahrungswerte genutzt werden, um Empfehlungen für die Gestaltung eines Atemtrainings auszusprechen.

Bezogen auf die Rahmenbedingungen hat es oberste Priorität, dass das Training so gestaltet wird, dass es sich möglichst störungsfrei in den ohnehin straff durchgetakteten Trainingsalltag eines ambitionierten Nachwuchssportlers integrieren lässt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die verwendeten Trainingsmittel in der Schwimmhalle in unmittelbarer Nähe zum Beckenrand gelagert, so dass die Sportler das Atemtraining unmittelbar vor Beginn des Wassertrainings durchführen konnten. Die für das Gerät empfohlenen zwei Durchgänge (je einmal morgens und abends) wurden aus Zeitgründen zu einer einzigen Trainingseinheit zusammengelegt. Auch ist der zeitliche Aufwand für Wartung und Pflege der Geräte gering zu halten, um den Sportlern keine zusätzliche Belastung aufzuerlegen. Während der durchgeführten Interventionen wurden Reinigung und Kontrolle des Akkuzustands durch die Versuchsleitung durchgeführt; für eine langfristige Integration eines solchen Trainingsinhaltes müssten andere Lösungen gefunden werden. Hier ist für Schwimmer unter Umständen die mechanische Vorgängervariante des eingesetzten Geräts sinnvoller. Die Vorteile bestehen darin, dass ein solches Gerät robuster, kostengünstiger und vor allem unempfindlich gegenüber Feuchtigkeit ist und nicht regelmäßig aufgeladen werden muss. Dem steht die fehlende Möglichkeit, die absolvierten Einheiten intern zu speichern, und somit eine Erschwerung der Trainingssteuerung gegenüber. Es ist zielführend, die Aufbewahrung der Atemtrainer so zu gestalten, dass diese schnell griffbereit, durch eine deutliche Personalisierung (z. B. durch Markierungen in unterschiedlichen Farben) eindeutig zuzuordnen und durch einen regelmäßig geprüften Akku sofort einsatzbereit sind. Vor allem während der Einführungsphase des Trainings sollte eine enge Zusammenarbeit mit den Sportlern erfolgen, um das korrekte Erlernen der Technik und eine angemessene Steigerungsrate der Belastung sicherzustellen. Auf diese Weise kann auch technischen Problemen und Anpassungsschwierigkeiten an die Belastung zeitnah begegnet werden. Einige Sportler (vor allem große und schlanke) reagierten anfangs mit leichten Kreislaufproblemen und Hyperventilationssymptomen auf das Atemtraining, die sich durch eine langsamere Atmung oder eine Gewöhnung an die Belastung durch eine Ausführung in sitzender statt stehender Position beheben ließen. Eine regelmäßige Rücksprache mit allen beteiligten Sportlern und Trainern während des gesamten Trainingszeitraums fördert die Compliance bzw. Motivation zur Durchführung zusätzlicher Umfänge sowie die generelle Akzeptanz der ungewohnten Trainingsinhalte.

Als Einsatzzeitpunkt empfiehlt sich aufgrund der in Kapitel 8.5.2 dargestellten Folgeeffekte für spätere Trainingsphasen ein Beginn des Atemtrainings während des GA-Trainings im ersten Makrozyklus. Dadurch kann die Atemmuskulatur bereits in Phasen niedrigerer Trainingsintensitäten auf die Belastungssteigerung in den folgenden Makrozyklen vorbereitet werden. Zur Trainingssteuerung bietet sich die Orientierung an der mit dem POWERbreathe-Gerät erzielten Leistungssteigerung bezogen auf den Ausgangswert zu Beginn des Atemtrainings an, alternativ kann auch der absolvierte Trainingsumfang als Leistungsprädiktor herangezogen werden. Bei der Planung von Trainingsinhalten sind individuelle Faktoren wie Alter, Geschlecht, Vorerkrankungen der Atemwege oder Motivation zu berücksichtigen, die ein unterschiedliches Ansprechen auf den Trainingsreiz nach sich ziehen. Nach sechs Wochen des durchgeführten *Foundation Trainings* ist laut Hersteller keine weitere Leistungssteigerung mehr zu erwarten, sofern die Vorgaben (2x täglich

30 Atemzüge) umgesetzt wurden. In diesem Fall kann der Trainingszustand durch ein reduziertes *Maintainance Training* (2-3 x pro Woche) erhalten werden. Da es sich hierbei nur um grobe Richtwerte handelt und es während der durchgeführten Trainingsinterventionen auch in der siebten und achten Woche zu weiteren Steigerungen kam, sollte der Trainingsfortschritt beobachtet und bei einem Abflachen der Entwicklungskurve zum Maintainance Training gewechselt werden. Alternativ können Trainingsvarianten wie das *Functional Training* zum Einsatz kommen, bei dem ein Training mit dem POWERbreathe mit Übungen aus dem Rumpfkrafttraining kombiniert wird, um die Belastung der Atemmuskulatur spezifischer zu gestalten. Auch ein Aufwärmprogramm mit dem Atemtrainer (Wilson et al., 2014) oder eine Belastung durch Atemzüge mit dem POWERbreathe-Gerät während der Pausen eines Intervalltrainings im Schwimmbecken (McConnell, 2011) haben sich bereits als trainingswirksam erwiesen. Darüber hinaus kann das Atemtraining als risikoarmes Alternativtraining bei verletzten Sportlern eingesetzt werden. Ist die Anschaffung eines Trainingsmittels für die Atmung aus Kostengründen nicht möglich, sollte verstärkt auf ein Training der Rumpfmuskulatur geachtet werden, da durch die enge Kopplung der Nutzung der Rumpfmuskeln zur Stabilisierung des Rumpfes und Unterstützung der Atmung auch Transfereffekte auf die Atemmuskulatur möglich sind (ebenda). In Anlehnung an die Wirkungsweise des ab der dritten Woche der Trainingsintervention eingesetzten Thera-Bands kann auch beim Schwimmen selbst ein spezifischeres Training der Atemmuskulatur erfolgen, wenn mit einem um den Brustkorb fixierten Thera-Band geschwommen wird. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, das Trainingsmittel anfangs nur punktuell (z. B. während der Erwärmung) einzusetzen und die Belastung nicht zu schnell zu steigern.

9.2 Zukünftige Fragestellungen

Visualisiert man das Wissen um einen bestimmmten Sachverhalt als Kreisfläche, so steigt durch Erweiterung dieses Wissens – d. h. durch die Vergrößerung des Flächeninhalts – auch das Ausmaß dessen, worüber man noch keine Aussage treffen kann (dargestellt durch den Umfang des Kreises). Analog dazu konnte im Rahmen dieser Untersuchung der Wissensstand zum Atemverhalten und -training beim Freistilschwimmen vorangetrieben werden; aufgrund des Untersuchungsdesigns und der vorhandenen technischen Möglichkeiten konnten jedoch nicht alle Parameter, die zum Nachweis der dargestellten Wirkungsmechanismen benötigt wurden, messtechnisch erfasst werden. Auch reichte der Stichprobenumfang in den meisten Fällen nicht aus, um signifikante Veränderungen in Folge des Atemtrainings belegen zu können. Nach Bortz und Lienert (2008) ist bei nichtparametrischen Tests ein Stichprobenumfang von jeweils 50 Probanden für die Interventions- und die Kontrollgruppe nötig, um bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0{,}05$ signifikante Unterschiede mittlerer Größe nachweisen zu können. Eine solche Stichprobengröße ist im Zusammenhang mit Leistungssportlern unrealistisch, weshalb im Allgemeinen empfohlen wird, Untersuchungen mit geringem Stichprobenumfang oder Teile davon zu wiederholen und auf diesem Wege die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu prüfen (ebenda). Im Zuge dessen können bestimmte Teilaspekte differenzierter untersucht werden. So sollte zum Beispiel anhand einer Online-Messung (z. B. mit einem Meta-Swim-System) während eines Belastungsprotokolls im Strömungskanal überprüft werden, ob in Folge eines POWERbreathe-Trainings tatsächlich schneller eingeatmet wird. In diesem Zusammenhang könnte auch die in der Literatur darstellte Vergrößerung des Atemzugvolumens in Folge einer Verringerung der Atemfrequenz bestätigt werden, um auf diesem Weg die Argumentation zu stützen, dass es bei Vorgabe einer Hypoventilationsatmung zu einer stärkeren Ermüdung der Atemmuskulatur durch die stärkere Dehnung und die veränderte Muskelbeanspruchung kommt. Die resultierende Muskelermüdung

kann dabei z. B. während der Pausen des Belastungsprotokolls oder im Anschluss an den Stufentest mit einem POWERbreathe-Gerät durch Messung des maximalen Widerstands, der vor bzw. nach der Belastung überwunden werden kann, quantifiziert werden. Auch die Abfrage der inspiratorischen statt der exspiratorischen Einsekundenkapazität im Rahmen der Lungenfunktion könnte die postulierte schnellere Inspiration nach einem Atemtraining bestätigen. Generell sollte bei einer zukünftigen Planung eines Testprotokolls berücksichtigt werden, dass die Inspirationsdauer aussagekräftiger zu sein scheint als die Atemfrequenz (Lomax & Castle, 2011). Kann eine Verkürzung der Einatmung nachgewiesen werden, sollte auch die in Anlehnung an das Phasenkoordinationskonzept von Seifert et al. dargestellte Optimierung der Vortriebsphasen durch das Atemtraining verifiziert werden, beispielsweise durch eine Videoanalyse. Über begleitende Ultraschall-Aufnahmen des Zwerchfells kann im Verlauf der Trainingsintervention die muskuläre Adaptation quantifiziert werden (Downey et al., 2007).

Aus trainingswissenschaftlicher Sicht ist eine Einordnung der im Rahmen des Atemtrainings erzielten Ergebnisse anhand von Vergleichswerten wünschenswert. Statt wie in dieser Intervention die absoluten Werte zu erfassen, ließe sich durch einen Maximaltest zu Beginn und nach Ende des Trainings ein relativer Bezug herstellen, wodurch die Verbesserung des Sportlers bewertbar wird und die Steigerungsraten verschiedener Sportler miteinander verglichen werden können. Auch die Einsatzmöglichkeiten innerhalb des Trainings- und Wettkampfjahres könnten detaillierter untersucht werden: Eine weitere Leistungskontrolle der Sportler mit oder ohne weiteres Atemtraining könnte zum einen zeigen, wie lange die gezeigten Effekte vorhalten, und zum anderen analysieren, ob die Durchführung eines Maintainance Trainings sich positiv auf die Leistung auswirkt – falls nicht, ist es aus Zeitgründen zielführender, lediglich im Rahmen des Grundlagentrainings einen solchen Trainingsimpuls zu setzen und im Verlauf des Trainings- und Wettkampfjahres von dessen Wirkung zu zehren. Auch das Functional Training wurde mangels Möglichkeiten zur Umsetzung innerhalb des straffen Zeitplans der Sportler für die vorliegende Studie verworfen, sollte aber Bestandteil zukünftiger Untersuchungen sein. Eine Integration in das Athletiktraining ist grundsätzlich umsetzbar, da derzeit jedoch lediglich eine Studie bekannt ist, die die Wirkung eines solchen Trainings untersucht hat (Tong et al., 2016), müssen weitere Trainingsinterventionen angestrebt werden.

Das in dieser Untersuchung gewählte Belastungsprotokoll wich insofern von den meisten Studien ab, als zwei vorgegebene Atemrhythmen innerhalb des gleichen Tests bei zunehmender Belastung gefordert waren, während in CFB-Untersuchungen typischerweise in einem ersten Test eine bestimmte Atemfrequenz und zu einem späteren Zeitpunkt eine andere getestet wird. Dadurch waren einzelne Testabschnitte unterschiedlich stark von den einsetzenden Ermüdungserscheinungen geprägt; weitere Erkenntnisse zur Wirksamkeit eines Atemtrainings können sich daher über eine isolierte Betrachtung von Einzelaspekten (z. B. das Schwimmen einer einmaligen Maximal- oder Submaximalbelastung) ergeben. Durch die konstant gehaltene Geschwindigkeitsvorgabe für jeden einzelnen Athleten über die vier Tests hinweg ließ sich eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse herstellen, es wurde hingegen nicht getestet, ob sich das Atemtraining auch positiv auf die tatsächliche Schwimmleistung (z. B. im Wettkampf) auswirkt. Kilding et al. (2010) konnten bereits nachweisen, dass sich die 100-m- und 200-m-Zeit von Schwimmern nach sechs Wochen POWERbreathe-Training signifikant verbesserte, weitere Studien könnten diesbezüglich jedoch ein differenzierteres Bild liefern. Auch konnte durch das durchgeführte Trainingsprotokoll die Reaktion auf Hypoventilation nur geringfügig verbessert werden. Es sind daher zusätzliche Untersuchungen dahingehend notwendig, wie das Atemverhalten eines Weltklasseathleten adaptiert werden kann.

9.3 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde im Rahmen einer Interventionsstudie mit Nachwuchssportlern die Wirkung eines Atemtrainings mit einem POWERbreathe-Gerät auf die schwimmerische Leistung untersucht. Durch ein Crossover-Design erfolgte dabei eine Abgrenzung der Einflüsse des regulären Schwimmtrainings von denen des zusätzlichen respiratorischen Trainings, außerdem konnte der Einsatz während zweier verschiedener Zeiträume innerhalb des Trainings- und Wettkampfjahres (erster bzw. zweiter Makrozyklus) getestet werden. Vor und nach jeder Intervention erfolgte eine Erfassung relevanter leistungsdiagnostischer Parameter im Rahmen eines Stufenprotokolls im Strömungskanal. Erstmalig wurde dabei die Reaktion auf Hypoventilation vor und nach einem Atemtraining getestet. Ein weiterer Neuigkeitswert dieser Studie ergab sich dadurch, dass die Wirksamkeit des Atemtrainings nicht allein anhand der veränderten leistungsphysiologischen Reaktion auf eine vorgegebene Belastung bewertet wurde, sondern zusätzlich eine Quantifizierung der Trainingswirkung auf Basis der POWERbreathe-Parameter erfolgte. Aufgrund dieser Auswertung konnten Zusammenhänge zwischen den mit dem Atemtrainer durchgeführten Trainingseinheiten und der Belastungsreaktion im Stufentest sowie Leistungsprädiktoren für die Trainingssteuerung identifiziert werden.

Das Hauptergebnis des Atemtrainings bestand in einer verbesserten Kraftfähigkeit der Atemmuskulatur, für die als Ursache eine verbesserte intramuskuläre Koordination in Frage kommt. Sie äußerte sich bei isolierter Belastung der Atemmuskulatur in Form einer höheren Verkürzungsgeschwindigkeit und damit einhergehend mit signifikant besseren Ergebnissen im MVV-Test. Volumenvergrößerungen (AZV, FVC, FEV1) konnten hingegen nicht festgestellt werden. Bei einer Ganzkörperbelastung kam es durch die bessere Ökonomie der Atemmuskulatur zu verringerten Laktatwerten, vor allem in hohen Intensitätsbereichen. Hintergrund der geringeren Gesamtlaktatkonzentration kann eine lokal verbesserte Laktateliminationoder eine geringere Laktatproduktion sein. Außerdem ist es in den Augen der Autorin realistisch, dass die in Folge des Trainings geringere Ermüdung der Atemmuskulatur zu einer Abschwächung des inspiratorischen Metaboreflexes geführt hat, wodurch es zu einer weniger starken Umverteilung des Blutflusses im Gesamtorganismus und einer besseren metabolischen Situation in der Arbeitsmuskulatur der Extremitäten kam. Auch dadurch lassen sich die insgesamt verringerten Laktatwerte begründen. Als Reaktion auf eine Einschränkung der Atemfrequenz im Stufentest kam es zu Beginn der Studie zu einer leichten Verringerung der Herzfrequenz im Sinne eines O_2-Sparmechanismus und einer Erhöhung der Zyklusfrequenz zur Verkürzung des Zeitraums bis zum nächsten Atemzug. Das Atemtraining konnte diesbezüglich keine Veränderungen herbeiführen, lediglich auf der 95 %-Stufe kam es zu einem leicht reduzierten Anstieg des Laktats. Die muskulär bedingt schnellere Inspiration kann sich hingegen auf die Bewegungsstruktur ausgewirkt haben, da es in Folge des Atemtrainings zu einer Verringerung der Zyklusfrequenz kam. Als Ursache dafür ist eine verbesserte Kraftübertragung auf die Arme im Bereich des Rumpfes und eine höhere Effizienz der Antriebsimpulse im Sinne einer Optimierung der Vortriebsphasen zu nennen, wodurch sich ein kontinuierlicherer intrazyklischer Geschwindigkeitsverlauf ergibt. Die Folgeeffekte, die an den Teilnehmern der ersten Intervention auch nach Ende des Atemtrainings noch beobachtet werden konnten, wiesen darauf hin, dass die Atemmuskulatur in einer Trainingsphase, die durch niedrige Intensitäten zur Ausprägung der Grundlagenausdauer gekennzeichnet ist, durch zusätzliche Trainingsreize an die höheren Belastungen herangeführt werden konnte, die im zweiten Makrozyklus geschwommen wurden. Das POWERbreathe-Training wurde damit der Forderung von Küchler und Graumnitz (2001) nach spezifischeren Inhalten im GA-Training zur Vorbereitung der Wettkampfleistung gerecht und stellt eine sinnvolle Ergänzung

des regulären Schwimmtrainings dar. Die eingangs aufgestellte Arbeitshypothese konnte daher bestätigt werden.

Das Zustandekommen einer Leistungssteigerung in Folge eines Atemtrainings stellte sich dabei als komplexes Zusammenspiel der beteiligten Systeme dar (Kilding et al., 2010). Die drei „Zahnräder", die für den Transport des Sauerstoffs zum Muskel und den Rücktransport des in Folge der körperlichen Aktivität anfallenden Kohlendioxids zuständig sind und durch ihre Arbeitsweise die Leistungsfähigkeit des Organismus bestimmen (Kroidl et al., 2014, vgl. Abb. 2), konnten auf unterschiedliche Weise von einem Atemtraining profitieren. Die Ventilation konnte durch die höhere Verkürzungsgeschwindigkeit erhöht werden und steigerte dadurch den Beitrag der Lunge. Eine direkte Verbesserung der Leistung des Herzens stellte sich zwar nicht ein, jedoch konnte durch die Abschwächung des inspiratorischen Metaboreflexes in Folge des Atemtrainings die Kreislaufregulation verbessert werden. Auf muskulärer Ebene kam es in mehrfacher Hinsicht zu Veränderungen: Zum einen verbesserte sich die Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur, was zum anderen eine geänderte Stoffwechselsituation für die Arbeitsmuskulatur in den Extremitäten nach sich zog. Zur Verdeutlichung des Gesamtzusammenhangs erfolgt in Abb. 51 eine Darstellung der Hauptergebnisse des Atemtrainings (grün), der Veränderungen der erfassten Messgrößen (blau) und der in diesem Zusammenhang relevanten Mechanismen, mittels derer die beobachteten Phänomene erklärt werden konnten. Dabei wurde analog zur Struktur der Ergebnis- und Diskussionskapitel zwischen der Wirkung des Atemtrainings bei isolierter Belastung der Atemmuskulatur und den Folgen des Atemtrainings für den Gesamtorganismus während einer Ganzkörperbelastung unterschieden.

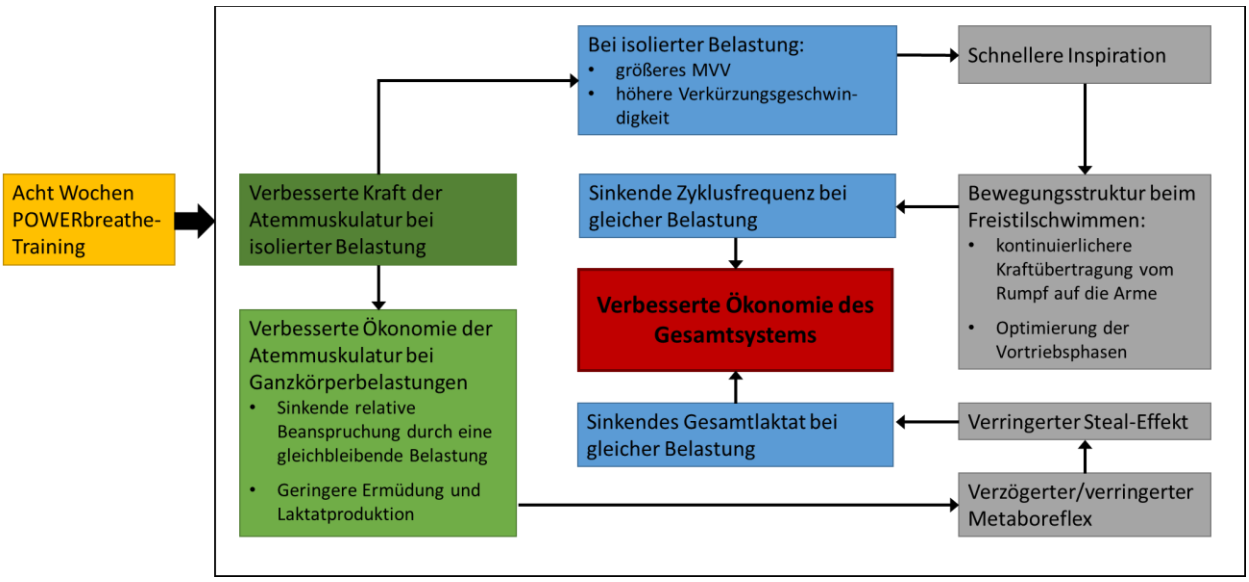


Abb. 51. Darstellung des Gesamtzusammenhangs aller beschriebenen Effekte in Folge eines Atemtrainings: Hauptergebnisse des Atemtrainings (grün), erfasste Messgrößen (blau) und zugrundeliegende Zusammenhänge, die der Literatur entnommen wurden (grau)

Zwecks gezielterer Trainingssteuerung sollten zukünftig nicht nur die dargestellten Prädiktoren zur Kontrolle des laufenden Trainings eingesetzt werden, sondern darüber hinaus Tests in das leistungsdiagnostische Spektrum von sportmedizinischen Untersuchungen aufgenommen werden, die die Leistungsfähigkeit der Atemmuskulatur erfassen. Diese sollten hinsichtlich ihrer Ausrichtung über die Parameter hinausgehen, die bereits im Rahmen eines Lungenfunktionstests ausgewertet werden. So lässt sich beispielsweise über Ultraschallaufnahmen des Zwerchfells im Längsschnitt der Fortschritt eines Atemtrainings bewerten.

Durch eine Erfassung des MIP vor und nach den bereits im Rahmen von sportmedizinischen Untersuchungen durchgeführten Ausbelastungstests lässt sich die Größe der inspiratorischen Muskelermüdung quantifizieren (Brown et al., 2008). Auch Belastungstests, die isoliert die Atemmuskulatur bis zur Ausbelastung beanspruchen, sind denkbar (Ramirez-Sarmiento et al., 2002). Durch eine kontinuierliche Durchführung dieser Tests mit Leistungssportlern können Normwerte abgeleitet werden, anhand derer zukünftige Testergebnisse exakter eingeordnet und bewertet werden können. Eine regelmäßige, standardisierte Kontrolle atemmechanischer Parameter – beispielsweise im Rahmen der komplexen Leistungsdiagnostik des Deutschen Schwimmverbands – erlaubt auf diesem Weg, individuelle Leistungsreserven hinsichtlich der Atmung aufzuzeigen und spezifische Empfehlungen für die Gestaltung eines Atemtrainings auszusprechen. Eine Integration dieses diagnostischen Instrumentariums im Bereich des Nachwuchstrainings und damit in den langfristigen Leistungsaufbau hat das Potential, auf lange Sicht zu einer Verbesserung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Schwimmsports beizutragen.

10 Literatur

Aaron, E. A., Seow, K. C., Johnson, B. D. & Dempsey, J. A. (1992). Oxygen cost of exercise hyperpnea. Implications for performance. *Journal of applied physiology, 72* (5), 1818-1825.

Adrian, M. J., Singh, M. & Karpovich, P. V. (1966). Energy cost of leg kick, arm stroke, and whole crawl stroke. *Journal of applied physiology, 21* (6), 1763-1766.

Aumüller, G. (2007). *Anatomie. 208 Tabellen* (Duale Reihe). Stuttgart: Thieme.

Ball, K., Hahn, A. & Mason, B. (1993). Untersuchungen zum intrazyklischen Geschwindigkeits-Zeit-Verlauf am Hüft- und Körperschwerpunkt im Kraulschwimmen. *Leistungssport* (5), 52-54.

Bar-Or, O., Rost, R. & Rost, G. (2013). *Die Praxis der Sportmedizin in der Kinderheilkunde: Physiologische Grundlagen und klinische Anwendung*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Barth, B. & Schnabel, G. (2014). *Trainingslehre - Trainingswissenschaft. Leistung - Training - Wettkampf* (3., aktualisierte Aufl.). Aachen: Meyer et Meyer.

Boitel, G., Vercruyssen, F., Alberty, M., Nesi, X., Bourdon, L. & Brisswalter, J. (2010). Kick frequency affects the energy cost of aquatic locomotion in elite monofin swimmers. *European journal of applied physiology, 109* (6), 1087-1093. doi: 10.1007/s00421-010-1450-6.

Bortz, J. & Döring, N. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation. Für Human- und Sozialwissenschaftler* (Springer-Lehrbuch, 5., überarb. Aufl.). Heidelberg: Springer.

Bortz, J. & Lienert, G. A. (2008). *Kurzgefasste Statistik für die klinische Forschung. Leitfaden für die verteilungsfreie Analyse kleiner Stichproben: mit 97 Tabellen sowie zahlreichen Formeln* (Springer-Lehrbuch, 3., aktualisierte und bearb. Aufl.). Heidelberg: Springer.

Boutellier, U. (1996). Die Atmung als leistungslimitierender Faktor bei Normalpersonen und Sportlern. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 47* (Sonderheft), 216-219.

Braun, W. (1983). *Körperliche und kardio-zirkulatorische Leistungsfähigkeit von Schülern im Kindes- und Jugendalter (10-17 Jahre) mit unterschiedlicher sportlicher Aktivität*. Dissertation, Universität Gießen. Gießen.

Brown, P. I., Sharpe, G. R. & Johnson, M. A. (2008). Inspiratory muscle training reduces blood lactate concentration during volitional hyperpnoea. *European journal of applied physiology, 104* (1), 111-117. doi: 10.1007/s00421-008-0794-7.

Brown, S. & Kilding, A. E. (2011). Exercise-induced inspiratory muscle fatigue during swimming: The effect of race distance. *Journal of Strength and Conditioning Research, 25* (5), 1204-1209.

Bucher, K. (1952). *Reflektorische Beeinflußbarkeit der Lungenatmung*. Wien: Springer.

Bühner, M. & Ziegler, M. (2009). *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. London: Pearson Studium.

Bußmann, G., Döttling, H. W., Jankowski, A., Jedamski, A., Lambertz, H., Lamodke, F. et al. (Rudolph, K., Hrsg.). (2015). *Nachwuchskonzeption Schwimmen 2020. Vom Grundlagen- bis zum Anschlusstraining,* Deutscher Schwimmverband. Zugriff am 01. Juni 2017 unter http://www.dsv.de/fileadmin/dsv/documents/schwimmen/Amtliches/150327_Nachwuchskonzeption_Schwimmen_2020.pdf

Capelli, C., Pendergast, D. R. & Termin, B. (1998). Energetics of swimming at maximal speeds in humans. *European journal of applied physiology, 78,* 385-393.

Capelli, C., Zamparo, A., Cigalotto, A., Francescato, M. P., Soule, R. G., Termin, B. et al. (1995). Bioenergetics and biomechanics of front crawl swimming. *Journal of applied physiology, 78* (2), 674-679.

Chiappa, G. R., Roseguini, B. T., Vieira, P. J. C., Alves, C. N., Tavares, A., Winkelmann, E. R. et al. (2008). Inspiratory muscle training improves blood flow to resting and exercising limbs in patients with chronic heart failure. *Journal of the American College of Cardiology, 51* (17), 1663-1671. doi: 10.1016/j.jacc.2007.12.045.

Chollet, D., Chalies, S. & Chatard, J. C. (2000). A new index of coordination for the crawl: description and usefulness. *International journal of sports medicine, 21* (1), 54-59. doi: 10.1055/s-2000-8855.

Clanton, T. L., Dixon, G. F., Drake, J. & Gadek, J. E. (1987). Effects of swim training on lung volumes and inspiratory muscle conditioning. *Journal of applied physiology, 62* (1), 39-46.

Costabel, U. & Kroegel, C. (2013). *Klinische Pneumologie. Das Referenzwerk für Klinik und Praxis*. Stuttgart: Thieme.

Costill, D. L., Kovaleski, J., Porter, D., Kirwan, J., Fielding, R. & King, D. (1985). Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *International journal of sports medicine, 6* (5), 266-270.

Craig, A. B. (1986). Breath holding during the turn in competitive swimming. *Medicine and science in sports and exercise, 18* (4), 402-407.

Craig, A. B. & Pendergast, D. R. (1979). Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. *Medicine and science in sports, 11* (3), 278-283.

Dannhauer, G. & Ulmer, H.-V. (1983). Zur Trainierbarkeit der Atemanhaltezeit- physiologische und psychische Aspekte. *Leistungssport* (6), 29-32.

Delahoche, J., Delapille, P., Lemaître, F., Verin, E. & Tourny-Chollet, C. (2005). Arterial oxygen saturation and heart rate variation during breath-holding: comparison between breath-hold divers and controls. *International journal of sports medicine, 26* (3), 177-181. doi: 10.1055/s-2004-820976.

Di Prampero, P. E., Cortili, G., Mognoni, P. & Saibene, F. (1976). Energy cost of speed skating and efficiency of work against air resistance. *Journal of applied physiology, 40* (4), 584-591.

Dicker, S. G., Lofthus, G. K., Thornton, N. W. & Brooks, G. A. (1980). Respiratory and heart rate responses to tethered controlled frequency breathing swimming. *Medicine and science in sports and exercise, 12* (1), 20-23.

Dinger, S. (im Druck). *Einfluss eines umfangsorientierten Trainings im Schwimmen auf ausgewählte Parameter der Atmung*. Masterarbeit, Universität Leipzig. Leipzig.

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. *Respiratory Physiology & Neurobiology, 156* (2), 137-146. doi: 10.1016/j.resp.2006.08.006.

Enright, S. J. & Unnithan, V. B. (2011). Effect of Inspiratory Muscle Training Intensities on Pulmonary Function and Work Capacity in People Who Are Healthy: A Randomized Controlled Trial. *Physical Therapy, 91* (6), 894-905.

Enright, S. J., Unnithan, V. B., Heward, C., Withnall, L. & Davies, D. H. (2006). Effect of High-Intensity Inspiratory Muscle Training on Lung Volumes, Diaphragm Thickness, and Exercise Capacity in Subjects Who Are Healthy. *Physical Therapy, 86* (3), 345-354.

Faller, A. (1984). *Der Körper des Menschen. Einführung in Bau und Funktion* (Flexibles Taschenbuch: Med, 3014, 10., überarb. Aufl.). München: Deutscher Taschenbuch-Verlag.

Fleisch, A. (1929). Über die Eigenschaften der propriozeptiven Atmungsreflexe. *Pflügers Archiv für die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere, 222* (1), 12-25. doi: 10.1007/BF01755097.

Fowler, W. S. (1954). Breaking point of breath-holding. *Journal of applied physiology, 6* (9), 539-545.

Fregosi, R. F. & Dempsey, J. A. (1986). Effects of exercise in normoxia and acute hypoxia on respiratory muscle metabolites. *Journal of applied physiology, 60* (4), 1274-1283.

Friedrich, W. (2005). *Optimales Sportwissen*. Balingen: Spitta-Verlag.

Graumnitz, J. & Küchler, J. (2004). Entwicklungstendenzen und Leistungsreserven im Schwimmen. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft, 11* (2), 119-128.

Graumnitz, J. & Küchler, J. (2009). Zur Wettkampfanalyse und daraus folgenden Ableitungen für die wissenschaftliche Arbeit im Deutschen Schwimm-Verband. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft, 16* (1), 9-19.

Graumnitz, J. & Küchler, J. (2017). Ausgewählte Aspekte der Olympiazyklusanalyse im Schwimmen (Becken) 2012-2016. In D. Büsch, I. Seidel & J. Wick (Hrsg.), *Olympiaanalyse Rio 2016.* Aachen: Meyer & Meyer.

Griffiths, L. A. (2009). *The application of respiratory muscle training to competitive rowing*. Dissertation, Brunel University unter https://www.researchgate.net/profile/Lisa_Griffiths/publication/266608648_THE_APPLICATION_OF_RESPIRATORY_MUSCLE_TRAINING_TO_COMPETITIVE_ROWING/links/5594fbc808ae5d8f392f925f.pdf

Griffiths, L. A. & McConnell, A. K. (2007). The influence of inspiratory and expiratory muscle training upon rowing performance. *European journal of applied physiology, 99* (5), 457-466.

Guderjahn, O. (2008). *Validierung der monoexponentiellen Nachatmungsmethode nach unterschiedlichen Belastungsintensitäten bei Sportlern unterschiedlicher Ausdauerleistungsfähigkeit in Annäherung an den breath-by-breath-Modus*. Dissertation, Universität Hamburg. Hamburg.

Harms, C. A., Babcock, M. A., McClaran, S. R., Pegelow, D. F., Nickele, G. A., Nelson, W. B. et al. (1997). Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *Journal of applied physiology, 82* (5), 1573-1583.

Hebestreit, H. U. & Beneke, R. (2002). *Kinder- und Jugendsportmedizin: Grundlagen, Praxis, Trainingstherapie; 41 Tabellen*. Stuttgart: Thieme.

Hoffmann, U., Dräger, T., Özen, Ş. & Çotuk, H. (2005). Cardiovascular responses to apnea during dynamic exercise and breath-hold underwater swimming. In J. Desola (Hrsg.), *Proceedings of the Fifteenth International Congress on Hyperbaric Medicine. Barcelona, 5-10 September 2005* (S. 42-44). Barcelona: SUB-HELP.

Hoffmann, U., Smerecnik, M., Leyk, D. & Essfeld, D. (2005). Cardiovascular responses to apnea during dynamic exercise. *International journal of sports medicine, 26* (6), 426-431. doi: 10.1055/s-2004-821113.

Hollmann, W. & Strüder, H. K. (2009). *Sportmedizin. Grundlagen für körperliche Aktivität, Training und Präventivmedizin; mit 91 Tabellen* (5., völlig neu bearb. und erw. Aufl.). Stuttgart: Schattauer.

Höltke, V., Degenhardt, A., Steuer, M., Starischka, S., Zeman, V. & Jakob, E. (2007). Die Bestimmung der maximalen Sauerstoffaufnahme auf der Grundlage spirometrischer Messungen der Nachbelastungsatmung. In U. Hartmann (Hrsg.), *Ausdauer und Ausdauertraining. Symposiumsbericht, München 2003* (Wissenschaftliche Berichte und Materialien/ Bundesinstitut für Sportwissenschaft, Bonn, Bd. 2007,14, 1. Aufl.). Köln: Sportverl. Strauss.

Hottenrott, K., Neumann, G. & Brettschneider, W. D. (2016). *Trainingswissenschaft: Ein Lehrbuch in 14 Lektionen*. Aachen: Meyer + Meyer Fachverlag.

Institut für Angewandte Trainingswissenschaft. (2008, 11. November). *Neuer Strömungskanal Schwimmen an IAT übergeben,* Institut für Angewandte Trainingswissenschaft. Zugriff am 08. Dezember 2016 unter http://www.iat.uni-leipzig.de/aktuelles/neuer-stroemungskanal-schwimmen-wird-uebergeben

Jakovljevic, D. G. & McConnell, A. K. (2009). Influence of different breathing frequencies on the severity of inspiratory muscle fatigue induced by high-intensity front crawl swimming. *Journal of Strength and Conditioning Research, 23* (4), 1169-1174. doi: 10.1519/JSC.0b013e318199d707.

Johnson, B. D., Babcock, M. A., Suman, O. E. & Dempsey, J. A. (1993). Exercise-induced diaphragmatic fatigue in healthy humans. *The Journal of physiology, 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. *European journal of applied physiology, 101* (6), 761-770. doi: 10.1007/s00421-007-0551-3.

Jung, R., Brun, R., Becker, P. E. & Bay, E. (2013). *Neurologie 0*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Keskinen, K. L. & Komi, P. V. (1994). Intracycle variation in force, velocity and power as a measure of technique performance during front crawl swimming. *Journal of Biomechanics, 27* (6), 672. doi: 10.1016/0021-9290(94)90996-2.

Key, M., Bunn, J. & Eschbach, C. (2014). Assessment of the Effects of Controlled Frequency Breathing on Lactate Levels in Swimming. *Journal of Athletic Enhancement, 03* (05). doi: 10.4172/2324-9080.1000164.

Kilding, A. E., Brown, S. & McConnell, A. K. (2010). Inspiratory muscle training improves 100 and 200 m swimming performance. *European journal of applied physiology, 108* (3), 505-511. doi: 10.1007/s00421-009-1228-x.

Kroidl, R., Schwarz, S., Lehnigk, B. & Fritsch, J. (2014). *Kursbuch Spiroergometrie: Technik und Befundung verständlich gemacht*. Stuttgart: Thieme.

Küchler, J. & Graumnitz, J. (2001). Olympische Spiele in Sydney 2000 - Entwicklungstendenzen im Schwimmen. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft, 8* (1), 25-32.

Küchler, J., Graumnitz, J. & Buck, M. (2013). Olympiazyklusanalyse im Schwimmen 2008-2012. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft, 20* (1), 70-88.

Küchler, J. & Leopold, H. (2000). Ergebnisse aus einer Wettkampfbeobachtung bei den XXIV. Schwimm-Europameisterschaften. *Zeitschrift für Angewandte Trainingswissenschaft, 7* (1), 87-104.

Léger, L. A., Seliger, V. & Brassard, L. (1980). Backward extrapolation of V'O2max values from the O2 recovery curve. *Medicine and science in sports and exercise, 12* (1), 24-27.

Leith, D. E. & Bradley, M. (1976). Ventilatory muscle strength and endurance training. *Journal of applied physiology, 41* (4), 508-516.

Lemaître, F., Cocquart, J. B., Chavallard, F., Castres, I., Mucci, P., Costalat, G. et al. (2013). Effect of Additional Respiratory Muscle Endurance Training in Young Well-Trained Swimmers. *Journal of Sports Science and Medicine* (12), 630-638.

Leopold, W. (2002). *Competition Analysis, XXVI. European Championships in Swimming, July, 29. - August, 04. 2002.* Berlin: DSV.

Lerda, R. & Cardelli, C. (2003). Breathing and propelling in crawl as a function of skill and swim velocity. *International journal of sports medicine, 24* (1), 75-80. doi: 10.1055/s-2003-37195.

Lomax, M. & Castle, S. (2011). Inspiratory muscle fatigue significantly affects breathing frequency, stroke rate, and stroke length during 200m front-crawl swimming. *Journal of Strength and Conditioning Research, 25* (10), 2691-2695.

Lüning, H. (Spomedis GmbH, Hrsg.). (2016, 13. Juni). *Atemlos schwimmen.* Zugriff am 21. März 2017 unter http://swim.de/training/trainingsplaene/atemlos-schwimmen-65147

Mauch, C. (2011). *Die Rolle der Ergoreflexaktivierung in der Atmungs- und Kreislaufregulation*. Dissertation, Universität Regensburg. Regensburg.

McConnell, A. (2011). *Breathe strong, perform better*. Champaign, Illinois: Human Kinetics.

McConnell, A. K. (2009). Respiratory Muscle Training as an Ergogenic Aid. *Journal of Exercise Science & Fitness, 7* (2), 18-27. doi: 10.1016/S1728-869X(09)60019-8.

McConnell, A. K. & Lomax, M. (2006). The influence of inspiratory muscle work history and specific inspiratory muscle training upon human limb muscle fatigue. *The Journal of physiology, 577* (1), 445-457. doi: 10.1113/jphysiol.2006.117614.

McDonagh, T. A., Gardner, R. S., Clark, A. L. & Dargie, H. (2011). *Oxford Textbook of Heart Failure*. Oxford: OUP Oxford.

McLean, S. P., Palmer, D., Ice, G., Truijens, M. & Smith, J. C. (2010). Oxygen uptake response to stroke rate manipulation in freestyle swimming. *Medicine and science in sports and exercise, 42* (10), 1909-1913. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181d9ee87.

Mickleborough, T. D., Stager, J. M., Chatham, K., Lindley, M. R. & Ionescu, A. A. (2008). Pulmonary adaptations to swim and inspiratory muscle training. *European journal of applied physiology, 103* (6), 635-646. doi: 10.1007/s00421-008-0759-x.

Mohnke, M. (2008). *Der Einfluss eines Apnoe-Trainings auf die Sauerstoffkinetik in der Nachbelastungsphase bei einem 50m Freistil-Sprint in Abhängigkeit von der Atemfrequenz*. Dissertation, Universität Hamburg. Hamburg.

Neumann, G., Pfützner, A. & Berbalk, A. (2013). *Optimiertes Ausdauertraining. Trainingsplanung, Leistungsaufbau, Ernährungstipps* (7. Aufl.). Aachen: Meyer + Meyer Fachverlag.

Neumann, G., Pfützner, A. & Hottenrott, K. (2010). *Das große Buch vom Triathlon* (2., überarb. Aufl.). Aachen: Meyer + Meyer Fachverlag.

Pedersen, T. & Kjendlie, P.-L. (2006). The effect of the breathing action on velocity in front crawl sprinting. In J. P. Vilas-Boas, F. F. Alves & A. Marques (Hrsg.), *Biomechanics and Medicine in Swimming X* (Bd. 10, S. 75-77).

Pokan, R., Förster, H., Hofmann, P., Hörtnagl, H., Ledl-Kurkowski, E. & Wonisch, M. (2013). *Kompendium der Sportmedizin: Physiologie, Innere Medizin und Pädiatrie*. Wien: Springer.

POWERbreathe International Ltd. (2011). *POWERbreathe K5 Manual.* Zugriff am 31. Mai 2017 unter http://respiration.cz/index.php?controller=attachment&id_attachment=4.

Ramirez-Sarmiento, A., Orozco-Levi, M., Guell, R., Barreiro, E., Hernandez, N., Mota, S. et al. (2002). Inspiratory muscle training in patients with chronic obstructive pulmonary disease: structural adaptation and physiologic outcomes. *American journal of respiratory and critical care medicine, 166* (11), 1491-1497. doi: 10.1164/rccm.200202-075OC.

Reer, R., Schmidt, B., Ziegler, M. & Braumann, K.-M. (2007). Can the rebreathing method be applied in the swim flume and swimming pool? In European College of Sport Science (Hrsg.), *Book of Abstracts of the 12th Annual Congress of the European College of Sport Science in Jyväskylä, Finland from 11-14 July 2007.* unter https://ecss2007.cc.jyu.fi/schedule/proceedings/pdf/1257.pdf

Ribeiro, J. P., Chiappa, G. R. & Callegaro, C. C. (2012). The contribution of inspiratory muscle function to exercise limitation in heart failure: pathophysiological mechanisms. *Revista Brasileira De Fisioterapia, 16* (4), 261-267.

Ringe, K. I. (2005). *Über Stoffwechselbedingungen und trainingsbegleitende Diagnostik beim Apnoetauchen*. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen. Göttingen.

Romer, L. M. & McConnell, A. K. (2003). Specificity and reversibility of inspiratory muscle training. *Medicine and science in sports and exercise, 35* (2), 237-244. doi: 10.1249/01.MSS.0000048642.58419.1E.

Romer, L. M., McConnell, A. K. & Jones, D. A. (2002). Effects of inspiratory muscle training upon recovery time during high intensity, repetitive sprint activity. *International journal of sports medicine, 23* (5), 353-360. doi: 10.1055/s-2002-33143.

Romer, L. M. & Polkey, M. I. (2008). Exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance. *Journal of applied physiology, 104* (3), 879-888. doi: 10.1152/japplphysiol.01157.2007.

Roßkopf, P. (1996). *Atemfrequenz als Parameter der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung. Untersuchung zur Anwendbarkeit im Breitensport* (Schriftenreihe Schriften zur Sportwissenschaft, Bd. 8). Hamburg: Verlag Dr. Kovač.

Rost, R. (2005). *Sport- und Bewegungstherapie bei Inneren Krankheiten. Lehrbuch für Sportlehrer, Übungsleiter, Physiotherapeuten und Sportmediziner*. Köln: Deutscher Ärzte-Verlag.

Roth, S. & Stahl, A. (2016). *Mechanik und Wärmelehre. Experimentalphysik – anschaulich erklärt*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Roussos, C. & Macklem, P. T. (1982). The respiratory muscles. *The New England journal of medicine, 307* (13), 786-797. doi: 10.1056/NEJM198209233071304.

Rüdrich, P., Lüdemann, R., Jost, J., Wüstenfeld, J. & Wolfarth, B. (2016, September). *Ermittlung der aeroben Beanspruchung im Ringen-spezifischen Leistungstest mit der Nachatmungsmethode*. Poster auf dem 47. Deutschen Sportärztekongress, Frankfurt am Main.

Schagatay, E., van Kampen, M., Emanuelsson, S. & Holm, B. (2000). Effects of physical and apnea training on apneic time and the diving response in humans. *European journal of applied physiology, 82,* 161-169.

Schramm, E. (1987). *Sportschwimmen*. Berlin: Sportverlag.

Schurr, S. (2013). *Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im Ausdauersport*. Norderstedt: Books on Demand.

Schwenke, S. (ssM swimsportMedia GmbH, Hrsg.). (2016, 19. Februar). *Michael Phelps überrascht mit neuer Technik beim Freistil-Finish (inklusive Video).* Zugriff am 27. März 2017 unter https://swimsportnews.de/index.php/21-startseite/international/kurzmeldungen-int/5693-phelps-ueberrascht-mit-neuer-technik-beim-freistil-finish-inkl-video

Secher, N. H., Clausen, J. P., Klausen, K., Noer, I. & Trap-Jensen, J. (1977). Central and regional circulatory effects of adding arm exercise to leg exercise. *Acta physiologica Scandinavica, 100* (3), 288-297. doi: 10.1111/j.1748-1716.1977.tb05952.x.

Secher, N. H., Ruberg-Larsen, N., Binkhorst, R. A. & Bonde-Petersen, F. (1974). Maximal oxygen uptake during arm cranking and combined arm plus leg exercise. *Journal of applied physiology, 36* (5), 515-518. Abgerufen von http://jap.physiology.org/content/jap/36/5/515.full.pdf

Secher, N. H. & Volianitis, S. (2006). Are the arms and legs in competition for cardiac output? *Medicine and science in sports and exercise, 38* (10), 1797-1803. doi: 10.1249/01.mss.0000230343.64000.ac.

Séhel, S. (2016). *Besser Kraul-Schwimmen: Die richtigen Techniken, um länger und ökonomischer zu schwimmen. 15 grundlegende Methoden zur Verbesserung der Effizienz. Die verschiedenen Kraul-Stile vom Becken bis ins Freiwasser*. Grünwald: Copress Sport.

Seifert, L., Chollet, D. & Allard, P. (2005). Arm coordination symmetry and breathing effect in front crawl. *Human movement science, 24* (2), 234-256.

Shapton, L. (2012). *Swimming Studies*. London: Penguin Publishing Group.

Sheel, A. W., Derchak, P. A., Morgan, B. J., Pegelow, D. F., Jacques, A. J. & Dempsey, J. A. (2001). Fatiguing inspiratory muscle work causes reflex reduction in resting leg blood flow in humans. *The Journal of physiology, 537* (1), 277-289.

Sheel, A. W., Derchak, P. A., Pegelow, D. F. & Dempsey, J. A. (2002). Threshold effects of respiratory muscle work on limb vascular resistance. *American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology, 282* (5), H1732-H1738. Abgerufen von http://ajpheart.physiology.org/content/ajpheart/282/5/H1732.full.pdf

Sinoway, L. I., Smith, M. B., Enders, B., Leuenberger, U., Dzwonczyk, T., Gray, K. et al. (1994). Role of diprotonated phosphate in evoking muscle reflex responses in cats and humans. *The American journal of physiology, 267* (2), H770-H778.

Sleivert, G. & Mackinnon, L. T. (1991). The validation of backward extrapolation of submaximal oxygen consumption from the oxygen recovery curve. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 63* (2), 135-139.

Smerecnik, M., Hoffmann, U. & Leyk, D. (2002). Herz-Kreislauf-Verhalten unter Apnoe während intensiver Arbeit. In A. Hahn, K. Reischle & D. Strass (Hrsg.), *Schwimmen. Biomechanische, sportmedizinische und didaktische Analysen* (Schriftenreihe Schriften zur Sportwissenschaft, 36). Hamburg: Verlag Dr. Kovač.

Speckmann, E.-J., Hescheler, J. & Köhling, R. (2013). *Physiologie* (6. Aufl.). Amsterdam: Urban & Fischer in Elsevier.

Spengler, C. M., Roos, M., Laube, S. M. & Boutellier, U. (1999). Decreased exercise blood lactate concentrations after respiratory endurance training in humans. *European journal of applied physiology, 79,* 299-305.

Stager, J. M. & Tanner, D. A. (2008). *Handbook of Sports Medicine and Science: Swimming*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Swaine, I. & Reilly, T. (1983). The freely-chosen swimming stroke rate in a maximal swim and on a biokinetic swim bench. *Medicine and science in sports and exercise, 15* (5), 370-375.

Technisches Zentrum Leipzig. (2016, 30. November). *Strömungskanal am IAT Leipzig,* Technisches Zentrum Leipzig. Zugriff am 08. Dezember 2016 unter http://www.tz-leipzig.com/sk%20leipzig.htm

Thompson, K. G., MacLaren, D. P. M., Lees, A. & Atkinson, G. (2004). The effects of changing pace on metabolism and stroke characteristics during high-speed breaststroke swimming. *Journal of sports sciences, 22* (2), 149-157. doi: 10.1080/02640410310001641467.

Tong, T. K., McConnell, A. K., Lin, H., Nie, J., Zhang, H. & Wang, J. (2016). 'Functional' inspiratory and core muscle training enhances running performance and economy. *Journal of Strength and Conditioning Research, 30* (10), 2942-2951. doi: 10.1519/JSC.0000000000000656.

Town, G. P. & Vanness, J. M. (1990). Metabolic responses to controlled frequency breathing in competitive swimmers. *Medicine and science in sports and exercise, 22* (1), 112-116.

Van den Berg, F. & Arendt-Nielsen, L. (2007). *Angewandte Physiologie* (Physiofachbuch, 2., aktualisierte Aufl.). Stuttgart [u.a.]: Thieme.

Vinogradova, O. L., Popov, D. V., Tarasova, O. S., Bravyi, Y. R., Missina, S. S., Bersenev, E. Y. et al. (2012). Ergoreflex. The essence and mechanisms. *Human Physiology, 38* (7), 665-674. doi: 10.1134/S0362119712070250.

Wein, J., Andersson, J. P. & Erdéus, J. (2007). Cardiac and ventilatory responses to apneic exercise. *European journal of applied physiology, 100* (6), 637-644. doi: 10.1007/s00421-007-0411-1.

Weineck, J. (2004). *Optimales Training. Leistungsphysiologische Trainingslehre unter besonderer Berücksichtigung des Kinder- und Jugendtrainings* (14. Aufl.). Balingen: Spitta-Verlag.

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. *European journal of applied physiology, 94* (5-6), 527-540. doi: 10.1007/s00421-005-1375-7.

West, S. A., Drummond, M. J., Vanness, J. M. & Ciccolella, M. E. (2005). Blood lactate and metabolic responses to controlled frequency breathing during graded swimming. *Journal of Strength and Conditioning Research, 19* (4), 772-776.

Wilson, E. E., McKeever, T. M., Lobb, C., Sherriff, T., Gupta, L., Hearson, G. et al. (2014). Respiratory muscle specific warm-up and elite swimming performance. *British journal of sports medicine, 48* (9), 789-791. doi: 10.1136/bjsports-2013-092523.

Windeler, J. & Conradt, C. (1999). Wie können "Signifikanz" und "Relevanz" verbunden werden? *Medizinische Klinik, 94* (11), 648-651. doi: 10.1007/BF03045008.

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. *The Journal of physiology, 584* (3), 1019-1028. doi: 10.1113/jphysiol.2007.140855.

Witt, M. (2008). *Antriebsgestaltung bei zyklischen Bewegungen. Unter besonderer Beachtung der oberen Extremitäten* (Schriftenreihe Schriften zur Sportwissenschaft, Bd. 75). Hamburg: Verlag Dr. Kovač.

Witt, M., Matthaei, A., Berbalk, A., Graumnitz, J. & Küchler, J. (2014). Atmung als Leistungsreserve. In W. Freitag (Hrsg.), *Schwimmen - Lernen und Optimieren Band 36* (S. 47-59). Lage: Deutsche Schwimmtrainer-Vereinigung.

Wylegala, J. A., Pendergast, D. R., Gosselin, L. E., Warkander, D. E. & Lundgren, C. (2007). Respiratory muscle training improves swimming endurance in divers. *European journal of applied physiology, 99* (4), 393-404. doi: 10.1007/s00421-006-0359-6.

Yanai, T. & Hay, J. G. (2000). Shoulder impingement in front-crawl swimming: II. Analysis of stroking technique. *Medicine and science in sports and exercise, 32* (1), 30-40.

Ziegler, M., Guderjahn, O., Reer, R. & Braumann, K.-M. (2006). Die Validierung der Nachatmungsmethode im breath-by-breath-Modus. In Bundesinstitut für Sportwissenschaft (Hrsg.), *BISp-Jahrbuch: Forschungsförderung 2005/06* (S. 197-202). Rheinbreitbach: Medienhaus Plump.

Zinner, J., Pansold, B. & Buckwitz, R. (1993). Computergestützte Auswertung von Stufentests in der Leistungsdiagnostik. *Leistungssport* (2), 21-26.

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1. Abnehmende Medaillenzahl der deutschen Nationalmannschaft seit Ende der neunziger Jahre (Angaben vor 1990: nur BRD; Küchler et al., 2013) 4
Abb. 2. „The 3 gears“ nach Wasserman (modifiziert nach Kroidl et al., 2014) 5
Abb. 3. Anteile der Energiebereitstellung (in Anlehnung an Neumann et al., 2013) 9
Abb. 4. Komponenten der Atemstrategie 9
Abb. 5. Inspiratorische Muskelermüdung beim Schwimmen im Vergleich zu anderen Sportarten (McConnell, 2011) 10
Abb. 6. Sauerstoffaufnahme ($\dot{V}O_2$), Herzfrequenz (HR) und Beinfrequenz (KR) in Abhängigkeit von der Zyklusfrequenz (McLean et al., 2010) 12
Abb. 7. Veranschaulichung des IdC: der gezeigte Sportler weist auf der einen Seite eine Antriebsüberlappung, auf der anderen eine Diskontinuität im Vortrieb auf (modifiziert nach Seifert et al., 2005) 13
Abb. 8. Ergebnisse der Videoanalyse der Freistilrennen und -staffeln der WM 2011 in Shanghai (Witt et al., 2014) 16
Abb. 9. Atemrhythmen 200 m Männer: M. Phelps (USA) und Y. Sun (China). Vereinfachte Darstellung einer 50m-Teilstrecke, Schwimmrichtung von links nach rechts (Witt et al., 2014) 17
Abb. 10. Atemrhythmen 200 m Frauen: C. Muffat (Frankreich), K. Palmer (Australien) und F. Pellegrini (Italien). Vereinfachte Darstellung einer 50m-Teilstrecke, Schwimmrichtung von links nach rechts (Witt et al., 2014) 17
Abb. 11. Atemmechanische Funktionsweise des Zwerchfells. a: Ausdehnung im erschlafften Zustand, b: radiale Kontraktion der Muskelfasern, c: resultierende Verschiebung im Bauchraum in Folge einer Kontraktion (Aumüller, 2007) 19
Abb. 12. Darstellung der Wirkungsweise der Interkostalmuskulatur (Aumüller, 2007) 20
Abb. 13. Zusammenhang zwischen Füllungsgrad der Lunge und möglichem Kraftmaximum der Inspirationsmuskulatur (McConnell, 2011) 20
Abb. 14. Auswirkungen eines O_2-Mangels (Mitte) und eines CO_2-Überschusses (rechts) auf die Normalatmung eines Kaninchens (links; Bucher, 1952) 21
Abb. 15. Anregung und Hemmung der Atem- und Kreislauftätigkeit unter körperlicher Belastung durch verschiedene Reflexe (Ribeiro, Chiappa & Callegaro, 2012) 22
Abb. 16. Wirkungsweise des inspiratorischen Metaboreflexes (Ribeiro et al., 2012) 26
Abb. 17. Verlauf von pCO_2 und pO_2 unter Apnoe mit und ohne vorherige Hyperventilation; A: Breaking Point bei Tauchgang ohne vorausgegangene Hyperventilation, B: Breaking Point bei Tauchgang mit vorausgegangener Hyperventilation (Ringe, 2005) 28
Abb. 18. Links: Laktat, Zugfrequenz und Herzfrequenz unter CFB (2er- bis 8er-Atmung); rechts: $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, Tidalvolumen (Atemzugvolumen) und Minutenvolumen im gleichen Testprotokoll (Town & Vanness, 1990) 30
Abb. 19. Verbesserungen durch IPTL-Training hinsichtlich Kraft, maximaler Verkürzungsgeschwindigkeit und maximaler mechanischer Leistung (McConnell, 2011) 32
Abb. 20. Verringerter Beinwiderstand (links) und verbesserter Blutfluss in die Extremitäten (rechts) nach inspiratorischem Widerstandstraining (Ribeiro et al., 2012) 34

Abb. 21. Belastungsprotokoll des Stufentests der Pilotstudie; oben: kontinuierliche Belastung, unten: intermittierende Belastung. Horizontale Zeitachse in Minuten, untereinander die Abfolge der Stufen inkl. Pausen und Messungen 41
Abb. 22. Zeitlicher Ablauf der Studie mit zwei Interventionen, je einem Test/Retest und einer zehnwöchigen Pause zwischen den Interventionen 43
Abb. 23. Umfang und Verteilung der Wasser-Einheiten (in km) in den Wochen, in denen Stufentests im Strömungskanal durchgeführt wurden (links), und bezogen auf den gesamten Studienzeitraum (rechts; GA I: Grundlagenausdauer I, GA II: Grundlagenausdauer II, WSA: wettkampfspezifische Ausdauer) 44
Abb. 24. Links: POWERbreathe mit Anzeige der absolvierten Einheiten und der aktuell eingestellten Last (eigene Darstellung). Mitte: Einsatz des POWERbreathe durch Umfassen des Mundstücks mit den Lippen (eigene Darstellung). Rechts: Eine spezifischere Belastung für den Einsatz beim Schwimmen kann durch ein um den Brustkorb gelegtes Gummiband erreicht werden (McConnell, 2011) 45
Abb. 25. Belastungsprotokoll des Stufentests im Strömungskanal (horizontale Zeitachse in Minuten, untereinander die Abfolge der Stufen inkl. Pausen und Messungen) 47
Abb. 26. Elastisches Leibchen zur rutschsicheren Fixierung des Pulsgurtes am Oberkörper des Probanden 48
Abb. 27. Laktatabnahme und spiroergometrische Messung im Strömungskanal nach Ende der Belastung 49
Abb. 28. Strömungskanal des IAT Leipzig mit Testprotokollanten zur Beobachtung und Betreuung des Schwimmers (links), Bedienung über den Kontrollraum (Bildhintergrund), Messstation für die Sauerstoffaufnahme (vorne links) und die Laktatabnahme (vorne rechts) 49
Abb. 29. Seitliches Unterwasserfenster zur technischen Analyse der Sportler 50
Abb. 30. Display zur Anzeige der aktuellen Vorgaben durch die Kanalsteuerung mit anliegender Geschwindigkeit (rechts) und aktuellem und folgendem Testabschnitt (links unten) 50
Abb. 31. Equipment für die Lungenfunktionstests: USB-Spirometer und Nasenklemme (links) und die zugehörige PC-Software (rechts) 51
Abb. 32. Spiroergometrische Messung mit dem MetaMax 3B im Akkubetrieb mit Mundstück und Nasenklammer (links); Abgleich der Gassensorik vor Testbeginn mit der Umgebungsluft über die Software MetaSoft 3.9.7 (rechts) 52
Abb. 33. Kontinuierliche Aufzeichnung und Übertragung der Herzfrequenz mittels Brustgurt (links) und Telemetriesystem (rechts) 52
Abb. 34. Grafische Darstellung der Herzfrequenz im Programm Ergograph 0.9.0 53
Abb. 35. Lineare Extrapolation der Sauerstoffaufnahme; Vergleich der Ergebnisse mit (links) und ohne unvollständigen Atemzug zu Beginn der Messung (rechts) 54
Abb. 36. Integration des pro Atemzug aufgenommenen Sauerstoffs über das Messintervall und Annäherung durch ein Polynom zweiten Grades (links); geglättete Sauerstoffaufnahme aus Differenzierung des Regressionspolynoms mit extrapolierten Werten bis zum Zeitpunkt t = 0 (rechts) 54
Abb. 37. Vergleich der Ergebnisse der Extrapolation mit (links) und ohne Berücksichtigung eines unvollständigen Atemzugs zu Beginn der Messung (rechts). Die unterschiedlichen Datensätze spiegeln sich im y-Achsenabschnitt des Regressionspolynoms wider, die resultierende Extrapolationsgerade nach der Differenzierung ist identisch. 55

Abb. 38. Anzahl der durchgeführten Einheiten und erzielte Last [cm H_2O] nach acht Wochen Atemtraining für jeden Probanden der beiden Interventionen, aufsteigend nach Anzahl der absolvierten Trainingseinheiten 68
Abb. 39. FVC der Interventions- und Kontrollgruppen vor und nach dem Atemtraining (Zeitraum der Interventionen: zwischen Test 1 und 2 sowie zwischen Test 3 und 4) 70
Abb. 40. FEV1 der Interventions- und Kontrollgruppen vor und nach dem Atemtraining (Zeitraum der Interventionen: zwischen Test 1 und 2 sowie zwischen Test 3 und 4) 71
Abb. 41. MVV der Interventions- und Kontrollgruppen vor und nach dem Atemtraining (Zeitraum der Interventionen: zwischen Test 1 und 2 sowie zwischen Test 3 und 4) 73
Abb. 42. Laktatwerte [mmol/l] der Interventions- und Kontrollgruppe für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte 76
Abb. 43. Herzfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte 77
Abb. 44. $\dot{V}O_2$ [l/min] der Interventions- und Kontrollgruppen für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte 79
Abb. 45. Zyklusfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppen für die GA-II-Stufe unter AF 1 zu jedem der vier Testzeitpunkte 80
Abb. 46. Laktat (links oben), Herzfrequenz (rechts oben), $\dot{V}O_2$ (links unten) und Zyklusfrequenz (rechts unten) des ersten Tests für Interventions- und Kontrollgruppe 83
Abb. 47. Laktat [mmol/l] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2) 88
Abb. 48. Herzfrequenz [1/min] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2) 89
Abb. 49. $\dot{V}O_2$ [l/min] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2) 90
Abb. 50. Zyklusfrequenz [1/min] der Gesamtgruppe zum Zeitpunkt des ersten Tests in Abhängigkeit von der Atemfrequenz (AF 1, AF2) 91
Abb. 51. Darstellung des Gesamtzusammenhangs aller beschriebenen Effekte in Folge eines Atemtrainings: Hauptergebnisse des Atemtrainings (grün), erfasste Messgrößen (blau) und zugrundeliegende Zusammenhänge, die der Literatur entnommen wurden (grau) 136

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 1. Gruppenzugehörigkeit der Probanden (mittels Probanden-ID anonymisiert); links erste Intervention, rechts zweite Intervention; rot: Interventionsgruppe, blau: Kontrollgruppe, gelb: Probanden, die nur an der zweiten Intervention teilgenommen haben 42
Tab. 2. Anthropometrische Daten der Interventions- und Kontrollgruppen 42
Tab. 3. Wahrscheinlichkeitsverteilung von Alter, Größe und Gewicht der Probandengruppen (grün: Normalverteilung, rot: keine Normalverteilung) 56
Tab. 4. p-Werte des Levene-Tests für alle leistungsphysiologischen Parameter der vier Untersuchungen 57
Tab. 5. Übersicht der durchgeführten Auswertungen; es erfolgte jeweils ein Vergleich der erfassten leistungsphysiologischen Parameter der gekennzeichneten Stufen innerhalb eines Protokolls und zwischen kontinuierlichem und intermittierendem Testprotokoll 61
Tab. 6. Laktatwerte [mmol/l] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls 62
Tab. 7. Zyklusfrequenzen [1/min] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls 62
Tab. 8. Herzfrequenz [1/min] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls (fehlende Werte bei Proband A und D aufgrund technischer Probleme) 63
Tab. 9. Sauerstoffaufnahme [l/min] der Probanden während des kontinuierlichen Protokolls (fehlende Werte bei Proband C und D aufgrund technischer Probleme) 63
Tab. 10. Laktatwerte [mmol/l] der Probanden während des intermittierenden Protokolls 63
Tab. 11. Zyklusfrequenzen [1/min] der Probanden während des intermittierenden Protokolls 64
Tab. 12. Herzfrequenz [1/min] der Probanden während des intermittierenden Protokolls 64
Tab. 13. Sauerstoffaufnahme [l/min] der Probanden während des intermittierenden Protokolls 64
Tab. 14. Ergebnisse des POWERbreathe-Trainings der Einzelsportler sowie Mittelwert und Standardabweichung der jeweiligen Gruppe; p: Ergebnis des Mann-Whitney-U-Tests, bezogen auf die Trainingsdaten der jeweils ersten Interventionswoche. Proband 1-6: erste Intervention, Proband 8-15: zweite Intervention. POWERbreathe-Parameter (Leistung P, Atemzugvolumen AZV, Arbeit W): jeweils Maximalwert nach acht Wochen und Steigerung bezogen auf den Ausgangswert. 67
Tab. 15. p-Werte des Mann-Whitney-U-Tests für die leistungsphysiologischen Parameter beider Interventionsgruppen jeweils vor Beginn des Atemtrainings (Interventionsgruppe 1: Test 1, Interventionsgruppe 2: Test 3 67
Tab. 16. FVC [l] aller teilnehmenden Probanden, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte. 69
Tab. 17. FEV1 [l] aller teilnehmenden Probanden, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte 71
Tab. 18. MVV [l/min] aller teilnehmenden Probanden, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte 72
Tab. 19. Laktat [mmol/l] aller teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG)

sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte 75
Tab. 20. Herzfrequenz [1/min] für alle teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte 77
Tab. 21. $\dot{V}O_2$ [l/min] aller teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte 78
Tab. 22. Zyklusfrequenz [1/min] aller teilnehmenden Probanden auf der GA-II-Stufe mit AF 1, Mittelwerte (MW) für die jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen (IG bzw. KG) sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Interventions- und Kontrollgruppe zu jedem der vier Testzeitpunkte 80
Tab. 23. Laktat (oben links, in mmol/l), Herzfrequenz (oben rechts, in 1/min), $\dot{V}O_2$ (unten links, in l/min) und Zyklusfrequenz (unten rechts, in 1/min) aller an Test 1 teilnehmenden Probanden sowie Mittelwerte (MW) für die erste Interventions- und Kontrollgruppe (IG bzw. KG) 82
Tab. 24. Laktatwerte [mmol/l] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) sowie Laktatanstieg [mmol/l] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %) 84
Tab. 25. Herzfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) sowie Frequenzanstieg [1/min] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %) 85
Tab. 26. Sauerstoffaufnahme [l/min] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) sowie $\dot{V}O_2$-Anstieg [l/min] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %) 85
Tab. 27. Zyklusfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe zu den vier Testzeitpunkten, gemittelt bezüglich der Intensität (GA I, GA II und 95 %) und Frequenzanstieg [1/min] von einer Stufe zur nächsten (GA I → GA II: von GA I zu GA II, GA II → 95 %: von GA II zu 95 %) 86
Tab. 28. Laktat [mmol/l] aller Probanden von Test 1 für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2), Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2 87
Tab. 29. Herzfrequenz [1/min] aller teilnehmenden Probanden zum Zeitpunkt des ersten Tests für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2), Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2 88
Tab. 30. $\dot{V}O_2$ [l/min] aller teilnehmenden Probanden zum Zeitpunkt des ersten Tests für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2), Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2 89
Tab. 31. Zyklusfrequenz [1/min] aller teilnehmenden Probanden zum Zeitpunkt des ersten Tests für alle Intensitäten (GA I, GA II und 95 %) und Atemfrequenzen (AF 1, AF2),

Mittelwert (MW) der Gesamtgruppe sowie p-Wert und Effektstärke des Mittelwertvergleichs von AF 1 mit AF 2 90
Tab. 32. Mittelwerte des Laktats [mmol/l] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe) 92
Tab. 33. Mittelwerte der Herzfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe) 93
Tab. 34. Mittelwerte der Sauerstoffaufnahme [l/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe) 94
Tab. 35. Mittelwerte der Zyklusfrequenz [1/min] der Interventions- und Kontrollgruppe für beide Atemfrequenzen (AF 1, AF 2) unter GA-I-, GA-II- und 95 %-Belastung zu jedem der vier Testzeitpunkte sowie p-Wert und Effektstärke r des Mittelwertvergleichs zwischen Laktat unter AF 1 und Laktat unter AF 2 (bezogen auf die jeweilige Stufe) 95
Tab. 36. Kreuztabellen mit Mediansplit der Leistung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Leistungssteigerung bezogen auf die Trainingshäufigkeit (unten). Geringe Leistung: Leistung ≤ Median der Leistung, hohe Leistung: Leistung > Median der Leistung; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 97
Tab. 37. Leistung [W] und Leistungssteigerung [W] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 98
Tab. 38. Kreuztabellen mit Mediansplit der MVV-Steigerung bezogen auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der MVV-Steigerung in Bezug auf die Leistung (unten). Geringe MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV ≤ Median der Prä-Post-Differenz des MVV, große MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV > Median der Prä-Post-Differenz des MVV; äquivalente Berechnung für die Parameter Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistung 98
Tab. 39. Kreuztabelle mit Mediansplit der MVV-Steigerung bezogen auf die Leistungssteigerung. Definition geringe MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV ≤ Median der Prä-Post-Differenz des MVV, große MVV-Steigerung: Prä-Post-Differenz MVV > Median der Prä-Post-Differenz des MVV; äquivalente Berechnung für den Parameter Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 99
Tab. 40. Prä-Post-Steigerung des MVV [l/min] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 99
Tab. 41. Kreuztabellen mit Mediansplit der Laktatsenkung bei GA-I-Belastung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben), der Laktatsenkung bei GA-I-Belastung bezogen auf die Leistung (Mitte) und der Laktatsenkung bei GA-I-Belastung in Bezug auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des

Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten), Leistung und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 100

Tab. 42. Prä-Post-Differenz des Laktats im GA-I-Bereich [mmol/l] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 100

Tab. 43. Kreuztabellen mit Mediansplit der Laktatsenkung bei GA-II-Belastung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben), der Laktatsenkung bei GA-II-Belastung bezogen auf die Leistung (Mitte) und der Laktatsenkung bei GA-II-Belastung in Bezug auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten), Leistung und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 101

Tab. 44. Prä-Post-Differenz des Laktats im GA-II-Bereich [mmol/l] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 102

Tab. 45. Kreuztabellen mit Mediansplit der Laktatsenkung bei 95 %-Belastung in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Laktatsenkung bei 95 %-Belastung bezogen auf die Leistung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistung 102

Tab. 46. Kreuztabelle mit Mediansplit der Laktatsenkung bei 95 %-Belastung in Bezug auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats ≤ Median der Prä-Post-Differenz des Laktats, große Laktatsenkung: Prä-Post-Differenz des Laktats > Median der Prä-Post-Differenz des Laktats; äquivalente Berechnung für die Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 103

Tab. 47. Prä-Post-Differenz des Laktats bei 95 %-Belastung [mmol/l] bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 103

Tab. 48. Kreuztabelle mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung mit AF 1 bezogen auf die Leistung. Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für die Leistung 104

Tab. 49. Kreuztabellen mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung und AF 1 in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung und AF 1 bezogen auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 104

Tab. 50. Kreuztabelle mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-I-Belastung und AF 1 in Bezug auf die Leistung. Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für die Leistung 105
Tab. 51. Prä-Post-Differenz der Zykluszeit [s] bei GA-I-Belastung und AF 1 bzw. 2 bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 105
Tab. 52. Kreuztabelle mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei GA-II-Belastung und AF 2 in Bezug auf die Leistungssteigerung. Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit), große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit); äquivalente Berechnung für Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 106
Tab. 53. Prä-Post-Differenz der Zykluszeit [s] bei GA-II-Belastung und AF 1 bzw. 2 bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 106
Tab. 54. Kreuztabellen mit Mediansplit der Zykluszeitverlängerung bei 95 %-Belastung und AF 1 in Bezug auf die Trainingshäufigkeit (oben) und der Zykluszeitverlängerung bei 95 %-Belastung und AF 1 bezogen auf die Leistungssteigerung (unten). Geringe/negative Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit ≤ Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit, große Zykluszeitverlängerung: Prä-Post-Differenz der Zykluszeit > Median der Prä-Post-Differenz der Zykluszeit; äquivalente Berechnung für Trainingshäufigkeit (Anzahl der durchgeführten Einheiten) und Leistungssteigerung (ΔP, Prä-Post-Differenz der Leistung) 107
Tab. 55. Prä-Post-Differenz der Zykluszeit [s] bei 95 %-Belastung und AF 1 bzw. 2 bei geringer bzw. hoher Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung (Einteilung der Gruppen über Mediansplit). MW: Mittelwert, STABW: Standardabweichung 107
Tab. 56. Exemplarische Gegenüberstellung von drei Probanden mit großem Trainingsumfang bzw. großer Leistungssteigerung 129
Tab. 57. Individuell berechnete Stufengeschwindigkeiten für jeden Probanden auf Basis der aktuellen 200m-Freistil-Bestzeit vor Beginn der Studie 155
Tab. 58. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Interventionsgruppe vor der ersten Intervention (grün: Normalverteilung, rot: keine Normalverteilung) 156
Tab. 59. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Kontrollgruppe vor der ersten Intervention 156
Tab. 60. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Interventionsgruppe nach der ersten Intervention 156
Tab. 61. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Kontrollgruppe nach der ersten Intervention 157
Tab. 62. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Interventionsgruppe vor der zweiten Intervention 157
Tab. 63. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Kontrollgruppe vor der zweiten Intervention 157

Tab. 64. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Interventionsgruppe nach der zweiten Intervention 158
Tab. 65. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Kontrollgruppe nach der zweiten Intervention 158
Tab. 66. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-I-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training. 167
Tab. 67. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-I-Belastungsstufe mit AF 2 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training. 168
Tab. 68. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-II-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training. 169
Tab. 69. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-II-Belastungsstufe mit AF 2 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training. 170
Tab. 70. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der 95 %-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training. 171
Tab. 71. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der 95 %-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training. 172

13 Anhang

13.1 Individuelle Stufengeschwindigkeiten der Hauptstudie

Tab. 57. Individuell berechnete Stufengeschwindigkeiten für jeden Probanden auf Basis der aktuellen 200m-Freistil-Bestzeit vor Beginn der Studie

Proband	Bestzeit 200m Freistil [min]	Stufengeschwindigkeit [m/s]		
		GA I	GA II	95%
1	02:16,6	1,17	1,32	1,39
2	02:32,2	1,05	1,18	1,25
3	02:20,0	1,14	1,29	1,36
4	02:18,0	1,16	1,30	1,38
5	02:05,0	1,28	1,44	1,52
6	02:01,0	1,32	1,49	1,57
7	02:09,0	1,24	1,40	1,47
8	02:15,0	1,18	1,33	1,41
9	02:16,0	1,18	1,32	1,40
10	02:09,0	1,24	1,40	1,47
11	02:18,0	1,16	1,30	1,38
12	01:59,0	1,34	1,51	1,60
13	02:16,3	1,17	1,32	1,39
14	02:09,9	1,23	1,39	1,46
15	02:10,3	1,23	1,38	1,46

13.2 Ergebnisse der Prüfung der leistungsphysiologischen Parameter auf Normalverteilung

Tab. 58. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Interventionsgruppe vor der ersten Intervention (grün: Normalverteilung, rot: keine Normalverteilung)

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

FVC	
FEV1	
MVV	

Tab. 59. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Kontrollgruppe vor der ersten Intervention

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

FVC	
FEV1	
MVV	

Tab. 60. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Interventionsgruppe nach der ersten Intervention

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

FVC	
FEV1	
MVV	

Tab. 61. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der ersten Kontrollgruppe nach der ersten Intervention

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

FVC	
FEV1	
MVV	

Tab. 62. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Interventionsgruppe vor der zweiten Intervention

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

FVC	
FEV1	
MVV	

Tab. 63. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Kontrollgruppe vor der zweiten Intervention

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

FVC	
FEV1	
MVV	

Tab. 64. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Interventionsgruppe nach der zweiten Intervention

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

FVC	
FEV1	
MVV	

Tab. 65. Wahrscheinlichkeitsverteilung der Messwerte der zweiten Kontrollgruppe nach der zweiten Intervention

	GA I		GA II		95%	
	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2	AF 1	AF 2
Laktat						
Herzfrequenz						
VO2						
Zyklusfrequenz						

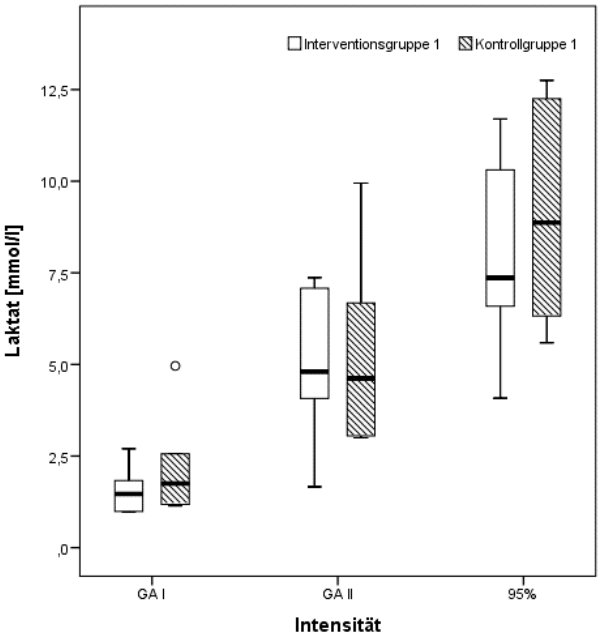
FVC	
FEV1	
MVV	

13.3 Ergebnisse der leistungsphysiologischen Parameter der vier Stufentest in Abhängigkeit von der Intensität

Laktat [mmol/l]

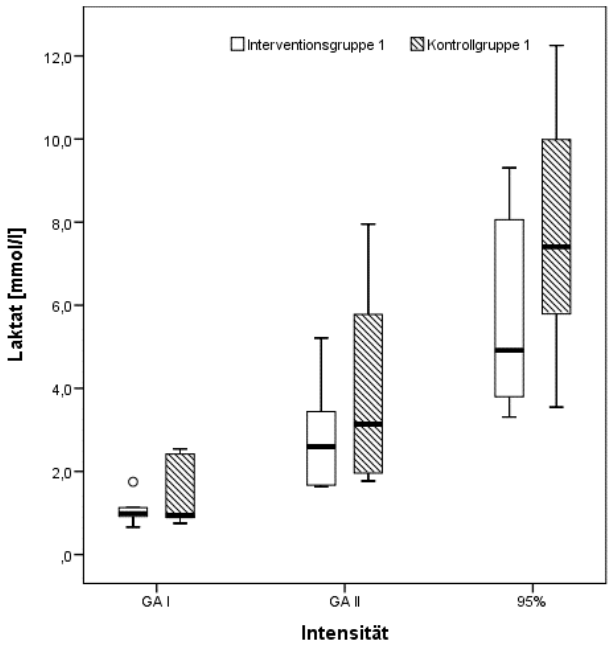
Test 1

Proband	GA I	GA II	95%
1	1,83	7,37	11,70
2	1,46	5,10	6,59
3	0,98	4,07	7,26
4	0,99	1,66	4,08
5	1,47	7,08	10,31
6	2,70	4,52	7,46
7	4,96	9,95	12,25
8	1,18	3,05	6,32
9	1,14	3,00	5,59
10	2,17	5,47	10,42
11	1,33	3,78	7,33
12	2,56	6,68	12,75
MW IG 1	1,57	4,96	7,90
MW KG 1	2,22	5,32	9,11



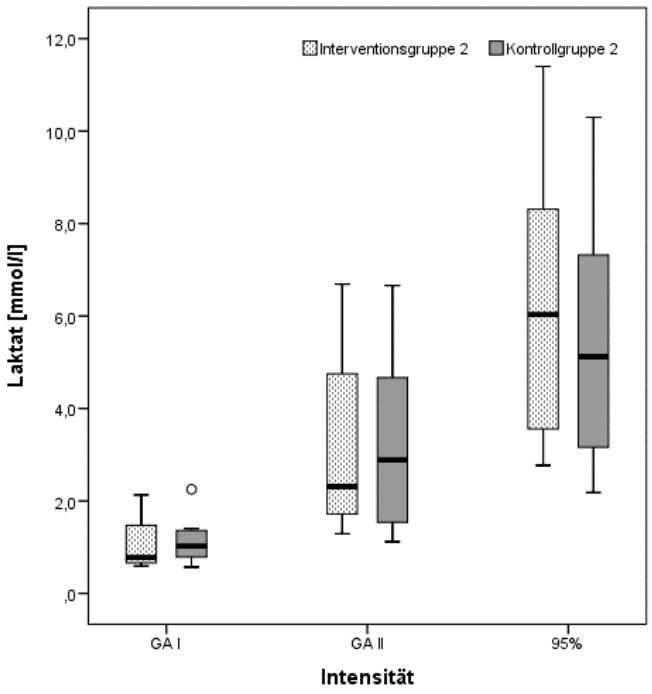
Test 2

Proband	GA I	GA II	95%
1	1,75	5,21	9,31
2	0,92	1,67	3,31
3	0,66	1,64	3,80
4	0,99	2,60	4,91
5	1,13	3,44	8,06
6			
7	2,54	7,95	12,25
8	0,75	1,77	5,79
9	0,94	1,96	3,55
10	2,42	5,78	9,99
11	0,95	3,03	7,24
12	0,89	3,26	7,58
MW IG 1	1,09	2,91	5,87
MW KG 1	1,41	3,96	7,73



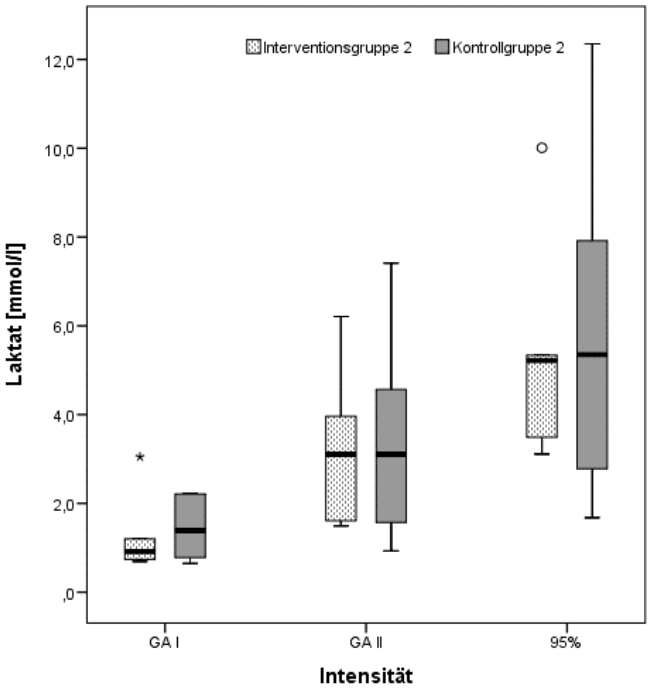
Test 3

Proband	GA I	GA II	95%
1	1,40	5,02	
2	1,02	1,68	3,16
3	0,57	1,40	3,16
4	0,63	1,12	2,18
5	0,94	2,88	7,32
6	2,25	4,31	7,08
7	1,32	6,66	10,30
8	0,59	1,29	2,77
9	0,82	1,72	3,56
10	2,13	6,69	11,40
13	0,73	2,31	5,50
14			8,31
15		4,75	6,56
MW IG 2	1,07	3,35	6,35
MW KG 2	1,16	3,29	5,53



Test 4

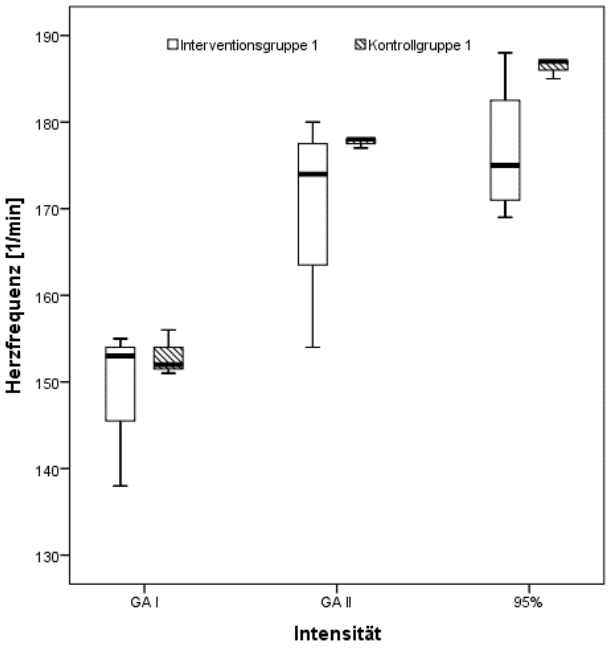
Proband	GA I	GA II	95%
1	1,32	4,61	5,35
2	1,47	2,12	3,53
3		0,93	1,68
4	0,65	1,02	2,03
5	0,78	3,10	7,73
6	2,21	4,52	8,10
7	2,23	7,41	12,35
8	0,74	3,96	5,22
9	0,92	1,61	3,11
10	3,05	6,21	10,01
13	0,69	1,49	3,49
14	1,20	3,10	5,34
15			
MW IG 2	1,32	3,27	5,43
MW KG 2	1,44	3,38	5,82



Herzfrequenz [1/min]

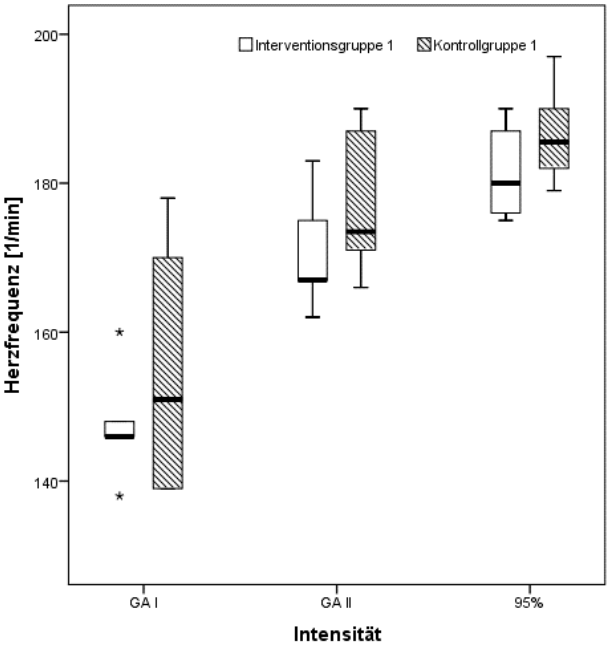
Test 1

Proband	GA I	GA II	95%
1	153	175	177
2	153	173	169
3	155	180	188
4	138	154	173
5			
6			
7			
8	151	178	187
9			
10			
11	152	177	187
12	156	178	185
MW IG 1	150	170	177
MW KG 1	153	177	186



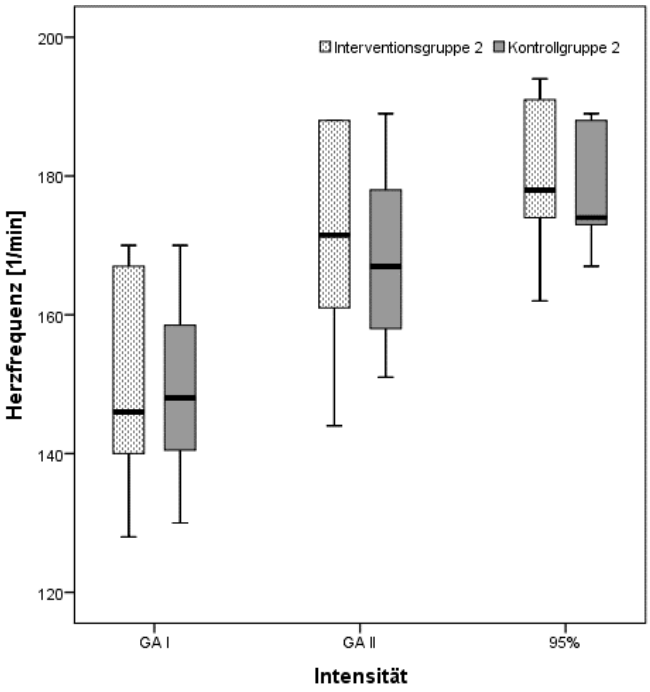
Test 2

Proband	GA I	GA II	95%
1	160	183	190
2	146	167	176
3	146	167	180
4	138	162	175
5	148	175	187
6			
7	139	166	179
8	139	171	186
9	170	187	197
10	178	190	190
11	148	175	185
12	154	172	182
MW IG 1	147	170	181
MW KG 1	155	177	186



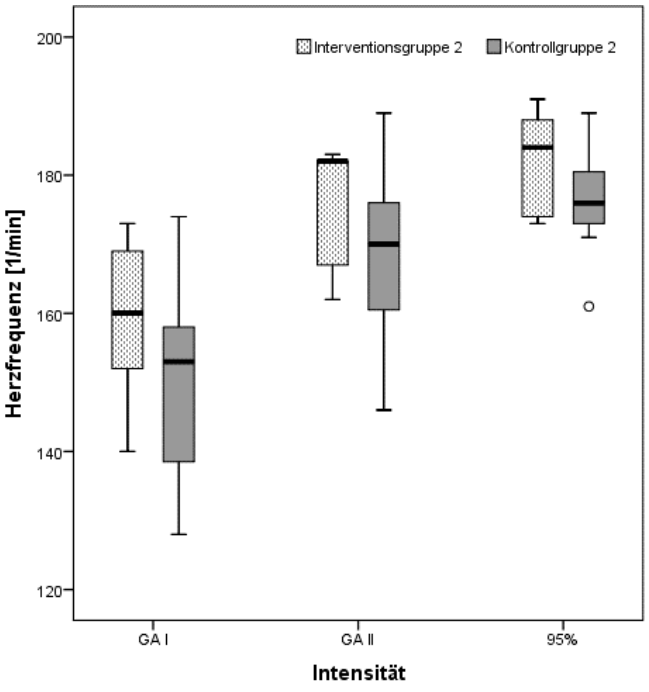
Test 3

Proband	GA I	GA II	95%
1	165	184	
2	144	157	173
3	137	159	173
4	130	151	167
5	148	172	188
6	152	167	175
7	170	189	189
8	140	161	174
9	128	144	162
10	170	188	194
13	147	164	178
14	167	188	191
15	145	179	
MW IG 2	149	171	180
MW KG 2	149	168	177



Test 4

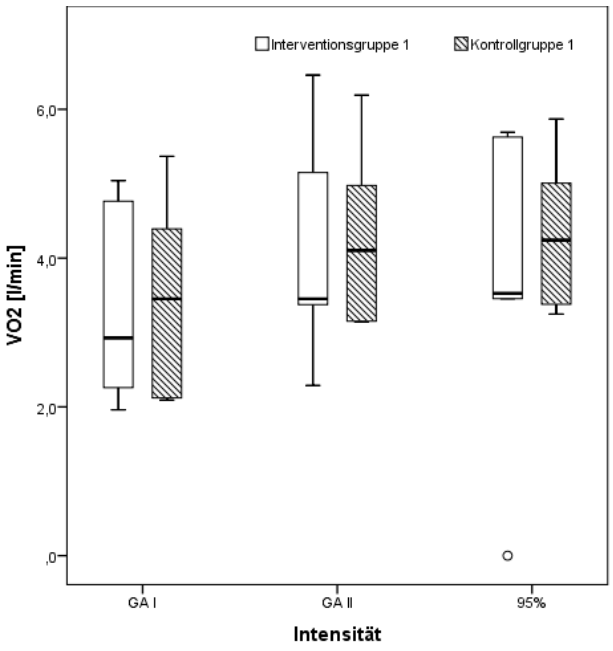
Proband	GA I	GA II	95%
1	156	178	175
2	142	161	176
3	135	160	171
4	128	146	161
5	174	189	189
6	160	174	178
7	153	170	183
8	160	182	184
9	140	162	174
10	173	182	191
13	169	183	188
14	152	167	173
15			
MW IG 2	159	175	182
MW KG 2	149	168	176



Sauerstoffaufnahme [l/min]

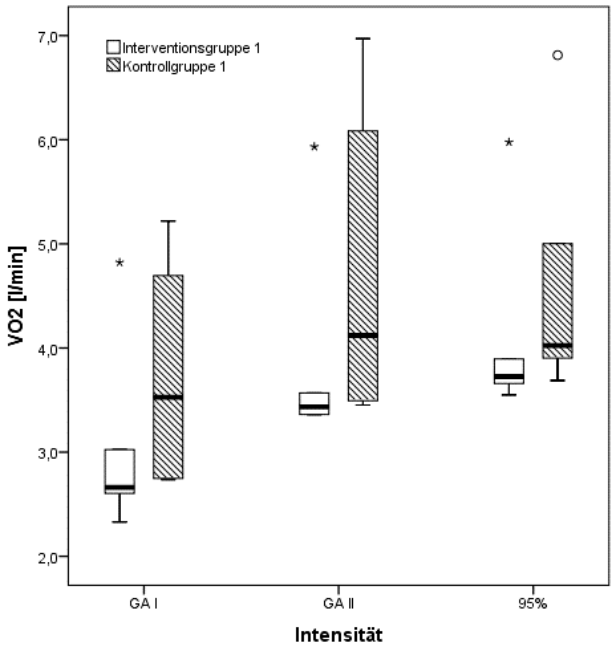
Test 1

Proband	GA I	GA II	95%
1	2,847	3,375	3,455
2	2,258	3,513	3,522
3	3,007	3,394	3,530
4	1,961	2,288	0,000
5	4,764	6,460	5,626
6	5,041	5,150	5,692
7	5,368	4,977	5,007
8	2,120	3,140	3,379
9	2,091	3,153	3,248
10	3,922	4,118	4,805
11	2,984	4,090	3,678
12	4,392	6,190	5,870
MW IG 1	3,313	4,030	3,637
MW KG 1	3,480	4,278	4,331



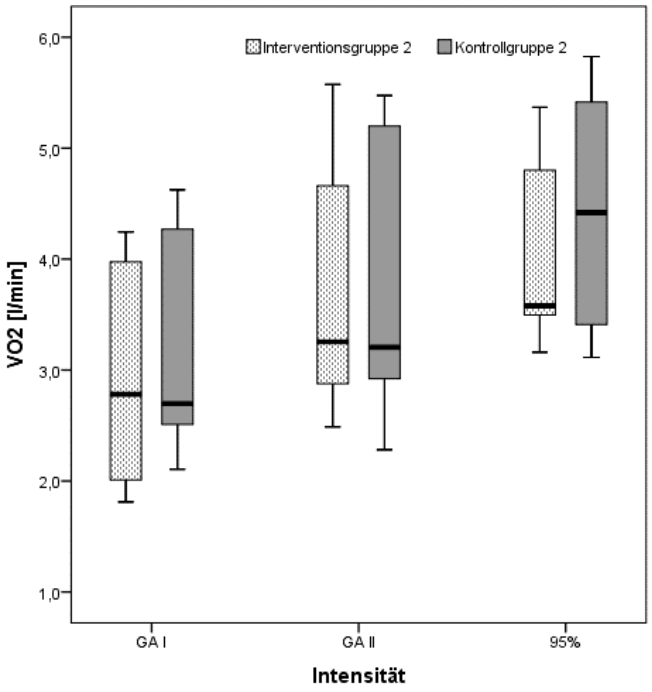
Test 2

Proband	GA I	GA II	95%
1	3,024	3,438	3,550
2	2,604	3,569	3,726
3	2,663	3,362	3,660
4	2,329	3,360	3,895
5	4,822	5,933	5,976
6			
7	5,219	6,085	
8	2,736	3,452	3,903
9	2,747	3,494	3,688
10	3,527	3,906	5,003
11	3,530	4,338	4,025
12	4,695	6,971	6,812
MW IG 1	3,088	3,932	4,161
MW KG 1	3,742	4,708	4,686



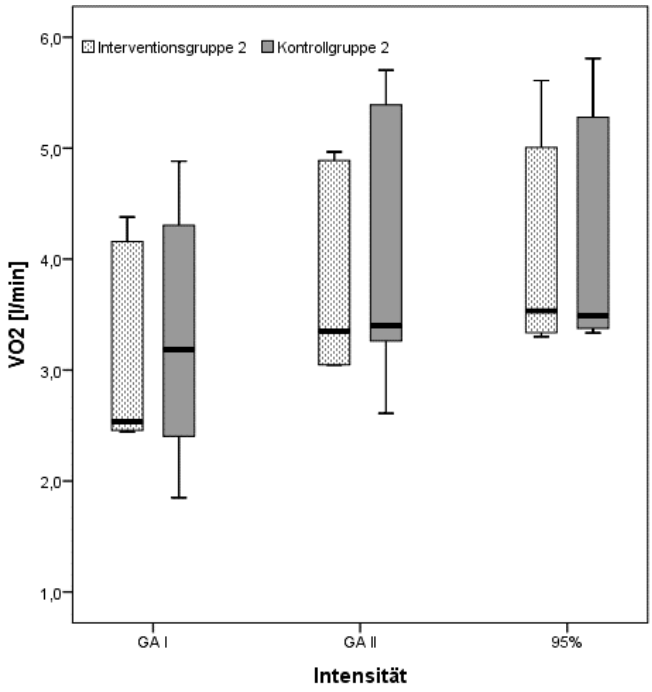
Test 3

Proband	GA I	GA II	95%
1	2,696	2,889	
2	2,398	2,956	3,411
3	2,623	3,204	3,487
4	2,106	2,283	3,114
5	4,156	4,988	5,826
6	4,625	5,411	5,415
7	4,382	5,475	5,348
8	2,010	2,890	3,496
9	2,366	2,877	3,582
10	3,975	4,661	4,801
13	1,811	2,488	3,160
14	4,245	5,574	5,370
15	3,199	3,619	
MW IG 2	2,934	3,685	4,082
MW KG 2	3,284	3,887	4,433



Test 4

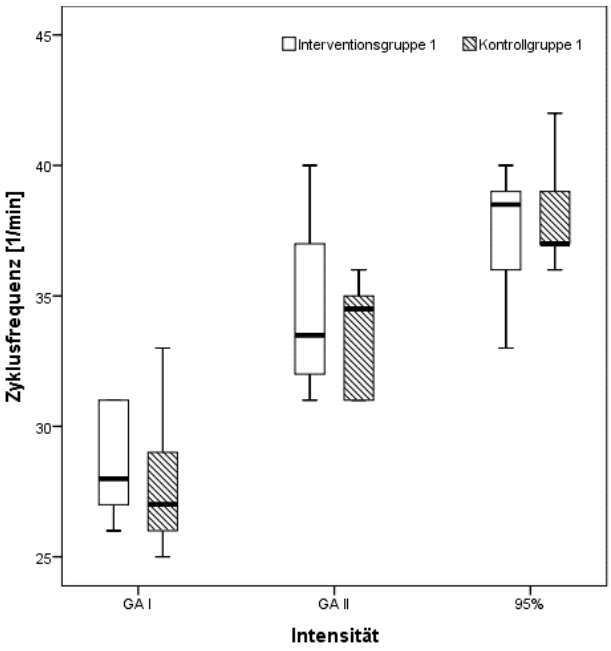
Proband	GA I	GA II	95%
1	3,185	3,301	3,335
2	2,181	3,402	3,488
3	2,627	3,225	3,358
4	1,850	2,610	3,392
5	4,096	5,287	5,382
6	4,512	5,703	5,809
7	4,882	5,494	5,176
8	2,535	3,352	3,300
9	2,458	3,046	3,534
10	4,158	4,966	5,006
13	2,444	3,048	3,338
14	4,379	4,888	5,609
15			
MW IG 2	3,194	3,860	4,157
MW KG 2	3,333	4,146	4,277



Zyklusfrequenz [1/min]

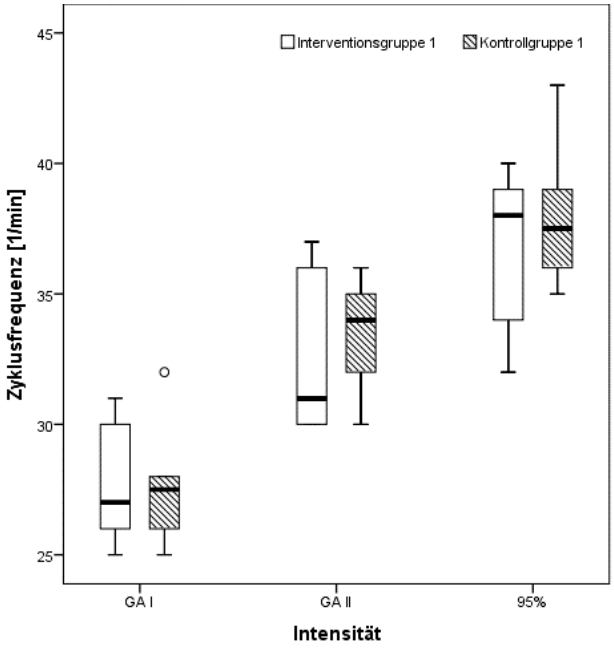
Test 1

Proband	GA I	GA II	95%
1	31	37	40
2	27	31	33
3	27	32	38
4	31	34	39
5	26	33	39
6	29	40	36
7	28	34	37
8	26	31	36
9	26	31	37
10	25	35	37
11	33	36	39
12	29	35	42
MW IG 1	29	34	37
MW KG 1	28	33	38



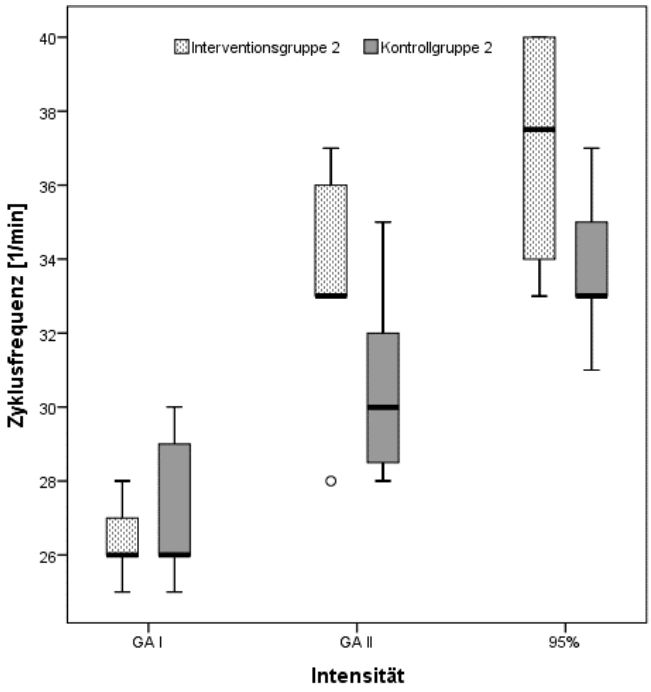
Test 2

Proband	GA I	GA II	95%
1	30	37	40
2	26	31	32
3	27	30	34
4	31	36	39
5	25	30	38
6			
7	28	33	36
8	25	30	35
9	27	32	36
10	26	35	39
11	32	36	39
12	28	35	43
MW IG 1	28	32	36
MW KG 1	28	33	38



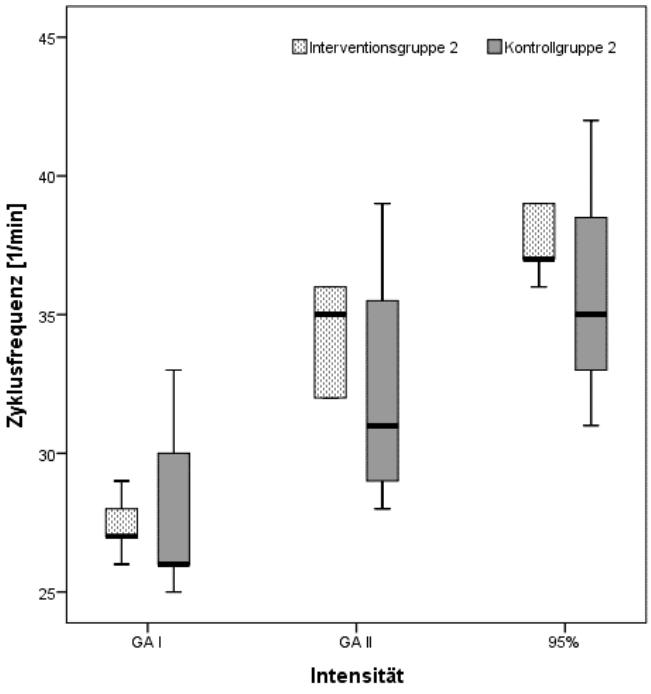
Test 3

Proband	GA I	GA II	95%
1	30	35	
2	26	28	31
3	26	28	33
4	30	33	37
5	25	30	35
6	28	31	33
7	26	29	34
8	25	28	33
9	26	33	37
10	26	37	40
13	27	33	38
14	28	36	40
15			
MW IG 2	26	33	37
MW KG 2	27	30	34



Test 4

Proband	GA I	GA II	95%
1	31	37	41
2	26	28	32
3	29	34	36
4	33	39	42
5	26	31	35
6	26	29	31
7	25	29	34
8	29	35	39
9	27	32	36
10	27	36	37
13	26	32	37
14	28	36	39
15			
MW IG 2	28	34	37
MW KG 2	28	32	36



13.4 Ergebnisse der Kreuztabellenanalyse für den Parameter Zykluszeitverlängerung

Die Auswertung wurde für jede der drei Stufengeschwindigkeiten (GA I, GA II und 95%) und beide Atemfrequenzen (AF 1 und AF 2) in Bezug auf die drei ausgewählten POWERbreathe-Parameter (Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung) durchgeführt. Es ergaben sich infolgedessen 18 Kombinationsmöglichkeiten für die Kreuztabellenanalyse.

Tab. 66. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-I-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training.

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 1	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	4 80,0 %	3 60,0 %	7 70,0 %
große Zykluszeitverlängerung	1 20,0 %	2 40,0 %	3 30,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 1	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	5 100,0 %	2 40,0 %	7 70,0 %
große Zykluszeitverlängerung	0 0,0 %	3 60,0 %	3 30,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 1	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	4 80,0 %	3 60,0 %	7 70,0 %
große Zykluszeitverlängerung	1 20,0 %	2 40,0 %	3 30,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 67. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-I-Belastungsstufe mit AF 2 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training.

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 2	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 2	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	4 80,0 %	1 20,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	1 20,0 %	4 80,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung GA I AF 2	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 68. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-II-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training.

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung GA II AF 1	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	3 60,0 %	6 60,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	2 40,0 %	4 40,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung GA II AF 1	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	3 60,0 %	6 60,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	2 40,0 %	4 40,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung GA II AF 1	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	3 60,0 %	6 60,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	2 40,0 %	4 40,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 69. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der GA-II-Belastungsstufe mit AF 2 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training.

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung GA II AF 2	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	3 60,0 %	6 60,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	2 40,0 %	4 40,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung GA II AF 2	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	3 60,0 %	6 60,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	2 40,0 %	4 40,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung GA II AF 2	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	4 80,0 %	2 40,0 %	6 60,0 %
große Zykluszeitverlängerung	1 20,0 %	3 60,0 %	4 40,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 70. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der 95 %-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training.

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 1	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 1	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 1	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	2 40,0 %	5 50,0 %
große Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 60,0 %	5 50,0 %
Gesamt	5 100,0 %	5 100,0 %	10 100,0 %

Tab. 71. Kreuztabellen für die Zykluszeitverlängerung auf der 95 %-Belastungsstufe mit AF 1 bezogen auf die Trainingshäufigkeit, Leistung und Leistungssteigerung im POWERbreathe-Training.

	Trainingshäufigkeit		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 2	**geringe Trainings-häufigkeit**	**hohe Trainings-häufigkeit**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 75,0 %	5 55,6 %
große Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	1 25,0 %	4 44,4 %
Gesamt	5 100,0 %	4 100,0 %	9 100,0 %

	Leistung		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 2	**geringe Leistung**	**hohe Leistung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	2 40,0 %	3 75,0 %	5 55,6 %
große Zykluszeitverlängerung	3 60,0 %	1 25,0 %	4 44,4 %
Gesamt	5 100,0 %	4 100,0 %	9 100,0 %

	Leistungssteigerung		
Zykluszeitverlängerung 95 % AF 2	**geringe Steigerung**	**große Steigerung**	**Gesamt**
geringe/negative Zykluszeitverlängerung	3 50,0 %	2 66,7 %	5 55,6 %
große Zykluszeitverlängerung	3 50,0 %	1 33,3 %	4 44,4 %
Gesamt	6 100,0 %	3 100,0 %	9 100,0 %

Zusammenfassung

Die Schwimmer des Deutschen Schwimmverbands verlieren zunehmend den Anschluss an die Weltspitze, was sich in einer sinkenden Anzahl von Medaillen bei internationalen Großereignissen äußert. Als Ursache wurden Mängel im langfristigen Leistungsaufbau identifiziert; in Folge dessen wurden spezifischere Inhalte für das Grundlagenausdauertraining gefordert, um die wettkampfspezifischen Kraftvoraussetzungen besser vorzubereiten. Da gezeigt werden konnte, dass die Atmung im Freistilschwimmen leistungsbegrenzend wirkt, sollte untersucht werden, wie sich durch ein gezieltes Training der Atemmuskulatur bislang ungenutzte Leistungsreserven erschließen lassen. Darüber hinaus sollte die Reaktion auf Hypoventilation unter Belastung getestet werden, da eine Analyse der Atemrhythmen international erfolgreicher Schwimmer ergeben hatte, dass sich niederfrequente Atmung im Wettkampf vorteilhaft auf die Leistung auswirkt. Dazu wurde eine Interventionsstudie mit 15 Nachwuchsschwimmern im Crossover-Design durchgeführt. Während des ersten und des zweiten Makrozyklus des Trainings- und Wettkampfjahres (TWJ) führten je sechs Sportler ein achtwöchiges Atemtraining mit einem POWERbreathe-Gerät durch. Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit und der Veränderung physiologischer Parameter durch Training wurden vor und nach jeder Intervention Stufentests im Strömungskanal durchgeführt, wobei drei verschiedene Intensitäten und zwei Atemfrequenzen ausgewertet wurden. Das Hauptergebnis der Studie bestand in einer verbesserten Kraftfähigkeit und Ökonomie der Atemmuskulatur, was sich bei isolierter Belastung in Form einer Vergrößerung des maximalen Minutenvolumens zeigte und beim Schwimmen zu verringerten Laktatwerten und niedrigerer Zyklusfrequenz bei gleichbleibender Belastung führte. Die Trainingswirkung wird dabei auf eine weniger starke Ausprägung des inspiratorischen Metaboreflexes und eine Optimierung der Vortriebsphasen in Folge einer schnelleren Inspiration zurückgeführt. Durch das Atemtraining konnte die respiratorische Muskulatur in Trainingsphasen niedrigerer Intensität auf die höheren Belastungen im späteren Verlauf des TWJ vorbereitet werden. Der Einsatz eines solchen Trainings hat daher das Potential, die Leistungsfähigkeit von Freistilschwimmern zu steigern.

Abstract

At present the athletes of the German swimming association are unable to keep up with the performance of the world's leading swimmers. Thus, the numbers of medals achieved within international competitions decreases. Analyses could trace back this trend to deficits regarding the long-term athlete development. As a result, there are growing demands on increasing the specificity of the basic endurance training in terms of a more adequate preparation of race-specific strength capacities. Since studies showed that the efficiency of the respiratory system can limit exercise performance, the aim of this dissertation was to analyze the potential of a specific training of the breathing muscles to access reserve capacities in freestyle swimming. An evaluation of the breathing patterns of successful athletes showed that a low-frequency breathing pattern has a positive impact on freestyle performance, hence another goal of this study was to investigate the effect of hypoventilation during high intensity swimming. A crossover intervention study was conducted with 15 adolescent swimmers. During the first and the second macro cycle of the swimming season an eight week POWERbreathe training was performed by six swimmers each. Before and after each intervention incremental tests were conducted in a swimming flume to assess exercise capacity and the change of exercise physiological parameters in response to the training stimulus. Within this test protocol three graded exercise intensities and two different breathing frequencies were taken into account. The

main result of the study was an improved strength and enhanced economy of the breathing muscles which resulted in an increased maximum voluntary ventilation (MVV), decreasing levels of lactate and lower cycle frequencies during freestyle swimming at a given velocity. The training effect is based on an attenuation of the inspiratory metaboreflex and an optimization of the propulsion phases due to a more rapid inspiration. Because of the breathing training the respiratory muscles were exposed to a high training stimulus within low-intensity swimming training periods which resulted in an improved preparation of higher swimming intensities in the later stages of the swimming season. Thus, the POWERbreathe training has the potential to enhance exercise performance of freestyle swimmers.

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich keine Unterstützungsleistungen erhalten.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Leipzig, den 07.07.2017

Anna Matthaei