

**Polyelektromyografische Untersuchung der
Rumpfmuskulatur bei Sängern
Folgeuntersuchung nach vier Jahren Gesangstraining**

**Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades**

doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

**von Robert Schwabe
geboren am 12.07.1984 in Zwickau**

Gutachter

1. Herr PD. Dr. Christoph Anders
2. Herr PD. Dr. Michael Eiselt
3. Herr Prof. Dr. Bernhard Richter

Tag der öffentlichen Verteidigung: 02.02.2016

Abkürzungsverzeichnis

A/D	Analog/Digital
Ag/AgCl	Silber/Silberchlorid
BMI	Body-Mass-Index
bzw.	Beziehungsweise
DP	Diaphragma
EI	Musculus erector spinae pars iliocostalis
EKG	Elektrokardiogramm
EL	Musculus erector spinae pars longissimus
EMG	Elektromyogramm
FSU	Friedrich - Schiller - Universität Jena
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
ICO5	Musculi intercostales im 5. Interkostalraum
ICO8	Musculi intercostales im 8. Interkostalraum
Kg	Kilogramm
LD	Musculus latissimus dorsi
m	männlich
M.	Musculus
Mm.	Musculi
OE	Musculus obliquus externus
OEMG	Oberflächen - Elektromyogramm
OI	Musculus obliquus internus
PM	Musculus pectoralis major
post.	posterior
QL	Musculus quadratus lumborum
RA	Musculus rectus abdominis
RMS	Root-Mean-Square
SA	Musculus serratur anterior
SCM	Musculus sternocleidomastoideus
sup.	superior
TD	Musculus trapezius pars descendens
ToM	Tower of Measurement
TU	Technische Universität
w	weiblich

1 INHALTSVERZEICHNIS

1	Zusammenfassung.....	7
2	Einleitung.....	9
2.1	Grundlagen.....	10
2.1.1	Die Atmung.....	10
2.1.1.1	Physiologie der Ventilationsatmung.....	11
2.1.1.2	Physiologie der Phonationsatmung.....	14
2.1.2	Elektromyographie.....	18
2.2	Untersuchte Muskeln.....	22
2.3	Bisherige wissenschaftliche Erkenntnisse.....	23
3	Ziele der Arbeit.....	26
4	Material und Methoden.....	29
4.1	Probanden.....	30
4.2	Untersuchung.....	31
4.2.1	Untersuchungsaufbau.....	31
4.2.2	Untersuchungsablauf.....	34
4.3	Datenanalyse.....	36
4.3.1	Datenaufzeichnung.....	36
4.3.2	Datenverarbeitung.....	36
4.3.2.1	Aufarbeitung der Daten.....	36
4.3.2.2	Allgemeine Datenverarbeitung.....	37
4.3.2.3	Spezielle Datenverarbeitung.....	38
4.3.2.3.1	Zeitunabhängige Betrachtungen.....	38
4.3.2.3.2	Zeitabhängige Betrachtungen.....	39
4.4	Statistik.....	40
4.4.1	Zeitunabhängige Betrachtungen.....	40
4.4.2	Zeitabhängige Betrachtungen.....	40

5	Ergebnisse	42
5.1	Zeitunabhängige Betrachtungen	42
5.1.1	Vokalausgleich	43
5.1.1.1	Betrachtungen der Folgeuntersuchung	43
5.1.1.1.1	Mittlere Muskelaktivitäten	43
5.1.1.1.2	Muskelaktivität bezogen auf das Referenzmaximum	44
5.1.1.1.3	Intermuskuläre Koordination	45
5.1.1.2	Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet	46
5.1.1.2.1	Mittlere Muskelaktivität	46
5.1.1.2.2	Muskelaktivität bezogen auf das Referenzmaximum	47
5.1.1.2.3	Intermuskuläre Koordination	48
5.1.2	Dreiklang	50
5.1.2.1	Betrachtungen der Folgeuntersuchungen	50
5.1.2.1.1	Mittlere Muskelaktivitäten	50
5.1.2.1.2	Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum	50
5.1.2.1.3	Intermuskuläre Koordination	51
5.1.2.2	Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet	53
5.1.2.2.1	Mittlere Muskelaktivitäten	53
5.1.2.2.2	Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum	53
5.1.2.2.3	Intermuskuläre Koordination	55
5.1.3	Tonleiter	57
5.1.3.1	Betrachtungen der Folgeuntersuchungen	57
5.1.3.1.1	Mittlere Muskelaktivitäten	57
5.1.3.1.2	Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum	57
5.1.3.1.3	Intermuskuläre Koordination	58
5.1.3.2	Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet	59
5.1.3.2.1	Mittlere Muskelaktivitäten	59
5.1.3.2.2	Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum	60

5.1.3.2.3	Intermuskuläre Koordination.....	61
5.1.4	Schwellton.....	63
5.1.4.1	Betrachtungen der Folgeuntersuchungen.....	63
5.1.4.1.1	Mittlere Muskelaktivitäten	63
5.1.4.1.2	Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum.....	63
5.1.4.1.3	Intermuskuläre Koordination.....	65
5.1.4.2	Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet.....	66
5.1.4.2.1	Mittlere Muskelaktivitäten	66
5.1.4.2.2	Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum.....	68
5.1.4.2.3	Intermuskuläre Koordination.....	69
5.1.5	Übungslängen der Erst- und Folgeuntersuchung	71
5.2	Zeitabhängige Betrachtung	73
5.2.1	Einatmung vor Erzeugung eines Schwelltons.....	73
5.2.1.1	Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung.....	73
5.2.1.2	Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung	75
5.2.1.2.1	Atemmuskulatur	75
5.2.1.2.2	Bauchmuskulatur	76
5.2.1.2.3	Hals- und Nackenmuskulatur	76
5.2.1.2.4	Thoraxmuskulatur.....	77
5.2.1.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur.....	77
5.2.1.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	78
5.2.2	Übungsverlauf.....	80
5.2.2.1	Vokalausgleich.....	80
5.2.2.1.1	Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung	80
5.2.2.1.2	Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung.....	82
5.2.2.1.2.1	Atemmuskulatur	82
5.2.2.1.2.2	Bauchmuskulatur	82
5.2.2.1.2.3	Hals- und Nackenmuskulatur	82

5.2.2.1.2.4	Thoraxmuskulatur.....	83
5.2.2.1.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur.....	83
5.2.2.1.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	84
5.2.2.2	Dreiklang.....	86
5.2.2.2.1	Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung	86
5.2.2.2.2	Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung.....	88
5.2.2.2.2.1	Atemmuskulatur	88
5.2.2.2.2.2	Bauchmuskulatur	88
5.2.2.2.2.3	Hals- und Nackenmuskulatur	89
5.2.2.2.2.4	Thoraxmuskulatur.....	89
5.2.2.2.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur.....	90
5.2.2.2.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	90
5.2.2.3	Tonleiter.....	93
5.2.2.3.1	Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung	93
5.2.2.3.2	Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung.....	95
5.2.2.3.2.1	Atemmuskulatur	95
5.2.2.3.2.2	Bauchmuskulatur	95
5.2.2.3.2.3	Hals- und Nackenmuskulatur	96
5.2.2.3.2.4	Thoraxmuskulatur.....	96
5.2.2.3.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur.....	97
5.2.2.3.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	97
5.2.2.4	Schwellton.....	100
5.2.2.4.1	Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung	100
5.2.2.4.2	Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung.....	102
5.2.2.4.2.1	Atemmuskulatur	102
5.2.2.4.2.2	Bauchmuskulatur	102
5.2.2.4.2.3	Hals- und Nackenmuskulatur	102
5.2.2.4.2.4	Thoraxmuskulatur.....	103

5.2.2.4.2.5	Tiefe Rückenmuskulatur.....	104
5.2.2.4.2.6	Oberflächliche Rückenmuskulatur	104
6	Diskussion.....	106
6.1	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	106
6.1.1	Einatmung	106
6.1.1.1	Atemmuster.....	106
6.1.1.2	Atemmuskulatur.....	107
6.1.1.3	Bauchmuskulatur	107
6.1.1.4	Hals- und Nackenmuskulatur.....	109
6.1.1.5	Thoraxmuskulatur	109
6.1.1.6	Tiefe Rückenmuskulatur.....	110
6.1.1.7	Oberflächliche Rückenmuskulatur.....	110
6.1.1.8	Zusammenfassende Überlegungen	111
6.1.2	Übungen	113
6.1.2.1	Atemmuster.....	113
6.1.2.2	Atemmuskulatur.....	114
6.1.2.3	Bauchmuskulatur	115
6.1.2.4	Hals- und Nackenmuskulatur.....	115
6.1.2.5	Thoraxmuskulatur	116
6.1.2.6	Tiefe Rückenmuskulatur.....	117
6.1.2.7	Oberflächliche Rückenmuskulatur.....	118
6.1.2.8	Zusammenfassende Überlegungen	119
6.2	Fragestellungen der Einleitung.....	122
6.2.1	Hypothese 1.....	122
6.2.2	Hypothese 2.....	125
6.2.3	Hypothese 3.....	128
6.2.4	Hypothese 4.....	131
6.3	Fehlerbetrachtungen	133

6.3.1	Probanden.....	133
6.3.2	Untersuchungsablauf.....	133
6.3.3	Elektrodenpositionierung	134
7	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	136
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	137
9	Anhang.....	140
9.1	Lebenslauf.....	140
9.2	Danksagung.....	141
9.3	Ehrenwörtliche Erklärung	142

2 ZUSAMMENFASSUNG

Während der professionellen Gesangsausbildung sollen die Auszubildenden eine Gesangstechnik erlernen, welche ihnen die Generierung eines ausgewogenen Luftstromes zur Tonproduktion mithilfe der Stimmlippen ermöglicht. Da die Studenten die Gesangsausbildung mit unterschiedlichen atemtechnischen Voraussetzungen beginnen, folgt die sängerische Ausbildung bestimmten, den Vorstellungen bzw. dem Stil der Gesangsschule entsprechenden Grundkonzepten der Sängeratmung. Häufig wird in der Literatur in diesem Zusammenhang der Begriff der „Atemstütze“ verwendet, um dem Singenden die Bedeutung der Rumpfmuskulatur für den Gesangsvorgang zu veranschaulichen. Mithilfe der „richtigen“ Technik der Atmung beim Singen soll es dem Sänger folglich ermöglicht werden, ohne Überbeanspruchung einzelner Muskelgruppen, einen gleichmäßigen, die Stimmlippen zum Schwingen anregenden Luftstrom zu generieren. Es soll am Beispiel der „Dresdner Gesangsschule“ nachgewiesen werden, ob eine gesangstechnische Umerziehung der Studenten möglich und auch wissenschaftlich belegbar ist. Die Arbeit zur Auswertung der Daten zu Studienbeginn von Jähkel (2014), welche hier als Vergleichsarbeit dienen soll, hat sich im Detail mit der Analyse der beteiligten Muskeln während des Singens zu Beginn des Studiums beschäftigt. Die vorliegende Arbeit beschreibt die Veränderungen der muskulären Aktivitätscharakteristika bei den Gesangsstudenten nach vier Jahren professioneller Ausbildung. Die Probanden mussten vier gesangstechnisch anspruchsvolle, standardisierte und etablierte Übungen (Vokalausgleich, Dreiklang, Tonleiter, Schwellton) vortragen. Mithilfe des Oberflächen-Elektromyogramms (OEMG) wurde nach vier Jahren Gesangsausbildung bei 13 verbliebenen Gesangsstudenten die Aktivität der zu untersuchenden Muskeln aufgezeichnet. Zusätzlich konnten die Atemexkursionen im Brust-, Flanken- und Bauchbereich mit drei dehnbaren Bändern sowie das Tonsignal aufgezeichnet werden. Anschließend wurden einzelne gesangstechnisch relevante Bereiche der entsprechenden Übungen analysiert. Aufgrund des stochastischen Charakters des Signals und der starken interindividuellen Unterschiede erfolgte eine Normierung auf festgelegte Bezugsgrößen. Diese Bezugsgrößen waren im Einzelnen das Referenzmaximum, das übungsspezifische Maximum sowie die intermuskuläre Koordination. Es wurde darauf geachtet, dass die Bedingungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten identisch waren. Die Erfassung der Messdaten erfolgte in der Ausgangs- und Vergleichsuntersuchung mit dem gleichen Elektrodenbesatz sowie entsprechenden elastischen Bändern. Die anatomischen Markierungen und das Anbringen der Elektroden und Bänder erfolgten ebenfalls zu beiden Zeitpunkten von derselben fachkundigen Person. Die vorliegende Arbeit kann

bemerkenswerte Tendenzen der muskulären Veränderungen bei Gesangsstudenten während der vier Jahre andauernden professionellen Gesangsausbildung aufdecken. Ein bereits vorhandenes, von Jähkel (2014) beschriebenes, natürliches Koordinationsmuster wird im Zuge einer gezielten gesangstechnischen Umerziehung verändert. An mehreren Beispielen zeigt sich eine deutliche Umorganisation oder auch „Professionalisierung“ der Atem- und Gesangstechnik. Diese Veränderungen finden sich insbesondere während der Einatmung bis hin zum darauf folgenden Tonansatz. Beispielhaft sei hier der M. obliquus internus zu nennen. Dieser Muskel zeigt in den Daten der vorliegenden Arbeit während der Einatmung deutliche Aktivierungscharakteristika während der Inspiration. Dies ist, verglichen mit den Daten von Jähkel (2014), am ehesten durch eine ausgeprägte Zunahme der „Stützfunktion“ dieses Muskels zu erklären. Ein ähnliches Bild findet sich auch bei der tiefen und oberflächlichen Rückenmuskulatur. Auch bei diesen Muskelgruppen ist eine Zunahme der Atemstützfunktion im Studienverlauf nachweisbar. Zusätzlich findet sich bei allen untersuchten Muskeln in der vorliegenden Arbeit eine auffällig bessere zeitliche Synchronisierung der muskulären Aktivierung während der Einatmung. Folglich kommt es zu einer Reduktion der interindividuellen Unterschiede im Laufe der Gesangsausbildung. Diese Veränderungen bilden deutlich den Effekt einer einheitlichen professionellen Gesangsausbildung ab. Bei den einzelnen Gesangsübungen konnten ebenfalls bemerkenswerte Veränderungen der muskulären Aktivierung und Koordination zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten dargestellt werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigten eine deutlich bessere, an die entsprechende Gesangsübung angepasste Koordination der Muskulatur, insbesondere bei der Atemmuskulatur. Dem steht zum Zeitpunkt der Ausgangsuntersuchung eine eher druckbetonte, „unkoordinierte“ Ausatmung während der entsprechenden Übungen gegenüber. Weiterhin finden sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten sehr hohe muskuläre Aktivierungen zum Zeitpunkt des Tonansatzes für die gesamte Rücken- und Bauchmuskulatur. Folglich zeigt sich auch in der vorliegenden Arbeit die herausragende Bedeutung dieser Muskelgruppen für die „Atemstütze“ während des Gesangsvorgangs. Grundsätzlich bleibt hierbei festzuhalten, dass sich diese eben beschriebenen Veränderungen bei den Probanden nach vier Jahren professioneller Gesangsausbildung bereits bei der sehr kleinen Fallzahl von 13 verbliebenen Studienteilnehmern mit entsprechenden statistischen Nachweisen dargestellt haben.

3 EINLEITUNG

„Von der Atmung und besonders der Funktion des für sie wesentlichen Muskels, dem Zwerchfell, hängt der Stimmklang direkt ab.“ (Göpfert 2002)

„Beim Singen kommt es darauf an, die Balance zwischen Zwerchfell und Stimmlippen herzustellen und dann nicht mehr zu stören.“ (Göpfert 2002)

Beide Zitate veranschaulichen die enorme Bedeutung der Atmung für die Stimm- und Klangerzeugung. Der Gesangsschüler soll im Laufe seiner professionellen Gesangsausbildung eine konkrete Vorstellung der Sängeratmung entsprechend dem jeweiligen spezifischen Stil der Gesangsschule erlernen. Für den Sänger bzw. die Sängerin existieren hierbei eine Vielzahl verschiedener Methoden der Körper- und Atemschulung. Mithilfe dieser unterschiedlichen Techniken soll dem Singenden eine effektive und zugleich schonende Atemtechnik aneignet werden. Die beschriebene Form des Ökonomisierens ist eine entscheidende Voraussetzung für eine langjährige sängerische Tätigkeit. Diese Sachverhalte verdeutlichen die Wichtigkeit der Atmung und insbesondere das Verständnis der Atemtechnik für den Singenden, und in diesem Zusammenhang auch für den Lehrenden, während des Gesangsvorganges (Göpfert 2002).

Ein weiterer entscheidender Begriff, der häufig im Zusammenhang mit der Sängeratmung genannt wird, ist jener der „Atemstütze“ oder häufig auch kurz als „Stütze“ bezeichnet. Dem gesungenen Ton wird bei der Ausatmung der nötige Halt verliehen. Einheitliche Erkenntnisse, wie der gesungene Ton muskulär gestützt wird, gibt es jedoch nicht.

In den folgenden Abschnitten werden dem Leser die Grundlagen der physiologischen Atmung, der für den Gesang bedeutungsvollen Phonationsatmung sowie die Methode der Elektromyographie näher erläutert. Im Anschluss daran erfolgt ein kurzer Überblick über die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie die Formulierung der Ziele der vorliegenden Arbeit.

3.1 GRUNDLAGEN

3.1.1 DIE ATMUNG

„Das Erste was zu lehren ist, ist der Atem!“ (Buddha 550 - 480 v.Chr.)

Die Atmung spielt sowohl im täglichen Leben als auch bei der Stimm- und Klangbildung eine herausragende Rolle. Im Laufe einer professionellen Gesangsausbildung wird die Atemtechnik gezielt mittels Training der entsprechenden Muskelbereiche verbessert.

Im Folgenden werden Physiologie und Mechanik der Atmung grundlegend erläutert, wobei zwischen der Ventilationsatmung und der Phonationsatmung unterschieden wird. Die Ventilationsatmung wird als weitestgehend unwillkürlicher Prozess gesehen, welcher hauptsächlich der Anreicherung des Blutes mit Sauerstoff dient. Demgegenüber wird die Phonationsatmung als willkürlicher Mechanismus verstanden, welcher vor allem zur Stimmbildung sowie zur sängerischen Klangerzeugung genutzt wird. Zum Verständnis der Phonationsatmung sind Grundlagenkenntnisse der physiologischen Atemmechanik zwingend erforderlich.

3.1.1.1 Physiologie der Ventilationsatmung

Angelehnt an Aumüller et al. (2007), Schmidt et al. (2011), Hirano et al. (1970) sowie Thiel (1969) werden im Folgenden die anatomischen und physiologischen Grundlagen der Ventilationsatmung erläutert.

Ein Großteil der Energiegewinnung im menschlichen Körper wird mittels oxidativer Stoffwechselprozesse bewerkstelligt. Der Organismus ist somit auf die stetige Zufuhr von Sauerstoff und die konsequente Abgabe von Kohlenstoffdioxid angewiesen. Die Lunge ist der entscheidende Ort dieses Gasaustausches zwischen der Umgebungsluft und dem Sauerstofftransportmedium Blut. Jeder Atemzyklus beginnt mit der Atemruhelage, einem kurzen Moment, in dem ein Gleichgewicht zwischen der Verkleinerungstendenz der Lunge und der Ausdehnungstendenz des Brustkorbes herrscht. Ein vollständiger Atemzyklus dehnt sich jeweils vom Beginn der Inspiration bis zum Ende der darauf folgenden Expiration aus. Die Atemfrequenz in Ruhe beträgt durchschnittlich 14 Atemzüge pro Minute mit jeweils einem Atemzugvolumen von etwa 0,5 Litern. Demnach ergibt sich in körperlicher Ruhe ein Atemminutenvolumen von ca. 7,0 Litern, welches unter starker körperlicher Belastung jedoch auf über 120 Liter pro Minute angehoben werden kann.

Bei der Inspiration, welche als aktiver Vorgang zu verstehen ist, vergrößert sich das Volumen des Brustkorbes durch eine Zunahme des vertikalen, sagittalen sowie horizontalen Durchmessers. Hauptverantwortlich für diesen aktiven Prozess sind das Diaphragma sowie die Interkostalmuskulatur, die vorwiegend bei körperlicher Belastung durch die Atemhilfsmuskulatur unterstützt werden. Anstelle des Begriffes Diaphragma wird im Folgenden vorwiegend die deutsche Bezeichnung Zwerchfell verwendet. Durch eine Kontraktion dieses Muskels, kommt es zu einer Abflachung der Zwerchfellkuppeln und somit zu einer erheblichen Vergrößerung des Brustraumes, insbesondere im vertikalen Durchmesser. Als Folge davon werden die Organe des Bauchraumes nach unten geschoben und die Bauchdecke weicht nach vorn und an den Flanken zur Seite aus. Eine Vergrößerung des Brustkorbes in der sagittalen und horizontalen Ebene, bedingt durch ein Anheben der Rippen, wird durch eine Kontraktion der äußeren Interkostalmuskulatur erreicht. Die Lunge ist durch Adhäsionskräfte mit der Innenwand des Brustkorbes verbunden und somit in der Lage passiv seinen expandierenden Bewegungen zu folgen. Das Ausdehnen der Lunge führt zu einer Abnahme des Luftdruckes im Inneren des Organs. Diese Druckdifferenz zwischen der Umgebungsluft und dem Lungeninneren ist der entscheidende Mechanismus bei der Ventilation der Lungenalveolen, was schließlich zu einem Einströmen der Atemluft führt.

Die Expiration ist unter Ruhebedingungen, im Gegensatz zur eben dargestellten Inspiration, ein passiver Vorgang. Nach dem Erschlaffen des Zwerchfells und der äußeren Interkostalmuskeln bewirken hauptsächlich die elastischen Rückstellkräfte der Lunge sowie die Schwerkraft eine Verkleinerung des Brustraumes. Die dadurch hervorgerufene Abnahme des Lungenvolumens führt zu einem Entweichen der Atemluft. Bei körperlicher Belastung kann die Expiration, in diesem Zusammenhang als forcierte Expiration bezeichnet, auch als aktiver Vorgang gesehen werden. Hier kommt es, bedingt durch eine Kontraktion der inneren Interkostalmuskeln sowie der Bauch- und Rumpfmuskulatur, zu einer beschleunigten Ausatmung.

Ausgehend von den eben beschriebenen Prozessen bei der Inspiration und der Expiration unterscheidet man verschiedene Atmungsformen. Zum einen sei hier die diaphragmale Atmung zu nennen, welche gerade in körperlicher Ruhe den dominanten Atmungsmechanismus darstellt. Zum anderen beschreibt die kostale Atmung eine Atmungsform, die hauptsächlich unter körperlicher Belastung verstärkt zum Einsatz kommt.

Die bei der Inspiration sowie der Expiration bzw. forcierten Expiration beteiligte Muskulatur ist in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Die Steuerung der physiologischen Atmung wird von Neuronengruppen der Medulla oblongata im Hirnstamm übernommen sowie durch reflektorische und chemische Einflüsse kontrolliert. Einen wesentlichen reflektorischen Einfluss haben die Muskeleigenreflexe der Atemmuskulatur und der Hering-Breuer-Reflex, der den Dehnungszustand der Lunge vermittelt. Die chemische Kontrolle erfolgt über zentrale und periphere Chemorezeptoren, welche fortlaufend den Kohlenstoffdioxid- und Sauerstoffpartialdruck sowie die Wasserstoff-Ionen-Konzentration registrieren. Den bedeutendsten Einfluss auf den Atemantrieb hat hierbei der Kohlenstoffdioxidpartialdruck.

Die Ventilationsatmung ist damit weitestgehend unwillkürlich reguliert, ganz im Gegensatz zur willkürlich gesteuerten Phonationsatmung, die vordergründig zur Stimm- und Klangerzeugung dient.

Tabelle 1 Atemmuskulatur: Inspiratorische und Expiratorische Muskeln

Muskelgruppe	Aufgabe	beteiligte Muskeln
obligate Inspiratoren	Einatmung in Ruhe	Diaphragma Mm. intercostales externi Mm. intercartilaginei Mm. scaleni
auxiliäre Inspiratoren	forcierte Einatmung	M. serratus anterior M. serratus post. sup. M. pectoralis major M. pectoralis minor M. sternocleidomastoideus M. erector spinae
obligate Exspiratoren	Ausatmung in Ruhe	Mm. intercostales interni Mm. subcostales M. transversus thoracis
auxiliäre Exspiratoren	forcierte Ausatmung	Mm. abdominis Mm. latissimus dorsi

3.1.1.2 Physiologie der Phonationsatmung

Im folgenden Abschnitt sollen die Klangerzeugung, die „Stütze“ sowie die Sängeratmung, angelehnt an die Werke von Sundberg (1997), Richter (2013) sowie Göpfert (2002), grundlegend physiologisch erläutert werden.

Klangerzeugung

Unter diesem Punkt werden die anatomische und physiologische Funktion des Stimmorgans sowie seine besondere Rolle bei der Klangerzeugung ausführlicher beschrieben. Grundlegend besteht das Stimmorgan nach Sundberg (1997) aus den drei Kompartimenten: Atemapparat, Stimmlippen sowie Ansatzrohr und dient in erster Linie der zwingend erforderlichen Modifikation des Luftstromes beim Singen und Sprechen. Nach Richter (2013) setzt sich die Stimme aus Tonanregung (Atmung), Tonproduktion (Kehlkopf) und Tonformung (Resonanzräume) zusammen, was prinzipiell die Funktion der drei von Sundberg beschriebenen Kompartimente erläutert.

Das erste Kompartiment, der Atemapparat, komprimiert die eingeatmete Luft und gibt sie kontrolliert, durch spezifischen Einsatz einer muskulären Gegenstütze, wieder ab. Diese Stütze wird auch als Atemstütze oder einfach „Stütze“ bezeichnet und ist für die Phonationsatmung, insbesondere für die Dauer des gesungenen Tons, von herausragender Bedeutung, weswegen sie im Verlauf der Arbeit separat besprochen wird. Die auszuatmende Luft wird somit durch den Atemapparat unterhalb der geschlossenen Stimmritze verdichtet und erzeugt so den subglottischen Druck. Der minimale Druck, der zu einer leisen Phonation notwendig ist, liegt bei etwa zwei bis drei cm H₂O (1,96 bis 2,94 mBar). Der maximale subglottische Druck, der bei Sängern gemessen wurde, liegt bei bis zu 60 cm H₂O (58,84 mBar) (Richter 2013).

Der Begriff der Phonation bezeichnet die Schallerzeugung mithilfe der Stimmlippenschwingung. Der während der Phonation erzeugte Schall wird auch als Primärschall bezeichnet (Sundberg 1997). Somit wird der Kehlkopf mit den Stimmlippen als zweites wichtiges Kompartiment des Stimmorgans gesehen und ist maßgeblich für die Erzeugung des primären Schalls, auch als Tonproduktion zu verstehen, verantwortlich.

Das dritte Kompartiment, welches an der Modifikation der Stimme beteiligt ist, wird auch als Ansatzrohr bezeichnet. Es besteht aus dem Pharynx (Rachen) und der sich anschließenden Mundhöhle und dient vordergründig als Resonanzkörper zur Verstärkung bzw. Formung des

erzeugten Primärschalls. Eine weitere wesentliche Funktion des Ansatzrohres ist die Artikulation und Formantenbildung. Als Artikulation bezeichnet man die Vorgänge zur Einstellung der benötigten Form des Ansatzrohres während der Stimmbildung, hauptsächlich durch Lippen, Zunge, Unterkiefer, Gaumensegel und Kehlkopf realisiert. Die Formanten beschreiben diejenigen Frequenzanteile, die am besten durch das Ansatzrohr übertragen bzw. verstärkt werden. Bei diesen Frequenzen wird die Amplitude des Schalldrucks besonders groß. Mithilfe einer Formantenanalyse kann die Artikulationsfunktion des Ansatzrohres, insbesondere im Rahmen der Artikulationsschulung während der Gesangsausbildung, überprüft werden.

Die drei dargestellten Kompartimente des Stimmorgans werden von Sundberg (1997) in seinem Werk „Die Wissenschaft von der Singstimme“ auch mit den Begriffen Kompressor (Atemapparat), Oszillator (Stimmlippen) und Resonator (Ansatzrohr), orientiert am Vokabular im Ingenieurwesen, beschrieben.

Atemstütze

„Atemstütze beim Singen bedeutet demnach - im Gegensatz zum bloßen Ausatmen -, das Gefühl des spannungsvollen Weithaltens in Brustkorb und Taille nach der Einatmung mit in die Tonproduktion hinüberzunehmen.“ (Göpfert 2002)

Der sängerische Begriff der „Stütze“ leitet sich vom italienischen „appoggio“, übersetzt „Anlehnung“, ab und beschreibt den Vorgang der Atemregulierung. Dem gesungenen Ton wird, vereinfacht gesprochen, der nötige Halt verliehen. In der Literatur wird beim Begriff „Stütze“ von einem Zurückhalten der Luft mithilfe der Einatemmuskulatur oder von einem Verdichten der Luft unterhalb der Glottis gesprochen (Forchhammer 1937). Auch heute noch ist diese Begrifflichkeit nicht einheitlich geklärt. Die Atemstütze ist in erster Linie eine Art subjektive sängerische Empfindung, für die eine einheitliche Definition nur schwierig herauszuarbeiten ist (Seidner und Wendler 2010). Es konnte gezeigt werden, dass es für den Zuhörer scheinbar keinen offensichtlichen Zusammenhang zwischen der gestützten Stimme und einer guten stimmlichen Qualität gibt. Einerseits finden sich Sänger, die eine gestützte von einer nicht gestützten Stimme unterscheiden können. Andererseits gibt es jedoch auch Sänger, welche beim Hören ihrer eigenen Stimme nicht zwischen gestützt und nicht gestützt unterscheiden können (Sonninen et al. 2005). Selbst professionelle Gesangsausbilder können beim Zuhören nicht einheitlich einschätzen, wie ausgeprägt die „Stütze“ im Moment des Singens gerade vorliegt (Sand und Sundberg 2005).

Unter dem Oberbegriff „Stütze“ werden verschiedene Regulationsvorgänge der Atmung zusammengefasst. In der ersten Phase der Expiration wird den passiven Rückstellkräften der Lunge entgegengewirkt, da möglichst wenig Luft über die Lunge entweichen soll. Nach Überschreitung der Atemruhelage wird dieser Vorgang umgekehrt, wobei hingegen am Ende der Expiration möglichst viel Luft entweichen soll (Göpfert 2002).

Die physiologische Grundlage der Atemstütze stellt, wie im Eingangszitat bereits angeführt, ein Halten der inspiratorischen Spannung während des Gesangs dar. Die Lunge federt nicht sofort nach der Einatmung passiv in die Atemruhelage zurück, sondern wird in Spannung gehalten, damit die Stimmlippen gleichmäßig mit einem Luftstrom versorgt werden können. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei das Zwerchfell, welches jedoch nicht direkt beeinflusst werden kann. „Ein Kraftvoll gespanntes Zwerchfell, das wiederum der Lunge ein Halten ihrer Spannung ermöglicht, ist die Basis jeder gelungenen Tonproduktion.“ (Göpfert 2002) Der Sänger muss somit versuchen, indirekt Einfluss auf den Spannungszustand des Zwerchfells zu nehmen. Der relative Tiefstand dieses Muskels wird vermutlich durch den gezielten Einsatz der Atemhilfsmuskulatur, vorwiegend durch die Bauchwandmuskulatur sowie mittels oberflächlicher und tiefer Rückenmuskulatur erreicht.

In der italienischen Terminologie muss in Bezug auf den Begriff „appoggio“ jedoch zwischen „appoggiare la voca in petto“ („Stützen der Stimme im Brustkorb“) und „appoggiarsi in testa“ („sich in den Kopf stützen“) unterschieden werden. Somit scheint auch der Zwischenrippenmuskulatur, deren Hilfsmuskulatur und der Muskulatur des Rachens und Kehlkopfes eine Atemstützfunktion zuzukommen.

Sängeratmung

Die Anforderungen an die Atmung und die entsprechende Technik sind beim Singen und auch beim Sprechen, verglichen mit der Ruheatmung, besonders hoch. Zum einen muss die Muskulatur auf eine häufige Änderung des Lungenvolumens reagieren und sich dementsprechend anpassen. Zum anderen muss dennoch eine sehr spezifische und schnelle Änderung des subglottischen Druckes ermöglicht werden. Zusätzlich kann das Verhältnis zwischen Ein- und Ausatmung, welches in Entspannung etwa 1:2 beträgt, während des Gesangs deutlich zugunsten der Ausatmung verlagert sein (Binazzi et al. 2006).

Es existieren unterschiedliche Gesangsschulen mit teilweise sehr verschiedenen eigenen Vorstellungen und Einstellungen von einer „richtigen“ Atemtechnik während des Singens. Generell gilt jedoch, entsprechend dem Stand des Wissens der Sängergemeinde und der

Gesangslehrer, dass die Studenten zu Beginn einer Gesangsausbildung mit unterschiedlichen Voraussetzungen, betreffend der Technik der Atmung beim Singen, ausgestattet sind. Ziel ist es dann, den Sänger im Laufe seiner Ausbildung zu einem bestimmten, den Vorstellungen bzw. dem Stil der Gesangsschule entsprechenden Grundkonzept der Sängeratmung umzuerziehen.

Ein wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit soll es hierbei sein, anhand des Stils der „Dresdner Schule“ nachzuweisen, ob dieser Prozess der Umerziehung des Gesangsstudenten wissenschaftlich belegbar ist. Eine vergleichende Betrachtung einzelner Gesangsschulen mit ihren jeweiligen unterschiedlichen Gesangstechniken soll in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden.

In der Literatur existieren keine einheitlichen Meinungen und Techniken zur Atemmechanik während des Singens. Einig ist man sich lediglich betreffs der Wichtigkeit einer „richtigen“ und vor allem auch schonenden Atemtechnik. Eine Verbesserung und Optimierung der Sängerstimme erscheint möglich. Eine gesunde Technik, insbesondere der Atemstütze, sowie ein effizienter Einsatz der dafür notwendigen Muskulatur ist eine Grundvoraussetzung für die Gestaltung des Berufslebens eines Sängers bzw. einer Sängerin (Emmons 1988).

3.1.2 ELEKTROMYOGRAPHIE

„Elektromyographie ist das Studium der Muskelfunktion durch Erforschung des elektrischen Signals, das die Muskeln erzeugen.“ (Basmajian und De Luca 1985)

Die Elektromyographie (EMG) ist ein technisches Verfahren, bei dem mittels applizierten Elektroden die myoelektrischen Signale der untersuchten Muskulatur erfasst und analysiert werden können. Mithilfe dieser Methode ist es möglich die Muskelaktivierung darzustellen und zu beurteilen (De Luca 1997). „Erfasst wird der Vorgang der elektrischen Erregung (Aktionspotentiale), welcher sich auf der Muskelmembran ausbreitet.“ (Freiwald et al. 2007) Vereinfacht könnte man sagen, es wird durch das EMG ein „direkter Blick auf den Muskel“ gewährt.

Die Grundlage der Entstehung eines elektrischen Signals stellen, wie im vorherigen Abschnitt bereits erwähnt, die über die Muskelmembran wandernden Aktionspotentiale dar. Durch eine Verschiebung des Ionengleichgewichtes an der Muskelfasermembran wird eine Depolarisation hervorgerufen. Dieser elektrische Impuls wird während der Repolarisationsphase sofort wieder umgekehrt. Direkt im Anschluss erfolgt eine kurze Phase der Hyperpolarisation, in welcher die Muskelzellmembran kurzzeitig nicht erregbar ist. Dieses so generierte Aktionspotential wandert jetzt in bidirektionaler Richtung entlang der Muskelfasermembran. Der Ursprungsort dieser Aktionspotentiale ist die motorische Endplatte, ein wesentlicher Bestandteil der motorischen Einheit, welche wiederum durch ein Motoneuron und der von ihm innervierten Muskelfaser beschrieben wird (Schmidt et al. 2011).

Der Umkehrbereich dieses Muskelaktionspotentials zwischen Depolarisation und Repolarisation beträgt etwa ein bis drei mm^2 und wird auch als Depolarisationszone bezeichnet. Dieser Bereich wandert mit etwa zwei bis sechs m/s entlang der Muskelfaser. Die so erzeugten Potentialdifferenzen können mittels applizierten Elektroden gemessen werden (Freiwald et al. 2007).

Es gibt prinzipiell verschiedene Arten der Elektrodenapplikation, die sich hinsichtlich des Aufwandes, der Fehleranfälligkeit aber auch der Toleranz des Probanden unterscheiden. Grundlegend muss eine Unterteilung zwischen invasiven und nicht-invasiven Methoden vorgenommen werden. Invasive Methoden werden hauptsächlich in Form von Nadelelektroden bei neurologischen Fragestellungen eingesetzt. Im Rahmen einer mehrfachen Durchführung der Untersuchung, beispielsweise im Zusammenhang mit einer klinischen

Studie, ist diese Methode aufgrund von mangelnder Toleranz als ungeeignet anzusehen. In kinesiologischen Studien hat sich aufgrund der vergleichsweise einfachen Handhabung und der guten Akzeptanz durch die Probanden die Verwendung von Oberflächenelektroden, vorwiegend Silber/Silberchlorid basierten Einmalelektroden, durchgesetzt. Der Einsatz von Oberflächenelektroden beim OEMG unterliegt jedoch einer Vielzahl von ungünstigen Beeinflussungen und muss deshalb standardisiert durchgeführt werden. Dies betrifft v.a. die Elektrodenpositionierung (Merletti et al. 2001, De Luca und Knaflitz 1992) und die Hautvorbereitung.

Die elektrische Leitfähigkeit des Gewebes wird ganz besonders von individuell erheblich unterschiedlichen Faktoren wie Körperbehaarung, Hautverunreinigungen, Fettgewebe sowie Sehnen und Faszien der Muskeln beeinflusst. Auch Entzündungen oder Ödeme können das OEMG-Signal erheblich stören. Demnach sind Hautvorbereitungen wie eine Haarentfernung, um den sicheren Halt der Elektroden zu gewährleisten, sowie eine Hautreinigung mit einer speziellen abrasiven Reinigungspaste zur Reduktion des Hautwiderstandes unerlässlich (Basmajian und De Luca 1985). Die Distanz zwischen Elektrode und Muskulatur hat ebenfalls einen starken Einfluss auf die ermittelten Ergebnisse. So wird das OEMG-Signal mit zunehmendem Abstand zwischen Elektrode und Entstehungsort des Muskelaktionspotentials abgeschwächt. Das Gewebe und dessen Beschaffenheit wirken wie eine Art Tiefpassfilter, d.h. hohe Frequenzanteile des Signals werden möglicherweise herausgefiltert und gehen verloren (Freiwald et al. 2007). Das OEMG-Verfahren eignet sich aus diesem Grund vorwiegend für die Untersuchung von oberflächlich gelegener Muskulatur, für das Erfassen tiefer gelegener Muskeln sind Nadelelektroden demnach unablässig (Konrad 2005). Die Ableitung des OEMG-Signals erfolgt hauptsächlich in bipolarer Technik, nämlich durch Anbringung zweier Elektroden in Verlaufsrichtung der Muskelfasern (Basmajian und De Luca 1985). Der Interelektrodenabstand wird in mehreren Publikationen erwähnt und beträgt in der Regel zwischen 10 bis 30 Millimeter (Freiwald et al. 2007, Basmajian und De Luca 1985, De Luca und Knaflitz 1992, Farina et al. 2002). Je weiter dieser Abstand gewählt wird, desto tiefer kann eine Ableitung im Gewebe erfolgen, jedoch geschieht dies zu Lasten der Selektivität (De Luca und Knaflitz 1992, De Luca 1979). Weiterhin von entscheidender Bedeutung ist die Positionierung der Elektroden anhand von anatomischen Landmarken bzw. leicht zu ertastenden Bezugspunkten. Zu diesem Zweck existieren einheitliche Vermessungssysteme, welche eine optimale Elektrodenpositionierung gewährleisten (www.seniam.org). Ein großer Störfaktor bei einer dynamischen Analyse ist ebenfalls durch die Verschiebbarkeit von Haut, Bindegewebe und Muskulatur gegeben (Basmajian und De

Luca 1985). Diese Störgrößen können jedoch durch einen optimalen Versuchsaufbau auf ein vernachlässigbares Minimum reduziert werden. Hierzu ist eine Positionierung der Oberflächenelektroden zentral auf dem Muskelbauch erforderlich, um relative Bewegungen der Elektroden bei Muskelkontraktion zu vermeiden (Beck et al. 2009). Die Elektroden sowie die angeschlossenen Kabel dürfen während der Analyse nicht auf Zug belastet werden, weshalb eine Kabelfixation mittels Tapes, elastischen Bändern oder Netzstrümpfen empfohlen wird (Freiwald et al. 2007, Konrad 2005).

Das von korrekt angebrachten Elektroden erfasste Signal wird auch als Rohsignal oder „Roh-EMG“ bezeichnet. In der Regel wird dieses Signal mittels eines Differenzialverstärkers um den Faktor 500 oder 1000 verstärkt. Dieser Miniaturverstärker befindet sich bei sogenannten aktiven Elektroden direkt im Messkabel oberhalb der Elektrode integriert, ansonsten in einem separaten Verstärkergehäuse, welches aufgrund der geringen Signalamplituden des Rohsignals möglichst nah zu den Elektroden platziert sein sollte (Basmajian und De Luca 1985). Ein weiterer wichtiger Schritt zur Bearbeitung des EMG-Signals ist eine korrekte A/D-Konvertierung, um Aliasing-Effekte zu verhindern (Konrad 2005, De Luca 2001). Hierbei wird der analoge Messstrom in ein digitales Signal umgewandelt, abgespeichert und schließlich an einem Computer analysiert und ausgewertet. Um im weiteren Verlauf der Analyse die Signaldaten besser interpretieren und beschreiben zu können, muss eine Gleichrichtung und Glättung des Signals erfolgen. Bei der Gleichrichtung werden die positiven und negativen Ausschläge der EMG-Kurve durch mathematische Betragsbildung positiviert. Ein weiterer wesentlicher Schritt ist die Glättung des EMG-Signals. Da das „Roh-EMG“ stochastischer Natur ist, d.h. in seiner Form nicht exakt reproduzierbar ist, muss diese Variabilität mittels Glättung minimiert werden. In diesem Zusammenhang haben sich die Verfahren des „gleitenden Mittelwertes“ sowie das „Root-Mean-Square“-Verfahren (kurz RMS) etabliert (Forchhammer 1937). Der RMS ist der derzeit am häufigsten verwendete und international anerkannte Glättungsalgorithmus (De Luca 1979). Mathematisch betrachtet ist dieser Wert die quadrierte Wurzel des Eingangssignals und beschreibt die mittlere Leistung des EMG-Signals (Konrad 2005, Freiwald et al. 2007).

Bei OEMG-Messungen kommt es, wie im vorherigen Abschnitt bereits ausführlich erläutert, teilweise zu sehr starken Veränderungen während der Durchführung einer Messung. Es liegt eine sehr hohe interindividuelle Variabilität der Amplitudenwerte vor. Grundsätzlich sollten mehrere Wiederholungen der entsprechenden Messungen erfolgen, um die erhaltenen Ergebnisse insbesondere bei dynamischen Fragestellungen zu mitteln (Shiavi et al. 1987).

Zusätzlich dazu ist eine Normierung der gemessenen Daten zwingend erforderlich, da somit eine Reduktion der Variabilität der Signalamplitude sowie eine Verbesserung der Sensitivität erreicht werden kann (Yang und Winter 1984). Die am weitesten verbreitete und etablierte Normalisierungsmethode ist die Maximum-Voluntary-Contraction-Normalisierung (MVC), somit eine maximale willentliche Muskelkontraktion unter isometrischen Bedingungen. Dieses Verfahren eignet sich hauptsächlich für die Untersuchung von einzelnen und gut isoliert kontrahierbaren Muskeln, wie beispielsweise dem M. biceps brachii (Freiwald et al. 2007, Burden und Bartlett 1999). Eine weitere Methode ist die Expected-Maximum-Contraction-Normierung (EMC). Dieses Verfahren, auch als Normierung durch Bezug zu einem übungsspezifischen Maximum zu verstehen, hat sich bei der Untersuchung größerer Muskelgruppen, insbesondere wenn eine isolierte Kontraktion nur bedingt möglich ist, etabliert. Beispielhaft sei hier die Untersuchung der Rumpfmuskulatur zu nennen (Marras und Davis 2001, Marras et al. 2001). Letzteres Verfahren wurde, insbesondere für die Analyse der zeitunabhängigen Daten, in der vorliegenden Arbeit verwendet.

3.2 UNTERSUCHTE MUSKELN

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vordergründig mit den Veränderungen der Koordinationsmuster von im Vorfeld definierten Muskeln im Verlaufe einer professionellen Gesangsausbildung. Die zur Klangerzeugung ebenfalls notwendige Kehlkopfmuskulatur sowie die Muskulatur des Ansatzrohres werden in der vorliegenden Arbeit nicht näher beschrieben.

Es erfolgt, um auf die Arbeit zur Erstuntersuchung der Gesangsstudenten von Jähkel (2014) Bezug nehmen zu können, eine Einteilung der betrachteten Muskeln in die bereits etablierten sechs Muskelgruppen. Zur übersichtlichen Darstellung werden die einzelnen Muskelgruppen mit ihren zugehörigen untersuchten Muskeln in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt. Eine anatomische und funktionelle Beschreibung der einzelnen Muskeln erfolgte bereits in der Arbeit von Jähkel (2014) und wird deshalb nicht erneut vorgenommen.

Tabelle 2 Muskelgruppen: Zugehörige untersuchte Muskeln. Dargestellt sind die definierten Muskelgruppen der Erst- und Folgeuntersuchung mit den jeweils zugehörigen Muskeln. Jeder untersuchte Muskel wurde grundsätzlich simultan auf beiden Körperseiten gemessen.

Muskelgruppe	zugehörige Muskeln
Atemmuskulatur	Diaphragma (DP) Mm. intercostales(ICO5 und ICO8)
Bauchmuskulatur	M. obliquus internus abdominis (OI) M. obliquus externus abdominis (OE) M. rectus abdominis (RA)
Hals- und Nackenmuskulatur	M. sternocleidomastoideus (SCM) M. trapezius descendens (TD)
Thoraxmuskulatur	M. pectoralis major (PM) M. serratus anterior (SA)
tiefe Rückenmuskulatur	M. multifidus (MF) M. quadratus lumborum (QL)
oberflächliche Rückenmuskulatur	M. erector spinae pars iliocostalis (EI) M. erector spinae pars longissimus (EL) M. latissimus dorsi (LD)

3.3 BISHERIGE WISSENSCHAFTLICHE ERKENNTNISSE

Im folgenden Abschnitt wird eine Auswahl der bisher durchgeführten Untersuchungen gegeben, um einen kurzen Überblick über den aktuellen wissenschaftlichen Stand in diesem Themenbereich zu vermitteln.

Viele der bisherigen Untersuchungen beschäftigen sich in erster Linie mit der Atmung bzw. den kinematischen Veränderungen der Bauch- und Brustwandmuskulatur während des Gesangs. Schon frühzeitig wurde die Bedeutung der Muskulatur der Bauchwand für die Aufrechterhaltung der Spannung der Brustwand während des Singens untersucht (Watson et al. 1989). In späteren Untersuchungen konnten aufzeigen, dass geschulte Sänger ein stabiles Atemmuster besitzen, welches jedoch interindividuell sehr stark variieren kann (Collyer et al. 2008). Des Weiteren wurde untersucht, ob eine gezielte Veränderung dieses Atemmusters einen Einfluss auf die Generierung von spezifischen subglottischen Drücken und somit auf die Klangerzeugung selbst hat (Collyer et al. 2009b). Eine weitere Studie hat in diesem Zusammenhang analysiert, ob der Zuhörer bei der Beurteilung der klanglichen Qualität zwischen verschiedenen, gezielt veränderten Atemmustern während des Gesangs unterscheiden kann (Collyer et al. 2009a). All diese Studien konnten jedoch keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Veränderung des Atemmusters und der stimmlichen Qualität, insbesondere auch deren Wahrnehmung durch den Zuhörer, herausfinden.

Ein Großteil weiterer Publikationen beschäftigt sich mit dem Kehlkopf, der Kehlkopfmuskulatur, seiner Positionsveränderung während der Tonproduktion und der mit Hilfe der durch die Lunge komprimierten Atemluft erzeugten subglottischen Drücke und schließlich der resultierenden Klangentstehung. Beispielsweise wurde schon frühzeitig die Kehlkopfmuskulatur mit Hilfe der Elektromyographie während der Stimmbildung und auch während des Singens analysiert (Hirano et al. 1969, Hirano et al. 1970). Auch Löfqvist et al. (1984) haben sich detailliert mit der Aktivierung der einzelnen Kehlkopfmuskeln während der Stimmbildung befasst. Hier wurden ebenfalls mittels EMG die Aktivitäten von drei Binnenmuskeln (M. vocalis, der M. cricoarytenoideus lateralis sowie der M. arytenoideus transversus) und einem Außenmuskel (M. cricothyroideus) des Kehlkopfes während der Stimmbildung aufgezeichnet. In einer weiteren Untersuchung wurde beispielsweise der Schwingungsmechanismus des Kehlkopfes im Zusammenhang mit dem Gesangsregister näher untersucht. Man konnte herausarbeiten, dass während des Singens teilweise verschiedene Register mit derselben Einstellung des Kehlkopfes produziert werden (Roubeau

et al. 2009). In einer anderen Arbeit hat man untersucht, ob die vertikale Kehlkopfposition vom Lungenvolumen abhängig ist. Hier wurde diskutiert, dass ein großes Lungenvolumen mit einer kaudal veränderten Kehlkopfposition korreliert. Die vertikale Position des Kehlkopfes steht zusätzlich in direktem Zusammenhang mit der Tonhöhe beim Singen. Beide Sachverhalte zeigten sich bei männlichen Probanden stärker ausgeprägt als bei weiblichen (Iwarsson und Sundberg 1998). In einer weiteren Veröffentlichung wurde die vertikale Position des Kehlkopfes in Abhängigkeit von der Bauchatmung näher untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Kehlkopf bei der Atmung mit vorgewölbter Bauchwand in seiner vertikalen Position höher steht als bei der Atmung mit eingezogener Bauchwand (Iwarsson 2001). Somit widerspricht dieses Ergebnis in gewisser Weise der Hypothese von Iwarsson und Sundberg (1998), dass bei verstärkter Zunahme des Lungenvolumens und somit tiefer tretendem Zwerchfell ein Absinken des Kehlkopfes, vermutlich durch Zug der Trachea, hervorgerufen wird. Aufgrund individueller und womöglich sehr unterschiedlicher Atemtechniken ist jedoch eine direkte Vergleichbarkeit beider Sachverhalte in Frage zu stellen. Weitere Arbeiten von Shipp (1975) und Shipp und Izdebski (1975) beschäftigten sich bereits ausführlich mit der Veränderung der Kehlkopfposition in Abhängigkeit von der Frequenzänderung während der Stimmbildung.

Viggo Pettersen sowie Peter J. Watson haben eine ganze Reihe von Untersuchungen mit einzelnen Muskeln sowie spezifischen kleineren Muskelgruppen und deren Aktivitäten während des Singens durchgeführt. Eine Studie beschäftigt sich beispielsweise mit der Aktivität der Hals- und Nackenmuskulatur während des Singens. Es konnte festgestellt werden, dass die Aktivitätsverläufe der Mm. sternocleidomastoidei und der Mm. scaleni während der Einatmung und der Phonation miteinander korrelieren. Darüber hinaus konnte man eine erhebliche Muskelaktivität in der hinteren Nackenregion während der Einatmung und der Stimmbildung beschreiben. Abschließend hat man die Aktivität der Hals- und Nackenmuskulatur im Gesangsverlauf als sehr „eigenwillig“ beschrieben (Pettersen und Westgaard 2005). In einer weiteren Publikation wurde das Verhalten des oberen M. trapezius, der Interkostalmuskulatur sowie der lateralen Bauchwandmuskulatur untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich der M. trapezius bei der Phonation den beiden anderen Muskelgruppen gegenüber sehr ähnlich verhält. Somit ist man zu dem Ergebnis gekommen, dass dem M. trapezius beim Singen eine expiratorische Funktion zukommt (Pettersen und Westgaard 2004). In einer weiteren Arbeit konnte gezeigt werden, dass mittels Biofeedbackverfahren, speziell beim M. sternocleidomastoideus und dem M. trapezius, eine Reduktion der Muskelaktivität während des Gesangsvorgangs erreicht werden kann. Dies

lässt die Autoren darauf schließen, dass diese Muskeln beim Singen überbeansprucht werden (Pettersen und Westgaard 2002). Des Weiteren wurde auch die Beanspruchung des M. pectoralis major in einer Studie untersucht, wobei geschlechtsspezifische Unterschiede festgestellt werden konnten. Bei den Sängern ist eine konstante Aktivität des Muskels über die gesamte Phonation hinweg zu beobachten. Demgegenüber zeigt sich bei den Sängerinnen eine Aktivität vorwiegend im Verlauf der Einatmung und zu Beginn der Phonation (Pettersen 2006). Weiterhin wurde auch die Funktion des M. latissimus dorsi während der Phonation analysiert. Dieser Muskel ist entscheidend an der Aufrechterhaltung der Spannung des expandierten Brustkorbes beteiligt und hat somit eine wesentliche Funktion beim Gesangsvorgang (Watson et al. 2012).

Viele aktuellere Arbeiten beschäftigen sich beispielsweise mit der Darstellung des Ansatzrohres oder auch der Kehlkopfeinstellung mittels Magnet-Resonanz-Tomographie, um so die Vorgänge der Stimmproduktion und Stimmformung optisch veranschaulichen zu können (Vasconcelos et al. 2011, Echternach et al. 2011, Echternach et al. 2014a, Echternach et al. 2014b). Beispielsweise wurden u.a. die morphologischen Unterschiede der Resonanzräume oberhalb des Kehlkopfes bei professionellen Sängern untersucht und hierbei konnte gezeigt werden, dass eine Zunahme der Lautstärke beim Singen mit einer Vergrößerung des Hohlraumes der Mundhöhle und des Rachens einhergeht (Rua Ventura et al. 2013). Weitere Arbeiten beschäftigen sich in diesem Zusammenhang mit neuen Methoden der Magnet-Resonanz-Tomographie zur Darstellung des Kehlkopfes und der Resonanzräume während des Singens. Hier wird beispielsweise das sog. „weight-bearing MR imaging“ genutzt, um eine Untersuchung in sitzender sowie liegender Position während des Gesanges zu gewährleisten. Folglich ist es möglich den Einfluss der Schwerkraft bei der Untersuchung abzubilden (Traser et al. 2013, Traser et al. 2014).

4 ZIELE DER ARBEIT

Wie bei den Ausführungen zum aktuellen wissenschaftlichen Stand ersichtlich wird, beschäftigen sich viele der bisher durchgeführten Studien mit der Untersuchung des Kehlkopfes und des Ansatzrohres sowie der Aktivität einzelner Muskeln während des Singens. Arbeiten, die sich mit der Koordination der einzelnen, an der Phonationsatmung beteiligten, Muskeln und Muskelgruppen sowie deren Veränderungen über einen längeren definierten Zeitraum beschäftigen, sind in der Literatur in dieser Form nicht zu finden.

Für diese Arbeit wurden deshalb Gesangsstudenten zu Beginn und nach vier Jahren professioneller Gesangsausbildung untersucht, um die muskuläre Koordination während des Singens, vor allem aber deren Beeinflussung durch die Ausbildung, analysieren und beurteilen zu können. Es erfolgte jeweils eine standardisierte Untersuchung der an der Studie teilnehmenden Studenten in einem Abstand von vier Jahren. In der Erstuntersuchung wurde die Koordination ausgewählter Muskeln und Muskelgruppen zu Beginn der Gesangsausbildung beschrieben und in der nun durchgeführten Folgeuntersuchung sollen die Veränderungen nach vier Jahren dargestellt werden. Zu beiden Untersuchungszeitpunkten mussten die Probanden jeweils vier definierte und überwachte gesangstechnische Übungen vortragen. Mithilfe der etablierten Methode des OEMGs konnte die Aktivität der während des Gesangs zu messenden Muskulatur aufgezeichnet werden. Die Untersuchung der Probanden erfolgte zu beiden Untersuchungszeitpunkten, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, unter identischen Untersuchungsbedingungen.

Die Daten der Erstuntersuchung haben zum einen aufgezeigt, dass die Probanden zu Beginn ihrer Ausbildung schon ein etabliertes muskuläres Koordinationsmuster für die Phase der Einatmung vorweisen, und zum anderen auffällige geschlechtsspezifische Unterschiede im Hinblick auf die verschiedenen Atemtypen bestehen. Es konnte gezeigt werden, dass männliche Probanden vermehrt die Bauchatmung und weibliche Probanden vorwiegend die Brustatmung einsetzen. Weiterhin wurde dokumentiert, dass weibliche Probanden, verglichen mit den männlichen Probanden, über alle Übungen hinweg ein höheres Beanspruchungsniveau der einzelnen Muskeln besitzen. Einzige Ausnahme war hier der M. sternocleidomastoideus. Bei allen vier Gesangsübungen zeigten sich bei den Studenten zum Zeitpunkt des Ausbildungsbeginns ebenfalls schon vorhandene Koordinationsmuster, welche bei jedem einzelnen Probanden in ähnlichem Ausmaß ausgeprägt waren (Jähkel 2014).

In der Erstuntersuchung ist es somit gelungen, die Charakteristik der Muskelaktivität speziell auch der Muskelkoordination, insbesondere der Atemstützmuskulatur sowie größerer Muskelgruppen, während des Vortragens von spezifischen professionellen Gesangsübungen zu Beginn des Studiums näherungsweise zu beschreiben.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse der Veränderungen der muskulären Koordination, beziehungsweise auch identifizierbarer Beanspruchungsparameter, während des Gesangs im Laufe einer professionellen Gesangsausbildung (Gesangsstudium).

Die folgenden Hypothesen sollen im Verlauf der Arbeit diskutiert werden:

Hypothese 1:

Durch eine Optimierung der Muskelkoordination während einer professionellen Gesangsausbildung kommt es gegenüber der Situation zu Beginn der Ausbildung zu einer Veränderung der muskulären Aktivierung, insbesondere im Hinblick auf eine stärkere, funktionelle Orientierung. Spezifische Charakteristika im Rangzahlverlauf sollten sich in der Nachuntersuchung deutlich ausgeprägter darstellen.

Hypothese 2:

Im Verlauf der Gesangsausbildung kommt es zu einer Abnahme der Amplitudenanteile der Atemhilfsmuskeln, speziell beim SCM und dem TD, und zu einer Zunahme der Anteile der obligat an der Atmung beteiligten Muskeln. Vordergründig betrifft dies das DP, ICO5 und ICO8 sowie die an der Atemstütze beteiligte Rumpfmuskulatur (tiefe und oberflächliche Rücken- sowie Bauchmuskulatur).

Hypothese 3:

Da eine Ökonomisierung der Muskelaktivität als entscheidende Voraussetzung im Berufsalltag eines Sängers bzw. einer Sängerin angesehen werden kann, führt das professionelle Gesangstraining zu einer Optimierung der maßgeblich an der Atmung und Stimmgebung beteiligten Muskulatur, was, bezogen auf die Gesangsunabhängige Referenz, wiederum in einem Absinken des entsprechenden relativen Aktivitätsniveaus zu sehen ist.

Hypothese 4:

Bei der durch die Sänger in ihrer Länge frei wählbaren Gesangsübung des Schwelltons nimmt die Übungslänge im Vergleich zur Erstuntersuchung bedingt durch eine während der Gesangsausbildung erworbene, effektivere muskuläre Koordination zu. Gleichzeitig ist das auf die Referenz bezogene Aktivitätsniveau der beteiligten Muskeln bei der Folgeuntersuchung am Übungsende niedriger ausgeprägt als zu Beginn des Studiums.

5 MATERIAL UND METHODEN

Die im Folgenden aufgeführten Untersuchungen und deren Datenanalysen sind basierend auf einer Zusammenarbeit der Hochschule für Musik Carl Maria von Weber in Dresden und der Klinik für Unfall- und Wiederherstellungschirurgie, FB Motorik, Biomechanik und Pathophysiologie an der Friedrich-Schiller-Universität Jena entstanden.

Dieses Projekt wurde von der Ethikkommission der FSU Jena befürwortet (Bearbeitungs-Nr. 2320-06/08) und wurde durch das Ministerium für Wissenschaft und Forschung des Freistaates Sachsen gefördert (Förderkennzeichen: 4-7531.50-03-2800-08/1).

Die Langzeitstudie begleitet Gesangsstudenten sächsischer Musikhochschulen während einer professionellen Gesangsausbildung über einen Zeitraum von vier Jahren und soll dazu dienen, die muskuläre, koordinative sowie stimmliche Entwicklung der Probanden im Verlauf zu betrachten.

Vordergründiges Ziel dieser Arbeit war es, die Entwicklung der Probanden nach vier Jahren vergleichend auf physiologischer Ebene zu beurteilen. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, wurden die erhobenen Daten zu Beginn der Studie im Oktober 2008 durch Frau Stella Jähkel, den erhobenen Daten nach vier Jahren gegenüber gestellt.

Die vorliegende Arbeit betrachtet ausschließlich die Entwicklung auf muskulärer und koordinativer Ebene. Die stimmliche Entwicklung im o.g. Zeitraum wird in dieser Arbeit nicht interpretiert.

5.1 PROBANDEN

Am Projekt nahmen anfangs 24 Gesangsstudenten teil. Dabei konnten jedoch zu Beginn der Studie lediglich neun Studenten im ersten Studienjahr an der Musikhochschule in Dresden eingeschlossen werden. Es wurden weitere 12 Studenten der Hochschule für Musik und Theater Felix Mendelssohn Bartholdy in Leipzig sowie drei Studenten der Hochschule für Musik Franz Liszt in Weimar in die Untersuchungen mit einbezogen. Das Alter der Studienteilnehmer lag zwischen 19 und 26 Jahren, jeweils 12 männlichen und 12 weiblichen Geschlechts. Die ersten Daten wurden im Oktober 2008 erhoben und dokumentiert.

In die Messungen nach vier Jahren konnten 13 Probanden der beiden sächsischen Musikhochschulen eingeschlossen werden. 11 Studienteilnehmer verließen das Projekt aus unterschiedlichen Gründen (u.a. Schwangerschaft, starke Schwankungen des BMI, Studienabbruch, Hochschulwechsel). Bei den Messungen nach vier Jahren professionellen Gesangstrainings konnten sechs männliche und sieben weibliche Probanden untersucht und deren Messdaten dokumentiert werden (siehe Tabelle 3 *Probandenauflistung*).

Tabelle 3 *Probandenauflistung*

Nr.	Geburtsdatum	Geschlecht	Gesang	Erstmessung	Folgemessung
P01	22.03.1984	m	Bassbariton	19.04.2009	10.01.2012
P04	12.07.1989	w	Sopran	29.10.2008	09.01.2012
P05	25.01.1988	w	Mezzosopran	29.10.2008	09.01.2012
P06	10.01.1989	m	Bassbariton	29.10.2008	10.01.2012
P07	08.02.1989	w	Sopran	29.10.2008	10.01.2012
P20	01.02.1987	m	Tenor	17.04.2009	27.04.2012
P21	10.09.1988	w	Sopran	17.04.2009	27.04.2012
P23	27.07.1988	m	Bassbariton	17.04.2009	27.04.2012
P24	16.05.1983	w	Mezzosopran	17.04.2009	09.01.2012
P25	07.05.1989	w	Sopran	17.04.2009	27.04.2012
P26	03.10.1988	m	Bassbariton	17.04.2009	27.04.2012
P28	19.05.1988	m	Bassbariton	17.04.2009	27.04.2012
P29	08.02.1990	w	Sopran	17.04.2009	27.04.2012

5.2 UNTERSUCHUNG

5.2.1 UNTERSUCHUNGSaufbau

Die Ableitung der Muskelaktivität erfolgte wie bereits erwähnt mittels OEMG. Um Variationen aufgrund wechselnder Versuchsleiter mit unterschiedlicher Erfahrung zu vermeiden, erfolgte die Markierung für die EMG-Elektroden im gesamten Verlauf der Studie stets durch dieselbe Person. Die Anbringung der Elektroden orientiert sich am internationalen Standard (Hermens et al. 1999), mit jeweils zwei Ag/AgCl Oberflächenelektroden (H93SG, Kendall, Covidien, Deutschland) parallel zur Faserrichtung des zu untersuchenden Muskels. Die Markierung wurde mit einem wasserfesten Stift vorgenommen. Zur Gewährleistung guter Ableitbedingungen und eines geringen Hautwiderstandes wurden die markierten Areale auf der Haut mit einer Peelingcreme (Epicont, General Electrics Healthcare, Deutschland) vorbehandelt, mögliche Messungenauigkeiten in stark behaarten Bereichen konnten durch eine lokale Rasur eingeschränkt werden. Die exakte Position der Elektroden ist in Tabelle 4 *Elektroden- und Bandpositionen* sowie in Abbildung 1 *Elektrodenposition* direkt im Anschluss an diesen Abschnitt ersichtlich. Zur Erfassung der Exkursion im Brust-, Flanken- und Bauchbereich kamen drei dehnungssensible Bänder zur Anwendung. Die Registrierung der Auslenkungen geschah dabei über in die Bänder integrierte Kraftaufnehmer. Die entsprechende Verstärkertechnik war simultan ebenfalls mit dem Messsystem verbunden. Die EMG-Elektroden wurden während der Messung weder auf Druck noch auf Zug belastet.

Die Auswahl der Muskeln erfolgte aufgrund der Zielstellung der vorliegenden Untersuchung. In diesem Projekt erfolgte erstmals nicht nur die Betrachtung einzelner Muskeln, wie beispielsweise der Nacken- und Schultermuskulatur (Pettersen et al. 2005), sondern größerer Muskelsysteme. Im Einzelnen umfasste dies Teile der Atemmuskulatur (Diaphragma, Musculi intercostales), der Bauchmuskulatur (M. obliquus internus abdominis, M. obliquus externus abdominis, M. rectus abdominis), der Hals- und Nackenmuskulatur (M. sternocleidomastoideus, M. trepezius descendens), der Thoraxmuskulatur (M. serratus anterior, M. pectoralis major) sowie der tiefen (M. multifidus, M. quadratus lumborum) und oberflächlichen (M. erector spinae pars longissimus et pars iliocostalis, M. latissimus dorsi) Rückenmuskulatur.

Tabelle 4 Elektroden- und Bandpositionen

Muskel/Signal	Lokalisation/Orientierung	Abkürzung
Diaphragma	7.-8. ICR, Medioclavicularlinie, senkrecht	DP
Intercostale (5. ICR)	5. ICR, vordere Achsillarlinie (Höhe Xiphoid)	ICO5
Intercostale (8. ICR)	8. ICR, vordere Achsillarlinie	ICO8
Obliquus internus	medial Inguinalfalte, Höhe SIAS, horizontal	OI
Obliquus externus	Ca. 30° nach unten, Hälfte Distanz Rippenbogen-Beckenkamm, seitl. Körperkontur	OE
Rectus abdominis	kaudale Elektrode Höhe Nabel, 4cm von Mitte, vertikal	RA
Sternocleidomastoideus.	nach kranial, beginnend ca. 2cm oberhalb Clavicula, entlang Muskelkontur	SCM
Trapezius descendens	prox. Elektrode ½ Distanz zw. C7 und Acromion, auf Linie	TD
Pectoralis major	Hälfte Abst. Achselfalte-Sternum, waagerecht	PM
Serratus anterior	Höhe Xiphoid, seitl. Körperkontur, 45° nach dorsal ansteigend, auf Linie	SA
Multifidus	Höhe L5, 1cm medial der Linie SIPS – L1/L2 Zwischenraum	MF
Quadratus lumborum	neben Muskelbauch Multifidus, Hälfte zwischen 12. Rippe und Crista iliaca, vertikal	QM
Errector spinae (iliocostalis)	Höhe L2, medial d. Linie SIPS-Unterkante Rippenbogen	EI
Errector spinae (longissimus)	Höhe L1 2-Finger lateral des Proc. spinosus auf Muskelbauch, nach kranial	EL
Latissimus dorsi	½ Distanz Linie hintere Achselfalte L1, auf Linie	LD
Elektrokardiogramm	obere Kante Sternum gegen Herzspitze	EKG
Band 1	Höhe direkt unter Achsel	B1
Band 2	Hälfte Distanz zwischen Band 1 und Band 3	B2
Band 3	oberhalb des Beckenkammes	B3

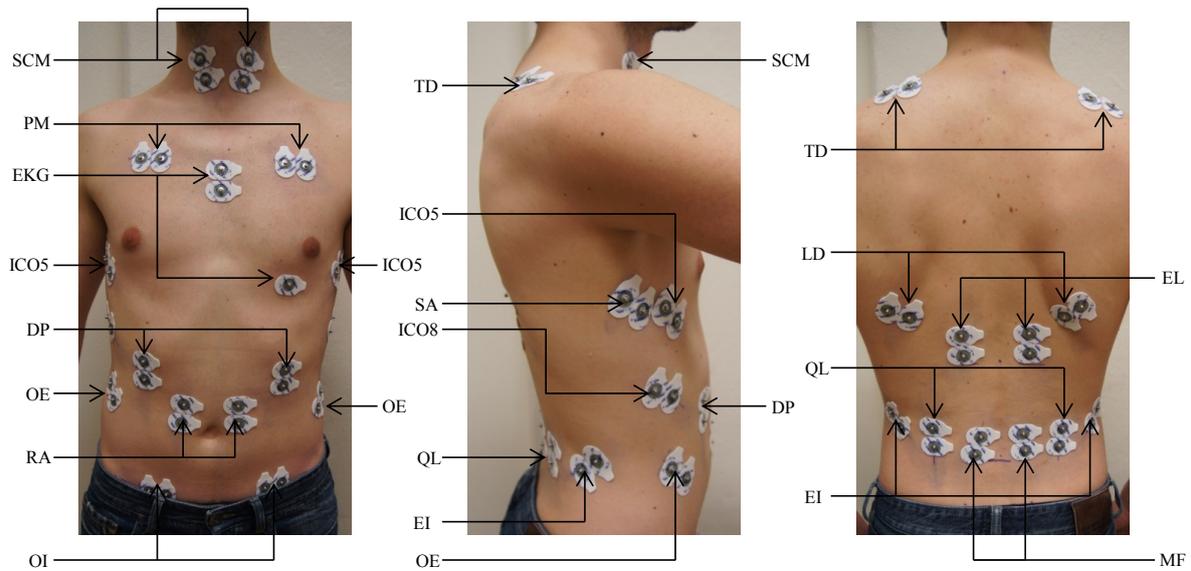


Abbildung 1 Elektrodenpositionen

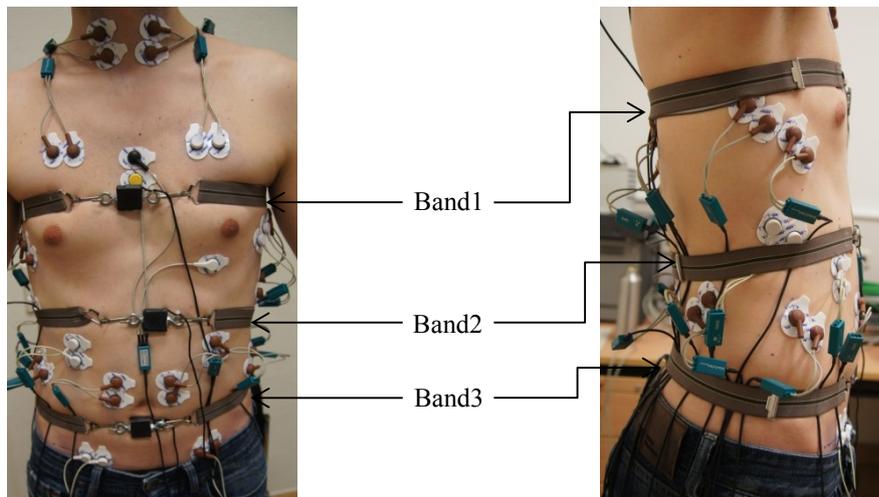


Abbildung 2 Bandpositionen

Die elektrische Aktivität des Herzmuskels stellt bei der Ableitung der OEMG-Aktivitäten, insbesondere in naher Lage zum Herzen (Schulter- und Rumpfmuskulatur), ein nicht zu vernachlässigendes Störsignal dar (Konrad 2005). Es war somit zwingend erforderlich, die Artefakte bei der Messung zu eliminieren. Unter diesem Gesichtspunkt wurden, zusätzlich zu den Elektroden für die einzelnen Muskeln, jeweils zwei Elektroden zur Ableitung des EKG-Signals in der Herzachse positioniert. Ziel dieses Vorgehens war es, das EKG-Signal bei jeder einzelnen Muskelaktivität mit aufzuzeichnen, um es bei der Datenanalyse mathematisch zu eliminieren. Ein einfaches Herausfiltern des Signales war aufgrund von Frequenzähnlichkeiten mit dem Hauptfrequenzspektrum des EMGs nicht möglich.

Die so vorbereiteten Probanden wurden vor einem Mikrophon, immer im selben Abstand (30 cm), positioniert. Neben den Aktivitäten der einzelnen Muskeln, den Bandauslenkungen und dem EKG-Signal war es so ebenfalls möglich, ein Tonsignal aufzunehmen. Verwendet wurde dafür ein speziell für diese Untersuchung entwickelter Signalverstärker und Taktgeber (Spezialanfertigung, Studio für Stimmforschung Dresden, Prof. Dr.-Ing. Gert Hofmann, Klinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Universitätsklinikum Carl Gustav Carus der TU Dresden).

Andere Störsignale, neben dem EKG-Artefakt, wurden vor jeder Messung mit der Aufzeichnungssoftware auffindig gemacht und gegebenenfalls beseitigt.

5.2.2 UNTERSUCHUNGSABLAUF

Bei den Probanden wurde während des mehrmaligen Vortragens von vier spezifischen Gesangsübungen (Vokalausgleich, Tonleiter, Dreiklang und Schwellton) die muskuläre Aktivität der Thorax-, Bauch- und Rückenmuskulatur mittels Oberflächen-EMG (OEMG) erfasst. Des Weiteren konnte die Exkursion im Brust-, Flanken- und Bauchbereich mit Hilfe von drei dehnungssensiblen Bändern ermittelt werden. Die durchgeführten Gesangsübungen sind als standardisierte Methode zur Verlaufskontrolle der stimmlichen Entwicklung der Studenten an der Hochschule für Musik in Dresden schon seit mehreren Jahren im Einsatz. Alle vorgestellten Untersuchungsteile mussten die Probanden im Stehen durchführen.

Zu Beginn wurde bei jedem Probanden in vollkommener Entspannung mit herabhängenden Armen eine Ruhemessung von 20 Sekunden Dauer durchgeführt. Im folgenden Schritt erfolgte eine Kalibrierung der dehnungssensiblen Bänder. Bei jedem Versuchsteilnehmer wurde die individuelle Auslenkung der Bänder, jeweils bei maximaler Inspiration und Expiration, im Brust-, Flanken- und Bauchbereich, erfasst. Anschließend erfolgten mehrere Referenzmessungen zur Detektion der maximalen Aktivität jedes einzelnen Muskels: maximale Inspiration in die Brust, maximale Inspiration in die Flanke und den Bauch, maximale Expiration. Nachdem die Probanden die erläuterten Ruhe- und Referenzmessungen absolviert hatten, schlossen sich die eigentlichen Messungen während der vier Gesangsübungen an.

Beim Vokalausgleich wurden die Vokale A E I O U jeweils für eine Dauer von einer Sekunde auf derselben Tonhöhe vom Versuchsteilnehmer gesungen. Der Dur-Dreiklang (Grundton, Terz und Quinte einer Tonleiter) wurde von jedem einzelnen Probanden auf- und abwärts, die Quinte dabei fünf Sekunden haltend, gesungen. Bei der im Staccato gesungenen Tonleiter wurde der Grundton aufwärts bis zur None und schließlich wieder abwärts bis zum selbigen

gesungen. Den letzten Ton mussten die Vortragenden für ca. drei Sekunden lang halten. Als letzte Übung wurde ein Schwellton gesungen. Hierbei haben die Probanden den Ton, ausgehend vom Piano crescendiert, so lange wie möglich gehalten und anschließend wieder decrescendiert.

Jede einzelne dieser vier Gesangsübungen wurde genau fünf Mal hintereinander durchgeführt. Im Anschluss daran erfolgte eine weitere, 20 Sekunden andauernde Ruhemessung.

5.3 DATENANALYSE

5.3.1 DATENAUFZEICHNUNG

Die Signalableitung der Muskelaktivität erfolgte im bipolaren Verschaltungsmodus. Das Signal wurde durch einen elektrodennahen Verstärker (5 Hz bis 700 Hz RC-Filter 1. Ordnung Biovision, Deutschland) um den Faktor 1000 verstärkt. Zur Aufzeichnung des Tonsignals, welches im späteren Verlauf sehr gut zur Orientierung genutzt werden konnte, diente das unter Punkt 5.2.1 aufgeführte Spezialmikrophon. Die Muskelaktivitäten, die Bandauslenkungen, das EKG-Signal und das Tonsignal konnten somit auf insgesamt 35 Kanälen simultan registriert werden. Die analogen Signale wurden mit dem Messsystem Tower of Measurement (ToM, DeMeTec, Deutschland) mit einer analog-digital (AD) Wandlungsrate von 2000/s und einer Auflösung von 24bit digitalisiert. Die so verarbeiteten Daten konnten schließlich auf einem Messlaptop aufgezeichnet (Programm: Erfassung, GJB, Langewiesen, Deutschland) und gleichzeitig orientierend auf Störsignale untersucht werden.

5.3.2 DATENVERARBEITUNG

5.3.2.1 Aufarbeitung der Daten

Die Daten der Messungen wurden für das weitere analytische Vorgehen im ATISAPro (GJB, Langewiesen) vorverarbeitet. Mit dieser Software war es möglich, die für die Berechnungen notwendigen Markierungsarbeiten der Muskelaktivitäten sowie der Bandauslenkungen und des EKG-Signals vorzunehmen.

Für die Berechnungen der Referenzwerte der Muskelaktivitäten wurden im ATISAPro visuell die Bereiche der Aktivitätsmaxima identifiziert und markiert. Als Orientierungshilfe dienten bereits während der Messung gesetzte Vormarkierungen, sowie die zusätzlich aufgezeichnete Tonspur.

In jeder einzelnen Übung konnten so die Phase der Einatmung, die gesamte Übung sowie ein im Folgenden aufgeführter, jeweils interessanter Bereich herausgearbeitet werden. Zur Markierung der Einatemphase wurde immer die erste messbare Auslenkung eines der Bänder als Anfangspunkt und das erste messbare Tonsignal als Endpunkt gesetzt. Der Bereich der gesamten Übungslänge ist jeweils vom Anfang des ersten messbaren Tons bis zum Ende des letzten messbaren Tons erfasst worden. Die Einatemphase sowie die gesamte Übungslänge wurden für alle Gesangsübungen und deren vier Wiederholungen in gleicher Weise

bearbeitet. Individuell interessante Bereiche, welche im Folgenden näher erläutert werden, waren abhängig von der vorher definierten Fragestellung.

Für den Vokalausgleich wurden die gesungenen Töne einzeln markiert. Beim folgenden Dreiklang wurden der Anfang des Grundtons bis zur Quinte, der gehaltene Ton und der abfallende Ton von der Quinte bis zum Grundton als getrennte Bereiche festgelegt. Bei der im Staccato gesungenen Tonleiter konnte jeweils der Beginn jedes einzelnen Tons bis einschließlich zur None mit einem Marker versehen werden. Eine weitere Markierung erfolgte beginnend mit der None ebenfalls immer am Anfang des Tons bis zum letzten gesungenen Ton. Weiterhin wurde der letzte gesungene Ton der Tonleiter als Bereich definiert und mit einem entsprechenden Marker gekennzeichnet. In der letzten vorgetragenen Übung, dem Schwellton, wurden jeweils drei definierte Areale festgelegt. Jeder Bereich war hierbei genau zwei Sekunden lang. Die Markierungen befanden sich am Anfang des Tons und an dessen Ende sowie im Gebiet der maximalen Tonintensität.

Die mithilfe von ATISAPro vorbereiteten Daten wurden im Anschluss durch verschiedene Skripte (Programmierung durch Dr. med. Ch. Anders) in der Programmierumgebung MATLAB weiterverarbeitet. Die einzelnen Prozesse werden im Folgenden erläutert.

5.3.2.2 Allgemeine Datenverarbeitung

Zunächst wurden alle Daten dem gleichen festgelegten Procedere unterzogen, um Störsignale und Artefakte zu eliminieren. Dieses Vorgehen wurde, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, bei allen Rohdaten angewendet. Der erste Schritt umfasste hierbei das Herausfiltern des Gleichspannungsanteils sowie eine Hochpassfilterung bei 10Hz. Dieses Vorgehen sollte dazu dienen, niederfrequente Störsignale zu unterdrücken. Es folgte, wie bereits unter 5.2.1 erwähnt, die Elimination der EKG-Artefakte. Da das EKG-Signal das OEMG-Signal von jedem einzelnen Muskel, abhängig von dessen Entfernung vom Herzen, verschieden stark beeinflusst, wurde es gesondert aufgezeichnet und schließlich vom OEMG-Signal, wie im Folgenden beschrieben, mathematisch abgezogen. Über den separat mitgeführten EKG-Kanal konnten die QRS-Komplexe an identischen Stellen detektiert werden. Eine visuelle Kontrolle der Markierungen erfolgte mittels der Software ATISAPro. Zur korrekten Elimination des EKG-Signals bedurfte es der Erstellung eines Templates (Mörl et al. 2010), mit dessen Hilfe es möglich war das Signal in jedem Kanal auf die gleiche Weise zu unterdrücken. Das Signal wurde mit einem symmetrischen Abstand von $\pm 100\text{ms}$, bezogen auf die gesetzte Markierung der R-Zacke, für alle auftretenden Ereignisse im jeweiligen

Messfile gemittelt. Damit konnten die systematischen Einflüsse des EKGs sicher identifiziert werden. Nun wurde dieses Template an den jeweils markierten Stellen in jedem einzelnen Kanal vom Originalsignal abgezogen. Es folgte weiterhin eine Bandsperrfilterung bei 50Hz, 150Hz, 250Hz und 300Hz. Zusätzlich wurde noch ein Tiefpassfilter bei 300Hz eingesetzt.

Alle so bearbeiteten Daten wurden als RMS-Werte (Root-Mean-Square) ausgegeben. Bei einem RMS-Wert wird aus der quadrierten mittleren Muskelaktivität die Wurzel gezogen. Er reflektiert die mittlere Leistung des EMG-Signals und wird standardmäßig als Glättungsalgorithmus eingesetzt (Konrad 2005).

Für das weitere Vorgehen wurden spezielle, unter 5.3.2.3 aufgeführte Bezugsgrößen definiert. Im Folgenden werden die Daten in zeitunabhängige und zeitabhängige Betrachtungen unterteilt.

5.3.2.3 Spezielle Datenverarbeitung

Die drei verschiedenen Bezugsgrößen (das Referenzmaximum, das übungsspezifische Aktivitätsmaximum und die intermuskuläre Koordination) bildeten die Grundlage für die weiteren Interpretationsschritte und Berechnungen.

Das Referenzmaximum ist definiert als das Amplitudenmaximum in einem zuvor mit Bereichsmarkern festgelegten Abschnitt der maximalen Muskelaktivität. Das übungsspezifische Maximum entspricht der maximalen Amplitude eines Muskels im Verlauf jeder einzelnen Übung. Hierbei ist es möglich, das Anstrengungsmaß eines Muskels zu einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb der Übung, im Bezug zu seinen beiden genannten Referenzmaxima, zu charakterisieren. Die intermuskuläre Koordination beschreibt den Anteil eines einzelnen Muskels an der Gesamtaktivität aller Muskeln zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Die eben beschriebenen Parameter wurden in allen vier Gesangsübungen für jeweils jeden einzelnen Muskel zur Berechnung verwendet.

5.3.2.3.1 Zeitunabhängige Betrachtungen

Wie bereits unter 5.3.2.1 beschrieben, wurden für jede einzelne Gesangsübung verschiedene Bereiche markiert. Diese waren für die zeitunabhängige Betrachtung im Einzelnen die fünf gesungenen Vokale beim Vokalausgleich, die drei Bereiche des Dreiklangs, der letzte Ton der Tonleiter sowie die drei Abschnitte beim Schwellton. Innerhalb dieser vorher festgelegten Bereichsmarker wurden die Muskelaktivitäten und Bandauslenkungen gemittelt.

Die berechneten Mittelwerte konnten im weiteren Verlauf als zeitunabhängige Werte angesehen werden. Die mittleren Muskelaktivitäten wurden relativ zu den oben aufgeführten Bezugsgrößen (Referenzmaximum und intermuskuläre Koordination) betrachtet.

5.3.2.3.2 Zeitabhängige Betrachtungen

Zu den zeitabhängigen Bereichen zählen zum einen die Einatemphase und zum anderen der jeweilige gesamte Übungsverlauf. Hierbei kommt es zu teilweise erheblichen intra- und interindividuellen Unterschieden bei den Versuchsteilnehmern. Zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit der Daten waren weitere Bearbeitungsschritte nötig. Um Abweichungen im Verlauf zu kompensieren, wurde eine zeitliche Normierung auf 100% mit einer Genauigkeit von 1% durchgeführt. Diese Normierung wurde für alle zeitabhängigen Betrachtungen durchgeführt. Für die Einatemphase wurde die mittlere Muskelaktivität, im unter 5.3.2.1 beschriebenen Bereich, aus allen fünf Wiederholungen in jeder Gesangsübung berechnet. Die geduldete zeitliche Abweichung für die einzubeziehenden Einatemphasen betrug 50%. Beim gesamten Übungsverlauf wurde ebenfalls die mittlere Muskelaktivität errechnet, jedoch hier bezogen auf die komplette Übung mit allen fünf Durchgängen.

Mithilfe dieser Bearbeitungsschritte war es möglich, die mittlere Muskelaktivität für jeden Probanden und jeden Muskel einzeln zu errechnen. Bei den hier beschriebenen zeitabhängigen Betrachtungen wurden ebenfalls die mittleren Muskelaktivitäten im Verhältnis zu den spezifischen Bezugsgrößen (Referenzmaximum, übungsspezifisches Maximum und intermuskuläre Koordination) gesehen.

5.4 STATISTIK

In der vorliegenden Arbeit bezieht sich die Fragestellung in erster Linie auf die Veränderungen der mittleren Muskelaktivitäten sowie der Bandauslenkungen im Verlauf des Projektes. Die Daten wurden zu Studienbeginn 2008 und nach vier Jahren professioneller Gesangsausbildung erhoben. Geschlechtsspezifische Unterschiede wurden bereits in einer vorherigen Arbeit (Jähkel 2014) mit dem Mann-Whitney-U-Test erfasst.

5.4.1 ZEITUNABHÄNGIGE BETRACHTUNGEN

Für die Auswertung der zeitunabhängigen Daten wurden die mittleren Aktivitätswerte der einzelnen Muskeln für die unter 5.3.2.3.1 angeführten, markierten Bereiche relativ zu den festgelegten Bezugsgrößen gesehen. Zur Überprüfung auf Schwankungen der Muskelaktivitäten und Bandauslenkungen innerhalb einer Gesangsübung sowie zwischen den Probanden wurde der Friedman-Test eingesetzt (Lohse et al. 1982, Sachs 1997). Er wird als ein nichtparametrisches Testverfahren zum Vergleich von drei oder mehr gepaarten Stichproben angewendet. Den durchschnittlichen Muskelaktivitäten und Bandauslenkungen werden jeweils Rangzahlen zugeordnet, welche eine Vergleichbarkeit der Daten trotz individueller Schwankungen der Amplitudenwerte gewährleisten. Signifikante Unterschiede der einzelnen Muskelaktivitäten in den festgelegten Bereichen wurden mit der kritischen Rangzahldifferenz auffindig gemacht. Die Fragestellung der gegenwärtigen Arbeit beschäftigt sich mit den Veränderungen der mittleren Aktivitäten der Muskulatur und der Bandauslenkungen im Verlauf der Studie. Verglichen wurden hierbei die bearbeiteten Daten zum Zeitpunkt des Studienbeginns und nach vier Jahren professioneller Gesangsausbildung. Zu diesem Zwecke wurde der Wilcoxon-Test eingesetzt, welcher als ein nichtparametrisches Testverfahren zum Vergleich zweier gepaarter Stichproben angewendet wird (Lohse et al. 1982, Sachs 1997).

5.4.2 ZEITABHÄNGIGE BETRACHTUNGEN

Die Auswertung der zeitabhängigen Daten bezog sich auf die gemittelten Muskelaktivitäten während der Einatmungsphase und des gesamten Übungsverlaufs, relativ betrachtet zu den Bezugsgrößen. Der auf 100% normierte Zeitverlauf wurde in 10%-Schritte unterteilt und für die Einatmungsphase sowie den Übungsverlauf ausgewertet. Die mittleren Muskelaktivitäten wurden jeweils innerhalb dieser 10%-Abschnitte erfasst. Im Ergebnis- sowie im Diskussionsteil werden der Übersichtlichkeit halber nur noch die Endpunkte der hier zu betrachtenden 10%-Abschnitte als Zeitpunkte benannt. Diese beinhalten immer die dem

genannten Zeitpunkt vorausgehenden Mittelwerte für jeweils 10% der gesamten zu berücksichtigenden Zeit. Für die Auswertung der Muskelaktivitäten während der Einatemphase und der gesamten Gesangsübung, bezogen auf jeden einzelnen Muskel spezifisch bei jedem Probanden, ist der Friedman-Test erneut zum Einsatz gekommen (Lohse et al. 1982, Sachs 1997). Die kritische Rangzahldifferenz konnte hier ebenfalls zur Aufdeckung von signifikanten Unterschieden der gemittelten Aktivitäten innerhalb der festgelegten normierten Bereiche verwendet werden. Auch bei den zeitabhängigen Betrachtungen waren die Aktivitätsverläufe von zentralem Interesse. Hierzu sollten die mittleren Muskelaktivitäten während der Einatemphase und dem gesamten Übungsverlauf zu Beginn der Studie und nach vier Jahren verglichen werden. Des Weiteren wurden in dieser Arbeit die Veränderungen der Übungslängen im Verlauf der Studie betrachtet. Zur Beantwortung der beiden zeitabhängigen Fragestellungen, die Veränderungen der Muskelaktivitäten sowie der Übungslängen, wurde der Wilcoxon-Test eingesetzt (Lohse et al. 1982, Sachs 1997).

6 ERGEBNISSE

6.1 ZEITUNABHÄNGIGE BETRACHTUNGEN

In den nächsten Abschnitten werden die zeitunabhängigen Betrachtungen analytisch für jede einzelne Gesangsübung der Folgeuntersuchung dargestellt sowie im Anschluss mit der Erstuntersuchung verglichen. Die unter 5.3.2.3 erwähnten Bezugsgrößen Referenzmaximum und intermuskuläre Koordination werden neben den nicht normierten Amplitudenwerten zur Analyse herangezogen. Im Falle von nachweisbaren signifikanten Differenzen werden diese mittels eines „Sternes“ in den entsprechenden Abbildungen gekennzeichnet. Die Übungslängen der zeitunabhängigen Daten werden in der letzten Rubrik dieses Abschnittes vergleichend dargestellt.

Beim SA der rechten Körperseite kam es aufgrund eines Elektrodendefektes während der Messung zu deutlichen Abweichungen der Messwerte, weswegen dieser Muskel in der Statistischen Betrachtung nicht mit berücksichtigt wird.

In den folgenden Abbildungen sind jeweils die Muskeln beider Körperseiten nebeneinander dargestellt. Links entspricht jeweils dem linken und rechts jeweils dem rechten Muskel.

6.1.1 VOKAL AUSGLEICH

6.1.1.1 Betrachtungen der Folgeuntersuchung

6.1.1.1.1 Mittlere Muskelaktivitäten

Das Aktivitätsniveau steigt, wie in Abbildung 3 zu sehen, bei fast allen Muskeln im Verlauf der Gesangsübung beim Singen der Vokale A bis U an. Am deutlichsten zu sehen ist dies beim OI beidseits. Sein Beanspruchungsniveau steigt während der Übung auf über das Doppelte seiner Ausgangsaktivität an. Auffällig sind hier, wie auch bei der gesamten Hals- und Nackenmuskulatur und speziell dem MF der tiefen Rückenmuskulatur, besonders große interindividuelle Schwankungsbreiten. Eine nur minimale Aktivitätszunahme mit geringen Schwankungsbreiten ist beim RA der Bauchmuskulatur sowie dem PM der Thoraxmuskulatur zu verzeichnen. Beim SCM der Hals- und Nackenmuskulatur zeigt sich ein etwas anderer Verlauf der Muskelaktivitäten über die Übungsbereiche auf beiden Seiten. Nach einer besonders großen Muskelaktivität während des ersten Vokalbereiches fällt das Aktivitätsniveau zu Beginn des zweiten Vokalbereiches deutlich ab. Im Verlauf der Gesangsübung steigt dann die mittlere Muskelaktivität auch hier wieder, wie bei fast allen Muskeln, erwartungsgemäß kontinuierlich an. Der MF der tiefen Rückenmuskulatur zeigt Differenzen bezogen auf beide Körperseiten. Der Linke MF verhält sich ähnlich dem bereits beschriebenen SCM, vom ersten zum zweiten Vokalbereich kommt es zu einem Abfall des Aktivitätsniveaus. Im Bereich der restlichen Vokalbereiche finden sich keine deutlichen Aktivitätszunahmen, bis auf eine leicht erhöhte Aktivität während des vierten Vokalbereiches. Der Rechte MF zeigt bis auf eine leicht abfallende Aktivität beim vierten Vokalbereich keine nennenswerte Aktivitätszunahme während der Gesangsübung.

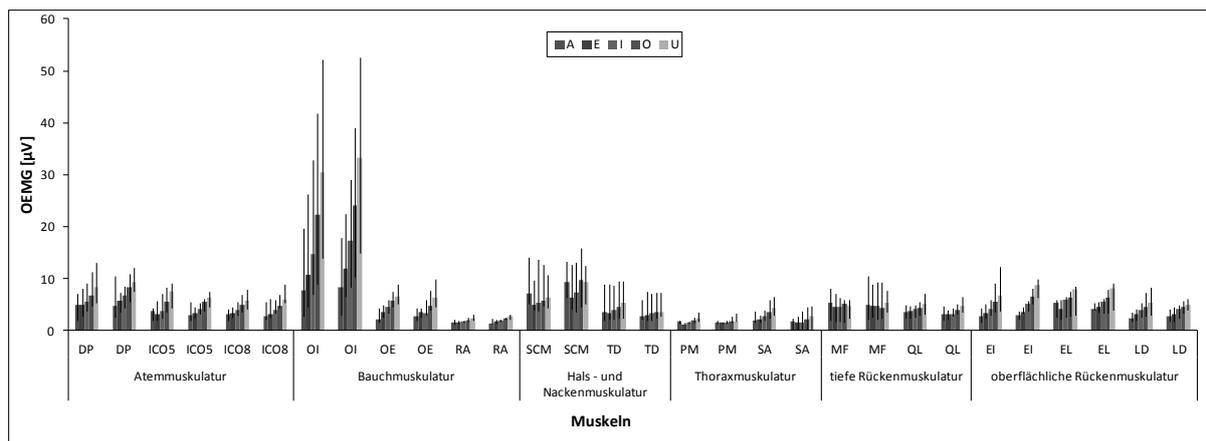


Abbildung 3 Vokalausgleich: Mittlere Muskelaktivität. Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel über die fünf Vokalbereiche A E I O U für alle Probanden.

6.1.1.1.2 Muskelaktivität bezogen auf das Referenzmaximum

Betrachtet man die einzelnen Amplitudenwerte im Bezug zum vorher ermittelten Referenzmaximum der einzelnen Probanden fällt auf, dass sich die Muskeln ihrem gesangsunabhängigen Maximum deutlich annähern. Dies ist insbesondere zu sehen bei der Hals- und Nackenmuskulatur (von 36% der Referenz beim TD rechts bis zu 97% des Referenzmaximums beim TD links) sowie dem PM (bis zu 50% der Referenz links), der Thoraxmuskulatur und der gemessenen tiefen Rückenmuskulatur (MF, QL). Einige Probanden erreichen sogar höhere Aktivitätswerte als in der Referenzmessung. Besonders deutlich wird dies bei der Hals- und Nackenmuskulatur (SCM rechts und TD links). Bemerkenswert ist, wie in Abbildung 4 zu sehen, dass es, bezogen auf die Referenz, scheinbar zwei Gruppen von Muskeln mit jeweils dem gleichen Aktivitätsverlauf über die fünf Bereiche des Vokalbereichs hinweg gibt. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8), die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA), der SA der Thoraxmuskulatur sowie der QL der tiefen und der EI der oberflächlichen Rückenmuskulatur zeigen ein Aktivitätsniveau von nur ca. 8% (ICO5 links) des Referenzmaximums zu Beginn der Übung gleichmäßig aufsteigend bis ca. 41% (OE links) der Referenz während des letzten Vokalbereiches. Die Hals- und Nackenmuskulatur (SCM, TD), der PM der Thoraxmuskulatur, sowie der MF der tiefen- und Teile der oberflächlichen Rückenmuskulatur (EL, LD) zeigen schon beim ersten Vokalbereich ein sehr hohes Aktivitätsniveau von 20% (QL rechts) bis 97% (TD links) des Referenzmaximums. Hier bleibt die mittlere Muskelaktivität im Bezug zur Muskelaktivität der Referenzmessung im Verlauf der Gesangsübung weitestgehend auf einem konstanten bis nur leicht steigenden Niveau. Zusammenfassend kann man also feststellen, dass sich die

Aktivität der Atem- und Bauchmuskulatur, bezogen auf die Referenz mit einem niedrigem Niveau beginnend, im Verlauf der Gesangsübung auf ein höheres Niveau steigend verhält. Die Hals- und Nackenmuskulatur, die Thoraxmuskulatur sowie die tiefe- und oberflächliche Rückenmuskulatur zeigen, bis auf wenige Ausnahmen, zu Beginn der Gesangsübung ein vergleichsweise hohes Aktivitätsniveau in Bezug auf die Referenz, welches sich im Übungsverlauf nur leicht erhöht.

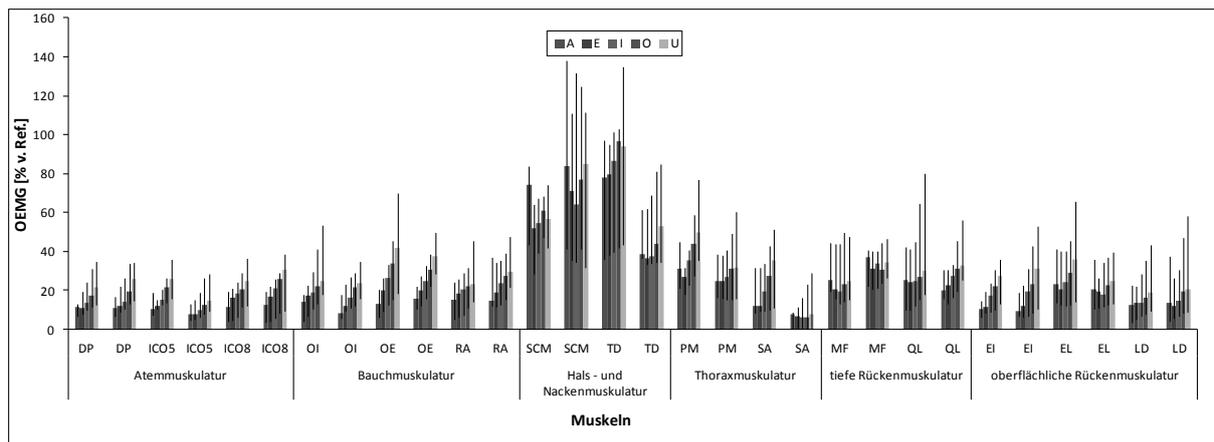


Abbildung 4 Vokalausgleich: Muskelaktivität bezogen auf das Referenzmaximum. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivitäten jedes einzelnen Muskels über die fünf Vokalbereiche bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.1.1.3 Intermuskuläre Koordination

Betrachtet man bei der intermuskulären Koordination den Anteil der einzelnen Muskeln an der gesamten Muskelaktivität, so fällt zunächst auf, dass der OI der Bauchmuskulatur, wie bereits unter 6.1.1.1.1 ersichtlich, mit bis zu 12% im letzten Vokalbereich den größten Anteil der Gesamtaktivität ausmacht. Auch hier findet sich, wie schon bei der Darstellung der mittleren Muskelaktivitäten, ein deutlicher interindividueller Schwankungsbereich. Eine Anteilszunahme im Verlauf der Gesangsübung kann ebenfalls sehr deutlich dargestellt werden. Die übrigen Muskeln zeigen über die fünf Vokalbereiche hinweg einen weitestgehend konstanten Aktivitätsanteil. Eine auffällige Ausnahme stellt hier der SCM dar, dessen Aktivitätsanteil über die Vokalbereiche hin abnimmt. Dieses Phänomen hat sich unter 6.1.1.1.1 bereits abgezeichnet. Der OE und der RA haben einen vergleichsweise kleinen Aktivitätsanteil bei der Bauchmuskulatur. Die Hals- und Nackenmuskulatur zeigt eine deutliche Dominanz des SCM mit bis zu 7,5% (rechts) gegenüber dem TD mit bis zu 3,5% (links) der Gesamtaktivität. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) ist mit 2% (ICO5 links) bis 4% (DP rechts) der Gesamtaktivität sehr gleichmäßig vertreten. Die Thoraxmuskulatur

(PM, SA) ist mit unter 1% (PM links und rechts) bis zu 2% (SA links) der Gesamtaktivität am geringsten vertreten. Die tiefe (MF, QL)- und oberflächliche (EI, EL, LD) Rückenmuskulatur ist mit 1,5% (LD links) bis fast 5% (MF links und rechts) der Gesamtaktivität, wie die Atemmuskulatur, sehr gleichmäßig an der Gesangsübung beteiligt.

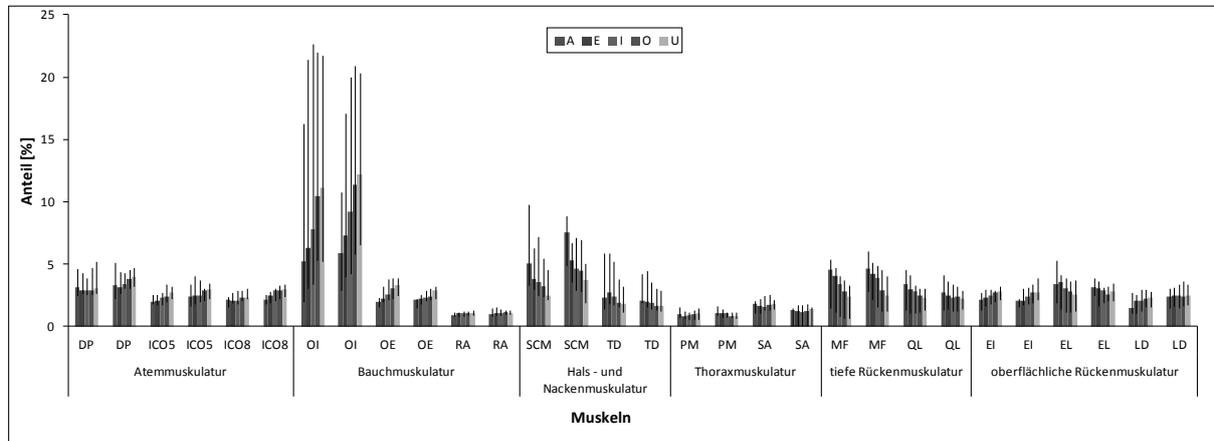


Abbildung 5 Vokalausgleich: Intermuskuläre Koordination. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivität jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur für die fünf Bereiche des Vokalausgleichs für alle Probanden mit oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.1.2 Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet

6.1.1.2.1 Mittlere Muskelaktivität

Wie Abbildung 6 verdeutlicht, verändert sich die mittlere Muskelaktivität im Vergleich zur Erstuntersuchung beim Singen der fünf Vokalbereiche nur in geringem Maße. Am deutlichsten zu sehen ist dies beim TD der Hals- und Nackenmuskulatur beidseits, wobei Signifikanzen nur für die Vokalbereiche A bis O der rechten Körperseite nachgewiesen werden können. Ebenfalls auffällig verhält sich der OI der Bauchmuskulatur. Hier zeigen sich im Studienverlauf Unterschiede zwischen der rechten und der linken Körperseite. Auf der linken Körperseite nimmt die Aktivität eher ab, während sie auf der gegenüberliegenden Seite eher zunimmt. Aufgrund des großen Streubereiches darf diese Veränderung jedoch nicht als systematisch interpretiert werden. Eine Tendenz zur Aktivitätsabnahme findet man beim MF der tiefen Rückenmuskulatur beidseits. Die übrigen beteiligten Muskeln zeigen nur geringe Tendenzen in Richtung Zunahme oder Abnahme der Muskelaktivität. Generell bleibt vereinfacht festzuhalten, dass jene Muskeln, welche eine Veränderung vorweisen, eher eine Tendenz zu Aktivitätsabnahme haben.

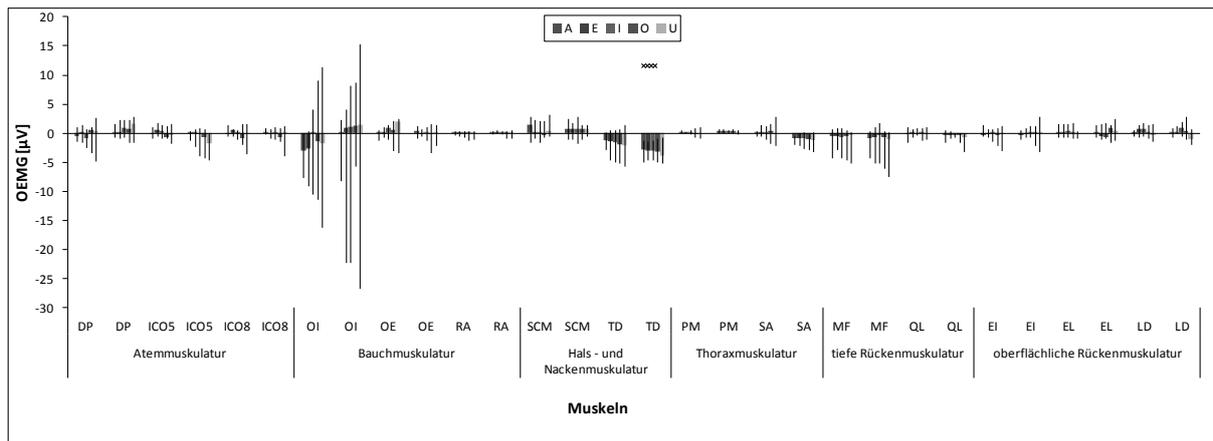


Abbildung 6 Vokalausgleich: Mittlere Muskelaktivität im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der mittleren Amplitudenwerte der Erst- und Folgeuntersuchung mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel über die fünf Vokalbereiche A E I O U für alle Probanden.

6.1.1.2 Muskelaktivität bezogen auf das Referenzmaximum

Die Abbildung 7 stellt die Veränderungen der mittleren Muskelaktivitäten bezogen auf die im Vorfeld durchgeführte Referenzmessung im Studienverlauf dar. Besonders auffällig zeigt sich der TD (Aktivitätsabnahme um bis zu 37% im dritten Vokalbereich rechts) der Hals- und Nackenmuskulatur beidseits. Auf der rechten Körperseite sind die Veränderungen bei allen Vokalbereichen als signifikant nachweisbar. Im Gegensatz dazu kommt es beim SCM der gleichen Muskelgruppe zu einer leichten relativen Aktivitätszunahme (ca. 7% auf der rechten Körperseite), jedoch sind auch hier wieder sehr große Schwankungsbreiten zu beobachten. Somit ist die Veränderung nicht als systematisch zu werten. Eine ähnliche, jedoch nicht so stark ausgeprägte, relative Aktivitätsabnahme wie beim TD beidseits zeigt auch der MF der tiefen Rückenmuskulatur beidseits (bis zu 13% relative Aktivitätsabnahme rechts). Eher zu einer Aktivitätszunahme im Bezug zur Referenzmessung kommt es bei der Thoraxmuskulatur. Besonders auffällig ist hier der PM auf der rechten Körperseite mit signifikanten Aktivitätszunahmen bei den ersten drei Vokalbereichen. Der SA auf der rechten Körperseite zeigt eher abnehmende Veränderungen, was jedoch messtechnisch bedingt sein kann und aus diesem Grund nicht berücksichtigt wird. Beim LD der oberflächlichen Rückenmuskulatur kommt es, bezogen auf die Referenzmessung, zu einer leichten Aktivitätszunahme (bis ca. 4% beim vierten Vokalbereich rechts). Die übrigen Muskeln dieser Gruppe stellen sich nur wenig verändert dar. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) und die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) zeigen bis auf wenige Ausnahmen geringe Tendenzen nach oben oder unten, jedoch keine durchgehend systematische Veränderung.

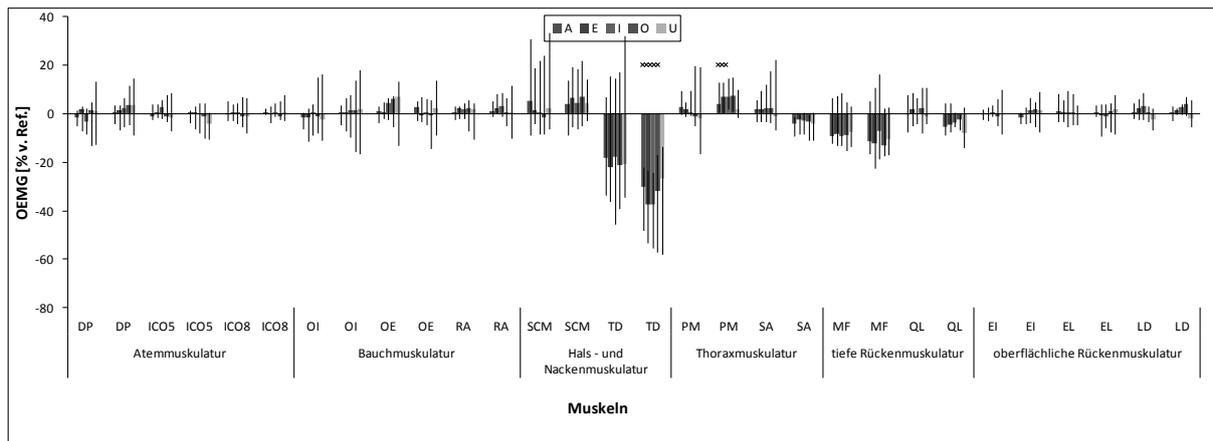


Abbildung 7 Vokalausgleich: Muskelaktivität bezogen auf das Referenzmaximum im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels über die fünf Vokalbereiche bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartil.

6.1.1.2.3 Intermuskuläre Koordination

Die Abbildung 8 verdeutlicht die Veränderungen der Anteile der einzelnen Muskelaktivitäten an der Gesamtaktivität zwischen der Erst- und der Folgeuntersuchung. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur sieht man, wie schon unter 6.1.1.2.1 und 6.1.1.2.2 dargestellt, eine gegenläufige Entwicklung innerhalb einer Muskelgruppe. Der Anteil des TD nimmt beidseits ab (um bis zu 2% auf der rechten Körperseite) wohingegen der Anteil des SCM beidseits zunimmt (um bis zu 1,5% rechts). Die Veränderungen des TD rechts stellen sich über alle Vokalbereiche als signifikant dar. Bei der Thoraxmuskulatur kommt es mit Ausnahme des SA rechts, wahrscheinlich auf den systematischen Fehler zurückzuführen, zu einer geringen Zunahme der anteiligen Aktivität der einzelnen Muskeln. Eine Signifikanz zeigt sich hier lediglich beim dritten Vokalbereich des PM auf der rechten Körperseite. Die tiefe Rückenmuskulatur (MF, QL) erreicht leichte anteilige Aktivitätsabnahmen (jedoch um deutlich weniger als 1%). Die oberflächliche Rückenmuskulatur (EI, EL, LD) zeigt hingegen eine gegenläufige Veränderung und nimmt anteilig in der Aktivität, bezogen auf die Gesamtaktivität, leicht zu (um weniger als 1%). Bei der Bauchmuskulatur fällt eine Aktivitätsveränderung des OI beidseits, mit einer Tendenz zur Zunahme mit weiter voranschreitender Übungszeit, auf (um bis zu 1,5% beim zweiten Vokalbereich auf der rechten Körperseite). Eine Ausnahme bilden bei diesem Muskel die ersten beiden Vokalbereiche auf der linken Körperseite, welche eine Abnahme des Aktivitätsanteils zeigen. Die restlichen Muskeln der Bauchmuskulatur (QE, RA) sowie die gesamte Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) stellen sich nur wenig verändert dar.

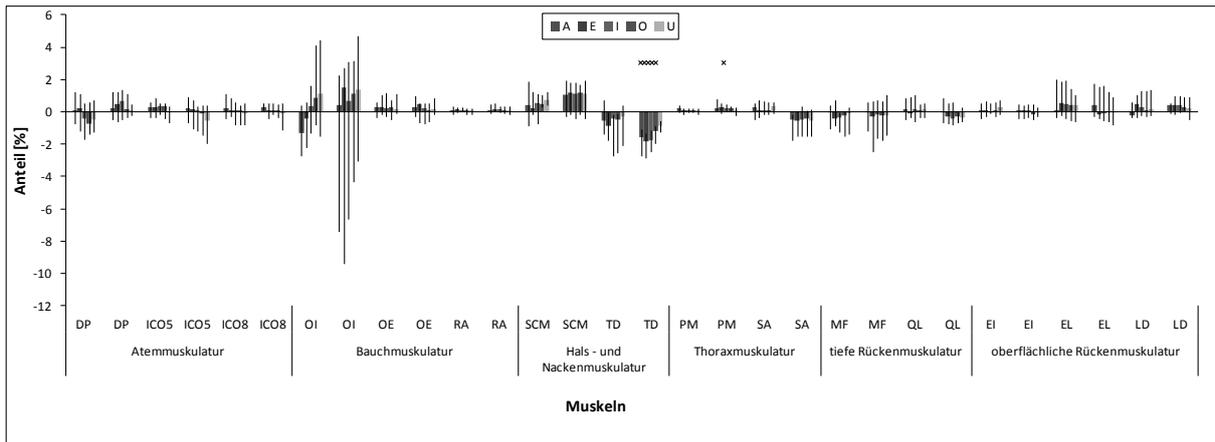


Abbildung 8 Vokalausgleich: Intermuskuläre Koordination im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur für die fünf Bereiche des Vokalausgleichs für alle Probanden mit oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.2 DREIKLANG

6.1.2.1 Betrachtungen der Folgeuntersuchungen

6.1.2.1.1 Mittlere Muskelaktivitäten

Die in Abbildung 9 dargestellten mittleren Muskelaktivitäten der drei Bereiche des Dreiklangs verhalten sich ähnlich den unter 6.1.1.1.1 beschriebenen Muskelaktivitäten für die fünf Bereiche des Vokalausgleichs. Das Aktivitätsniveau steigt bei fast allen Muskeln im Übungsverlauf vom Anfang über die Quinte hinweg bis zum Ende hin an. Am deutlichsten zu sehen ist dies wiederum beim OI der Bauchmuskulatur. Sein Aktivitätsniveau steigt über die drei Bereiche hinweg auf über das Doppelte seiner Ausgangsaktivität an. Auch hier zeigen sich die deutlichen interindividuellen Schwankungsbreiten aller beteiligten Muskeln. Eine Ausnahme im Hinblick auf den Aktivitätsverlauf, wie schon beim Vokalausgleich aufgefallen, stellt der SCM der Hals- und Nackenmuskulatur beidseits dar. Hier kommt es zu einer Abnahme der Aktivität vom ersten zum letzten Übungsbereich. Lediglich im letzten Bereich des Dreiklangs kommt es auf der rechten Körperseite zu einem Anstieg der mittleren Muskelaktivität. Der TD der rechten Seite zeigt wie auch der SCM einen Aktivitätsabfall zwischen den ersten beiden Abschnitten des Dreiklangs, der TD der linken Körperseite stellt sich hingegen in seinem Aktivitätsverlauf während der Gesangsübung ansteigend dar.

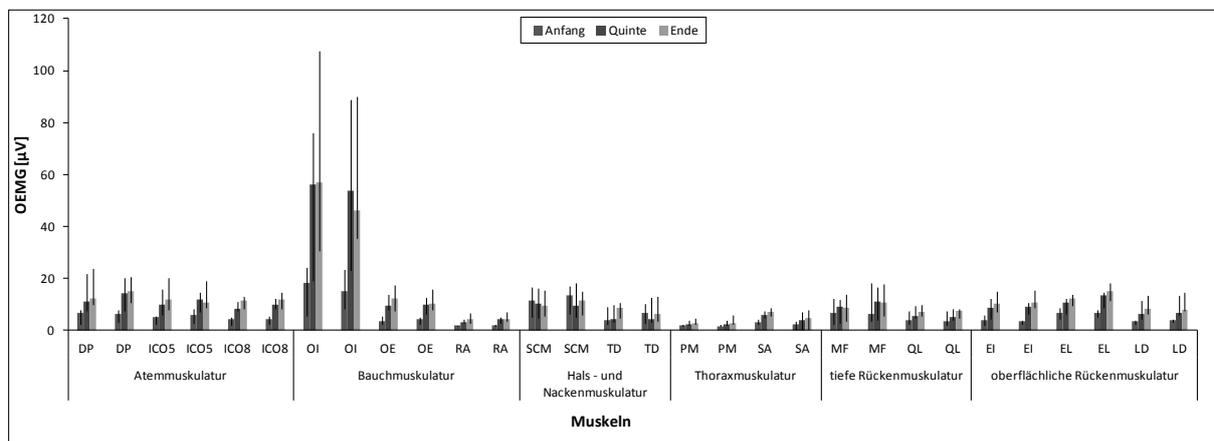


Abbildung 9 Dreiklang: Mittlere Muskelaktivitäten. Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel über die drei Bereiche des Dreiklangs für alle Probanden.

6.1.2.1.2 Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum

Wird die Muskelaktivität der einzelnen Muskeln in Abbildung 10 auch hier im Bezug zum vorher ermittelten Referenzmaximum gesehen, so zeigt sich für alle Muskeln ein ähnliches

Bild wie schon unter 6.1.1.1.2 für die fünf Bereiche des Vokalausgleichs. Die Muskeln nähern sich im Übungsverlauf mit einem steigenden Aktivitätsniveau ihrem Referenzmaximum an. Einzige Ausnahme ist auch hier wieder der SCM beidseits, welcher eine während der Übung abnehmende Muskelaktivität im Bezug zur Referenz aufweist. Einige Probanden zeigen erneut eine Muskelaktivität, welche teilweise deutlich über ihrem Referenzmaximum liegt. Die Hals- und Nackenmuskulatur (SCM, TD) erreicht mit bis zu 97% des Referenzmaximums (im letzten Übungsbereich beim TD der rechten Körperhälfte) das größte Aktivitätsniveau der beteiligten Muskeln. Die Thoraxmuskulatur (PM, SA) stellt sich mit Aktivitäten von 15% (SA links im ersten Übungsbereich) bis zu 74% der Referenz (PM links im letzten Übungsbereich) dar. Ebenfalls eine sehr deutliche Annäherung an die Referenz ist bei der tiefen Rückenmuskulatur (MF, QL) zu sehen. Hier kommt es zu Aktivitäten von 22% (im ersten Übungsbereich QL rechts) bis zu 65% des Referenzmaximums (MF rechts im letzten Übungsbereich). Die oberflächliche Rückenmuskulatur (EI, EL, LD) ist mit Aktivitäten von 10% (EI rechts im ersten Übungsbereich) bis 61% der Referenz (EL links im letzten Übungsbereich) vertreten. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) sowie die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) sind mit einem Beanspruchungsniveau von 10% (DP links im ersten Übungsbereich) bis zu maximal 65% des Referenzmaximums (OE rechts im letzten Übungsbereich) beteiligt.

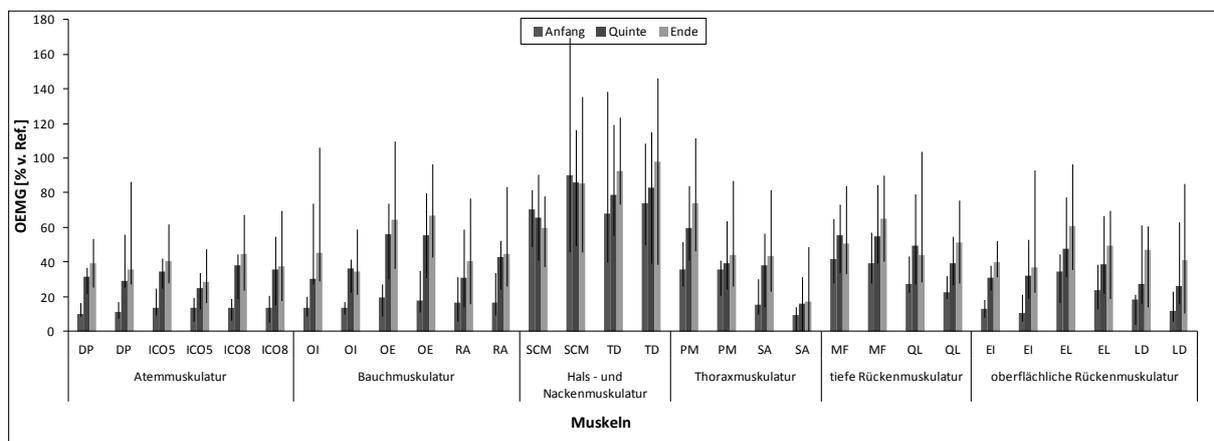


Abbildung 10 Dreiklang: Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivitäten jedes einzelnen Muskels über die drei Bereiche des Dreiklangs bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.2.1.3 Intermuskuläre Koordination

Abbildung 11 zeigt, im Hinblick auf den prozentualen Anteil der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität der beteiligten Muskulatur, ein dem Vokalausgleich sehr ähnliches Bild. Der

OI der Bauchmuskulatur hat mit bis zu 15% der Gesamtaktivität (OI rechts zweiter und dritter Übungsbereich) den mit Abstand größten Anteil der beteiligten Muskeln. Eine Anteilszunahme im Verlauf der Gesangsübung kann ebenfalls erneut sehr deutlich abgebildet werden. Die übrigen Muskeln zeigen über die drei Bereiche des Dreiklangs hinweg einen weitestgehend konstanten Aktivitätsanteil. Auffällige Ausnahmen sind die gesamte Hals- und Nackenmuskulatur (SCM, TD) sowie die tiefe Rückenmuskulatur (MF, QL), bei denen es im Verlauf der Gesangsübung eher zu einer Anteilsabnahme kommt. Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) hat mit etwas mehr als 1% (LD links im ersten Übungsbereich) bis zu 5% (MF links im ersten Übungsbereich) Anteil an der Gesamtaktivität der beteiligten Muskulatur. Die Thoraxmuskulatur kommt mit knapp unter 1% (PM links in allen Übungsbereichen) bis maximal 2% (SA links im ersten Übungsbereich) nur zu einem sehr geringen Anteil. Die Atemmuskulatur ist mit einem Anteil von fast 2% (ICO8 beidseits im ersten Übungsbereich) bis höchstens 4% (DP rechts im letzten Übungsbereich) über alle zugehörigen Muskeln hinweg sehr gleichmäßig vertreten.

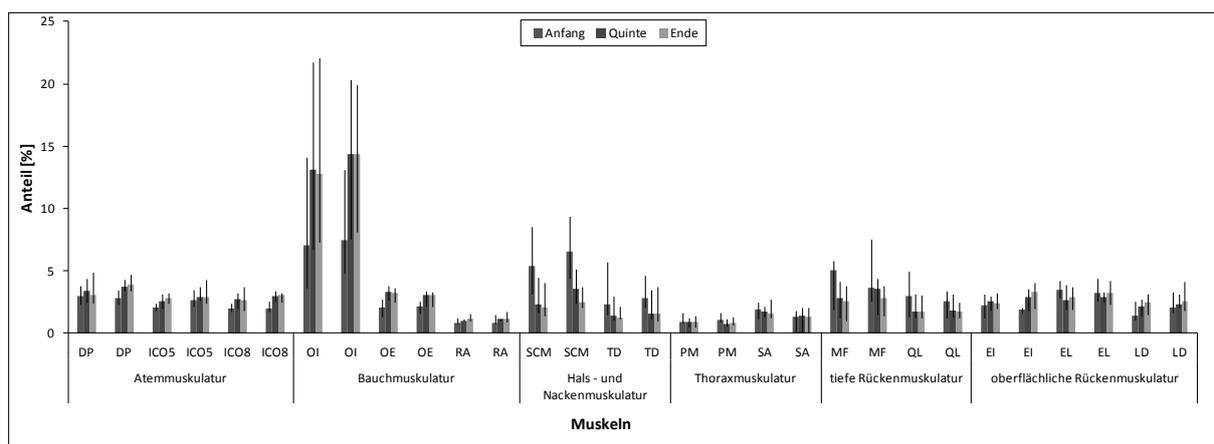


Abbildung 11 Dreiklang: Intermuskuläre Koordination. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivität jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur für die drei Bereiche des Dreiklangs für alle Probanden mit oberem und unterem Quartil.

6.1.2.2 Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet

6.1.2.2.1 Mittlere Muskelaktivitäten

Abbildung 12 verdeutlicht, dass sich die mittlere Muskelaktivität im Vergleich zur Erstuntersuchung während des Studienverlaufes beim Singen der drei Bereiche des Dreiklangs nur wenig verändert. Wie schon beim Vokalausgleich unter 6.1.1.2.1 gezeigt werden konnte, kommt es bei der Hals- und Nackenmuskulatur zu einer gegenläufigen Entwicklung. Während der SCM beidseits in seiner Aktivität zunimmt, nimmt das Aktivitätsniveau beim TD beidseits ab. Alle drei Übungsbereiche der linken Körperseite sowie der zweite und dritte Übungsbereich der rechten Seite sind beim SCM als signifikant verschieden nachweisbar. Beim OI der Bauchmuskulatur kommt es besonders auf der rechten Körperseite zu einer Aktivitätsabnahme, während die linke Seite nur wenige Tendenzen nach oben oder unten zeigt. Der interindividuelle Streubereich ist hier jedoch wieder sehr stark ausgeprägt, eine systematische Veränderung im Studienverlauf somit fraglich. Die übrigen Muskeln stellen sich im Vergleich zur Erstuntersuchung nur sehr gering verändert dar.

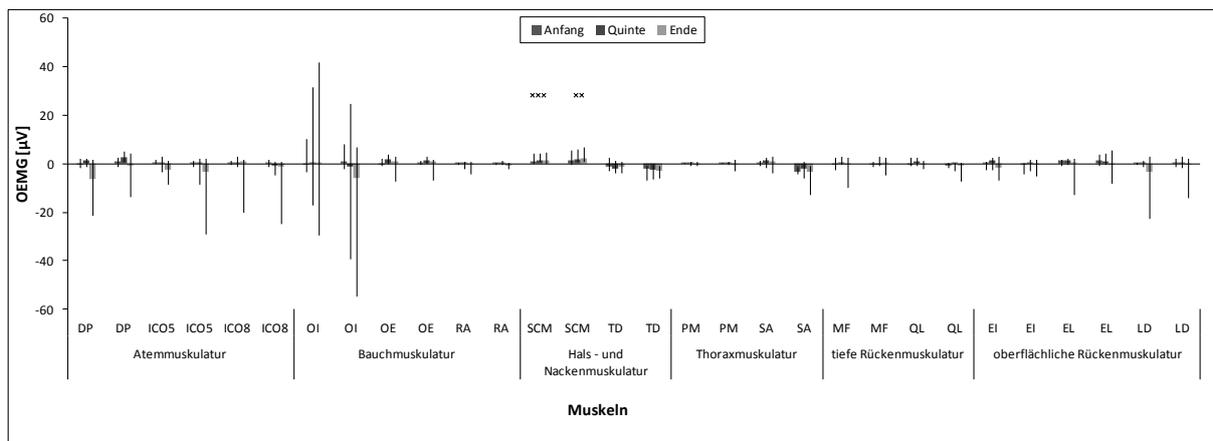


Abbildung 12 Dreiklang: Mittlere Muskelaktivitäten im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der mittleren Amplitudenwerte der Erst- und Folgeuntersuchung mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel über die drei Bereiche des Dreiklangs für alle Probanden.

6.1.2.2.2 Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum

In Abbildung 13 sind die Veränderungen der mittleren Muskelaktivitäten bezogen auf die im Vorfeld durchgeführte Referenzmessung verglichen mit der Erstuntersuchung dargestellt. Besonders auffällig stellt sich, wie schon beim Vokalausgleich unter 6.1.1.2.2 herausgearbeitet, die Hals- und Nackenmuskulatur dar. Hier kommt es zu einer Aktivitätsabnahme im Vergleich zur Referenz um bis zu 32% (TD rechts im letzten Übungsbereich) bezogen auf die Erstuntersuchung. Der SCM zeigt auf beiden Körperseiten

eine Zunahme der relativen Aktivität (rechts um bis zu 23% im letzten Bereich). Signifikanzen können bei den Veränderungen des SCM auf beiden Seiten über alle drei Bereiche des Dreiklangs nachgewiesen werden. Bei der Thoraxmuskulatur (PM, SA) kommt es ebenfalls zu einer relativen Aktivitätszunahme um bis zu 19% (SA links im letzten Übungsbereich). Der SA rechts zeigt eine Abnahme der Muskelaktivität bezogen auf die Referenzmessung, welche jedoch am ehesten wieder auf die bereits oben erwähnte systematische Ungenauigkeit zurückzuführen ist. Eine signifikante Veränderung ist für den PM im zweiten Übungsbereich auf der rechten Körperseite nachweisbar. Bei der Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) findet sich eine relative Aktivitätszunahme in den ersten beiden Übungsbereichen und interessanterweise eine deutliche Aktivitätsabnahme um bis zu 17% (DP links) während des letzten Übungsbereiches. Einzige Ausnahme ist hier der ICO8 auf der linken Körperseite, bei dem es auch im letzten Bereich des Dreiklangs zu einer relativen Zunahme der Muskelaktivität kommt. Die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) zeigt die größten relativen Aktivitätswerte im zweiten Übungsbereich mit bis zu 11% (OE rechts). Eine Ausnahme stellt der OI auf der rechten Körperseite dar, dessen relative Muskelaktivität im Übungsverlauf abnimmt. Fast die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) zeigt ähnliche Verläufe wie schon die Atemmuskulatur. Es stellt sich eine relative Aktivitätszunahme dar, während es bei einem Großteil der beteiligten Muskeln (MF links, QL beidseits, EI beidseits, EL rechts und LD beidseits) zu einer relativen Abnahme des Aktivitätsniveaus im letzten der drei Übungsbereiche kommt.

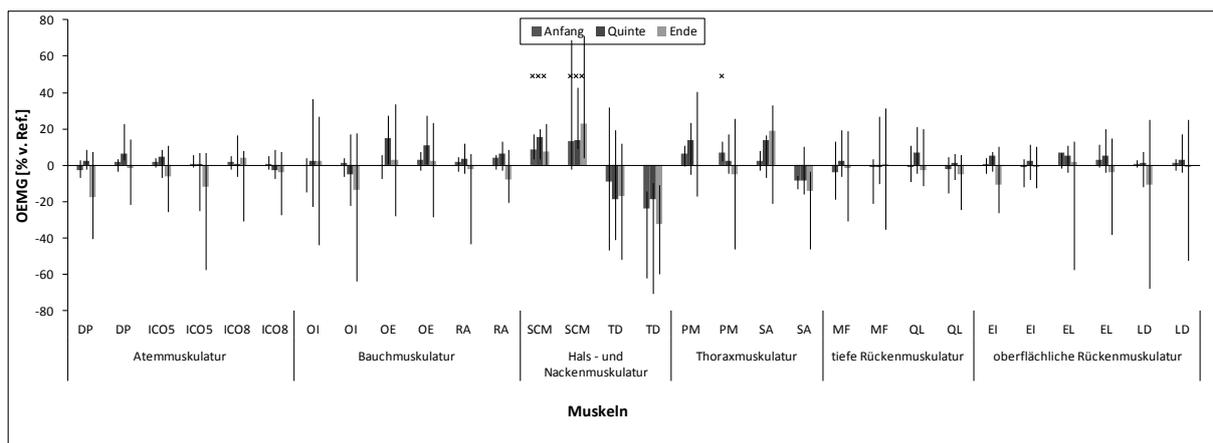


Abbildung 13 Dreiklang: Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels über die drei Bereiche des Dreiklangs bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.2.2.3 Intermuskuläre Koordination

Die Abbildung 14 verdeutlicht die Veränderungen der Anteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität der Muskulatur verglichen mit der Erstuntersuchung. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur zeichnet sich wieder die bereits erwähnte gegenläufige Entwicklung ab. Der SCM nimmt anteilmäßig in seiner Aktivität zu (um bis zu 2% rechts), wobei die rechte Körperseite die linke dabei deutlich übertrifft. Der TD nimmt in seinem Anteil auf der rechten Seite um bis zu 2% (im ersten Übungsbereich) ab, wohingegen auf der linken Körperseite eine Anteilszunahme besonders im ersten Bereich des Dreiklangs um bis zu 1% auffällt. Der dritte Übungsbereich des SCM auf der rechten Körperseite sowie der letzte Bereich des Dreiklangs beim TD auf der rechten Seite zeigen signifikante Veränderungen. Sehr geringe Anteilszunahmen finden sich bei der Bauchmuskulatur (PM, SA), wobei die Veränderungen im ersten Bereich des Dreiklangs beim PM auf der rechten Seite als signifikant anzusehen sind. Der SA auf der rechten Körperseite stellt sich auffällig anders dar. Hier kommt es zu einer, im Vergleich zu den restlichen Muskeln dieser Gruppe, deutlichen Anteilsabnahme. Zurückzuführen ist dies jedoch wahrscheinlich wieder auf die bereits erwähnten systematischen Fehler. Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) zeigt leichte Anteilszunahmen um bis zu 1% (MF recht im letzten Übungsbereich). Ausnahmen sind die ersten Bereiche des Dreiklangs bei MF, QL und EI auf beiden Körperseiten, welche eine geringe Abnahme der anteiligen Muskelaktivität vorweisen. Eine signifikante Veränderung liegt im letzten Bereich des Dreiklanges beim MF auf der rechten Körperseite vor. Bei der Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) zeigt der OI auf beiden Seiten mit einer Anteilszunahme von bis zu 2% im zweiten Übungsbereich auf der linken Seite die stärkste Veränderung. Nur sehr wenige Tendenzen nach oben oder unten fallen bei der Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) auf. Einzig die ersten beiden Bereiche des Dreiklangs beim DP auf der linken Seite und der letzte Bereich beim ICO5 auf der rechten Seite stellen sich durch eine etwas stärkere negative Tendenz dar.

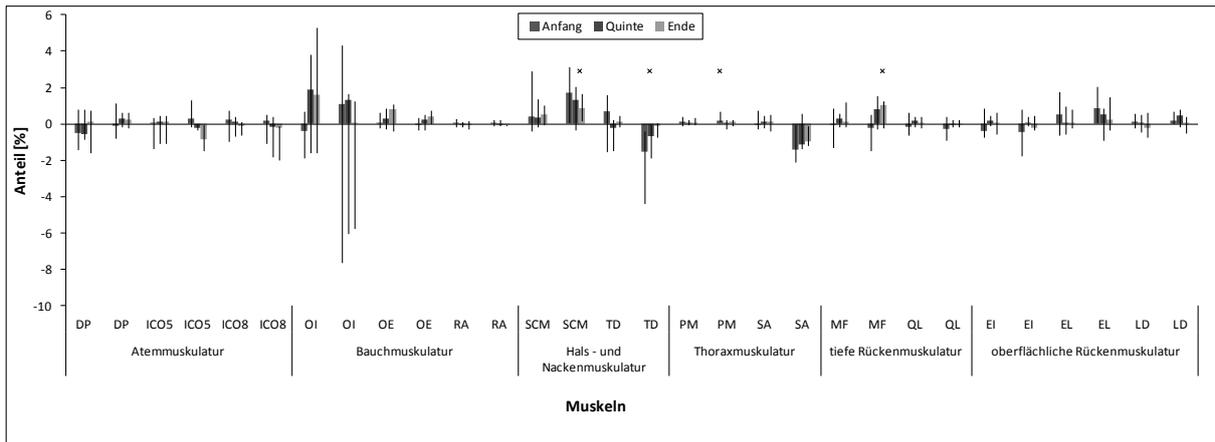


Abbildung 14 Dreiklang: Intermuskuläre Koordination im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur für die drei Bereiche des Dreiklangs für alle Probanden mit oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.3 TONLEITER

6.1.3.1 Betrachtungen der Folgeuntersuchungen

6.1.3.1.1 Mittlere Muskelaktivitäten

Die in Abbildung 15 dargestellten mittleren Muskelaktivitäten der Tonleiter zeigen ein ähnliches Bild wie schon zuvor beim Vokalausgleich unter 6.1.1.1.1 und auch beim Dreiklang unter 6.1.2.1.1. Betrachtet wird bei dieser Gesangsübung jeweils der letzte ausgehaltene Ton der Tonleiter. Eine ausgeprägte Zunahme der mittleren Amplitudenwerte findet sich beim OI der Bauchmuskulatur auf beiden Körperseiten. Auch hier sind die interindividuellen Schwankungsbreiten wieder sehr stark ausgeprägt. Die Hals- und Nackenmuskulatur (SCM, TD) zeigt ebenfalls eine im Vergleich zu den übrigen Muskelgruppen relativ große Aktivität mit einer leichten Dominanz der rechten Körperseite. Die niedrigste mittlere Aktivität im Endtonbereich der Tonleiter zeigt die Thoraxmuskulatur (PM, SA). Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) sowie die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) stellen sich alle auf einem sehr ähnlichen Aktivitätsniveau dar.

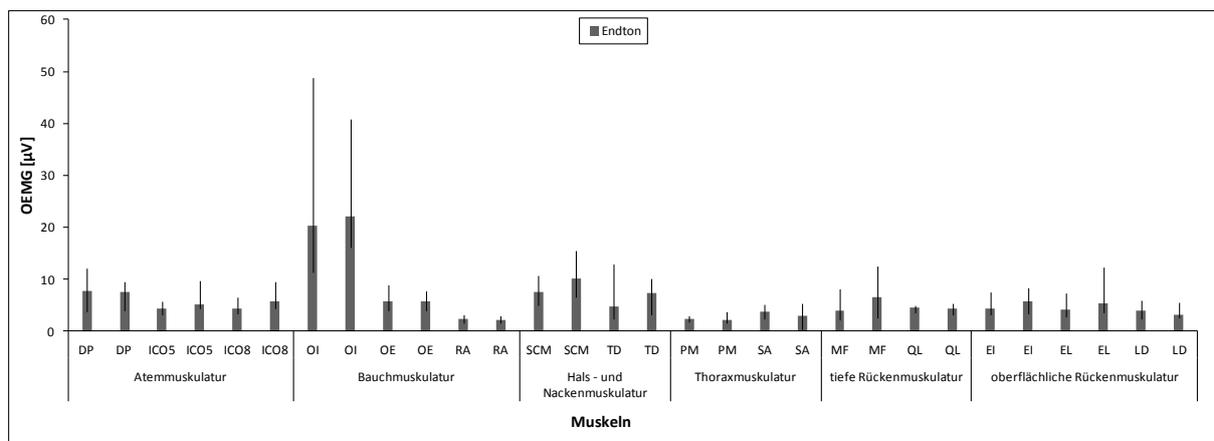


Abbildung 15 Tonleiter: Mittlere Muskelaktivitäten. Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel im Endtonbereich der Tonleiter für alle Probanden.

6.1.3.1.2 Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum

In Abbildung 16 zeigt sich bei der Betrachtung der Muskelaktivitäten bezogen auf die vorher durchgeführte Referenzmessung ein ähnliches Bild wie bereits beschriebenen Gesangsübungen. Die Hals- und Nackenmuskulatur erreicht hier erneut das höchste Beanspruchungsniveau mit den größten Schwankungsbreiten. Beim SCM auf der rechten Körperseite sind dies Werte von bis zu 101% der Referenz und beim TD der linken Seite von

bis zu 64% des Referenzmaximums. Einige Probanden erreichen auch bei dieser Übung wieder deutlich höhere Werte als bei ihrer Referenzmessung. Die Thoraxmuskulatur erzielt mit bis zu 45% (PM links) ebenfalls ein sehr hohes Niveau bezogen auf die Referenzmessung. Das Aktivitätsniveau des SA der rechten Körperseite bildet sich sehr niedrig ab, wird aber aufgrund der bereits beschriebenen systematischen Fehler nicht weiter mit berücksichtigt. Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) zeigt ein sehr gleichmäßiges Beanspruchungsniveau von bis zu 37% der Referenz (QL links). Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) sowie die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) erreichen ein Niveau von mindestens 15% (ICO5 rechts) bis höchstens 32% (OE rechts) des Referenzmaximums.

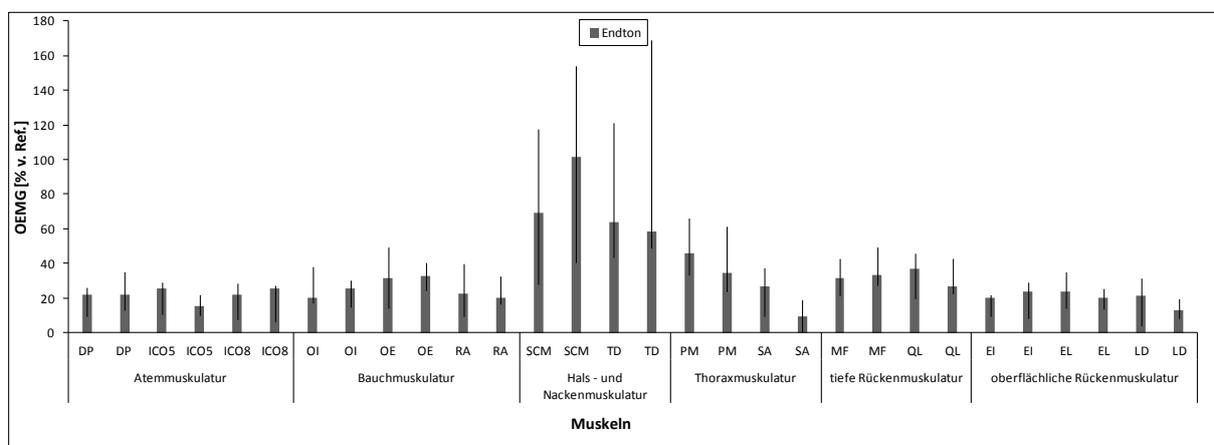


Abbildung 16 Tonleiter: Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivitäten jedes einzelnen Muskels im Endtonbereich der Tonleiter bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.3.1.3 Intermuskuläre Koordination

Die Verteilung der einzelnen Muskelaktivitäten an der Gesamtaktivität der Muskulatur im Endtonbereich der Tonleiter stellt sich, wie in Abbildung 17 erkennbar, den vorherig beschriebenen Gesangsübungen gegenüber sehr ähnlich dar. Auch hier erreicht wieder der OI der Bauchmuskulatur mit Abstand den größten Anteil mit bis zu 11% (OI links) der Gesamtaktivität. Ebenfalls einen relativ großen Anteil erzielt mit knapp 5% (SCM recht) der SCM der Hals- und Nackenmuskulatur. Anteilig am geringsten vertreten ist die Thoraxmuskulatur mit bis zu höchstens 2% (SA links). Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) sowie die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) verhalten sich sehr gleichmäßig mit Werten von etwas mehr als 1,5% (LD rechts) bis maximal 3,5% (MF rechts) der Muskelaktivität bezogen auf die Gesamtaktivität der beteiligten Muskulatur.

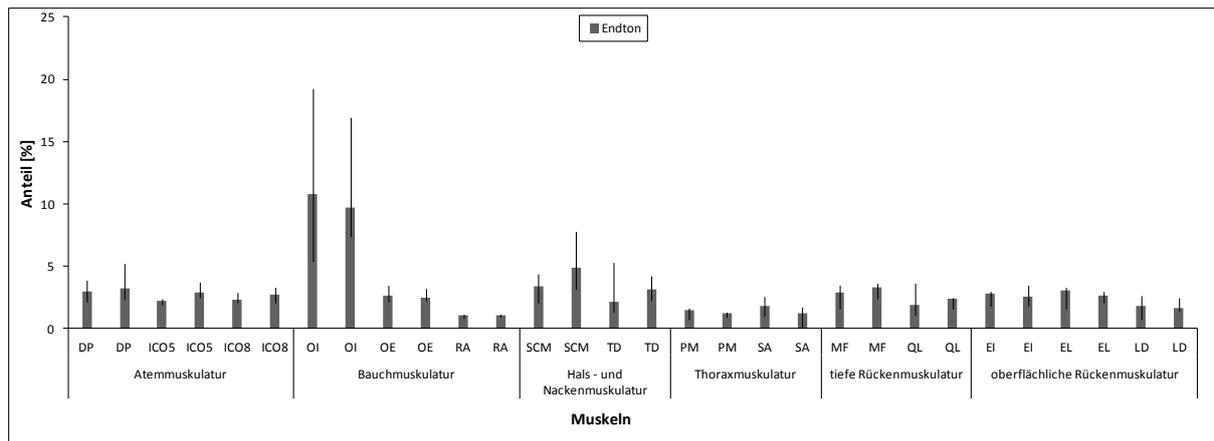


Abbildung 17 Tonleiter: Intermuskuläre Koordination. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivität jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur im Endtonbereich der Tonleiter für alle Probanden mit oberem und unterem Quartil.

6.1.3.2 Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet

6.1.3.2.1 Mittlere Muskelaktivitäten

Die Abbildung 18 veranschaulicht, dass sich die mittlere Muskelaktivität im Vergleich zur Erstuntersuchung im Verlauf der Studie beim Singen des Endtonbereichs der Tonleiter, wie schon bei den Gesangsübungen unter 6.1.1.2.1 und 6.1.2.2.1 beschrieben, nur wenig verändert hat. Die Bauchmuskulatur zeigt bis auf eine Aktivitätsabnahme des OI auf der rechten Körperseite und sehr großen Schwankungsbreiten beidseits nur sehr geringe Veränderungen der Amplitudenwerte. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur stellt sich eine ebenfalls nur schwach ausgeprägte, aber dennoch ähnliche Entwicklung wie schon in den vorherigen Betrachtungen dar. Es kommt zu einer schwachen Aktivitätszunahme beim SCM und zu einer etwas deutlicheren Abnahme des Aktivitätsniveaus beim TD beidseits. Bei der Thoraxmuskulatur finden sich im Verlauf nur geringe positive oder negative Tendenzen der Muskelaktivitäten. Der SA auf der rechten Körperseite wird, wie bereits erwähnt, nicht berücksichtigt. Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) erreicht ein niedrigeres Aktivitätsniveau als in der Erstuntersuchung, einzige Ausnahme ist hierbei der EL auf der linken Körperseite mit einer nur minimalen Zunahme der mittleren Muskelaktivität. Ebenfalls nahezu ausschließlich Aktivitätsabnahmen im Vergleich zur Erstuntersuchung, zeigt fast die gesamte Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8). Einzige Ausnahme ist hier der DP der rechten Seite mit einer leichten Erhöhung des Aktivitätsniveaus. Die einzige Signifikanz kann bei der Veränderung des ICO8 auf der rechten Seite nachgewiesen werden.

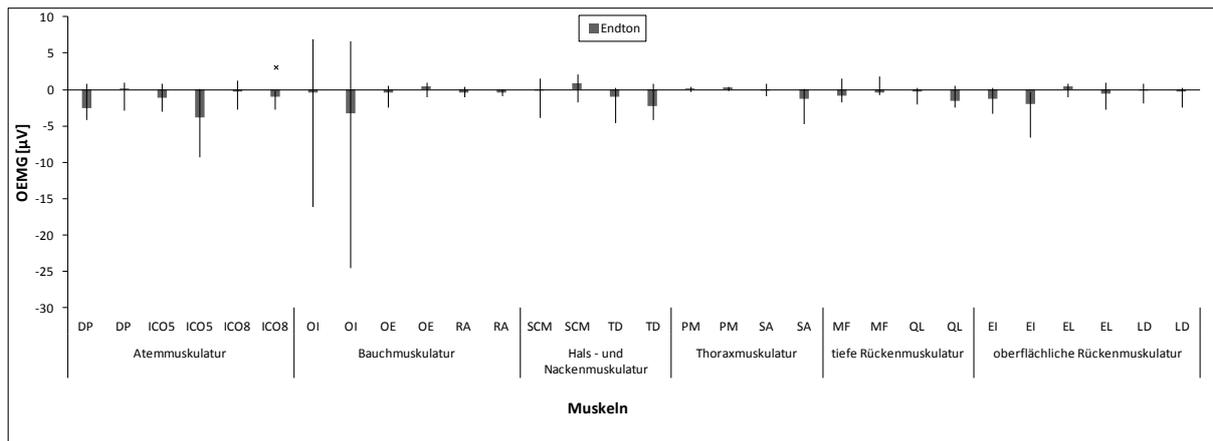


Abbildung 18 Tonleiter: Mittlere Muskelaktivitäten im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der mittleren Amplitudenwerte der Erst- und Folgeuntersuchung mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel im Endtonbereich der Tonleiter für alle Probanden.

6.1.3.2 Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum

In Abbildung 19 sind die Veränderungen der mittleren Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum im Studienverlauf dargestellt. Besonders auffällig stellt sich wiederum die Hals- und Nackenmuskulatur dar. Es kommt zum einen zu einer relativen Aktivitätsabnahme um bis zu 17% (TD rechts) und zum anderen zu einer Zunahme des Aktivitätsniveaus um bis zu 3% (SCM rechts) verglichen mit der Referenzmessung. Bei der Thoraxmuskulatur erreicht der PM eine relative Aktivitätszunahme um bis zu 6% auf der rechten Körperseite wohingegen der SA auf der linken Seite eine minimale Aktivitätsabnahme zeigt. Der SA auf der rechten Körperseite wird hier wieder nicht mit berücksichtigt. Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) stellt sich in ihrer relativen Aktivität um bis zu maximal 13% (MF links) abnehmend dar. Einzige Ausnahme bei dieser Muskelgruppe ist der EL auf der linken Körperseite, welcher eine Zunahme der relativen Aktivität um etwa 2% erreicht. Eine signifikante Veränderung findet sich lediglich beim QL auf der rechten Körperseite. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) sowie die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) zeigen bei fast allen beteiligten Muskeln Abnahmen der relativen Aktivitäten verglichen mit der Erstuntersuchung von 1,5% (ICO8 links) bis maximal ca. 7% (ICO5 rechts). Nennenswerte Ausnahmen sind hier der DP der rechten und der OE ebenfalls der rechten Körperseite. Die relative Aktivität nimmt bei beiden erwähnten Muskeln im Studienverlauf minimal zu.

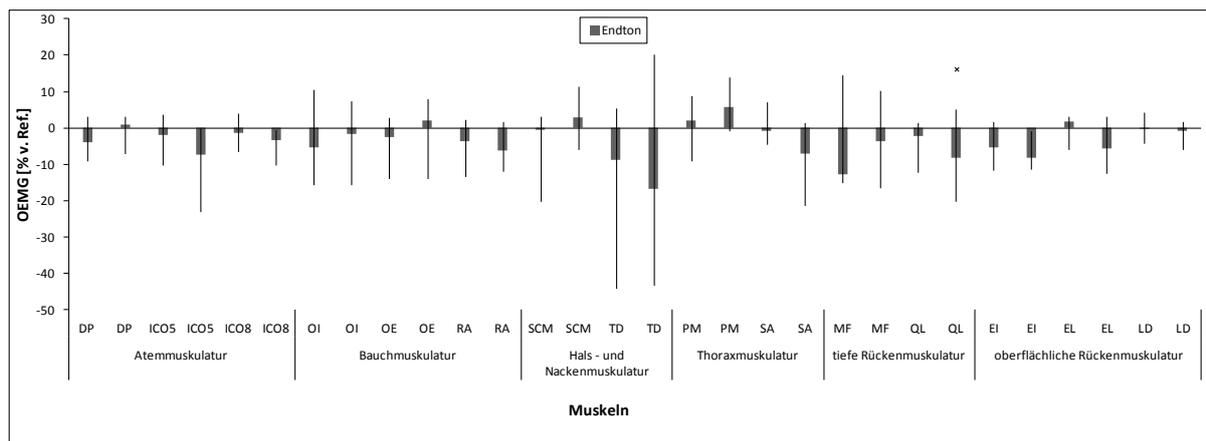


Abbildung 19 Tonleiter: Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels im Endtonbereich der Tonleiter bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.3.2.3 Intermuskuläre Koordination

Abbildung 20 veranschaulicht die Veränderungen der Anteile einzelner Muskeln an der Gesamtaktivität der Muskulatur während der Durchführung der Gesangsübung im Vergleich zur Erstuntersuchung. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur kommt es zu einer Steigerung der anteiligen Aktivität um etwas mehr als 0,5% (SCM rechts), lediglich der TD auf der rechten Körperseite zeigt eine leichte Abnahme seiner Aktivität verglichen mit der Erstuntersuchung. Eine Steigerung des Aktivitätsanteils bezogen auf die Gesamtaktivität erreichen der PM und der SA der Thoraxmuskulatur. Der SA auf der rechten Seite wird wie bereits in den vorherigen Gesangsübungen nicht mit berücksichtigt. Die tiefe- und die oberflächliche Rückenmuskulatur (MF, QL, Ei, EL, LD) verändern ihren Aktivitätsanteil im Vergleich zur Erstuntersuchung nur sehr wenig. Leichte Aktivitätszunahmen zeigt die gesamte tiefe Rückenmuskulatur, mit Ausnahme des MF der linken Körperseite. Die oberflächliche Rückenmuskulatur nimmt den Aktivitätsanteil betreffend eher ab, einzige Ausnahmen sind hier der EL und der LD auf der linken Körperseite mit geringen Anteilszunahmen bezüglich der mittleren Muskelaktivität. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) zeigt Abnahmen des Aktivitätsanteil um bis zu knapp über 1% (ICO5 rechts). Einzige Ausnahme ist hier eine minimale Zunahme des Aktivitätsanteils von unter 0,5% beim DP auf der rechten Körperseite. Bei der Bauchmuskulatur fällt eine starke Zunahme des Aktivitätsanteils des rechten OI mit fast 2%, verglichen mit der Erstuntersuchung, auf. Der enorme Streubereich zeigt jedoch, dass dies nicht wirklich als systematische Veränderung interpretiert werden darf. Der OI auf der linken Seite stellt sich mit nur einer Anteilszunahme von weniger als 0,5%, verglichen mit der

Erstuntersuchung, nur diskret verändert dar. Die verbleibenden Muskeln der Bauchmuskulatur (OE und RA) erreichen nur sehr geringe Veränderungen betreffend des Aktivitätsanteils im Studienverlauf.

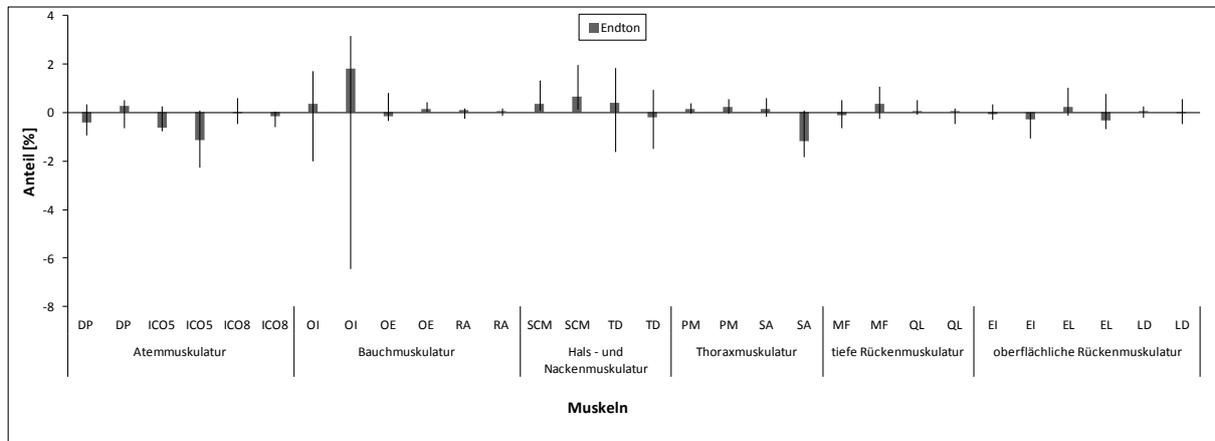


Abbildung 20 Tonleiter: Intermuskuläre Koordination im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur im Endtonbereich der Tonleiter für alle Probanden mit oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.4 SCHWELLTON

6.1.4.1 Betrachtungen der Folgeuntersuchungen

6.1.4.1.1 Mittlere Muskelaktivitäten

In Abbildung 21 zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den bereits beschriebenen Gesangsübungen. Das Aktivitätsniveau steigt, ähnlich dem Vokalausgleich unter 6.1.1.1.1 und dem Dreiklang unter 6.1.2.1.1, bei fast allen beteiligten Muskeln im Übungsverlauf an. Auch hier hebt sich der OI auf beiden Körperseiten von den übrigen Muskeln deutlich ab. Seine Aktivität steigt nach dem ersten Übungsbereich sehr deutlich auf ein Vielfaches seiner Anfangsaktivität an. Der SCM der Hals- und Nackenmuskulatur stellt sich im Verlauf über die drei Übungsbereiche des Schwelltons deutlich anders dar. Das Aktivitätsniveau fällt beim Übergang vom mittleren zum letzten Übungsbereich deutlich ab und steigt nicht, wie bei den restlichen beteiligten Muskeln, weiter an.

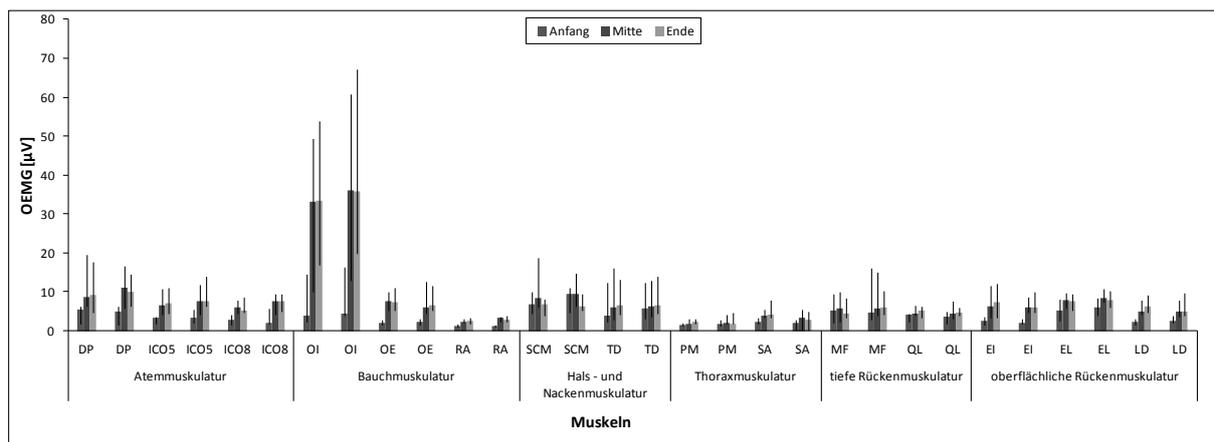


Abbildung 21 Schwellton: Mittlere Muskelaktivitäten. Dargestellt ist der Median der mittleren Amplitudenwerte mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel über die drei Bereiche des Schwelltons für alle Probanden.

6.1.4.1.2 Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum

Auch beim Schwellton wird die mittlere Muskelaktivität im Bezug zur Referenzmessung betrachtet. Abbildung 22 zeigt, dass sich alle beteiligten Muskeln im Übungsverlauf, erneut mit überwiegend steigendem Aktivitätsniveau, ihrem vorher ermittelten Referenzmaximum annähern. Wie bei allen bisher beschriebenen Gesangsübungen, erreicht die Hals- und Nackenmuskulatur auch an dieser Stelle das größte Beanspruchungsniveau von bis zu 125% der Referenz (TD links im mittleren Übungsbereich). Es kann erneut gezeigt werden, dass ein Großteil der Probanden im Verlauf dieser Gesangsübung ein Niveau der Muskelaktivitäten

teils deutlich über ihrem Referenzmaximum erzielt. Der TD auf der rechten Körperseite ist der einzige Muskel dieser Gruppe, dessen relative Aktivität sich im letzten Übungsabschnitt ansteigend verhält. Der SCM auf beiden Seiten sowie der TD links zeigen ein Maximum ihrer Beanspruchung im mittleren Bereich der Übung. Die Thoraxmuskulatur erreicht eine relative Aktivität von bis zu 45% der Referenz (PM rechts im letzten Übungsbereich). Das deutlich niedrigere Aktivitätsniveau des SA rechts wird, wie bereits erwähnt, nicht weiter berücksichtigt. Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) zeigt Aktivitäten von 7% (EI rechts im ersten Übungsabschnitt) bis zu 45% der Referenz (QL links im mittleren Übungsbereich). Beim MF beidseits sowie dem QL auf der linken Körperseite findet sich der schon beim SCM beschriebene Abfall der Beanspruchung während des letzten Übungsbereiches. Bei den übrigen Muskeln dieser Muskelgruppe steigt das relative Aktivitätsniveau über die drei Abschnitte der Gesangsübung an. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) sowie die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) zeigen gleichmäßig aufsteigende Aktivitäten von wenigstens 6% (OI rechts im ersten Übungsbereich) bis maximal 46% (OE rechts im letzten Übungsbereich) der Referenzmessung.

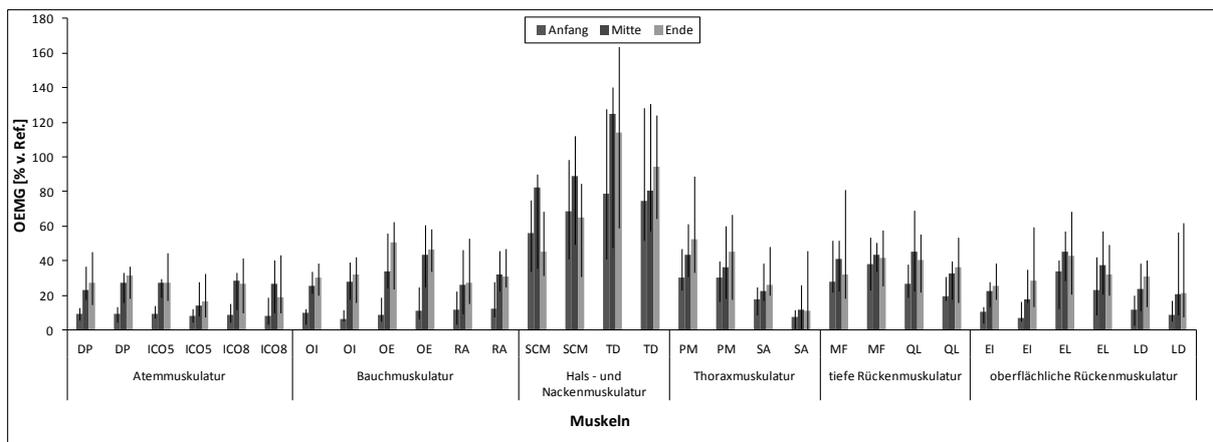


Abbildung 22 Schwellton: Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivitäten jedes einzelnen Muskels über die drei Bereiche des Schwelltons bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.4.1.3 Intermuskuläre Koordination

Die Ergebnisse betreffend die prozentualen Anteile der einzelnen Muskeln an der Gesamtaktivität der gemessenen Muskulatur sind in Abbildung 23 dargestellt. Der OI der Bauchmuskulatur erreicht einen Anteil von bis zu 15% (OI rechte Körperseite im letzten Übungsabschnitt) der gesamten erfassten Muskulatur. Wie auch bei den bereits erwähnten Gesangsübungen erreicht kein anderer gemessener Muskel derartig hohe Aktivitätsanteile. Die restlichen Muskeln dieser Gruppe zeigen Anteile von unter 1% (RA beidseits im ersten Übungsbereich) bis höchstens 3% (OE links im mittleren Übungsbereich) der Gesamtaktivität. Die Hals- und Nackenmuskulatur hat Aktivitätsanteile von 2% (TD rechts im mittleren Übungsbereich) bis etwa 6,5% (SCM rechts im ersten Übungsbereich). Wie schon beim Vokalausgleich unter 6.1.1.1.3 und beim Dreiklang unter 6.1.2.1.3 beschrieben, kommt es im Übungsverlauf über die drei Bereiche zu einer auffälligen Abnahme der Aktivitätsanteile. Nur geringe prozentuale Anteile, jeweils ohne Aktivitätsveränderungen im Übungsverlauf, zeigt hingegen die Thoraxmuskulatur (PM, SA). Die gesamte Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) ist mit Anteilen von etwas über 1% (LD links im ersten Übungsbereich) bis zu 5% (EL links im ersten Übungsbereich) vertreten. Fast alle Muskeln dieser Gruppe zeigen, wie schon bei der Hals- und Nackenmuskulatur beschrieben, eine Abnahme der prozentualen Anteile der Muskelaktivitäten über die drei Bereiche des Schwelltons. Auffällige Ausnahmen sind der EI sowie der LD der oberflächlichen Rückenmuskulatur, bei denen es auf beiden Körperseiten zu einer Anteilszunahme über die drei Übungsbereiche kommt. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) ist mit Anteilen von 2% (ICO8 links im ersten Bereich der Übung) bis maximal 4% (DP rechts im letzten Übungsbereich) sehr gleichmäßig vertreten. Alle Muskeln zeigen in dieser Gruppe eine leichte Zunahme der anteiligen Muskelaktivität über die drei Bereiche der Gesangsübung.

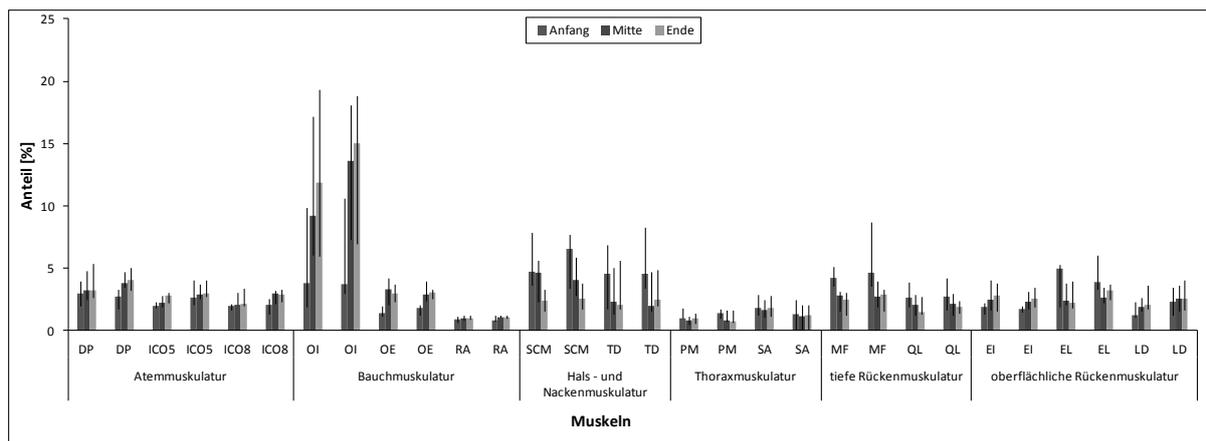


Abbildung 23 Schwellton: Intermuskuläre Koordination. Dargestellt ist der prozentuale Anteil der mittleren Muskelaktivität jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur über die drei Bereiche des Schwelltons für alle Probanden mit oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.4.2 Erst- und Folgeuntersuchung vergleichend betrachtet

6.1.4.2.1 Mittlere Muskelaktivitäten

Abbildung 24 zeigt, dass sich die mittleren Muskelaktivitäten im Vergleich zur Erstuntersuchung beim Singen des Schwelltons nur geringfügig verändern. Beim SCM der Hals- und Nackenmuskulatur kommt es, mit Ausnahme des ersten Bereichs des Schwelltons, zu einer leichten Zunahme der mittleren Muskelaktivitäten auf beiden Körperseiten. Die Ergebnisse der rechten Seite zeigen Signifikanzen in den letzten beiden Übungsbereichen. Der TD stellt sich auf beiden Körperseiten unterschiedlich dar. Während es auf der linken Körperseite zu praktisch keiner sichtbaren Veränderung der mittleren Muskelaktivität kommt, zeigt die rechte Seite in allen drei Bereichen der Übung eine deutliche Aktivitätsabnahme. Bei der Thoraxmuskulatur sind nur sehr geringe Veränderungen im Studienverlauf zu verzeichnen. Eine signifikante Aktivitätszunahme errechnet sich für den zweiten Übungsbereich beim PM der rechten Körperseite. Der SA auf der rechten Seite nimmt in seiner Aktivität relativ deutlich ab, wird jedoch nicht weiter berücksichtigt. Die mittlere Aktivität der Muskeln der gesamten Rückenmuskulatur (MF, QL, EI, EL, LD) hat im Vergleich zur Erstuntersuchung minimal abgenommen, eine auffällige Ausnahme ist hier der EL auf beiden Seiten. Als signifikant ist die Veränderung der Aktivität im letzten Bereich der Gesangsübung beim QL rechts zu verstehen. Ebenfalls nur sehr geringe Veränderungen sind bei der Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) sowie der Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) zu beobachten. Ausnahmen bestehen lediglich in den letzten Übungsbereichen, hauptsächlich beim OI beidseits sowie dem ICO5 und ICO8 auf beiden Seiten. Signifikanzen bestehen für

die Abnahmen der Aktivitäten beim ICO5 sowie dem ICO8 auf der rechten Körperhälfte jeweils im letzten Bereich der Gesangsübung.

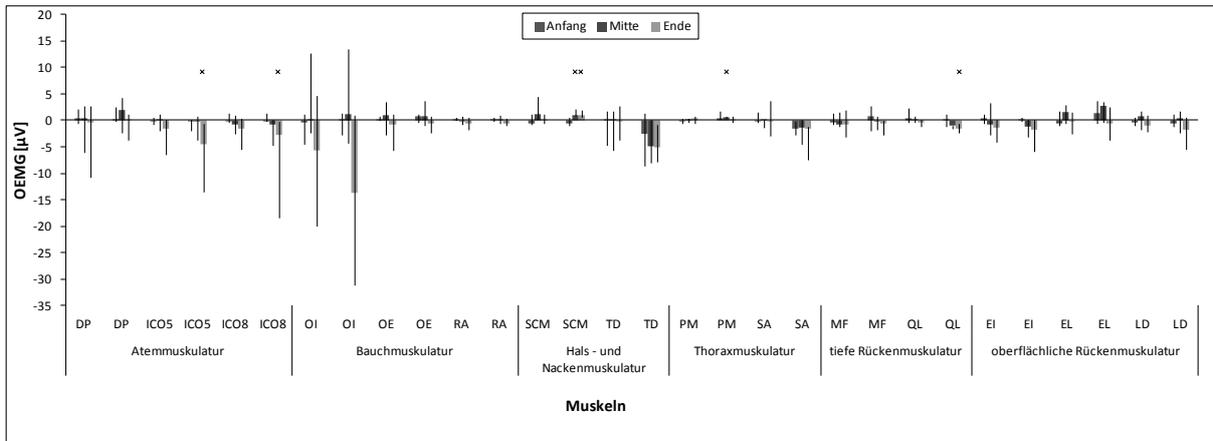


Abbildung 24 Schwellton: Mittlere Muskelaktivitäten im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der mittleren Amplitudenwerte der Erst- und Folgeuntersuchung mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand für jeden einzelnen Muskel über die drei Bereiche des Schwelltons für alle Probanden.

6.1.4.2.2 Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum

In Abbildung 25 sind die Veränderungen der Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum im Vergleich zur Erstuntersuchung dargestellt. Sehr auffällig stellt sich wiederum die Hals- und Nackenmuskulatur dar. Beim SCM zeigt sich auf beiden Körperseiten eine Abnahme der relativen Muskelaktivität bis zu 6% im ersten Übungsbereich und eine Zunahme der relativen Aktivitäten um bis zu 11% im letzten Übungsbereich rechts. Die Veränderungen sind auf beiden Seiten im mittleren Übungsbereich und auf der rechten Seite ebenfalls im letzten Bereich der Gesangsübung signifikant. Sehr bemerkenswert ist die gegenläufige Entwicklung des TD auf beiden Körperseiten. Die linke Seite erreicht eine Zunahme der Aktivitätsanteile um bis zu 6% (im ersten Bereich der Übung), während die rechte Seite eine deutlich Abnahme der Aktivität bezogen auf die Referenz von bis zu 48% (im letzten Bereich der Übung) aufzeigt. Zu beachten sind allerdings auch hier wieder die sehr großen Streuungsbereiche auf beiden Körperseiten. Allerdings weist auch die linke Seite eine grundsätzlich abfallende Tendenz über die Übungsdauer hinweg auf. Zu einer Zunahme des relativen Aktivitätsanteils kommt es beim PM der Thoraxmuskulatur beidseits, insbesondere auf der rechten Körperseite. Hier kann eine signifikante Veränderung im zweiten Bereich der Gesangsübung nachgewiesen werden. Die tiefe Rückenmuskulatur zeigt leichte Abnahmen der relativen Aktivitäten beim MF links (bis 11,5%) und dem QL rechts (bis 12%) besonders während der letzten Bereiche der Übung. Die Veränderung des QL auf der rechten Körperseite im letzten Übungsbereich ist als signifikant zu betrachten. Nur geringe Veränderungen fallen bei der oberflächlichen Rückenmuskulatur im Vergleich zur Erstuntersuchung auf. Zu einer leichten Abnahme der relativen Muskelaktivität kommt es beim EI auf beiden Körperseiten (bis maximal 7% im letzten Übungsbereich links), wohingegen es zu einer Zunahme der prozentualen Muskelaktivität beim EL beidseits (bis 7% im ersten Bereich der Übung rechts) kommt. Im Vergleich zur Erstuntersuchung finden sich bei der gesamten Atemmuskulatur nur wenige nachweisbare Veränderungen der relativen Muskelaktivitäten. Bemerkenswert sind lediglich die signifikanten Abnahmen der Aktivitäten jeweils im letzten Bereich der Gesangsübung beim ICO5 beidseits sowie dem ICO8 auf der rechten Seite. Die Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) verändert ihr Beanspruchungsniveau im Studienverlauf nur sehr wenig. Über die ersten beiden Übungsbereiche kommt es eher zu einer Zunahme und während des letzten Bereiches des Schwelltons eher zu einer Abnahme der relativen Muskelaktivitäten verglichen mit der Erstuntersuchung.

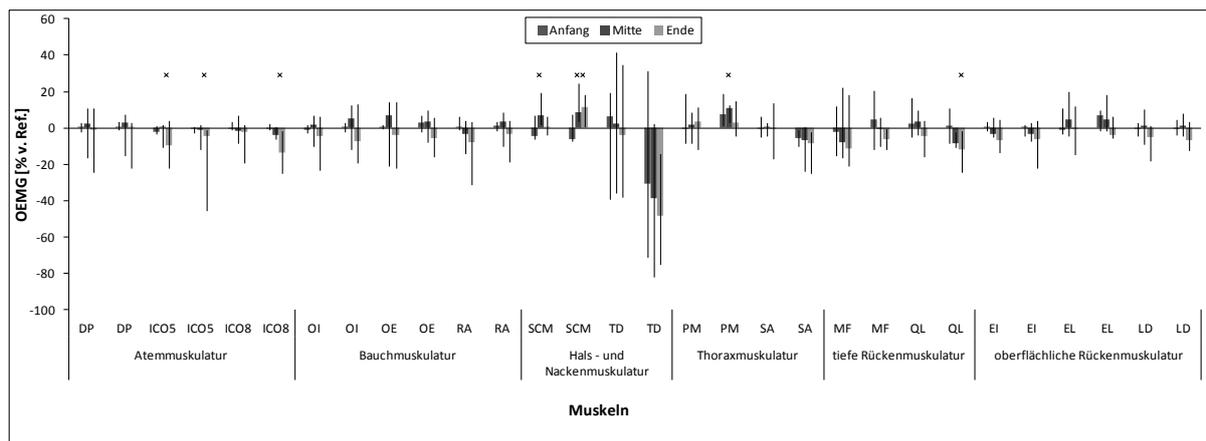


Abbildung 25 Schwellton: Muskelaktivitäten bezogen auf das Referenzmaximum im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels über die drei Bereiche des Schwelltons bezogen auf das im Vorfeld ermittelte Referenzmaximum für alle Probanden mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.4.2.3 Intermuskuläre Koordination

Abbildung 26 veranschaulicht die Veränderungen der einzelnen Muskelanteile an der Gesamtaktivität der gemessenen Muskulatur verglichen mit der Erstuntersuchung. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur bestehen signifikante Veränderungen beim SCM auf beiden Körperseiten jeweils im letzten Bereich der Gesangsübung. Der Anteil des SCM nimmt beidseits im Vergleich zur Voruntersuchung um maximal 1,5% (im mittleren Übungsbereich rechts) zu. Ein leichter Abfall der Beanspruchung kann im letzten Übungsabschnitt festgestellt werden. Der TD zeigt erneut ein unterschiedliches Ergebnis auf beiden Körperseiten. Auf der rechten Seite nimmt im Gegensatz zur linken Körperseite der Aktivitätsanteil ab. Die große interindividuelle Streuung sei auch hier wieder relativierend zu erwähnen. Die Thoraxmuskulatur verändert ihren Aktivitätsanteil verglichen mit der Erstuntersuchung nur geringfügig. Signifikante Veränderungen können im mittleren und letzten Übungsbereich beim PM auf der rechten Seite ermittelt werden. Der SA rechts wird trotz seiner deutlichen Anteilsabnahme, wie bereits erwähnt, nicht berücksichtigt. Die tiefe Rückenmuskulatur (MF, QL) stellt sich nur sehr wenig verändert dar. Einziger bemerkenswerter Sachverhalt ist hier eine rechtsseitige Anteilszunahme der Muskelaktivität beim MF im Vergleich mit seiner Gegenseite. Bei der oberflächlichen Rückenmuskulatur (EI, EL, LD) kommt es bei allen Muskeln zu einer gleichmäßigen leichten Zunahme der anteiligen Muskelaktivitäten um bis zu 0,5% (EL links im ersten Übungsbereich). Die stärksten Veränderungen erreicht in dieser Muskelgruppe der EL beidseits. Die Atemmuskulatur (DP, ICO5, ICO8) zeigt nur sehr schwache Tendenzen in Richtung Zunahme oder Abnahme der

Muskelanteile im Studienverlauf. Eine erwähnenswerte signifikante Verminderung gibt es dennoch im mittleren Übungsbereich beim ICO8 rechts. Bei der Bauchmuskulatur (OI, OE, RA) stellt sich am auffälligsten der OI auf beiden Seiten dar. Hier kommt es zu einer Zunahme der anteiligen Muskelaktivität um bis zu 1,4 % (im mittleren Übungsbereich rechts) auf der rechten und zu einer Abnahme des Aktivitätsanteils um höchstens 0,6 % (im ersten Übungsbereich links) auf der linken Körperseite. Wie schon beim TD ist auch hier wieder der Schwankungsbereich sehr ausgeprägt. Die restlichen Muskeln dieser Gruppe erscheinen, verglichen mit der Erstuntersuchung, nur wenig verändert.

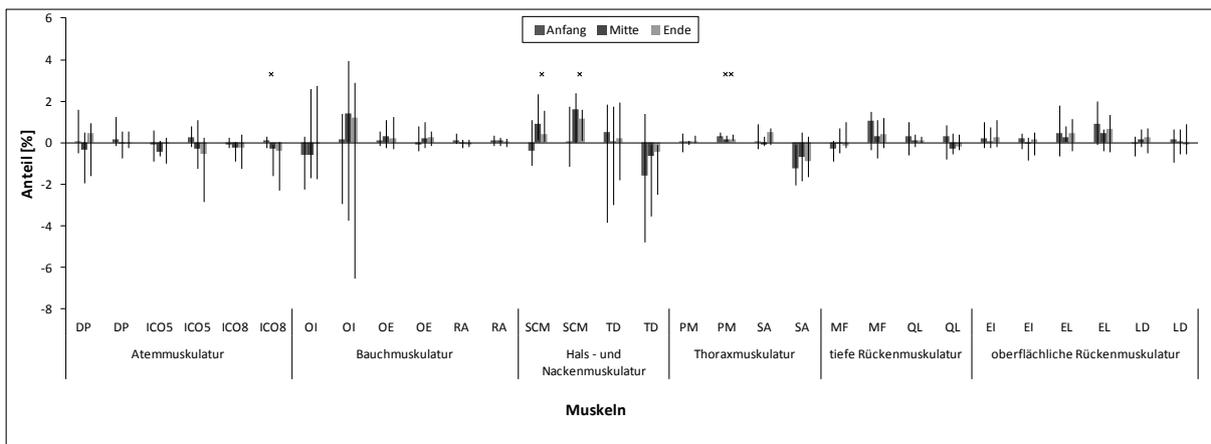


Abbildung 26 Schwellton: Intermuskuläre Koordination im Vergleich. Dargestellt ist die Differenz der prozentualen Anteile der mittleren Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung jedes einzelnen Muskels bezogen auf die Gesamtaktivität der betrachteten Muskulatur über die drei Bereiche des Schwelltons für alle Probanden mit oberem und unterem Quartilsabstand.

6.1.5 ÜBUNGSLÄNGEN DER ERST- UND FOLGEUNTERSUCHUNG

Im Folgenden wird jeweils der Median der Übungslängen für die jeweiligen Gesangsübungen graphisch dargestellt. Einbezogen wurde, wie unter 5.2.2 beschrieben, jede durchgeführte Übung während des mehrmaligen Vortragens der Übung bei jedem einzelnen Probanden.

In der oberen Grafik in Abbildung 27 ist jeweils die mittlere Dauer für jede einzelne Gesangsübung während der Erstuntersuchung graphisch dargestellt. Für den Vokalausgleich zeigt sich eine mittlere Übungslänge von ungefähr 6,7 Sekunden. Die Dauer der Übung beim Vortragen der Tonleiter fällt mit etwa 7,5 Sekunden etwas länger aus. Kaum Unterschiede ergeben sich beim Singen des Dreiklangs und des Schwelltons. Die Übungsdauer unterscheidet sich bei beiden Gesangsübungen mit 9,3 bzw. 9,5 Sekunden nur minimal voneinander.

Wie in der unteren Abbildung, dargestellt sind die hier die Daten der Folgeuntersuchung, zu sehen, beträgt die mittlere Übungsdauer bei den Probanden während des Vortragens des Vokalausgleichs etwa 7,4 Sekunden und ist somit der Übungslänge der Tonleiter mit 7,3 Sekunden fast identisch. Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Singen des Dreiklangs und des Schwelltons, mit Übungslängen von jeweils 10,0 und 9,9 Sekunden.

Vergleicht man die Erst- und die Folgeuntersuchung miteinander, so zeigt sich bei beiden ein sehr ähnliches Bild. Vokalausgleich und Tonleiter sowie Dreiklang und Schwellton zeigen etwa die gleiche Dauer der Übung. Die Übungslänge nimmt bei fast allen Gesangsübungen im Vergleich zur Erstuntersuchung leicht zu. Für den Vokalausgleich und den Dreiklang ergibt sich eine Zunahme der Übungsdauer um etwa 0,7 Sekunden, wohingegen die Übungslänge beim Singen des Schwelltons lediglich um 0,4 Sekunden zunimmt. Beim Singen der Tonleiter zeigt sich eine bemerkenswert gegenteilige Entwicklung, da die Übungslänge, verglichen mit der Erstuntersuchung, um etwa 0,2 Sekunden abnimmt.

Mögliche systematische Veränderungen zwischen Erst- und Folgeuntersuchung wurden mit dem Wilcoxon-Test getestet (Lohse et al. 1982, Sachs 1997). Für den Vokalausgleich ergab sich ein Ergebnis von $p = 0,095$, beim Dreiklang von $p = 0,146$, bei der Tonleiter von $p = 1,0$ und beim Schwellton von $p = 0,273$. Somit kann bei keiner der vier Gesangsübungen eine statistisch signifikante Veränderung nachgewiesen werden.

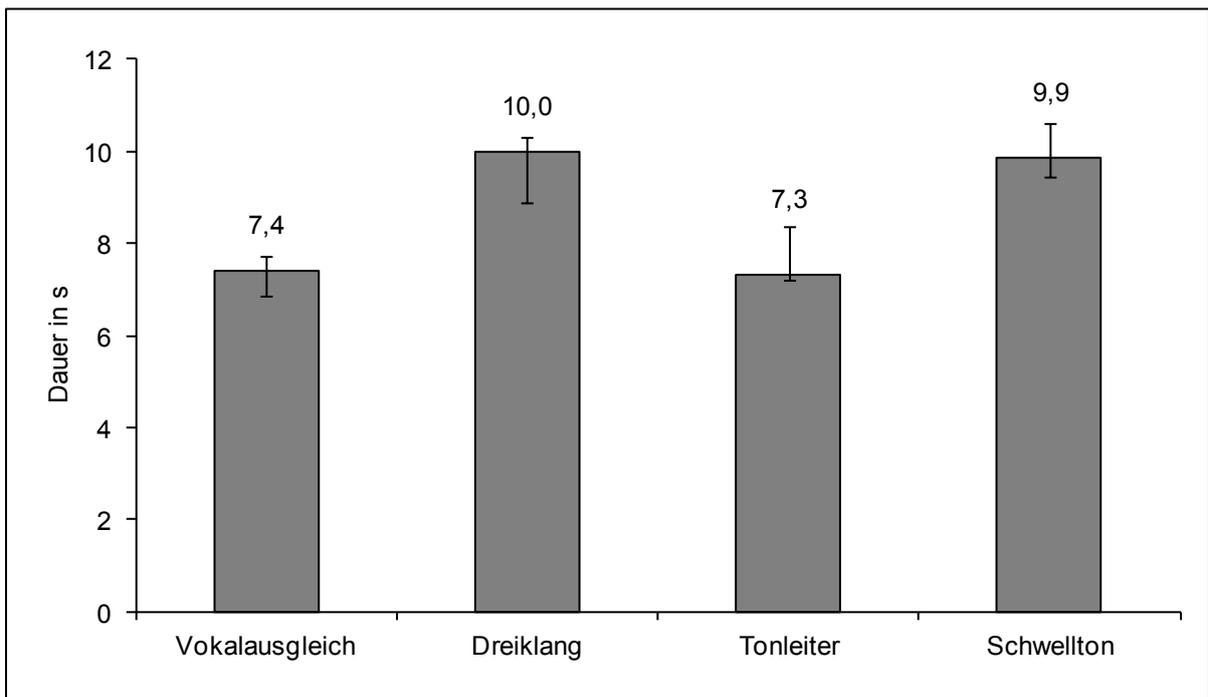
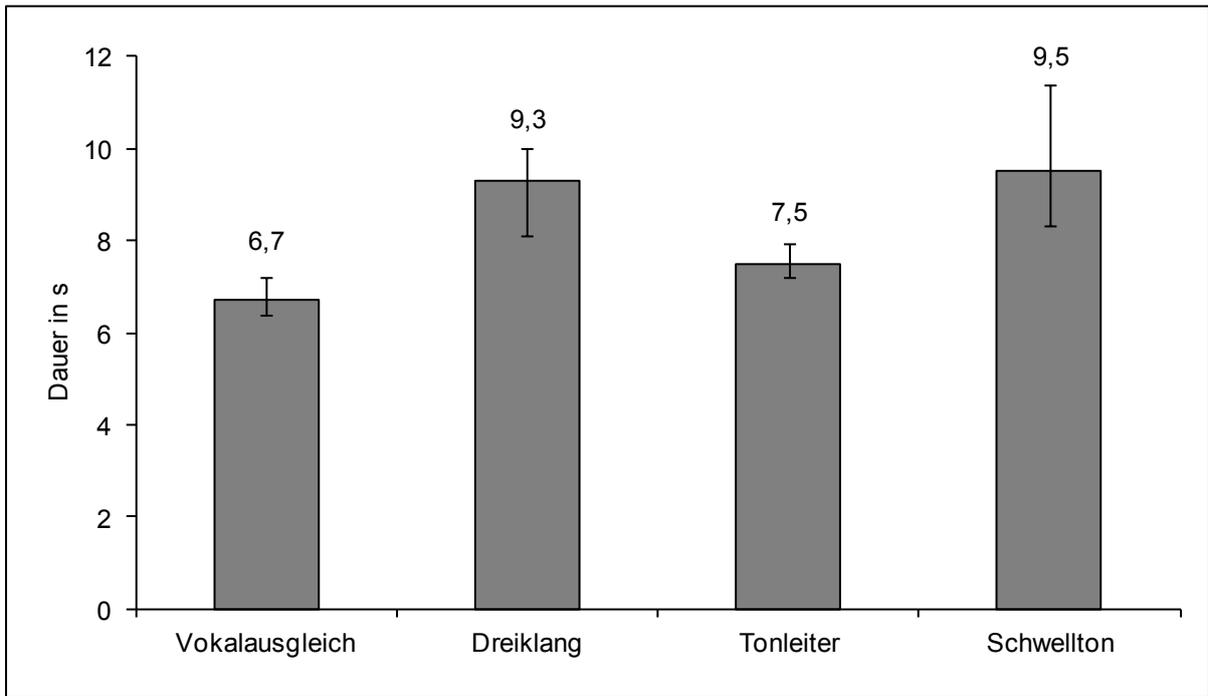


Abbildung 27 Übungslängen: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt ist der Median der Übungslängen aller Probanden für jede einzelne Gesangsübung mit oberem und unterem Quartilsabstand in Sekunden. Die obere Abbildung zeigt die Daten der Erstuntersuchung und die untere Abbildung jene der Folgeuntersuchung.

6.2 ZEITABHÄNGIGE BETRACHTUNG

Im Folgenden werden Bandauslenkungen sowie Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung für die Einatmung und die jeweiligen Gesangsübungen betrachtet. Es werden die Abbildungen der Erstuntersuchung korrespondierend zu denen der Folgeuntersuchung dargestellt.

6.2.1 EINATMUNG VOR ERZEUGUNG EINES SCHWELLTONS

Die Einatmung wird, um eine Vergleichbarkeit mit der Erstuntersuchung zu gewährleisten, am Beispiel des Schwelltons beschrieben. Schon in der Erstuntersuchung von Jähkel (2014) stellten sich die Einatmungssituationen der vier Gesangsübungen als ausreichend reliabel dar, so dass die Phase der Einatmung anhand der Gesangsübung des Schwelltons dargestellt werden kann.

6.2.1.1 Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung

In den folgenden Abbildungen wird die Bandauslenkung der einzelnen Bänder relativ zur maximalen Auslenkung der Bänder während der Ruhemessung gesehen. Die Phase der Einatmung bzw. der jeweiligen Gesangsübung wird als relativer zeitlicher Verlauf dargestellt und ist auf 100% der gesamten Einatmung normiert.

Betrachtet man in Abbildung 28 die Auslenkungen der einzelnen Bänder der Erst- und Folgeuntersuchung, so fällt zunächst auf, dass es erwartungsgemäß zu einer Umfangszunahme im Brust- (Band 1), Flanken- (Band 2) und Bauchbereich (Band 3) kommt. Ebenfalls bemerkenswert ist, dass die Auslenkung der Bänder zum Zeitpunkt der Folgeuntersuchung sehr viel gleichmäßiger ist als bei der Erstuntersuchung. Die Zunahme der Auslenkung bis hin zur Maximaldehnung stellt sich bei der Folgeuntersuchung deutlich flacher dar. Besonders gut zu sehen ist dieses Phänomen ab dem mittleren Übungsabschnitt. Der grobe Verlauf der Bandauslenkung ist zu beiden Untersuchungszeitpunkten ähnlich. Die stärkste Dehnung wird bei der Atmung in die Flanke (dargestellt durch Band 2) bei etwa 75% der Phase der Einatmung erreicht. Zu Beginn der Einatmung ist die Auslenkung bei Bauch- und Brustband demgegenüber größer und steigt dann im Verlauf gleichmäßig an. Die Dehnung des Flankenbandes nimmt während der Einatmung, bei Erst- und Folgeuntersuchung gleichermaßen, sehr deutlich zu. Seine Dehnungskurve schneidet in beiden Abbildungen zunächst die des Brustbandes und danach auch jene des Bauchbandes. In der Erstuntersuchung nimmt nach Erreichen der Maximaldehnung die Auslenkung der Bänder

zum Ende der Inspiration wieder deutlich ab. In der Folgeuntersuchung erscheint die Dynamik verändert. Das Dehnungsmaximum wird deutlich früher erreicht (bei ca. 65%) und geht danach in ein Plateau über anstatt deutlich abzufallen. Lediglich Band 2 fällt gegenüber dem erreichten Maximum wieder leicht ab. Weiterhin fällt auf, dass die Auslenkungsabnahme bei der Folgeuntersuchung sehr viel kontinuierlicher erscheint.

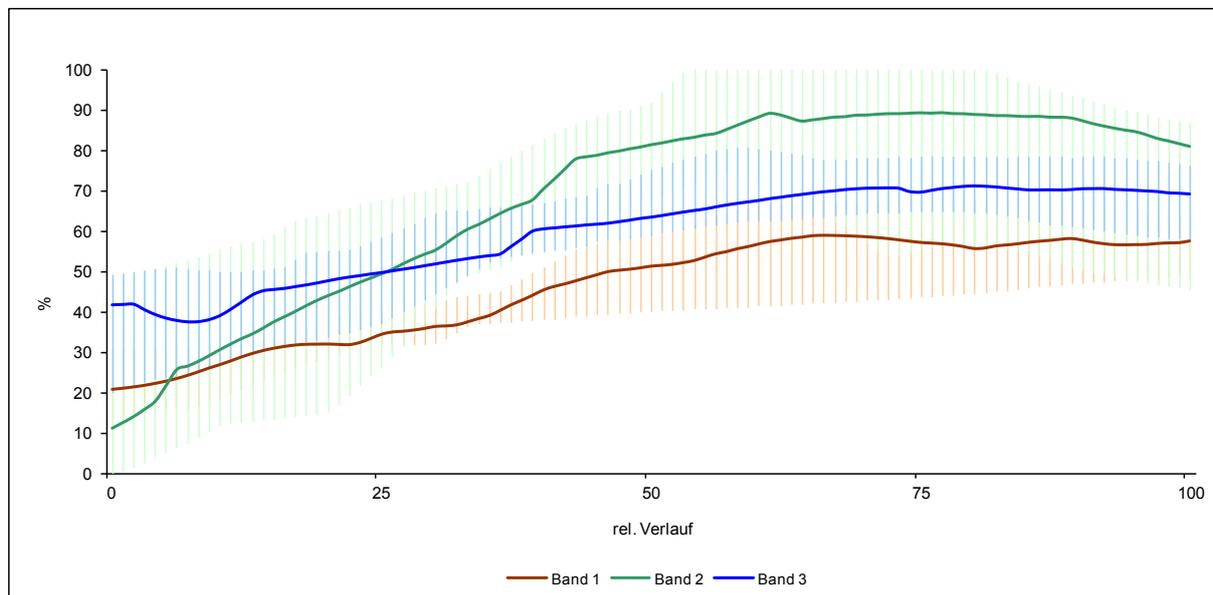
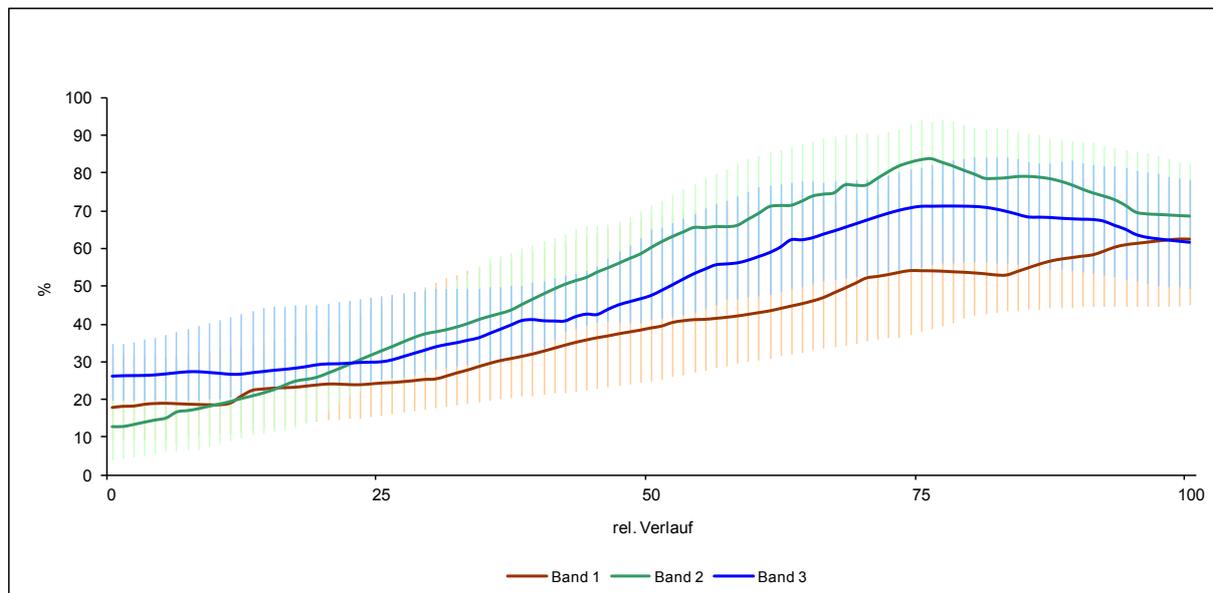


Abbildung 28 Bandauslenkungen Einatmung: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt ist jeweils der mediane Verlauf der relativen Auslenkung jedes einzelnen Bandes in Prozent mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand über die definierte Phase der Einatmung beim Schwellton. Die obere Abbildung entspricht der Erstuntersuchung, die untere Abbildung zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Brustband: Band 1, Flankenband: Band 2, Bauchband: Band 3.

6.2.1.2 Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung

Wie schon bei der Erstuntersuchung zeigen die einzelnen Muskeln auf der linken und rechten Körperseite prinzipiell den gleichen Aktivitätsverlauf. Um eine Vergleichbarkeit der Daten zu erreichen und gleichzeitig den bereits erwähnten systematischen Fehler beim SA auf der rechten Körperseite zu berücksichtigen, wird in den folgenden Abschnitten nur die Muskulatur auf der linken Körperhälfte beschrieben.

Auf die Auswertung und Interpretation der einzelnen Aktivitätsverläufe jedes beteiligten Muskels und deren signifikante Unterschiede innerhalb der Folgeuntersuchung wird im Anschluss verzichtet. Eine solche Analyse wurde bereits in der Erstuntersuchung für jede Gesangsübung separat durchgeführt. Unterschiede der absoluten Muskelaktivitäten und deren Amplitudenmaxima sind zwar zu erwarten, jede dieser Veränderungen zu beschreiben würde jedoch das Ziel der vorliegenden Arbeit nicht verfolgen. Von besonderem Interesse sind Veränderungen auf Ebene der Muskelkoordination der Probanden im Studienverlauf. Mithilfe von mittleren Rangzahlen, welche im jeweiligen Verlauf in zeitlich normierten Abschnitten dargestellt sind, wird eine innerhalb der Gesangsübungen beziehungsweise der Einatmung erreichte Charakteristik der Amplitudenverläufe zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten miteinander verglichen. Die mittleren Rangzahlen kennzeichnen die Rangfolge der Amplitudenwerte innerhalb der betrachteten Übung. Somit ist eine Musteranalyse möglich, die zwar keinen Rückschluss auf die tatsächlichen Amplitudenwerte erlaubt, jedoch die anzunehmenden intra- und interindividuellen Amplitudenvarianzen auszugleichen vermag. Die Verwendung der mittleren Rangzahlen an Stelle von einzelnen Amplitudenwerten stellt somit eine Form der Normierung dar. Die kritischen Rangzahldifferenzen wurden mit angegeben, damit unabhängig davon die Analyse im jeweiligen Übungsverlauf möglich ist.

6.2.1.2.1 Atemmuskulatur

Wie in Abbildung 29 deutlich wird, ist der grobe Verlauf der mittleren Rangzahlen der Muskeln innerhalb dieser Gruppe zu beiden Untersuchungszeitpunkten ähnlich. Auffällig ist jedoch, dass bei der Folgeuntersuchung zu Beginn der Übung die Rangzahlen aller drei Muskeln deutlich niedriger sind, womit die Verlaufscharakteristik als koordiniert und deutlich weniger variabel einzuschätzen ist. Insbesondere der ICO5 zeigt in der rechten Abbildung einen deutlich abgesunkenen Verlauf der Rangzahlen im ersten Viertel der Gesangsübung. Weiterhin befindet sich der Gipfel der Rangzahlverläufe in der Nachuntersuchung um eine Auflösungseinheit (somit einem Zeitabschnitt von 10% entsprechend) frühzeitiger als in der Erstuntersuchung und in deutlicher Korrespondenz zum Dehnungsverlauf der Bänder. Die

maximalen Rangzahlen hingegen unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Des Weiteren ist sehr bemerkenswert, dass sich der Rangzahlverlauf des ICO5 in der Folgeuntersuchung zu den Verläufen der anderen Muskeln dieser Gruppe deckungsgleich verhält. Damit erscheint die Koordination innerhalb dieser Muskelgruppe, besonders im Bereich der maximalen Aktivität, deutlich homogener als noch zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung.

6.2.1.2.2 Bauchmuskulatur

Das grobe Koordinationsmuster der einzelnen Muskeln innerhalb dieser Gruppe unterscheidet sich bereits auf den ersten Blick in mehreren Punkten zwischen Erst- und Folgeuntersuchung voneinander. Der OI hebt sich durch einen auffälligen Rangzahlverlauf in beiden Abbildungen von den anderen Muskeln dieser Gruppe ab. In der Erstuntersuchung stellt sich der Rangzahlverlauf des OI während der gesamten Phase der Einatmung kontinuierlich abnehmend dar. In der Folgeuntersuchung fallen die Rangzahlen schon bei 20% der Einatmung unter jene der linken Abbildung ab. Die niedrigste mittlere Rangzahl erreicht der Muskel bei 50% der Einatmung und liegt damit ebenfalls unter jenem der Erstuntersuchung. Bemerkenswert ist ebenfalls ein Aktivitätsanstieg zwischen 60% und 90% der Inspiration, welcher in der Erstuntersuchung lediglich angedeutet erscheint. Beim OE und RA zeigen sich in der Folgeuntersuchung niedrigere Rangzahlen zu Beginn der Einatmung. Damit liegt auch hier eine sehr ausgeprägte Veränderung im Vergleich zur Erstuntersuchung vor. Weiterhin erreichen der OE und der RA ihr Amplitudenmaximum, wie bereits bei den Atemmuskeln beobachtet, etwa eine Zeiteinheit früher als noch in der Erstuntersuchung. Somit befinden sich die maximalen Rangzahlen in der Nachuntersuchung bereits bei 70% der Einatmung.

6.2.1.2.3 Hals- und Nackenmuskulatur

Bei dieser Muskelgruppe kommt es bei der Folgeuntersuchung teilweise zu auffälligen Veränderungen gegenüber der Erstuntersuchung. Sowohl beim SCM als auch beim TD zeigen sich zu Beginn der Einatmung in der Folgeuntersuchung deutlich niedrigere mittlere Rangzahlen. Der SCM in der rechten Abbildung zeigt von 10% bis zu seinem Maximum bei 70% der Einatmung einen sehr kontinuierlichen Aktivitätsanstieg. In der Erstuntersuchung wird die maximale mittlere Rangzahl erst bei 90% der Einatmung erreicht, der Verlauf ist ebenfalls sehr viel ungleichmäßiger. Beim TD fallen, wenn man die Folgeuntersuchung betrachtet, zunächst wesentlich niedrigere mittlere Rangzahlen zu Beginn der Übung auf. In der rechten Abbildung stellt sich der Aktivitätsanstieg bei 50% und 60% der Inspiration

deutlich ausgeprägter dar. In der zweiten Hälfte der Phase der Einatmung nehmen die mittleren Rangzahlen in der Folgeuntersuchung wieder kontinuierlich ab.

6.2.1.2.4 Thoraxmuskulatur

Wie bei den bereits schon beschriebenen Muskelgruppen kommt es auch hier zu Veränderungen der Koordinationsmuster im Studienverlauf. Auch bei den beiden beteiligten Muskeln der Thoraxmuskulatur finden sich zu Beginn der Einatmung niedrigere mittlere Rangzahlen als in der Erstuntersuchung. Bei genauer Betrachtung der mittleren Rangzahlverläufe des SA fallen insbesondere zu Beginn Veränderungen zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten auf. In der Nachuntersuchung fallen die mittleren Rangzahlen innerhalb von 10% um etwa 1,5 Rangzahlen ab. Im Gegensatz dazu zeigt sich in der Erstuntersuchung über einen Zeitabschnitt von 30% lediglich eine Abnahme der mittleren Rangzahlen um einen Zahlenwert. Der allgemeine Verlauf der Rangzahlkurve gestaltet sich in der Folgeuntersuchung, bis zu seinem Maximum bei 70% der Einatmung, deutlich gleichmäßiger als in der Erstuntersuchung. In der rechten Abbildung stellt sich der Abfall der mittleren Rangzahlen, gegen Ende der Übung zwischen 80% und 90% der Einatmung, deutlich steiler dar als in der linken Abbildung zu sehen. Der PM zeigt zum zweiten Untersuchungszeitpunkt zwischen Einatmungsbeginn und 60% einen sehr kontinuierlichen Aktivitätsanstieg, welcher so bei der Erstuntersuchung nicht beobachtet werden kann. Des Weiteren hat sich in der Folgeuntersuchung das Rangzahlmaximum, verglichen mit der Erstuntersuchung, um eine Auflösungseinheit nach links verschoben.

6.2.1.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Bei der vergleichenden Betrachtung dieser Muskelgruppe stellen sich weniger Veränderungen im Verlauf als bei den bisher beschriebenen Muskeln dar. Der QL zeigt auf beiden Abbildungen einen nahezu identischen Rangzahlverlauf. Lediglich zu Beginn und am Ende der Einatmung haben die mittleren Rangzahlen im Vergleich zur Erstuntersuchung leicht abgenommen. Dieses Phänomen findet sich auch beim MF der rechten Abbildung wieder. Die Verlaufskurve der mittleren Rangzahlen des MF wirkt in der Folgeuntersuchung, anders als bei fast allen bereits beschriebenen Muskeln, weniger gleichmäßig als in der Erstuntersuchung. Es kommt, im Vergleich zum ersten Untersuchungszeitpunkt, zu einem auffälligem Aktivitätsanstieg bei 30% sowie bei 80% der Inspiration. Das Rangzahlmaximum findet sich in der rechten Abbildung nicht wie in der Erstuntersuchung bei 70%, sondern erst bei 80% der Einatmung.

6.2.1.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Die in den Abbildungen dargestellten Verlaufskurven der mittleren Rangzahlen der drei beteiligten Muskeln dieser Gruppe sind sich, unter allgemeinen Gesichtspunkten, weitestgehend ähnlich. Auch bei dieser Muskelgruppe zeigen sich in der Folgeuntersuchung zu Beginn der Einatmung niedrigere mittlere Rangzahlen als in der Vergleichsuntersuchung. Der Aktivitätsverlauf beim EI ist, bis auf ein deutlicher ausgeprägtes Maximum in der Folgeuntersuchung, in beiden Abbildungen nahezu identisch. Ebenfalls nur sehr wenige Unterschiede bestehen bei den Verlaufskurven des LD zu beiden Untersuchungszeitpunkten. Erwähnenswert ist hier in der Folgeuntersuchung lediglich ein höheres Rangzahlmaximum bei 80% sowie ein im Vergleich sehr starker Abfall der mittleren Rangzahlen zwischen 80% und 90% der Einatmung. Bemerkenswerte Veränderungen im Studienverlauf finden sich allerdings beim EL, besonders im ersten und letzten Drittel der Einatmungsübung. In der rechten Abbildung stellt sich der Rangzahlabfall zwischen 20% und 30% der Inspiration deutlich steiler dar als in der Vergleichsabbildung, erreicht jedoch nicht so niedrige Werte wie in der Erstuntersuchung. Wesentlich auffälliger ist indes der Kurvenverlauf der Folgeuntersuchung zum Einatmungsende hin. Ganz im Unterschied zur Erstuntersuchung zeigt sich in der rechten Abbildung ein Aktivitätsabfall zwischen 70% und dem Ende der Einatmung. In der linken Abbildung lässt sich nur ein deutlich weniger stark ausgeprägter Abfall der Verlaufskurve ablesen.

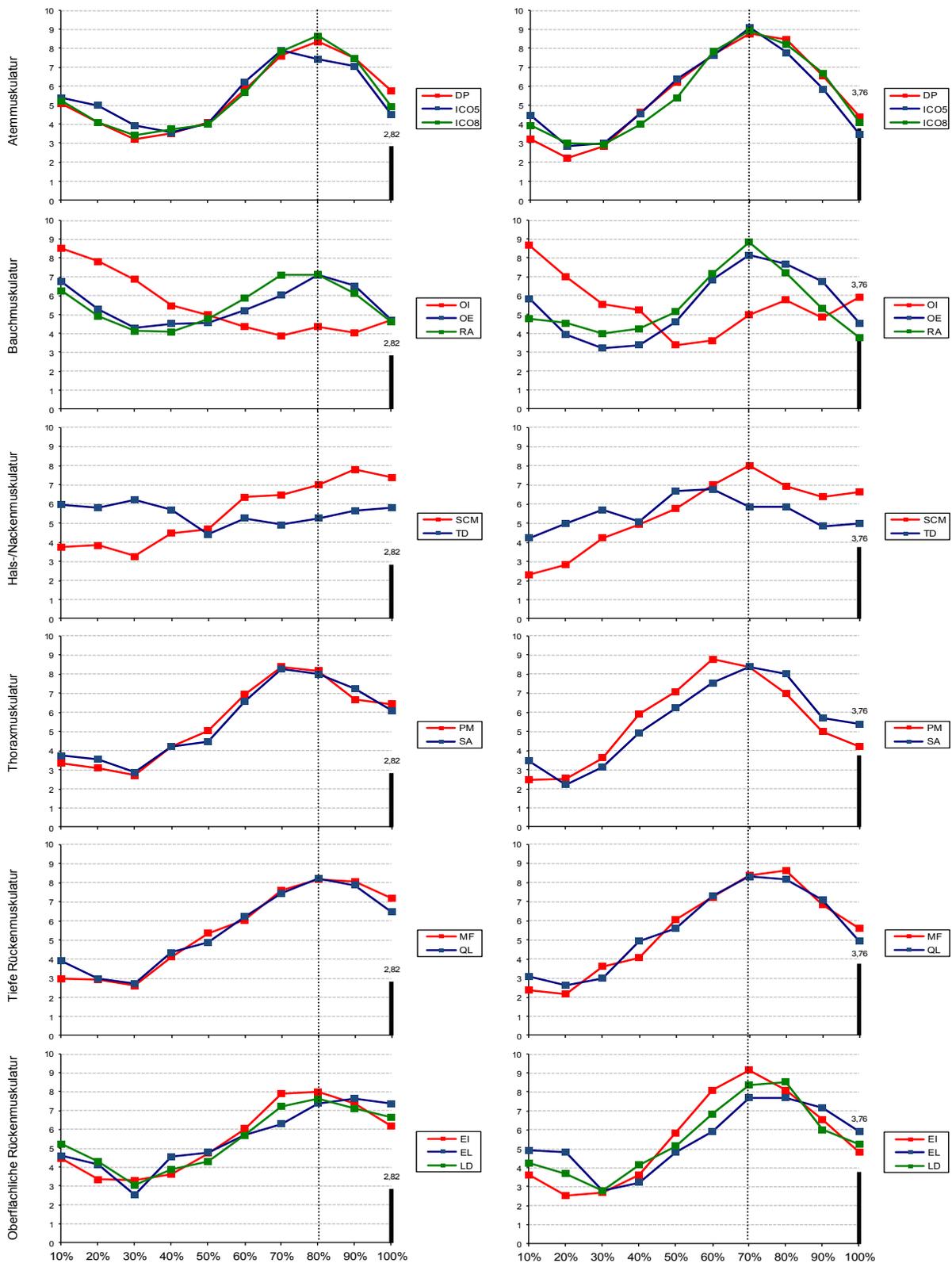


Abbildung 29 Muskelaktivitäten Einatmung: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt sind die mittleren Rangzahlverläufe für die einzelnen Muskelgruppen, zeitlich normiert in 10%-Schritten, während der Phase der Einatmung. Die linken Abbildungen entsprechen jeweils den Daten der Erstuntersuchung, die rechten Abbildungen zeigen die Daten der Folgeuntersuchung. Die kritische Rangzahldifferenz ist zur Orientierung in jedem Diagramm als schwarzer Balken mit aufgeführt. Die angedeuteten vertikalen Linien veranschaulichen eine zeitliche Synchronisierung der Aktivierungsmaxima zum entsprechenden Untersuchungszeitpunkt.

6.2.2 ÜBUNGSVERLAUF

6.2.2.1 Vokalausgleich

6.2.2.1.1 Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung

Abbildung 30 zeigt die Verläufe der Bandauslenkungen der ersten der vier Gesangsübungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten. Wie schon unter 6.2.1.1 bei der Phase der Einatmung beschrieben, stellt sich auch beim Vokalausgleich der Folgeuntersuchung ein deutlich gleichmäßigerer Dehnungsverlauf der drei Bänder während der Übung dar. Das Bauchband zeigt in der Folgeuntersuchung schon zu Beginn der Übung eine deutlich stärkere Dehnung von etwa 80%, als zum ersten Untersuchungszeitpunkt. Die Dehnungsabnahme verläuft dann während der Gesangsübung sehr gleichmäßig. Einen besonders deutlichen Unterschied zur Erstuntersuchung sieht man im ersten Übungsquartel. Bei der Darstellung des Flankenbandes findet sich zu Übungsbeginn in der Folgeuntersuchung eine leicht höhere Ausgangsdehnung. Es nimmt, seinen Umfang betreffend, von allen drei Bändern am stärksten ab und schneidet die Dehnungskurve des Brustbandes in beiden Abbildungen etwa zum gleichen Zeitpunkt. In der Nachuntersuchung stellt sich diese Umfangsabnahme frühzeitiger und steiler dar als im Vergleich dazu in der Erstuntersuchung. Weiterhin können in der Folgeuntersuchung keine negativen Umfangswerte mehr beobachtet werden. Beim Brustband ist die Auslenkung im Gegensatz zum Flankenband zum Start der Gesangsübung etwas geringer und nimmt im Übungsverlauf ähnlich kontinuierlich ab. Besonders am Ende der Übung ist der Dehnungsverlauf wesentlich gleichmäßiger als noch bei der Erstuntersuchung.

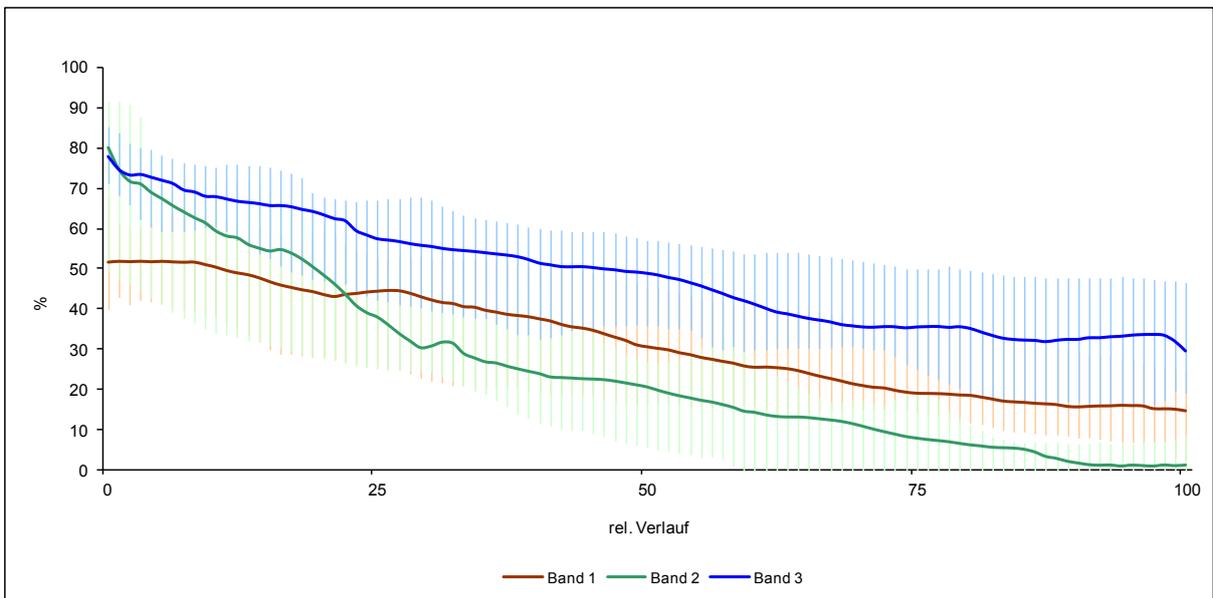
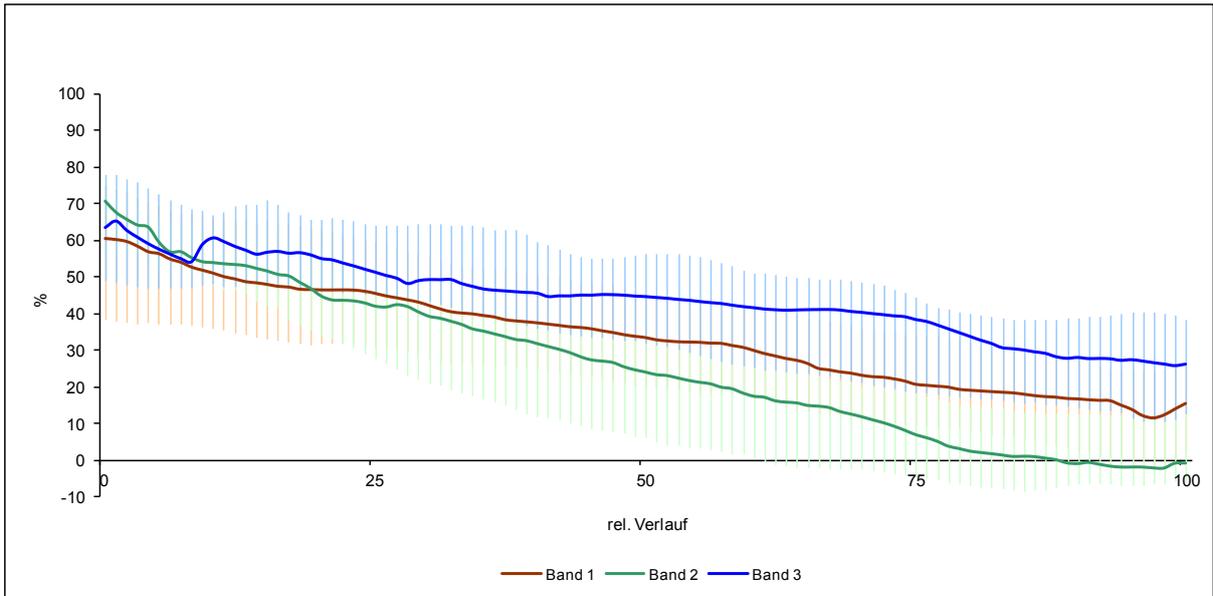


Abbildung 30 Bandauslenkungen Vokalausgleich: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt ist jeweils der mediane Verlauf mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand der relativen Auslenkung jedes einzelnen Bandes in Prozent über alle definierten Bereiche des Vokalausgleichs. Die obere Abbildung entspricht der Erstuntersuchung, die untere Abbildung zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Brustband: Band 1, Flankenband: Band 2, Bauchband: Band 3.

6.2.2.1.2 Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung

6.2.2.1.2.1 Atemmuskulatur

Bei der Betrachtung der Erst- und Folgeuntersuchung des Vokalausgleichs, dargestellt in Abbildung 31, fallen nur sehr geringe Unterschiede auf. Die Koordinationsmuster der einzelnen beteiligten Muskeln sind in beiden Abbildungen nahezu identisch. Zu Beginn der Übung können lediglich beim ICO5 und ICO8 der Folgeuntersuchung minimal niedrigere mittlere Rangzahlen festgestellt werden. Im Vergleich zur Erstuntersuchung, bei der die Rangzahlkurven der drei Muskeln über die gesamte Übung hinweg fast deckungsgleich verlaufen, kommt es in der Folgeuntersuchung zu einer leichten Separierung der Rangzahlverläufe. Das Aktivitätsmaximum ist zu beiden Untersuchungszeitpunkten bei 90% der Gesangsübung zu finden. In der Nachuntersuchung fallen, verglichen mit den Daten zum ersten Untersuchungszeitpunkt, die mittleren Rangzahlen am Ende der Gesangsübung weniger stark ab.

6.2.2.1.2.2 Bauchmuskulatur

Wie bereits bei der Atemmuskulatur unter 6.2.2.1.2.1 beschrieben, zeigt sich bei beiden Abbildungen ein sehr ähnliches Bild. Auffällig ist hier ebenfalls die leichte Separierung der Rangzahlverläufe der beteiligten Muskeln im Vergleich zur Erstuntersuchung, bei welcher der Kurvenverlauf der drei Muskeln erneut fast deckungsgleich erscheint. Bemerkenswert ist bei der Folgeuntersuchung, dass sich die mittleren Rangzahlen der Muskeln zum Zeitpunkt 10% recht deutlich unterscheiden. Bei der Erstuntersuchung verlaufen die Aktivitätskurven zwischen 30% und 70% der Übung sehr gleichmäßig. Bei 80% des Vokalausgleichs kommt es dann zu einem leichten Abfall der Kurve des RA. In der Folgeuntersuchung scheint sich dieses Phänomen umzukehren. So verhält sich das Koordinationsmuster zwischen 70% und 90% der Übung gleichmäßiger, wohingegen es zwischen 30% und 70% der Gesangsübung deutlich ungleichmäßiger erscheint als noch bei der Erstuntersuchung. Das Aktivitätsmaximum wird zu beiden Untersuchungszeitpunkten bei 90% erreicht und unterscheidet sich auch in seiner Ausprägung in beiden Abbildungen nicht voneinander.

6.2.2.1.2.3 Hals- und Nackenmuskulatur

Zu beiden Untersuchungszeitpunkten zeigt sich auch bei dieser Muskelgruppe wieder ein ähnliches Koordinationsmuster der beteiligten Muskeln. Die mittleren Rangzahlen zu Beginn der Übung sind bei beiden Abbildungen nahezu identisch, jedoch gibt es im Übungsverlauf erwähnenswerte Veränderungen. Betrachtet man den Verlauf des SCM der

Folgeuntersuchung, so fällt zunächst auf, dass die Rangzahlkurve zwischen 20% und 30% der Übung deutlich steiler abfällt als bei der Vergleichsuntersuchung. Das Rangzahlminimum erreicht der Muskel in der rechten Abbildung schon bei 40% und damit genau einen Zeitabschnitt früher als bei der Erstuntersuchung. Eine weitere Besonderheit zeigt sich bei 70% der Gesangsübung. Der Anstieg der Rangzahlkurve verläuft in der rechten Abbildung im Vergleich deutlich flacher. Der Kurvenverlauf des TD bietet nur wenige auffällige Unterschiede zwischen den beiden Abbildungen. Bei diesem Muskel nehmen die mittleren Rangzahlen in der Folgeuntersuchung zum Zeitpunkt 20%, verglichen mit der Erstuntersuchung, deutlicher zu. Des Weiteren nehmen die Rangzahlen zwischen 80% und 90% der Übung in der rechten Abbildung auffällig stärker zu. In der Folgeuntersuchung nehmen die Rangzahlen im Vergleich auch zum Übungsende weniger deutlich ab, die beiden Verlaufskurven nähern sich infolgedessen geringer aneinander an.

6.2.2.1.2.4 Thoraxmuskulatur

Bei dieser Muskelgruppe fallen bei der Betrachtung der beiden Abbildungen sehr bemerkenswerte Unterschiede auf. Die Verlaufskurven der mittleren Rangzahlen erscheinen bei der Folgeuntersuchung deutlich gleichmäßiger und kontinuierlicher als noch bei der Erstuntersuchung. Besonders auffällig stellt sich dieses Phänomen beim SA dar. In der rechten Abbildung sind im Übungsverlauf fast keine starken Tendenzen nach oben oder unten mehr festzustellen. Die Verlaufskurve des SA schneidet jene des PM in der rechten Abbildung nur zwischen 20% und 30% und bei etwa 80% der Übung. Im Gegensatz dazu sieht man in der linken Abbildung den ungleichmäßigen Verlauf des Graphen des SA. Hier kommt es im Übungsverlauf mehrfach zu Überschneidungen der beiden Rangzahlkurven. Die mittleren Rangzahlen zu Beginn der Gesangsübung sind zu beiden Untersuchungszeitpunkten nahezu identisch. Die Rangzahlen am Ende der Übung sind, im Vergleich mit der Erstuntersuchung, bei der Folgeuntersuchung leicht angestiegen.

6.2.2.1.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Das Koordinationsmuster ist auch hier in beiden Abbildungen wieder sehr ähnlich. Wesentliche Unterschiede können jedoch im Detail auch bei dieser Muskelgruppe herausgearbeitet werden. Erwähnenswert ist zunächst, dass die Verlaufskurven der beiden Muskeln in der Folgeuntersuchung deutlicher voneinander getrennt erscheinen. Beim MF kann, bis auf ein höheres Rangzahlmaximum zum Zeitpunkt 90%, kein weiterer wesentlicher Unterschied zu Voruntersuchung dargestellt werden. Der QL hingegen zeigt neben niedrigeren Rangzahlen zu Übungsbeginn auch einen in der Erstuntersuchung fehlenden

Rangzahlanstieg vom ersten zum zweiten Zeitabschnitt der Gesangsübung. Wie schon beim MF derselben Muskelgruppe kann auch bei diesem Muskel eine höhere maximale Rangzahl bei 90% der Übung nachgewiesen werden. Zusätzlich haben die mittleren Rangzahlen am Ende des Vokalausgleichs in der Nachuntersuchung deutlich zugenommen.

6.2.2.1.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Auch bei der oberflächlichen Rückenmuskulatur stimmen die Koordinationsmuster der einzelnen Muskeln, vergleicht man die beiden Untersuchungszeitpunkte miteinander, weitestgehend überein. Die mittleren Rangzahlen zum Zeitpunkt 10% sind in der Folgeuntersuchung, wie schon oft aufgezeigt werden konnte, auch hier wieder bei allen beteiligten Muskel dieser Gruppe leicht abgesunken. Der Kurvenverlauf beim EI zeigt, bis auf leichte Rangzahlzunahmen bei 50% und 70% der Übung, keinen nennenswerten Unterschied zur Voruntersuchung. In der rechten Abbildung kommt es beim LD bei 40% und 50% zu einer leichten Abnahme der mittleren Rangzahlen. Die linke Abbildung der Erstuntersuchung zeigt hier ein gegenläufiges Verhalten. Bis auf leicht niedrigere mittlere Rangzahlen am Ende der Gesangsübung bei der Folgeuntersuchung können keine weiteren Veränderungen zur Erstuntersuchung festgestellt werden. Eine bemerkenswerte Veränderung fällt jedoch beim EL in der ersten Hälfte und am Ende der Gesangsübung in der rechten Abbildung auf. Die mittleren Rangzahlen verändern sich, ganz im Gegensatz zum deutlichen Abfall von 10% bis 30% der Übung in der Erstuntersuchung, bis zum Zeitpunkt 50% nur sehr wenig. Danach steigt die Verlaufskurve in der rechten Abbildung auf ein höheres Rangzahlmaximum beim Zeitabschnitt 90% an. Ebenfalls deutlicher als noch in der Voruntersuchung zeigt sich in der Folgeuntersuchung das Absinken der mittleren Rangzahlen vom Zeitabschnitt 90% bis zum Ende der Gesangsübung hin.

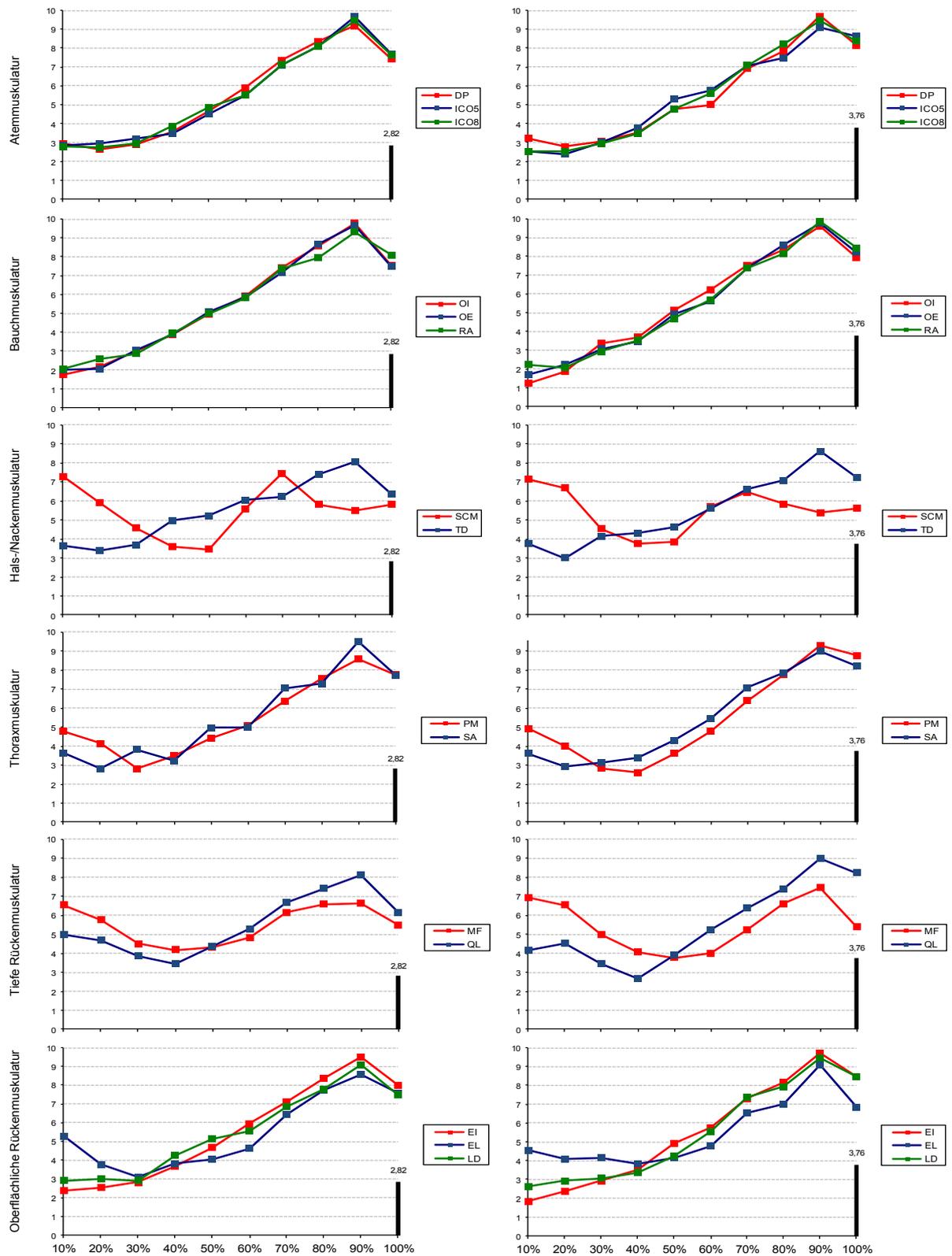


Abbildung 31 Muskelaktivitäten Vokalausgleich: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt sind die mittleren Rangzahlverläufe für die einzelnen Muskelgruppen, zeitlich normiert in 10%-Schritten, über alle Bereiche des Vokalausgleichs. Die linken Abbildungen entsprechen jeweils den Daten der Erstuntersuchung, die rechte Spalte zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Die kritische Rangzahldifferenz ist zur Orientierung in jedem Diagramm als schwarzer Balken mit aufgeführt.

6.2.2.2 Dreiklang

6.2.2.2.1 Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung

Die in Abbildung 32 dargestellten Bandauslenkungen beider Untersuchungszeitpunkte zeigen im Vergleich, wie bereits bei der Einatmung unter 6.2.1.1 sowie beim Vokalausgleich unter 6.2.2.1.1 beobachtet, z.T. deutliche Unterschiede im Übungsverlauf. Am auffälligsten ist auch hier wieder der wesentlich gleichmäßigere Dehnungsverlauf der drei Bänder in der Folgeuntersuchung. Ganz besonders ist dies beim Bauchband zu sehen. Das Dehnungsniveau liegt bei diesem Band bei der Folgeuntersuchung zu Beginn der Gesangsübung deutlich über dem der Erstuntersuchung. Der weitere Verlauf ist wesentlich kontinuierlicher und das Niveau der Auslenkung fällt zu keinem Zeitpunkt unter das des Brustbandes. Auch beim Dreiklang nimmt der Umfang des Flankenbandes, wie schon beim Vokalausgleich, vom größten Wert zu Beginn der Übung im Verlauf am deutlichsten ab. Auch bei diesem Band werden über die gesamte Übung hinweg weniger Tendenzen nach oben oder unten beobachtet, speziell im letzten Übungsviertel. Die Dehnungskurve des Brustbandes startet auf einem niedrigeren Niveau in der Folgeuntersuchung und wird im Übungsverlauf nur vom Flankenband geschnitten.

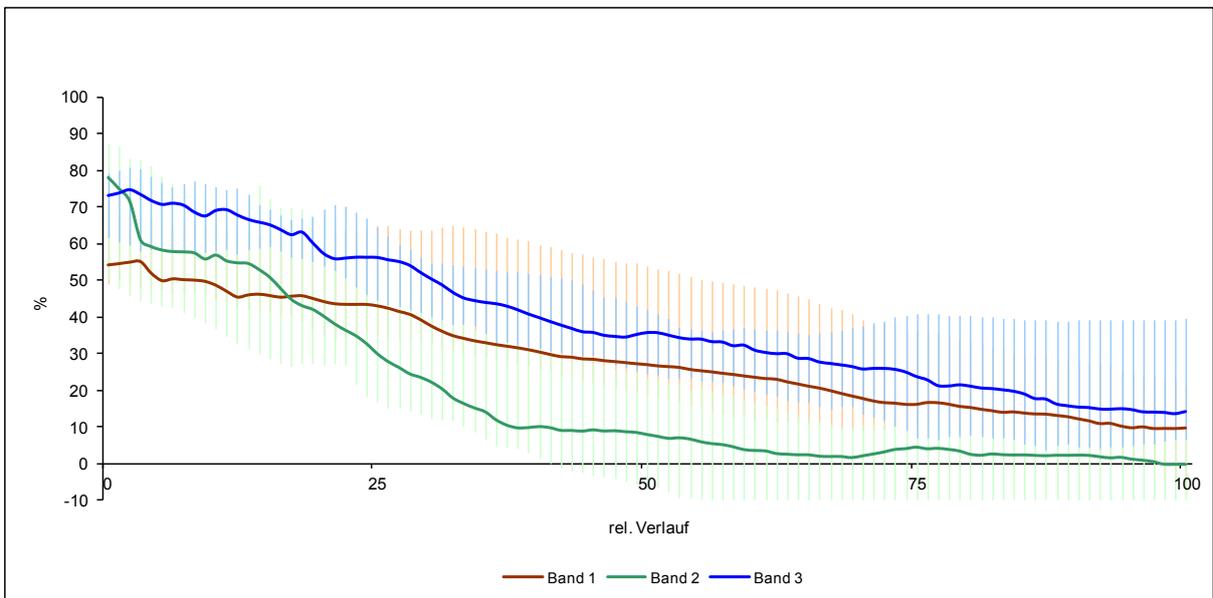
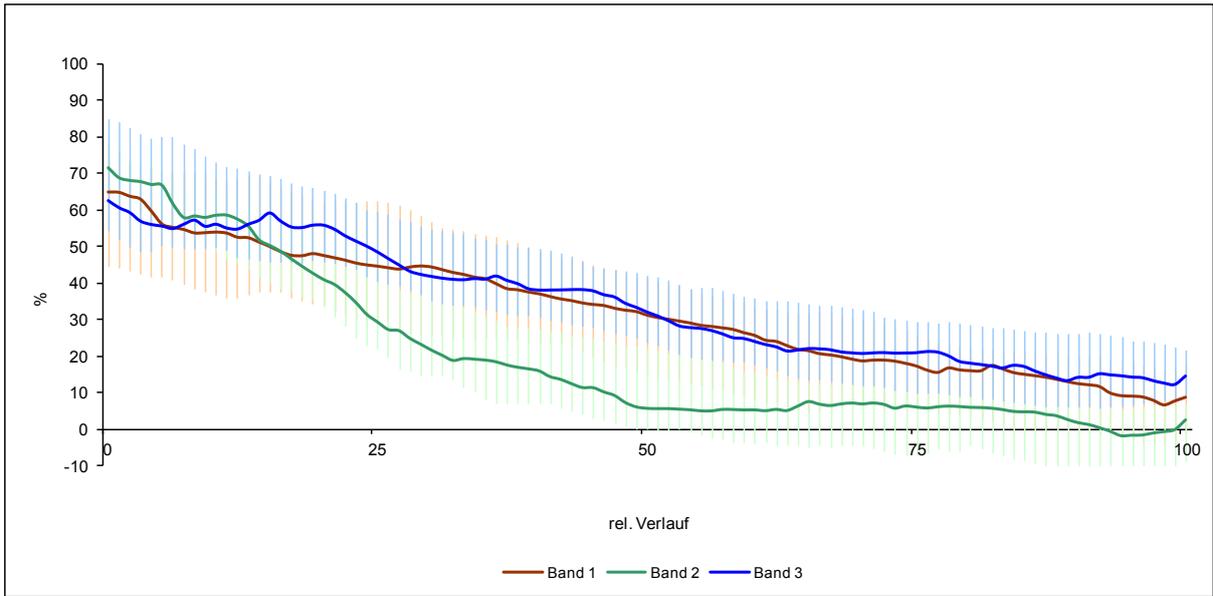


Abbildung 32 Bandauslenkungen Dreiklang: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt ist jeweils der mediane Verlauf mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand der relativen Auslenkung jedes einzelnen Bandes in Prozent über alle definierten Bereiche des Dreiklangs. Die obere Abbildung entspricht der Erstuntersuchung, die untere Abbildung zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Brustband: Band 1, Flankenband: Band 2, Bauchband: Band 3.

6.2.2.2.2 Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung

6.2.2.2.2.1 Atemmuskulatur

Wie die Abbildung 33 verdeutlicht, kommt es bei der Betrachtung der Koordinationsmuster von Erst- und Folgeuntersuchung bei dieser Muskelgruppe teilweise zu deutlichen Veränderungen im Verlauf der Studie. Hauptsächlich finden sich diese im letzten Drittel der Gesangsübung. Zu Beginn der Gesangsübung fällt in der Folgeuntersuchung zunächst auf, anders als beim Vokalausgleich unter 6.2.2.1.2.1 beschrieben, dass die mittleren Rangzahlen nicht niedriger geworden sind. Am deutlichsten zu sehen ist dieses Phänomen beim ICO5. Bemerkenswert ist jedoch, dass bei der Erstuntersuchung der Rangzahlverlauf aller Muskeln dieser Gruppe gleichmäßig zunimmt. Alle drei Muskeln erreichen erst zum Übungsende ihre maximalen Rangzahlen. Bei der Folgeuntersuchung, dargestellt in der rechten Abbildung, zeigt sich hingegen ein anderes Bild. Alle Muskeln dieser Gruppe erreichen ihr Rangzahlmaximum etwa bei 70% der Übung. Die mittleren Rangzahlen fallen dann zum Zeitpunkt 90% bei allen Muskeln wieder leicht ab, um danach zum Ende der Gesangsübung wieder leicht anzusteigen. Damit stellt sich das Koordinationsmuster, besonders im letzten Abschnitt der Übung, gegenüber der Erstuntersuchung deutlich verändert dar.

6.2.2.2.2.2 Bauchmuskulatur

Bei dieser Muskelgruppe zeigt sich im Studienverlauf ein ähnliches Bild wie schon bei der Atemmuskulatur. Auch hier unterscheidet sich das Koordinationsmuster der Folgeuntersuchung, besonders in der zweiten Übungshälfte, teilweise deutlich von dem der Erstuntersuchung. Die Werte der mittleren Rangzahlen sind zum Beginn der Übung in der rechten Abbildung nur minimal niedriger als in der linken Abbildung. Bei der Erstuntersuchung steigen die mittleren Rangzahlen wieder bis zum Übungsende hin kontinuierlich an. Eine leichte Abnahme der Rangzahlen ist beim OE und RA zwischen 70% und 80% der Übung festzustellen. Beim OI nehmen die Werte der mittleren Rangzahlen im Verlauf der Übung kontinuierlich zu. Bemerkenswert ist bei der rechten Abbildung, wie schon unter 6.2.2.2.2.1 beschrieben, ein nunmehr deutliches Abfallen der Rangzahlverläufe ab 70% der Übung bei allen beteiligten Muskeln dieser Gruppe. Verglichen mit der Erstuntersuchung stellt dies ein auffällig verändertes Koordinationsmuster dar. Zum Übungsende hin kommt es zu einem minimalen Aktivitätsanstieg, sehr gut zu sehen beim RA, wobei dieser nicht die Höhe der maximalen Rangzahlen bei 100% der Gesangsübung der Erstuntersuchung erreicht.

6.2.2.2.3 Hals- und Nackenmuskulatur

Die Koordinationsmuster der Hals- und Nackenmuskulatur zeigen teilweise deutliche Veränderungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten. Der Rangzahlverlauf des SCM nimmt im Verlauf eher ab, wohingegen die mittleren Rangzahlen des TD eher zunehmen. Die Verlaufskurve des SCM erscheint in der Folgeuntersuchung etwas gleichmäßiger als noch in der Erstuntersuchung. In der rechten Abbildung sind die mittleren Rangzahlen im Vergleich zur linken Abbildung in ihren Werten etwas niedriger. Gleichermaßen bleibt der starke Abfall der Rangzahlkurve bei 20% der Übung in der Folgeuntersuchung aus. Das Rangzahlmaximum in der zweiten Übungshälfte bei 70% wird in der rechten Abbildung gleichmäßiger erreicht als in der Vergleichsabbildung, zudem nehmen die Rangzahlen zum Übungsende hin wieder deutlicher ab. Der Rangzahlverlauf des TD zeigt sich besonders in der ersten Übungshälfte zum Zeitpunkt der Folgeuntersuchung stark verändert. Die mittleren Rangzahlen sind zu Beginn der Übung deutlich größer als in der Erstuntersuchung. Weiterhin nehmen sie im Verlauf bis etwa zum Zeitpunkt 40% kontinuierlich ab, um danach im Anschluss stark anzusteigen. In der zweiten Übungshälfte nehmen die Rangzahlen zum Zeitpunkt 80% noch einmal ab und steigen zum Ende der Übung hin wieder auf ein Maximum an. In der linken Abbildung fällt auf, dass das Rangzahlniveau bis zum Zeitpunkt 70% kontinuierlich zunimmt. Eine leichte Abnahme der mittleren Rangzahlen ist zwischen 70% und Übungsende zu verzeichnen.

6.2.2.2.4 Thoraxmuskulatur

Bei der Betrachtung dieser Muskelgruppe fallen, wie schon bei der Hals- und Nackenmuskulatur unter 6.2.2.2.3 beschrieben, teils sehr deutliche Unterschiede der Koordinationsmuster der Muskulatur zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf. Die beiden Kurven der mittleren Rangzahlen des PM und SA verlaufen bei der Folgeuntersuchung, im Gegenteil zur Erstuntersuchung, nahezu identisch. Beim SA zeigt sich zunächst, dass die mittleren Rangzahlen zu Beginn der Gesangsübung in der rechten Abbildung leicht angestiegen sind. Der Verlauf der Rangzahlkurven ist hingegen zu beiden Untersuchungszeitpunkten ähnlich, ausgenommen dem etwas stärkeren Abfall der Rangzahlen vom Zeitpunkt 70% bis 90% der Gesangsübung in der Folgeuntersuchung. Bemerkenswert sind jedoch die Veränderungen beim Kurvenverlauf des PM. In der linken Abbildung nehmen die Rangzahlen vom Zeitpunkt 20% bis zum Übungsende hin kontinuierlich zu. Im Gegensatz dazu fällt bei der Folgeuntersuchung ein Abfall der Verlaufskurve der mittleren Rangzahlen zwischen 70% und Übungsende auf. Somit gibt es

bei der Folgeuntersuchung zwei Zeitpunkte (70% und 100% der Übung) mit einem Rangzahlmaximum. Bei der Erstuntersuchung hingegen sind die maximalen Rangzahlen lediglich am Übungsende zu finden.

6.2.2.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Die Koordinationsmuster der beteiligten Muskeln der tiefen Rückenmuskulatur unterscheiden sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten schon auf den ersten Blick voneinander. Die Werte der Rangzahlen zu Beginn der Übung sind in der Folgeuntersuchung, wie schon häufiger beschrieben, leicht niedriger als noch bei der Erstuntersuchung. Die Verlaufskurve des MF erscheint in der ersten Übungshälfte der Folgeuntersuchung, verglichen mit der Erstuntersuchung, deutlich gleichmäßiger. Ein Rangzahlminimum findet sich zum Zeitpunkt 30% der Übung. Im Übungsverlauf nehmen die mittleren Rangzahlen bis zu einem Maximum bei 70% kontinuierlich zu. In der linken Abbildung erreicht der MF sein Rangzahlmaximum erst bei 90% der Gesangsübung. Der Kurvenverlauf vom Beginn bis zum Maximum zeigt in der Erstuntersuchung deutlich mehr Tendenzen nach oben und unten als bei der Folgeuntersuchung. Ebenfalls auffällig ist, dass in der rechten Abbildung die Rangzahlen des MF zum Zeitpunkt 80% und 100% noch einmal deutlich abnehmen. Der Verlauf der mittleren Rangzahlen des QL stellt sich in der rechten Abbildung wesentlich gleichmäßiger dar als in der Vergleichsabbildung. Die Abnahme der Rangzahlkurve in der Erstuntersuchung zum Zeitpunkt 80% fehlt in der Folgeuntersuchung ganz. Die maximalen Rangzahlen werden in der rechten Abbildung, verglichen mit der linken Abbildung, schon zwei Zeitabschnitte früher erreicht.

6.2.2.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Das Koordinationsmuster der Muskeln der oberflächlichen Rückenmuskulatur unterscheidet sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf den ersten Blick hauptsächlich im letzten Übungsabschnitt maßgeblich voneinander. So fällt zunächst auf, dass die mittleren Rangzahlen zu Übungsbeginn, bis auf einige größere Werte beim EI der Folgeuntersuchung, fast identisch sind. Bemerkenswert ist der Kurvenverlauf von 30% bis 60% der Gesangsübung. Bei der Folgeuntersuchung verhalten sich die Kurven der drei beteiligten Muskeln im Hinblick auf ihre Koordination fast deckungsgleich. Ganz im Gegensatz dazu zeigen die Kurven der Erstuntersuchung im selben Übungsabschnitt deutliche Tendenzen nach oben oder unten. Ab 70% der Übung nimmt der Anstieg aller drei Verlaufskurven der linken Abbildung leicht ab. Das Rangzahlmaximum wird dann zum Ende der Gesangsübung hin erreicht. In diesem Bereich, etwa dem letzten Übungsdrittel, kommt es nun zu erheblichen

Veränderungen bei der Folgeuntersuchung. Das Rangzahlmaximum wird bei allen drei Muskeln schon bei etwa 70% der Übung erzielt, im Übungsverlauf nehmen die Rangzahlen jedoch wieder ab. Ein erneuter leichter Rangzahlenanstieg kann beim EI und LD beobachtet werden, während die Aktivität beim EL zum Übungsende hin sogar noch weiter absinkt.

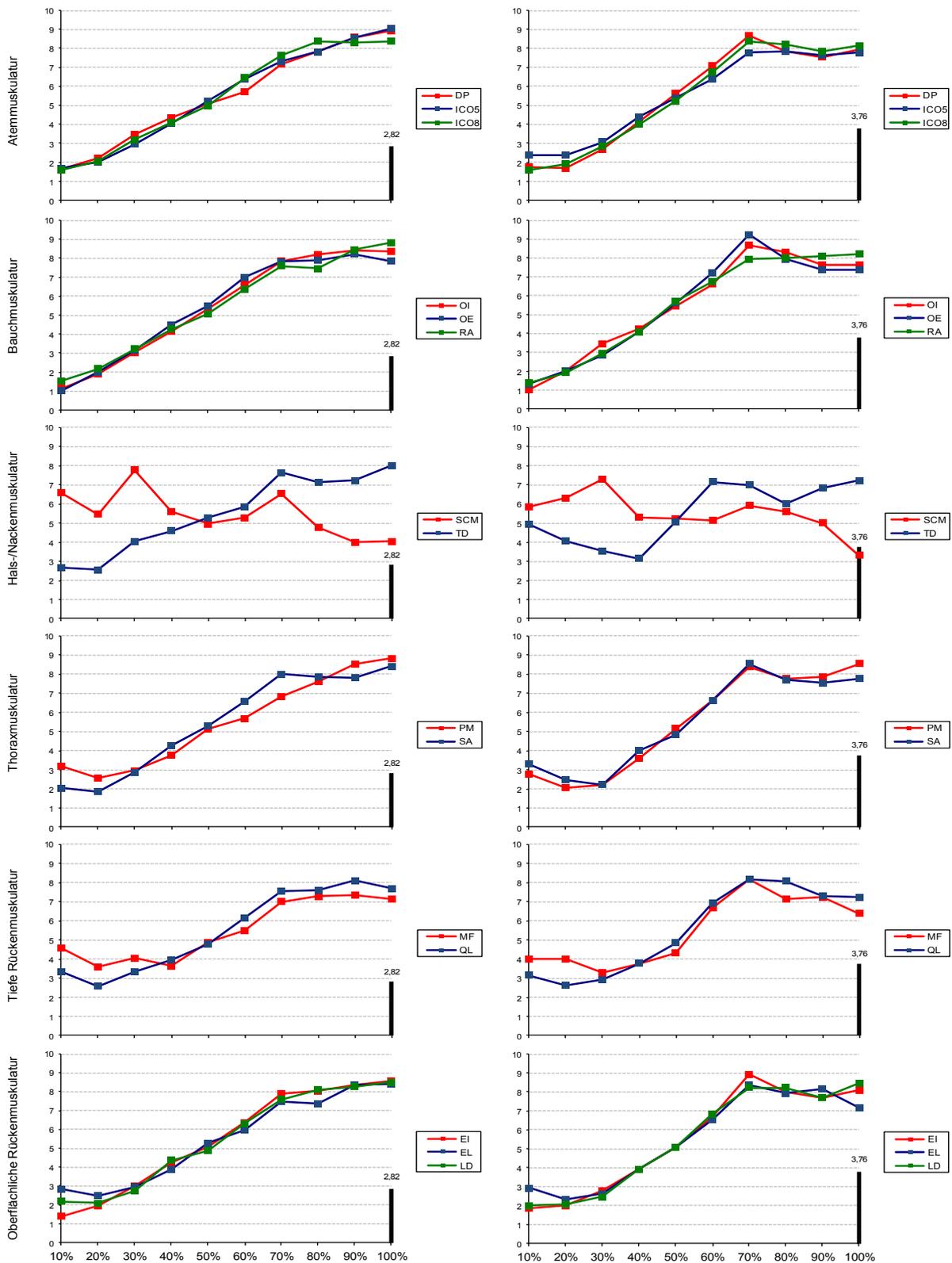


Abbildung 33 Muskelaktivitäten Dreiklang: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt sind die mittleren Rangzahlverläufe für die einzelnen Muskelgruppen, zeitlich normiert in 10%-Schritten, über alle Bereiche des Dreiklangs. Die linken Abbildungen entsprechen jeweils den Daten der Erstuntersuchung, die rechte Spalte zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Die kritische Rangzahldifferenz ist zur Orientierung in jedem Diagramm als schwarzer Balken mit aufgeführt.

6.2.2.3 Tonleiter

6.2.2.3.1 Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung

In Abbildung 34 wird deutlich, dass der Verlauf der Dehnungskurven der drei Bänder beim Singen der Tonleiter nicht so kontinuierlich ausfällt wie bei den bereits beschriebenen Gesangsübungen. Wie in der Erstuntersuchung bereits erwähnt, entspricht dieser wellenförmige Verlauf der Kurven jenem, der mit aufgezeichneter Tonspur und ist somit übungsbedingt. Bemerkenswert ist auch bei dieser Gesangsübung im Vergleich zur Erstuntersuchung das schon zu Beginn höhere Dehnungsniveau des Bauchbandes von fast 80%. Der Kurvenverlauf erscheint bei der Folgeuntersuchung deutlich wellenförmiger und gleichmäßiger. Das Flankenband zeigt, im Gegensatz zur Erstuntersuchung, zu Beginn der Übung bei der Folgeuntersuchung ein niedrigeres Dehnungsniveau als das Bauchband. Auch hier erscheint der Dehnungsverlauf deutlich wellenförmiger, besonders während der ersten zwei Drittel der Tonleiter. Die Dehnung des Bandes nimmt zu beiden Untersuchungszeitpunkten im Vergleich zu den übrigen Bändern im Übungsverlauf erneut am stärksten ab. Das Brustband verhält sich, bis auf einen gleichmäßigeren Verlauf in der unteren Abbildung, im Vergleich zu beiden Studienzeitpunkten fast identisch.

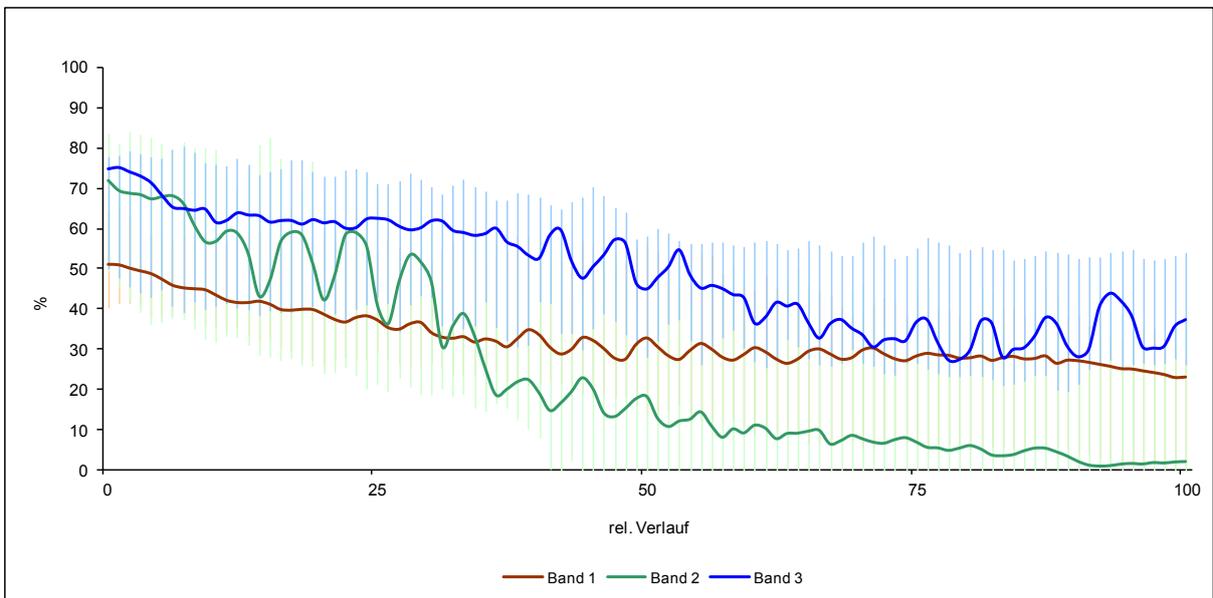
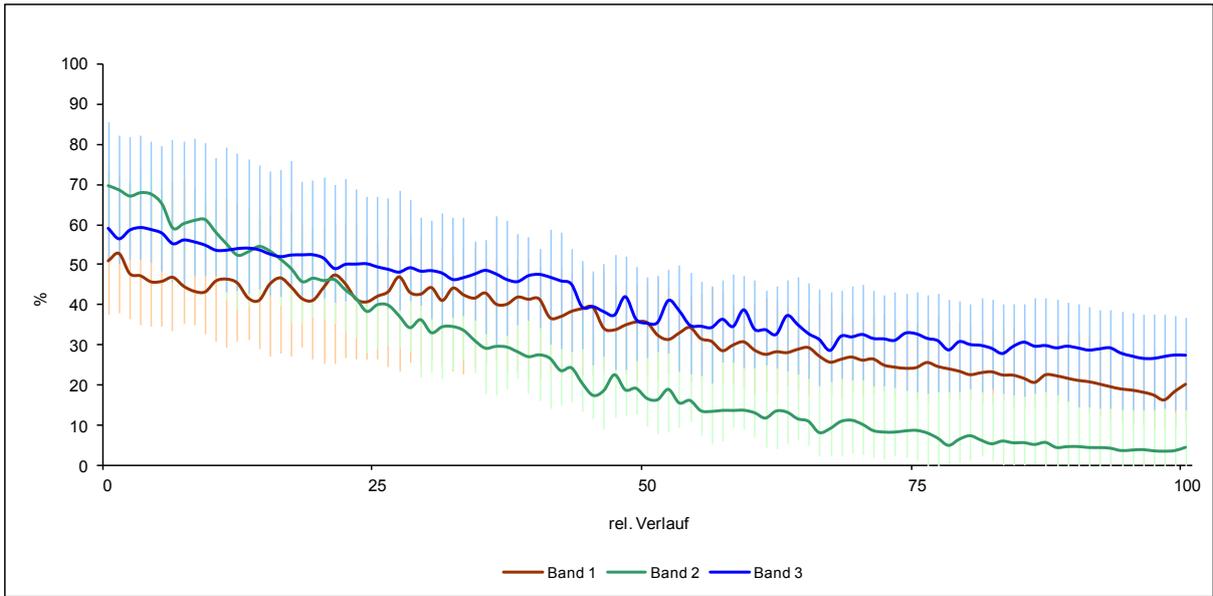


Abbildung 34 Bandauslenkungen Tonleiter: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt ist jeweils der mediane Verlauf mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand der relativen Auslenkung jedes einzelnen Bandes in Prozent im Endtonbereich der Tonleiter. Die obere Abbildung entspricht der Erstuntersuchung, die untere Abbildung zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Brustband: Band 1, Flankenband: Band 2, Bauchband: Band 3.

6.2.2.3.2 Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung

6.2.2.3.2.1 Atemmuskulatur

Vergleicht man das Koordinationsmuster der Erst- und Folgeuntersuchung der einzelnen Muskeln dieser Gruppe miteinander, so fallen teilweise deutliche Veränderungen auf. Besonders gut zu erkennen sind diese in der zweiten Übungshälfte. Die Rangzahlen zu Übungsbeginn sind bei allen Muskeln in beiden Abbildungen nahezu identisch, es kann lediglich eine minimale Zunahme beim ICO5 und eine Abnahme der mittleren Rangzahlen beim ICO8 nachgewiesen werden. In beiden Abbildungen nehmen die Rangzahlen aller Muskeln bis zum Übungsmittelpunkt bei 50% zu. Bei der Erstuntersuchung nehmen die Rangzahlen nach einem erreichten Maximum in der Mitte der Gesangsübung bis zum Übungsende hin wieder leicht ab. Eine leichte Zunahme der Rangzahlwerte im weiteren Kurvenverlauf kann beim ICO5 und beim ICO8 bei 70% der Übung beobachtet werden. Der Rangzahlverlauf der einzelnen Muskeln unterscheidet sich in diesem Abschnitt bei der Folgeuntersuchung maßgeblich von dem eben beschriebenen. So nehmen die Rangzahlen des ICO5 und des ICO8 nach dem Zeitpunkt 50% noch weiter bis zu einem Maximum bei 60% zu. Im Übungsverlauf stellen sich die Rangzahlkurven immer im Wechsel mit zunehmender und abnehmender Tendenz dar. Beim ICO5 sind diese Unterschiede zur Erstuntersuchung am deutlichsten zu beobachten.

6.2.2.3.2.2 Bauchmuskulatur

Bei dieser Muskelgruppe treten die erwähnenswerten Unterschiede in Bezug auf die Muskelkoordination ebenfalls hauptsächlich erst in der zweiten Hälfte der Gesangsübung auf. Die Rangzahlen zu Beginn der Übung sind in der Folgeuntersuchung beim OE sowie dem RA nur minimal höher als in der Vergleichsuntersuchung. Der Rangzahlverlauf unterscheidet sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten bis etwa zur Übungshälfte, wie schon bei der Atemmuskulatur unter 6.2.2.3.2.1 beschrieben, nur sehr wenig voneinander. Einzig der RA zeigt zum Zeitpunkt 30% und 40% der Folgeuntersuchung leicht höhere mittlere Rangzahlwerte als noch bei der Erstuntersuchung. In der linken Abbildung nehmen die Rangzahlen nach einem Maximum bei 50% wieder ab, um dann, mit Ausnahme des OE, bis zum Zeitpunkt 90% wieder leicht anzusteigen. Zum Übungsende hin nehmen die Rangzahlwerte bei allen beteiligten Muskeln wieder ab. In der rechten Abbildung fällt auf, dass das Rangzahlniveau beim OI und RA noch weiter bis etwa 60% der Übung ansteigt und somit einen Zeitabschnitt später sein Maximum erreicht als in der Vergleichsabbildung. Der weitere Kurvenverlauf stellt sich hier erneut, wie schon bei der Atemmuskulatur, mit deutlich

mehr Tendenzen nach oben und unten dar. Die offensichtlichsten Veränderungen im Vergleich zur Erstuntersuchung zeigt jedoch der RA in der zweiten Hälfte der Gesangsübung. Es kommt hier, verglichen mit der linken Abbildung, zwischen 50% und 60% sowie zwischen 80% und 100% zu einem entgegengesetzten Kurvenverlauf.

6.2.2.3.2.3 Hals- und Nackenmuskulatur

Betrachtet man die beiden untersuchten Muskeln dieser Muskelgruppe, so fallen beim SCM nur wenige, jedoch beim TD teilweise sehr große Veränderungen im Studienverlauf auf. Die Rangzahlkurve des SCM verläuft in beiden Abbildungen sehr ähnlich. Die Rangzahlwerte zu Übungsbeginn sowie der Verlauf bis zum Maximum bei 50% sind zu beiden Untersuchungszeitpunkten fast identisch. Ab dem Zeitpunkt 60% der Gesangsübung fallen indes leichte Veränderungen in der rechten Abbildung auf. Der Rangzahlverlauf nimmt zwischen 60% und 90% der Übung weniger stark ab. Die ausgeprägte Rangzahlzunahme des SCM zum Zeitpunkt 90% bei der Erstuntersuchung stellt sich in der Folgeuntersuchung wesentlich schwächer ausgeprägt dar. Der Kurvenverlauf erscheint somit in der zweiten Übungshälfte in der rechten Abbildung deutlich gleichmäßiger. Der Verlauf der mittleren Rangzahlen beim TD zeigt bezogen auf die beiden Abbildungen jedoch über den gesamten Übungsverlauf Auffälligkeiten. In der Folgeuntersuchung sind die Rangzahlwerte zum Übungsbeginn deutlich angestiegen. Im Verlauf der Gesangsübung nehmen die Rangzahlen zum Zeitpunkt 20% ab, um danach wieder leicht, bis etwa 40% der Übung, anzusteigen. Der Verlauf der mittleren Rangzahlen nimmt danach sehr gleichmäßig bis zum Zeitpunkt 70% ab. Es schließt sich ein weiterer kontinuierlicher Anstieg der Rangzahlen bis zum Übungsende hin an. Damit unterscheidet sich der Verlauf der mittleren Rangzahlen beim TD grundlegend von dem der Erstuntersuchung.

6.2.2.3.2.4 Thoraxmuskulatur

Die Rangzahlkurven verhalten sich auf den ersten Blick bei den hier untersuchten Muskeln dieser Gruppe ähnlich. Die Rangzahlwerte zu Beginn der Übung sind in der Folgeuntersuchung bei beiden Muskeln angestiegen. Nach initial leicht größeren Rangzahlwerten beim PM in der rechten Abbildung nehmen diese zum Zeitpunkt 20% jedoch wieder sehr deutlich ab. Der Rangzahlverlauf bis zum Zeitpunkt 50% erfolgt in der rechten Abbildung wesentlich ungleichmäßiger als in der linken Abbildung. Ein weiterer bemerkenswerter Unterschied zeigt sich bei 90% der Gesangsübung. Hier erreicht die Rangzahlkurve in der Erstuntersuchung ihren maximalen Wert und im Vergleich dazu nehmen die Rangzahlen in der Folgeuntersuchung maßgeblich ab. Das Rangzahlmaximum

wird in der Nachuntersuchung erst am Ende der Gesangsübung erreicht. Beim SA zeigen sich im Studienverlauf deutlich weniger Veränderungen betreffend der Rangzahlverläufe der untersuchten Muskeln. In beiden Abbildungen befindet sich der Zeitpunkt des Rangzahlmaximums bei 50% der Übung. In der Folgeuntersuchung nehmen die Rangzahlen im Vergleich mit der Erstuntersuchung während der Übung bis zum Zeitpunkt 90%, deutlicher ab. Ab diesem Zeitpunkt steigen die Rangzahlen bis zum Übungsende noch einmal an, was einen weiteren wesentlichen Unterschied zur Erstuntersuchung darstellt.

6.2.2.3.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Wie schon bei der Thoraxmuskulatur unter 6.2.2.3.2.4 beschrieben, ist der Kurvenverlauf der untersuchten Muskeln bei dieser Gruppe ebenfalls auf den ersten Blick wenig unterschiedlich. Die mittleren Rangzahlen zu Beginn der Übung sind zu beiden Untersuchungszeitpunkten fast identisch. Auffällig ist jedoch, dass bei beiden Muskeln die Rangzahlabnahme zum Zeitpunkt 20% in der Folgeuntersuchung ausbleibt. Beim QL haben im Vergleich zur linken Abbildung die mittleren Rangzahlen bei 30% der Übung wesentlich zugenommen. Bei beiden Muskeln verschiebt sich das Rangzahlmaximum in der Folgeuntersuchung um einen Zeitabschnitt nach hinten auf 60% der Gesangsübung. Beim QL nehmen die Rangzahlwerte zwischen 60% und 70% der Übung wesentlich deutlicher ab als in der Vergleichsuntersuchung. Der MF zeigt in der Folgeuntersuchung ein ähnliches Verhalten, auch bei ihm nehmen die Rangzahlwerte im Vergleich mit der Erstuntersuchung zwischen den Zeitpunkten 60% und 90%, stärker ab. Eine Rangzahlabnahme ab dem Zeitpunkt 90% bis zum Übungsende hin, wie in der linken Abbildung ersichtlich, kann in der Vergleichsabbildung der Folgeuntersuchung nicht beobachtet werden.

6.2.2.3.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Die Muskeln dieser Gruppe zeigen im Vergleich zwischen Erst- und Folgeuntersuchung sehr offensichtliche Veränderungen im Studienverlauf. Diese Unterschiede betreffen erneut, wie schon bei fast allen bereits beschriebenen Muskeln, bevorzugt die zweite Hälfte der Gesangsübung. Bis zum Zeitpunkt 50% verlaufen die Rangzahlkurven der beiden Abbildungen weitestgehend ähnlich. Einzige Unterschiede sind leicht höhere mittlere Rangzahlen des LD zum Zeitpunkt 10% und 20% in der linken Abbildung sowie gestiegene Rangzahlwerte beim EL zum Zeitpunkt 40% bei der Folgeuntersuchung. In der Erstuntersuchung erreichen alle untersuchten Muskeln dieser Gruppe ihr Rangzahlmaximum bei etwa der Mitte der Gesangsübung. Im Übungsverlauf nehmen die Rangzahlen bei allen Muskeln, mit Ausnahme einer leichten Zunahme beim EI zum Zeitpunkt 80%, bis zum Ende

der Gesangsübung kontinuierlich ab. In der Folgeuntersuchung erreichen der EI sowie der EL ihre Rangzahlmaxima erst bei 60% und der LD sogar erst bei 70 % der Übung. Bei allen drei Muskeln fallen die Rangzahlkurven nach Erreichen des Maximalwertes bis zum Zeitpunkt 90% gleichmäßig ab. Von diesem Zeitabschnitt ausgehend steigen bis zum Ende der Gesangsübung bei allen drei Muskeln die Werte der Rangzahlen, ganz im Gegensatz zur Vergleichsuntersuchung, wieder an. Der deutlichste Anstieg kann beim LD beobachtet werden. Auffällig ist ebenfalls, dass die einzelnen Rangzahlverläufe in der rechten Abbildung wesentlich separierter erscheinen als in der linken Abbildung.

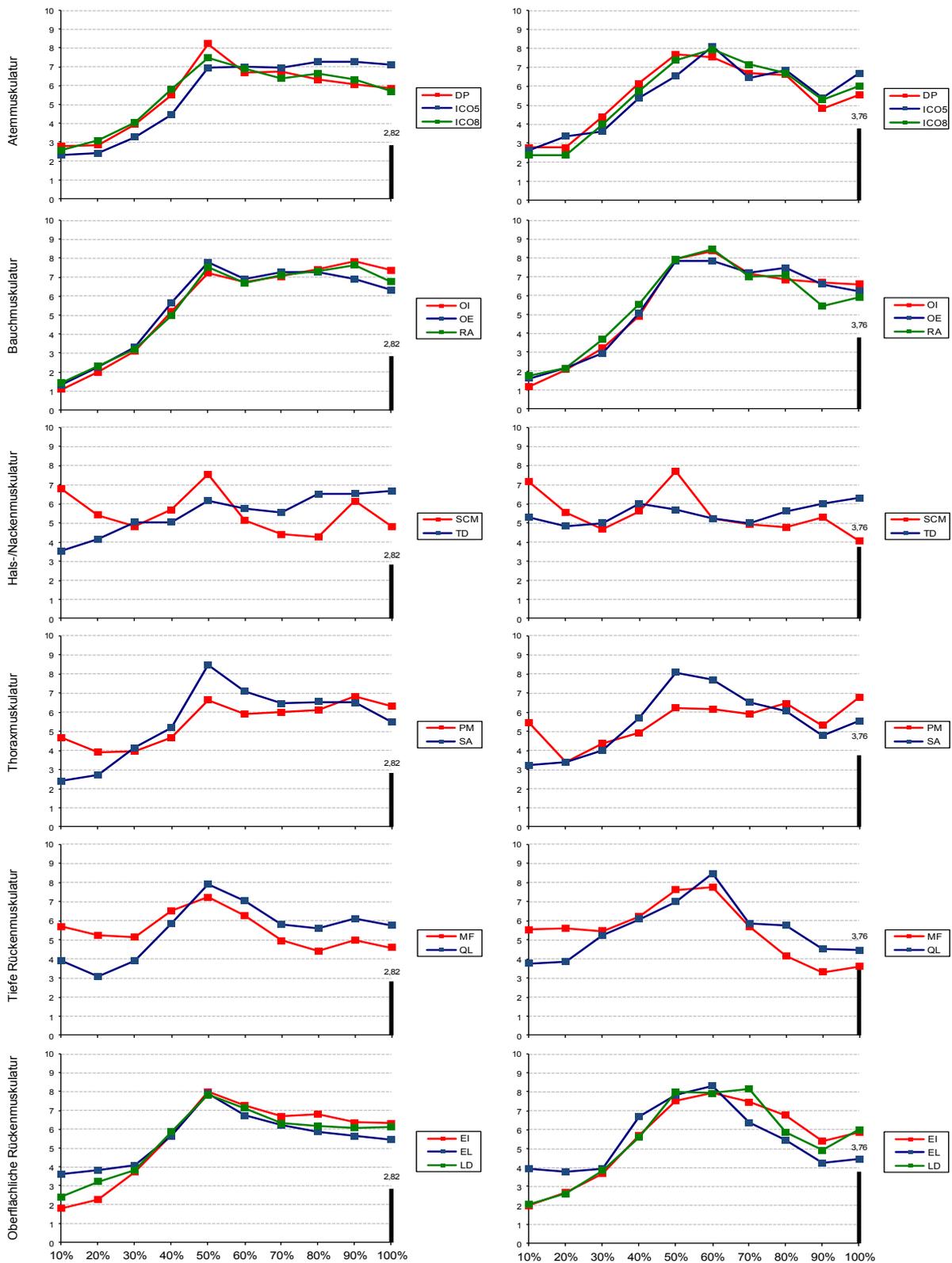


Abbildung 35 Muskelaktivitäten Tonleiter: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt sind die mittleren Rangzahlverläufe für die einzelnen Muskelgruppen, zeitlich normiert in 10%-Schritten, im Endtonbereich der Tonleiter. Die linken Abbildungen entsprechen jeweils den Daten der Erstuntersuchung, die rechte Spalte zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Die kritische Rangzahldifferenz ist zur Orientierung in jedem Diagramm als schwarzer Balken mit aufgeführt.

6.2.2.4 Schwellton

6.2.2.4.1 Bandauslenkungen der Erst- und Folgeuntersuchung

In Abbildung 36 sind teilweise wesentliche Veränderungen im Kurvenverlauf der drei Bänder zwischen Erst- und Folgeuntersuchung dargestellt. Zunächst fällt besonders der sehr kontinuierliche und gleichmäßige Verlauf der Dehnungskurven in der unteren Abbildung auf, sehr eindrucksvoll zu sehen beim Bauch- und Brustband. Wie bereits beim Dreiklang unter 6.2.2.2.1 beschrieben, erscheinen die beiden Bänder in der Folgeuntersuchung wesentlich besser voneinander getrennt. Es kommt in der unteren Abbildung zu keinen Überschneidungen der beiden Dehnungskurven mehr. Des Weiteren ist, verglichen mit der Erstuntersuchung, das Dehnungsniveau des Bauchbandes zu Beginn und auch über den gesamten Verlauf der Übung erhöht. Eine weitere auffällige Veränderung im Studienverlauf findet sich bei der Dehnungskurve des Flankenbandes. Zum einen ist das Anfangsniveau in der unteren Abbildung angestiegen und zum anderen sinkt dieses Niveau schneller ab. Ein Kurvenverlauf im negativen Bereich, wie in der oberen Abbildung zu sehen, kann bei der Folgeuntersuchung, zu sehen in der unteren Abbildung, nicht beobachtet werden.

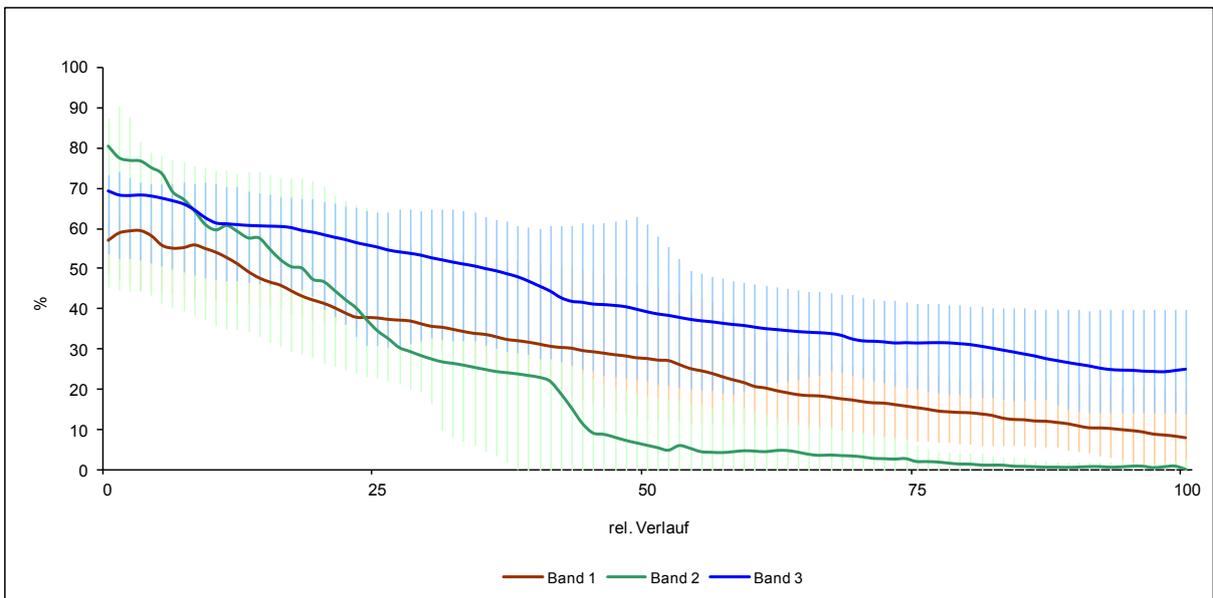
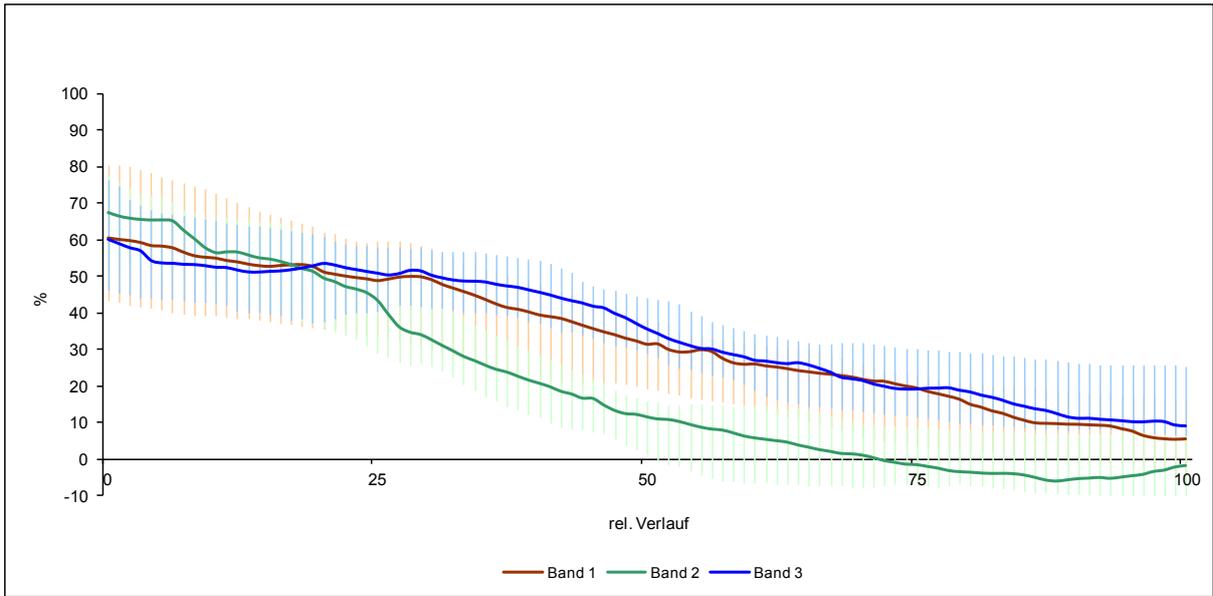


Abbildung 36 Bandauslenkungen Schwellton: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt ist jeweils der mediane Verlauf mit zugehörigem oberem und unterem Quartilsabstand der relativen Auslenkung jedes einzelnen Bandes in Prozent über alle definierten Bereiche des Schwelltons. Die obere Abbildung entspricht der Erstuntersuchung, die untere Abbildung zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Brustband: Band 1, Flankenband: Band 2, Bauchband: Band 3.

6.2.2.4.2 Muskelaktivitäten der Erst- und Folgeuntersuchung

6.2.2.4.2.1 Atemmuskulatur

Betrachtet man beide Abbildungen vergleichend, so fallen schon auf den ersten Blick Veränderungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf. Die mittleren Rangzahlwerte sind zu Beginn der Gesangsübung in der Folgeuntersuchung bei allen drei untersuchten Muskeln leicht angestiegen. Ein weiterer wesentlicher Unterschied ist die Höhe der ersten Rangzahlmaxima der untersuchten Muskulatur zum Zeitpunkt 60%. In der Folgeuntersuchung, dargestellt in der rechten Abbildung, liegt das Maximum recht deutlich über dem der Erstuntersuchung. Im Übungsverlauf nehmen die mittleren Rangzahlen zum Zeitpunkt 70% und 80% in der rechten Abbildung noch einmal deutlich ab. In der Erstuntersuchung fällt diese Rangzahlabnahme nur minimal aus. In beiden Abbildungen nehmen die mittleren Rangzahlwerte zum Ende der Übung wieder zu. Die Rangzahlmaxima aller Muskeln befinden sich in der linken Abbildung am Ende der Gesangsübung, in der rechten Abbildung trifft dies lediglich für den ICO5 zu.

6.2.2.4.2.2 Bauchmuskulatur

Bei dieser Muskelgruppe zeigt sich ein ähnliches Bild wie schon bei der Atemmuskulatur unter 6.2.2.4.2.1 beschrieben. Die Rangzahlen zu Beginn der Gesangsübung unterscheiden sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten nicht nennenswert voneinander. Auch hier erreichen die untersuchten Muskeln zum Zeitpunkt 60% ein erstes Rangzahlmaximum. Wie schon bei der Atemmuskulatur fallen auch hier die Rangzahlkurven im Übungsverlauf wieder in beiden Abbildungen ab. Eine auffällige Ausnahme stellt der OI in der Erstuntersuchung dar. Bei diesem Muskel zeigen die mittleren Rangzahlen nur minimale Abnahmen und steigen dann kontinuierlich bis zum Ende weiter an. In der Erstuntersuchung erreichen alle beteiligten Muskeln ihr Rangzahlmaximum erst zum Ende der Übung. In der Folgeuntersuchung kann man jedoch fast von einem zweigipfligen Maximum der Rangzahlen sprechen. Die Verlaufskurven der mittleren Rangzahlen aller Muskeln fallen zwischen den Zeitpunkten 60% und 100% wesentlich deutlicher ab als in der Vergleichsuntersuchung.

6.2.2.4.2.3 Hals- und Nackenmuskulatur

Die beiden Muskeln dieser Gruppe zeigen besonders in der ersten Hälfte der Gesangsübung wesentliche Veränderungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten. Die mittleren Rangzahlen stellen sich zu Beginn der Übung in der Folgeuntersuchung beim SCM niedriger und beim TD deutlich höher dar als in der Erstuntersuchung. Beide Rangzahlkurven verlaufen in der

rechten Abbildung, ganz im Gegensatz zur Erstuntersuchung, zwischen den Zeitpunkten 10% und 30% der Übung nahezu deckungsgleich. Im Übungsverlauf nehmen die Rangzahlwerte des TD jedoch zu und übersteigen die des SCM in der Folgeuntersuchung zwischen 70% und 80% der Gesangsübung. Die Rangzahlkurven des SCM fallen nach den Maxima bei 50%, in beiden Abbildungen identisch, zum Zeitpunkt der Folgeuntersuchung kontinuierlich bis zum Übungsende hin ab. In der linken Abbildung steigen die Rangzahlwerte im letzten Zeitabschnitt noch einmal leicht an. Weitere Unterschiede können auch beim Verlauf der mittleren Rangzahlen des TD beobachtet werden. So nehmen die Rangzahlwerte in der Erstuntersuchung bis etwa zum Zeitpunkt 50% gleichmäßig zu, um danach kurz deutlich anzusteigen und zum Ende hin anschließend weiter kontinuierlich zuzunehmen. In der Folgeuntersuchung kann hingegen eine gleichmäßige Rangzahlzunahme bis zum Übungsende beobachtet werden. Im Verlauf der Übung kommt es zu drei auffälligen Rangzahlabnahmen jeweils zu den Zeitpunkten 20%, 50% und 80%. Damit unterscheidet sich der Verlauf der Rangzahlkurven des TD in beiden Abbildungen maßgeblich voneinander.

6.2.2.4.2.4 Thoraxmuskulatur

Bei der Thoraxmuskulatur und ihren untersuchten Muskeln fallen in beiden Abbildungen auf den ersten Blick nur wenige Veränderungen auf. Der grobe Verlauf der Rangzahlkurven ist zu beiden Untersuchungszeitpunkten sehr ähnlich. Erwähnenswert ist jedoch eine Zunahme der Rangzahlen des SA vom Übungsbeginn bis zum Zeitpunkt 30% im Vergleich zur Erstuntersuchung. In diesem Übungsdrittel kann auch ein etwas anderes Rangzahlverhalten beim PM beobachtet werden. In der Folgeuntersuchung erfolgte die Rangzahlzunahme zum ersten Rangzahlmaximum erst ab dem Zeitpunkt 30% und somit etwa einen Zeitabschnitt später als in der Vergleichsuntersuchung. In beiden Abbildungen erreichen die Muskeln ein erstes Rangzahlmaximum zum Zeitpunkt 60%. Danach nehmen die Rangzahlwerte in der Erstuntersuchung zwischen 70% und 80% wieder ab und steigen zum Ende der Übung noch einmal sehr gleichmäßig an. In der Folgeuntersuchung gestaltet sich die zweite Hälfte der Gesangsübung den Rangzahlverlauf betreffend weniger gleichmäßig. Die Rangzahlkurven nehmen, wie auch in der Erstuntersuchung, zum Zeitpunkt 70% bei beiden Muskeln ab. Ein wesentlicher Unterschied ist jedoch, dass die mittleren Rangzahlwerte des SA zwischen 70% und 80% der Übung sogar unter jene des PM abfallen. Dieser Sachverhalt bleibt bis zum Übungsende unverändert und ist damit deutlich abweichend von der Erstuntersuchung.

6.2.2.4.2.5 Tiefe Rückenmuskulatur

Bei dieser Muskelgruppe kommt es teilweise zu deutlichen Veränderungen der Koordinationsmuster der einzelnen Muskeln im Studienverlauf. Die mittleren Rangzahlen zu Beginn der Gesangsübung unterscheiden sich bei beiden gemessenen Muskeln zu beiden Untersuchungszeitpunkten kaum voneinander. Betrachtet man den Verlauf der Rangzahlkurve des MF, so fallen in beiden Abbildungen teilweise erhebliche Unterschiede auf. Die Rangzahlwerte nehmen zum Zeitpunkt 20% sehr deutlich ab und steigen dann in der Nachuntersuchung gleichmäßig bis zu einem Maximum bei 70% an. Damit wird das Rangzahlmaximum in der Folgeuntersuchung im Bereich der Übungsmitte etwa einen Zeitabschnitt später erreicht als in der Erstuntersuchung. Im weiteren Verlauf der Gesangsübung nehmen die Rangzahlen in der rechten Abbildung bis zum Zeitpunkt 90% ab und steigen danach noch einmal zum Ende der Übung an. Der QL verhält sich ebenfalls zu beiden Untersuchungszeitpunkten deutlich verschieden. Die mittleren Rangzahlen nehmen in der Folgeuntersuchung bis zum Zeitpunkt 30% ab und steigen unmittelbar danach bis zum Zeitpunkt 60% der Gesangsübung stark an. Bis zum Übungsende nehmen die Rangzahlkurven in beiden Abbildungen kontinuierlich zu, jedoch werden in der Folgeuntersuchung niedrigere Rangzahlwerte erreicht.

6.2.2.4.2.6 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Der Verlauf der mittleren Rangzahlkurven zeigt auch bei dieser Muskelgruppe Veränderungen im Studienverlauf. Die Rangzahlwerte zum Übungsbeginn haben sich in beiden Abbildungen, ausgenommen einer leichten Zunahme der Rangzahlen beim EI in der Folgeuntersuchung, fast nicht verändert. Ein erwähnenswerter Unterschied zur Erstuntersuchung zeigt sich beim EL, bei dem die Zunahme der Rangzahlwerte schon ab dem Zeitpunkt 20% erfolgt und damit einen Zeitabschnitt früher als in der linken Abbildung. In beiden Abbildungen erreichen die Muskeln ihre Rangzahlmaxima bei etwa 60% der Gesangsübung. Auffällig ist, dass die Rangzahlkurven über die gesamte Übung hinweg in der Folgeuntersuchung deutlich separierter erscheinen. Gegen Ende der Übung nehmen die Rangzahlen der Muskeln in der Erst- und der Folgeuntersuchung noch einmal zu. Eine wesentliche Ausnahme stellt hier der EL der rechten Abbildung dar, bei dem es zu keiner weiteren nennenswerten Rangzahlzunahme mehr kommt. Weiterhin kann beim LD in der Nachuntersuchung, anders als in der Vergleichsuntersuchung, keine Rangzahlabnahme zwischen den Zeitpunkten 60% und 90 % beobachtet werden.

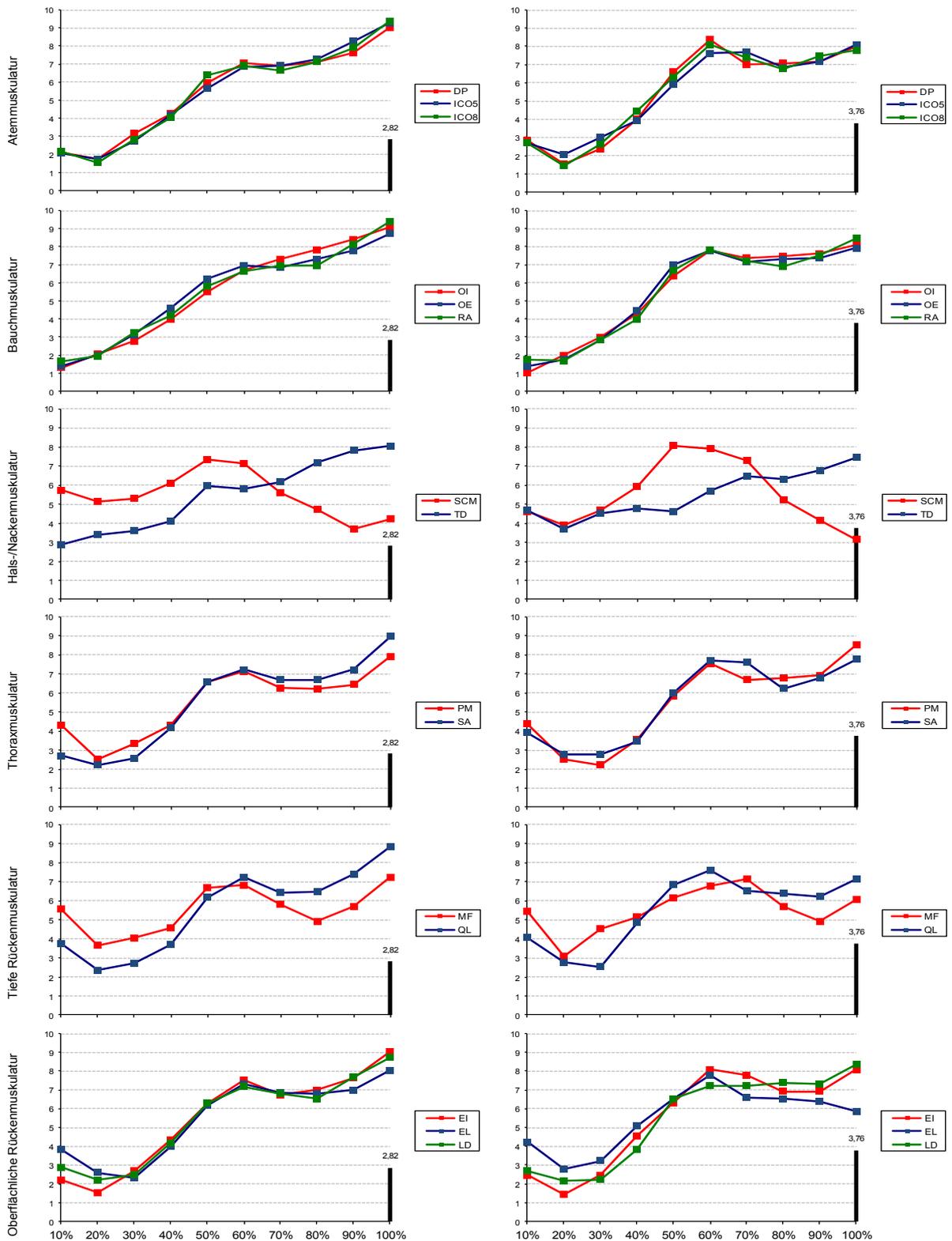


Abbildung 37 Muskelaktivitäten Schwellton: Erst- und Folgeuntersuchung im Vergleich. Dargestellt sind die mittleren Rangzahlverläufe für die einzelnen Muskelgruppen, zeitlich normiert in 10%-Schritten, über alle definierten Bereiche des Schwelltons. Die linken Abbildungen entsprechen jeweils den Daten der Erstuntersuchung, die rechte Spalte zeigt die Daten der Folgeuntersuchung. Die kritische Rangzahldifferenz ist zur Orientierung in jedem Diagramm als schwarzer Balken mit aufgeführt.

7 DISKUSSION

Aufgrund des großen Umfangs des Ergebnisteils erfolgt einleitend eine zusammenfassende Darstellung der ermittelten Ergebnisse. Um eine Vergleichbarkeit der Daten zu beiden Untersuchungszeitpunkten sowie eine bessere Übersichtlichkeit und Strukturierung der vorliegenden Arbeit zu gewährleisten, wird bewusst von der Einteilung in zeitunabhängige und zeitabhängige Betrachtungen abgewichen. Die untersuchten Muskelgruppen werden, wie auch schon bei der Auswertung der Erstuntersuchung von Jähkel (2014) vorgenommen, jeweils für die Phase der Einatmung sowie für die durchgeführten Gesangsübungen zusammenfassend dargestellt und interpretiert. In diesem Abschnitt wird erneut häufig auf den auf 100% normierten Zeitverlauf der Einatmungsphase sowie der Gesangsübungen Bezug genommen. Eine ausführliche Beschreibung dieser zeitlichen Normierung der Übungen wurde bereits unter 5.4.2 vorgenommen. Anschließend werden die postulierten Hypothesen ausführlich besprochen.

7.1 ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

7.1.1 EINATMUNG

7.1.1.1 Atemmuster

Zu beiden Untersuchungszeitpunkten kommt es während der Einatmungsphase erwartungsgemäß zu einer Zunahme des Bandumfanges im Bereich der Brust, der Flanken und des Bauches. Die stärkste Dehnung findet sich im Bereich des Flankenbandes, da Lunge und Thorax hier physiologisch die beste Möglichkeit zur Expansion besitzen (Schmidt et al. 2011). Die Umfangszunahme stellt sich bei der Folgeuntersuchung jedoch deutlich gleichmäßiger dar als bei der Erstuntersuchung (Jähkel 2014). Zum einen kann ein größerer Umfang besonders im Bereich der Flanken schon zu einem früheren Zeitpunkt während der Einatmungsphase erreicht werden. Zum anderen kann diese maximale Dehnung im Thorax- und Bauchbereich bis zum Ende der Einatmung gehalten werden. Diese Umstellung des Atemmusters ist Ausdruck einer koordinativen Optimierung des gesangstechnischen Atemstiles im Studienverlauf.

7.1.1.2 Atemmuskulatur

Die Atemmuskulatur zeigt in der Einatmungsphase in der Erst- und Folgeuntersuchung einen ähnlichen Rangzahlverlauf. Bemerkenswert ist eine zunächst stattfindende Abnahme der mittleren Rangzahlen bis zum Zeitpunkt 30% bei der Untersuchung zu Studienbeginn und 20% bei der Untersuchung nach vier Jahren Gesangsausbildung. Erst danach erfolgt eine deutliche Zunahme der Rangzahlwerte, welche während der Einatmung zum Zeitpunkt 80% bei der Erstuntersuchung und 70% bei der Folgeuntersuchung wieder abnehmen. Werden die Rangzahlen der Atemmuskeln mit den Dehnungsverläufen der Bänder verglichen, so ist zu vermuten, dass die Atemmuskulatur während der Einatmung die Dehnung des Brustkorbes besonders im Bereich der Flanken sowie im Bereich der Brust und des Bauches unterstützt. Die anfängliche Abnahme der mittleren Rangzahlen ist dadurch zu erklären, dass die passive Expansionstendenz des Brustkorbes für die Umfangszunahme der drei Bänder, und somit für die Bewegung aus der Atemruhelage heraus, verantwortlich ist. Dieses Phänomen wurde bereits bei der Erstuntersuchung von Jähkel (2014) beobachtet und beschrieben.

7.1.1.3 Bauchmuskulatur

Die untersuchten Bauchmuskeln zeigen zu beiden Untersuchungszeitpunkten einen ähnlichen Rangzahlverlauf. Betrachtet man den OE sowie den RA, so finden sich nur sehr gering ausgeprägte Unterschiede zwischen Erst- und Folgeuntersuchung. Bei beiden Muskeln kommt es zunächst innerhalb der ersten 30% des Einatmungsverlaufes zu einer Rangzahlabnahme. Dieses Phänomen wurde bereits bei der Atemmuskulatur unter 7.1.1.2 beschrieben. Erst danach nehmen die mittleren Rangzahlen des OE sowie des RA bis etwa zum Zeitpunkt 70% deutlich zu. Bei der Folgeuntersuchung wird jeweils ein auffällig höheres Rangzahlmaximum erreicht. Somit kann geschlussfolgert werden, dass sich die Koordination im Hinblick auf eine zeitliche Synchronisation beider Muskeln zum Ende der Einatmung im Laufe der Gesangsausbildung verbessert hat. Eine weitere bemerkenswerte Veränderung während des Gesangsstudiums findet sich beim Rangzahlverhalten des OI. So zeigt der Muskel bei der Untersuchung zu Beginn der Gesangsausbildung noch einen, im Vergleich zu den anderen beiden Bauchmuskeln, deutlich entgegengesetzten Verlauf der Rangzahlen (Jähkel 2014). In der Folgeuntersuchung nähert sich der Rangzahlverlauf des OI deutlich an jenen des OE sowie des RA an. Erkennbar ist ein deutlicher Rangzahlenanstieg ab der Hälfte der Einatmungsphase. Folglich scheint der Muskel inspiratorischen Komponenten hauptsächlich in Form einer Stabilisierung des unteren Brustkorbes (Löfqvist et al. 1984, Hirano et al. 1969) zu entwickeln bzw. deutlich zu verstärken. In der Erstuntersuchung (Jähkel 2014) ist dieses

Phänomen zum Zeitpunkt 80% nur angedeutet zu beobachten. Dies kann als ein direktes Beispiel für die Umorganisation der Muskelkoordination im Verlauf der Gesangsausbildung verstanden werden.

Zusammenfassend betrachtet, zeigt sich in der Folgeuntersuchung ein wesentlich gleichmäßigerer Verlauf der mittleren Rangzahlen der beteiligten Muskeln dieser Gruppe.

7.1.1.4 Hals- und Nackenmuskulatur

Bei diesen Muskelgruppen fallen ebenfalls ausgeprägte Unterschiede zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten auf. Der SCM hat durch das Anheben des oberen Brustkorbes eine entscheidende Funktion als Atemhilfsmuskel (Aumüller et al. 2007). Erwartungsgemäß gibt es deutliche Gemeinsamkeiten zwischen dem Dehnungsverlauf des Brustbandes und den Veränderungen der mittleren Rangzahlen des SCM. Besonders gut zu erkennen ist dies an der diskreten Zunahme des Umfangs des Brustbandes und der Rangzahlzunahme zum Endpunkt der Einatmung. Bei der Betrachtung der Folgeuntersuchung fällt, verglichen mit der Ausgangsuntersuchung, zu Beginn ein herabgesetztes Rangzahlniveau auf. Der weitere Rangzahlverlauf während der Einatmungsphase wirkt beim SCM in der Folgeuntersuchung im Wesentlichen zu den obligaten Atemmuskeln zeitlich synchronisiert. Somit scheint sich die Atemhilfsfunktion bei diesem Muskel im Laufe der Gesangsausbildung noch zu verstärken. Beim TD sind in der Folgeuntersuchung ebenfalls Veränderungen gegenüber der Erstuntersuchung zu beobachten. Bei der Folgeuntersuchung fallen deutlich niedrigere mittlere Rangzahlen zu Beginn der Einatmung auf. Es folgt eine Abnahme der Rangzahlwerte im mittleren Abschnitt. Im Anschluss zeigt sich allerdings eine deutliche Zunahme der Rangzahlen zu den Zeitpunkten 40% bis 70%, welche anschließend zum Ende der Einatmung wieder abnehmen. Im Gegensatz dazu wurde in der Erstuntersuchung von Jähkel (2014) der Rangzahlverlauf des TD eher als gleichbleibend und somit nicht inspiratorisch wirkend beschrieben.

Folglich können die zu erkennenden Zunahmen der Rangzahlwerte und die somit inspiratorische Wirkung des TD gerade im mittleren Abschnitt als Folge der Gesangsausbildung gewertet werden. Demnach scheint es auch bei dieser Muskelgruppe zu einer Umorganisation der Muskelkoordination zu kommen.

7.1.1.5 Thoraxmuskulatur

Im Vergleich zu den bereits besprochenen Muskeln sind bei dieser Muskelgruppe deutlich weniger Veränderungen zwischen den beiden Untersuchungszeitpunkten auszumachen. Die Beteiligung des PM als Atemhilfsmuskel ist, wie schon bei Jähkel (2014) beschrieben, eher kritisch zu sehen. Auch in der Folgeuntersuchung kommt es zu einer deutlichen Abnahme der mittleren Rangzahlen, während es zu einer deutlichen Umfangszunahme der Brust- und Flankenbänder kommt. Ein wesentlicher Grund dafür ist die Durchführung der Messungen in aufrechter Körperposition mit herabhängenden Armen. Ohne Fixierung der Arme kann der PM seine unterstützende Funktion bei der Einatmung nur begrenzt umsetzen (Aumüller et al.

2007). PM sowie SA zeigen jedoch erneut zu Beginn der Einatmung in der Folgeuntersuchung leicht niedrigere Rangzahlwerte, wobei es zusätzlich zu einem frühzeitigeren Anstieg der Rangzahlen kommt. Wie unter 7.1.1.2 bei der Atemmuskulatur bereits beobachtet, zeigt sich zunächst, vermutlich aufgrund der passiven Expansionstendenz des Brustkorbes, eine Abnahme der mittleren Rangzahlwerte. Insbesondere beim SA zeigt sich nach vier Jahren Gesangsausbildung im Vergleich zur Ausgangsuntersuchung ein gleichmäßigerer Rangzahlverlauf während der gesamten Phase der Einatmung.

7.1.1.6 Tiefe Rückenmuskulatur

Bei dieser Muskelgruppe kommt es, wie schon bei der unter 7.1.1.5 beschriebenen Muskulatur des Brustkorbes, zu wenigen Veränderungen zwischen Erst- und Folgeuntersuchung. Besonders beim QL findet sich, bis auf leicht abgenommene mittlere Rangzahlen zu Anfang und zum Ende der Einatmung, ein nahezu identischer Rangzahlverlauf in beiden Abbildungen. Beide Muskeln verzeichnen nach einer kurzen Abnahme der Rangzahlen, in der Erstuntersuchung etwas stärker ausgeprägt als in der Folgeuntersuchung, einen der Umfangszunahme der Bänder entsprechenden Anstieg der Rangzahlkurven. Somit kann auch in der Folgeuntersuchung eine entscheidende Funktion der tiefen Rückenmuskulatur, insbesondere durch ein Stabilisieren und Offenhalten der unteren Öffnung des Brustkorbes, vermutet werden. In der Folgeuntersuchung zeigt sich der Verlauf der Rangzahlwerte beider Muskeln, besonders in der zweiten Hälfte der Einatmungsphase, steiler zu- und abnehmend. Weiterhin findet sich auch bei dieser Muskelgruppe eine leichte Vorverlagerung des Rangzahlmaximums und somit eine zeitliche Synchronisierung während der Einatmung mit den bereits besprochenen Muskeln.

Diese Veränderung kann als ein gezielterer Einsatz der tiefen Rückenmuskulatur bei der forcierten Einatmung interpretiert und somit als eine direkte Folge der Gesangsausbildung gewertet werden.

7.1.1.7 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Die Rangzahlkurven der beteiligten Muskeln verhalten sich im Einatmungsverlauf denen der tiefen Rückenmuskulatur sehr ähnlich. Auch hier zeigen sich in der Folgeuntersuchung, verglichen mit der Erstuntersuchung, zu Beginn und zum Ende der Einatmung niedrigere mittlere Rangzahlwerte. Das Rangzahlniveau aller drei untersuchten Muskeln (EI, EL, LD) steigt während der Einatmung dem Dehnungsverlauf der Bänder entsprechend an. Nach einem Rangzahlmaximum, etwa zu Beginn des zweiten Drittels der Einatmung, nehmen die

Rangzahlwerte zum Ende hin wieder sehr deutlich ab. Demzufolge scheint die oberflächliche Rückenmuskulatur, welche sich der tiefen Rückenmuskulatur sehr ähnlich verhält, eine entscheidende Bedeutung bei der Stabilisierung des unteren Brustkorbes während der Einatmung zu haben. Diese im Verlauf der Einatmung zunächst stattfindende starke Zunahme und darauffolgende Wiederabnahme der Rangzahlen ist in der Folgeuntersuchung, wie schon bei der tiefen Rückenmuskulatur unter 7.1.1.6 beschrieben, deutlicher ausgeprägt als in der Vergleichsuntersuchung. Auch bei dieser Muskelgruppe findet sich eine deutliche zeitliche Synchronisierung der Rangzahlverläufe mit obligaten Atemmuskeln. Dargestellt ist dieses Phänomen durch eine Vorverlagerung der Rangzahlmaxima während der Einatmung.

Diese Veränderung im Verlauf der Gesangsausbildung kann erneut als ein gezielteres Einsetzen der oberflächlichen Rückenmuskulatur bei der Einatmung verstanden werden.

7.1.1.8 Zusammenfassende Überlegungen

Ein besonders große Bedeutung für die Phase der Einatmung haben, am ehesten durch die Stabilisierung des unteren Rückens und somit der unteren Brustkorböffnung, sowohl die tiefe als auch die oberflächliche Rückenmuskulatur. Bei allen beteiligten Muskeln, ausgenommen der Hals- und Nackenmuskulatur, zeigt sich jeweils zu Einatmungsbeginn eine Abnahme der Rangzahlen bei gleichzeitiger Zunahme des Umfanges aller gemessenen Bänder. Hauptsächlich verantwortlich für dieses Phänomen ist in erster Linie das Überwinden der Atemruhelage mithilfe der passiven Expansionstendenz des Brustkorbes. Bei nahezu allen untersuchten Muskeln zeigen sich deutlich niedrigere mittlere Rangzahlwerte zu Beginn der Einatmungsphase als noch zum Zeitpunkt der Ausgangsuntersuchung. Folglich haben sich die Rangzahlwerte insbesondere zu Beginn der Phase der Einatmung zwischen den Probanden deutlich angeglichen. Dieses Phänomen ist als ein Effekt der professionellen Gesangsausbildung zu bewerten. Besonders bemerkenswert sind mehrere, teilweise sehr auffällige Veränderungen der Muskelkoordination zwischen Erst- und Folgeuntersuchung. Zunächst fallen erste Veränderungen schon im Bereich der Atemmuster auf. In der Folgeuntersuchung bilden sich eine gleichmäßigere Umfangszunahme und eine geringere Abnahme des Umfanges bei Brust- und Bauchband ab. Des Weiteren stellt sich die Umfangszunahme des Flankenbandes, verglichen mit der Dehnung bei der Erstuntersuchung, frühzeitiger und intensiver dar. Eine weitere besonders erwähnenswerte Entwicklung findet sich beim OI der Bauchmuskulatur. Hier kommt es zu einer deutlichen Veränderung der Muskelkoordination im Ausbildungsverlauf. Dieser Bauchmuskel scheint seine inspiratorische Wirkung am ehesten in Form einer Stabilisierung und somit eines

„Offenhaltens“ des unteren Brustkorbes im Studienverlauf deutlich zu verstärken. Auch bei der Hals- und Nackenmuskulatur zeigen sich beim SCM sowie beim TD zu beiden Untersuchungszeitpunkten Veränderungen der mittleren Rangzahlverläufe. Der SCM scheint seine Funktion als Atemhilfsmuskel im Laufe der Gesangsausbildung noch zu verstärken. Es findet sich in der Folgeuntersuchung eine deutlich bessere zeitliche Synchronisation der Rangzahlmaxima dieses Muskels mit den obligaten Atemmuskeln. Während die Rangzahlkurve des TD in der Erstuntersuchung noch als gleichbleibend und seine Funktion somit als nicht inspiratorisch wirkend (Jähkel 2014) beschrieben wurde, zeigt der Muskel in der Folgeuntersuchung deutlich variabelere Rangzahlverläufe während der Einatmung. Bei der tiefen und oberflächlichen Rückenmuskulatur stellen sich ebenfalls steilere und charakteristischere, zeitlich besser mit den übrigen Muskeln synchronisierte, Rangzahlverläufe während der Einatmung dar. Somit wird die stabilisierende Funktion dieser Muskeln, vordergründig den unteren Brustkorb betreffend, scheinbar im Laufe der Gesangsausbildung zunehmend mehr beansprucht. Besonders hervorzuheben ist eine offensichtliche Umorganisation der Muskelkoordination aller Muskeln während der Einatmungsphase. Es zeigt sich eine frühzeitigere Aktivierung der einzelnen Muskeln im Verlauf der Einatmung. Entscheidend ist hierbei eine deutliche zeitliche Synchronisierung aller Rangzahlmaxima der einzelnen Muskeln auf etwa denselben Zeitpunkt der Einatmung. Des Weiteren fällt auf, dass sich die synchronisierten Rangzahlmaxima in der Folgeuntersuchung verglichen mit der Erstuntersuchung etwa eine Auflösungseinheit (einem Zeitabschnitt von 10% entsprechend) früher befinden. Zur besseren Veranschaulichung dieses Phänomens wurde in Abbildung 29 jeweils in der Erst- und Folgeuntersuchung eine vertikale Linie in die Darstellung eingefügt.

Diese Veränderungen können auf das gezielte Erlernen einer, dem Stil der Dresdner Gesangsschule entsprechenden, Atemtechnik während des Singens zurückgeführt werden. Möglicherweise sind auch die Veränderungen der Koordination der Rücken- und Bauchmuskeln als ein zunehmender Einsatz der Atemstütze zu werten. Folglich kommt es durch eine gezielte gesangstechnische Umerziehung der Studenten während der Ausbildung zu einer Veränderung der schon zu Ausbildungsbeginn bestehenden und detailliert von Jähkel (2014) beschriebenen Muskelkoordination. Die identifizierten Veränderungen im Untersuchungszeitraum von vier Jahren können demnach mit hoher Wahrscheinlichkeit als direkter Effekt der professionellen Gesangsausbildung gewertet werden.

7.1.2 ÜBUNGEN

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Gesangsübungen zusammenfassend nach Muskelgruppen sortiert dargestellt. Besonderheiten bei einzelnen Übungen werden im Text erwähnt und interpretiert.

7.1.2.1 Atemmuster

Die Dehnungsverläufe der drei Bänder während der Gesangsübungen zeigen erwartungsgemäß viele Gemeinsamkeiten. Der Umfang im Bereich des Brustkorbes, dargestellt durch das erste Band, ist bei allen Gesangsübungen zum Zeitpunkt des Übungsbeginns am geringsten. Im Übungsverlauf nimmt die Dehnung des Brustbandes sehr gleichmäßig, stets auf einem niedrigeren Niveau als das Flanken- und Bauchband, ab. Zudem hebt sich im Vergleich zur Erstuntersuchung von Jähkel (2014) der Verlauf der Umfangsabnahme bei diesem Band deutlicher vom Verlauf der anderen beiden Bänder ab. Das Flanken- und Bauchband verlieren ebenfalls während der Phonation kontinuierlich an Umfang. Hier zeigt sich, wie schon in der Erstuntersuchung, beim Flankenband eine deutlich stärkere Umfangsabnahme als beim Bauchband. Anders als in der Studie von Jähkel (2014) kommt es darüber hinaus in der Folgeuntersuchung zu wesentlich geringer ausgeprägten negativen Umfangswerten beim Flankenband. Das Bauchband zeigt eine ähnlich gleichmäßige Umfangsabnahme bei allen Gesangsübungen wie das Brustband, befindet sich allerdings stets auf einem höheren Dehnungsniveau.

Zusammenfassend kann der Bereich der Flanken, wie schon in den Arbeiten von Jähkel (2014), Sundberg (1997) sowie Frederick und Rodd-Marling (1978) beschrieben wurde, für die Sängeratmung als funktionell am bedeutungsvollsten verstanden werden. Neben einem gleichmäßigeren Verlauf der Umfangsabnahme bei allen beobachteten Bändern zeigt sich in den Daten der vorliegenden Arbeit zudem noch eine erwähnenswerte bessere Abgrenzung der Dehnungsbänder untereinander. Des Weiteren kommt es beim Flankenband zu einer deutlich geringer ausgeprägten Umfangsabnahme in den negativen Bereich. Diese Phänomene können als eine Form der Optimierung der Muskelkoordination während der Gesangsübungen, insbesondere aber auch bei den Übungen zu den Referenzmessungen, interpretiert werden. Zum Zeitpunkt der Ausgangsuntersuchung konnte bei der forcierten tiefen Ausatmung der tatsächliche minimale Dehnungswert der Bänder offensichtlich nicht erreicht werden. Den Gesangsstudenten war es folglich nach vier Jahren professionellen Gesangstrainings und entsprechender Umorganisation der Muskelkoordination möglich, in der für den Referenzwert

durchgeführten Testsituation, tatsächlich näherungsweise einen minimalen Dehnungswert bei allen untersuchten Bändern zu erreichen.

7.1.2.2 Atemmuskulatur

Die Rangzahlverläufe der Atemmuskulatur zeigen bei den verschiedenen Gesangsübungen mitunter erhebliche Veränderungen zwischen Erst- und Folgeuntersuchung. Betrachtet man zunächst das Verhalten der Atemmuskulatur beim Singen des Vokalausgleichs, so fallen nur sehr geringe Unterschiede zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf. Deutliche Veränderungen sind jedoch beim Vortragen von Dreiklang und Schwellton zu verzeichnen. Im Gegensatz zu dem eben beschriebenen Vokalausgleich zeigt sich dabei eine leichte Zunahme der mittleren Rangzahlwerte zu Beginn der Gesangsübungen. Eine weitere bemerkenswerte Veränderung im Laufe der Gesangsausbildung findet sich bei der Betrachtung der Muskelkoordination in der zweiten Hälfte der Gesangsübungen. In der Folgeuntersuchung nehmen die Rangzahlwerte während der ersten beiden Drittel der Übungen stetig zu. Die Rangzahlmaxima befinden sich folglich nicht am Ende der Übungen, sondern etwa zwischen den Zeitpunkten 50% und 75% der Gesangsübungen. Im letzten Übungsdrittel findet sich eine ausgeprägte Abnahme der mittleren Rangzahlwerte. Die Ergebnisse der Erstuntersuchung zeigen demgegenüber, insbesondere beim Dreiklang und beim Schwellton, eine kontinuierliche Zunahme der Rangzahlwerte mit einem Maximum am Ende der entsprechenden Gesangsübung. Folglich kommt es zu einer Vorverlagerung der Rangzahlmaxima um mehrere Auflösungseinheiten. Im weiteren Verlauf der Übungen sinken die Rangzahl-niveaus zunächst wieder ab und steigen gegen Ende erneut an. Bei der vorgetragenen Tonleiter sind diese eben beschriebenen Phänomene ansatzweise auch zu beobachten, jedoch ist der Unterschied zu den Ergebnissen der Studie von Jähkel (2014) wesentlich geringer ausgeprägt.

Zusammenfassend können diese Veränderung der Muskelkoordination ab etwa der Hälfte der Gesangsübungen, insbesondere beim Singen von Dreiklang und Schwellton, als Effekt der Gesangsausbildung in Form einer Optimierung der Muskelkoordination gewertet werden. Es zeigt sich eine, der entsprechenden Gesangsübung angepasste, deutlich bessere Koordination der Muskelaktivierung mit weniger starker Muskelaktivierung zum Ende der Übungen. Diese Veränderung der Gesangstechnik führt möglicherweise zur Entwicklung einer übungsspezifischen Aktivierung dieser Muskelgruppe während des Gesanges im Sinne einer Ökonomisierung. Eine solche spezifische Aktivierung dieser Muskeln konnte in der Vergleichsstudie von Jähkel (2014) nicht beobachtet werden.

7.1.2.3 Bauchmuskulatur

Auch bei dieser Muskelgruppe kommt es, vergleicht man die Ergebnisse der Erst- und Folgeuntersuchung miteinander, zu auffälligen Veränderungen der Muskelkoordination während der vorgetragenen Gesangsübungen. Für den Vokalausgleich findet sich, wie schon bei der Atemmuskulatur unter 7.1.2.2 beschrieben, kaum Veränderungen zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten. Beim Singen der Tonleiter stellen sich in der Folgeuntersuchung bis auf einen leicht ungleichmäßigeren Rangzahlverlauf im letzten Übungsdrittel wenige nennenswerte Veränderungen der Muskelkoordination dar. Bei den anderen Gesangsübungen finden sich ähnlich deutliche Veränderungen der Muskelkoordination wie schon bei der Atemmuskulatur. Die Rangzahlwerte nehmen über die ersten zwei Drittel der Übungen gleichmäßig zu. Das Rangzahlmaximum befindet sich dann zwischen den Zeitpunkten 50% und 75% der Übungen. Im Übungsverlauf zeigt sich eine Abnahme der Rangzahlwerte. Demgegenüber stellen sich die Rangzahlverläufe in der Vergleichsuntersuchung über die Gesangsübungen hinweg eher als linear ansteigend dar. In der aktuellen Untersuchung findet sich bei der Betrachtung des Dehnungsverlaufes des Bauchbandes, besonders gut beim Schwellton zu erkennen, eine geringere Umfangsabnahme.

Zusammenfassend kann postuliert werden, dass die gleichzeitig vorhandene, geringer ausgeprägte Umfangsabnahme des Bauchbandes bei zeitgleich vorhandener, hoch ausgeprägter Muskelaktivierung für einen stärkeren, übungsspezifischen Einsatz dieser Muskelgruppe während des Gesangsvorgangs spricht. An dieser Stelle kann beispielsweise ein vermehrter Einsatz der Bauchmuskulatur bei der Atemstütze, wie schon bei der Phase der Einatmung angedeutet, diskutiert werden.

7.1.2.4 Hals- und Nackenmuskulatur

Bei der Betrachtung der mittleren Rangzahlwerte der beiden beteiligten Muskeln TD sowie SCM zeigen sich sehr ähnliche Kurvenverläufe zu beiden Untersuchungszeitpunkten. Die Rangzahlwerte des TD liegen zu Beginn der Übungen eher auf einem niedrigen Niveau und steigen dann im Verlauf kontinuierlich an. Das Rangzahlmaximum befindet sich, wie beim Vokalausgleich zu sehen, bei allen Gesangsübungen erst am Übungsende oder kurz davor. Der Rangzahlverlauf des SCM stellt sich hingegen zu beiden Untersuchungszeitpunkten deutlich anders dar. Grundsätzlich besitzt dieser Muskel schon zu Übungsbeginn die höchsten mittleren Rangzahlwerte aller untersuchten Muskeln. Im Verlauf der Gesangsübungen nimmt die Aktivierung des Muskels im ersten Drittel der jeweiligen Gesangsübungen sehr deutlich ab. Eine Ausnahme stellt hier der Dreiklang dar, bei dem die Rangzahlen sehr schnell auf ein

Maximum ansteigen. Ein einheitliches Rangzahlmaximum kann aufgrund der sehr übungsspezifischen Aktivierung im Verlauf nicht ausgemacht werden. Wie schon bei der Einatmungsphase beschrieben, erfolgt die Aktivierung dieses Muskels, entsprechend der gesangstechnischen Anforderungen, sehr betont. In der vorliegenden Untersuchung finden sich im letzten Übungsdrittel interessante Veränderungen der Rangzahlverläufe des SCM. Die Werte der mittleren Rangzahlen sind in diesem Übungsabschnitt bei allen Gesangsübungen leicht abgesunken.

Zusammenfassend kann die Zunahme eines übungsspezifischen Einsatzes der Hals- und Nackenmuskulatur diskutiert werden. In Abhängigkeit von der entsprechenden Gesangsübung ist eine deutliche Betonung der muskulären Aktivierung zu erkennen. Dieses Phänomen ist besonders gut im mittleren Übungsbereich des Schwelltons, und somit während des Übungsplateaus zu sehen.

7.1.2.5 Thoraxmuskulatur

Bei der Betrachtung der Rangzahlverläufe der beteiligten Muskeln dieser Gruppe fallen zu beiden Untersuchungszeitpunkten einige Besonderheiten auf. So zeigen sich zunächst bei fast allen Gesangsübungen, mit Ausnahme der Tonleiter, im ersten Übungsdrittel der vorliegenden Nachuntersuchung niedrigere mittlere Rangzahlen. Die Dehnungsverläufe aller drei Bänder, hervorzuheben sei an dieser Stelle jedoch das Brustband, zeigen hingegen eine gleichmäßige Umfangsabnahme. Folglich sind beim Atemvorgang während des Gesangs nicht beide Muskeln dauerhaft aktiv. Bemerkenswert ist jedoch, dass die Rangzahlkurven beider Muskeln im weiteren Verlauf bei allen Gesangsübungen deutlich ansteigen. Sehr ausgeprägt ist dieses Phänomen bei den sehr anspruchsvollen, weil längsten Übungen Dreiklang und Schwellton zu erkennen. Die untersuchte Muskelgruppe hat scheinbar eine besondere Bedeutung bei der forcierten Ausatmung während des Gesangsvorgangs. Gerade am Ende der Übungen erreichen beide Muskeln sehr hohe Rangzahlen. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Bedeutsamkeit dieser Muskeln bei der kontrollierten Abgabe des „letzten Luftstromes“ beim Singen der Übungen. Besonderheiten im Studienverlauf findet sich, wie schon unter 7.1.2.2 bei der Atemmuskulatur ausführlich beschrieben, bei der Koordination der muskulären Aktivierung. Besonders gut zu erkennen ist dieser Sachverhalt bei der Tonleiter im letzten Übungsdrittel. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der Rangzahlwerte, wohingegen in der Erstuntersuchung eine stetige Zunahme der Aktivierung über die gesamte Gesangsübung hinweg sichtbar wurde.

7.1.2.6 Tiefe Rückenmuskulatur

Die bei dieser Muskelgruppe untersuchten Muskeln zeigen zu beiden Untersuchungszeitpunkten sehr interessante Rangzahlverläufe. Bei allen Gesangsübungen kommt es zunächst zu einer deutlich sichtbaren Abnahme der Rangzahlwerte. Erst im Übungsverlauf steigen die Rangzahlverläufe bei beiden Muskeln, jeweils zum entsprechenden übungsspezifischen Bereich der maximalen Anforderung, an. Die Rangzahlwerte haben direkt zu Übungsbeginn, demzufolge unmittelbar nach der Einatmung, ein sehr hohes Niveau und sinken kurz darauf wieder ab. Höhere mittlere Rangzahlwerte werden zu diesem Zeitpunkt nur von der Hals- und Nackenmuskulatur erreicht. Dieses Phänomen wurde bereits von Jähkel (2014) beschrieben und als ein Zeichen der Stützfunktion dieser Muskelgruppe zum Zeitpunkt des Tonansatzes interpretiert. Wie schon in der Erstuntersuchung nehmen die Rangzahlen im Verlauf der Übungen, abhängig vom Zeitpunkt der gesangstechnischen maximalen Anforderung, zu. Besonders gut zu sehen ist dies bei der Betrachtung der Tonleiter sowie des Schwelltons. Bei der Tonleiter findet sich ein deutliches Maximum im Bereich der None. Bei der Gesangsübung zum Schwellton zeigt sich ebenfalls eine ausgeprägte Abnahme der Rangzahlen nach dem Übungsplateau. Diese Rangzahlzunahme der Muskeln dieser Gruppe bei starker gesangstechnischer Beanspruchung ist ein deutlicher Hinweis für die Atemstützfunktion, hervorgerufen durch eine Stabilisierung der unteren Wirbelsäule und somit ein Offenhalten der unteren Öffnung des Brustkorbes. In der Folgeuntersuchung finden sich insbesondere beim Schwellton, im Vergleich zu den Daten der Erstuntersuchung, Veränderungen der Rangzahlverläufe. Die Ergebnisse von Jähkel (2014) zeigen eine erneute ausgeprägte Zunahme der Rangzahlwerte beider Muskeln im letzten Übungsdrittel. Das Rangzahlmaximum stellt sich erst am Ende der Gesangsübung dar. In der Folgeuntersuchung befinden sich die Rangzahlmaxima genau im Bereich des Plateaus dieser Übung und steigen zum Übungsende hin wesentlich geringer an. Diese Veränderung charakterisiert eine Verminderung einer unkoordinierten muskulären Überbeanspruchung, was möglicherweise als Folge einer Ökonomisierung der Muskelbeanspruchung im Laufe der Gesangsausbildung zu bewerten ist. Ein übungsspezifischer Einsatz dieser Muskelgruppe, hauptsächlich in Form der Atemstütze zu sehen, ist Folge einer Umstellung der Muskelkoordination und somit eine Veränderung der Atemmechanik bei der Phonation.

7.1.2.7 Oberflächliche Rückenmuskulatur

Das Rangzahlmuster der oberflächlichen Rückenmuskulatur zeigt deutliche Ähnlichkeiten mit jenem der Atem- und Bauchmuskulatur. Die Rangzahlwerte befinden sich zu Beginn der Gesangsübungen auf einem sehr niedrigen Niveau und steigen dann im Verlauf der Übungen bis zu einem übungsspezifischen Maximum an. Eine Ausnahme stellt hier, wie schon bei Jähkel (2014) beschrieben, der Rangzahlverlauf des EL dar. Bei diesem Muskel zeigen sich höhere mittlere Rangzahlwerte zu Beginn der Übungen, somit direkt nach der Einatmung, als bei den anderen Muskeln dieser Gruppe. Im Verlauf der Übungen sinken die Werte der Rangzahlen zunächst deutlich ab und steigen dann mit den beiden anderen beteiligten Muskeln zum Maximum der Gesangsbeanspruchung der jeweiligen Übung an. Ganz besonders gut zu sehen ist dieses Phänomen beim Vokalausgleich. Somit besitzt der Rangzahlverlauf des EL eine große Ähnlichkeit mit dem Verlauf der Rangzahlen der tiefen Rückenmuskulatur. Ein ähnliches Muster zeichnet sich bei der Gesangsübung zum Schwellton ab. Bei dieser Übung zeigen sich sehr auffällige Ähnlichkeiten im Rangzahlmuster zwischen tiefer und oberflächlicher Rückenmuskulatur. Die Rangzahlen sinken zunächst, ausgehend von einem hohen Niveau direkt zu Beginn der Gesangsübung, im ersten Übungsdrittel ab. Im Übungsverlauf steigen die Rangzahlkurven aller Muskeln bis zum Bereich des Plateaus des Schwelltons deutlich an und fallen ein weiteres Mal kurz vor Übungsende ab. Somit zeigt sich auch in der Folgeuntersuchung die Bedeutung der oberflächlichen Rückenmuskulatur bei der Atmung während des Gesangsvorgangs, wobei der EL eine größere Stützfunktion zu Übungsbeginn beim Tonansatz zu haben scheint als die beiden weiteren beteiligten Muskeln dieser Gruppe. Veränderungen der Muskelkoordination zwischen Erst- und Folgeuntersuchung sind insbesondere bei der Tonleiter aber auch beim Schwellton und dem Dreiklang zu finden. Bei der Tonleiter findet sich eine deutlich stärkere Aktivierung aller beteiligten Muskeln auch im unmittelbaren Bereich der None. Bei der Erstuntersuchung bildet sich hingegen ein scharf abgrenzbarer Bereich des Rangzahlmaximums genau im Bereich der None ab. Dies verdeutlicht einen variableren Einsatz der Muskelgruppe beim Singen der Tonleiter und kann als ein Effekt der Gesangsausbildung gewertet werden. Beim Schwellton sowie beim Dreiklang zeigen sich in der Folgeuntersuchung niedrigere Rangzahlwerte der beteiligten Muskeln am Ende der jeweiligen Übung.

Wie schon bei den tiefen Rückenmuskeln unter 7.1.2.6 diskutiert, könnte dies ein Zeichen der Ökonomisierung der Muskelkoordination sein und somit als ein weiterer Effekt der professionellen Gesangsausbildung gewertet werden.

7.1.2.8 Zusammenfassende Überlegungen

Bei der Betrachtung der einzelnen Gesangsübungen zeigen sich, wie schon bei der Phase der Einatmung, teilweise sehr deutliche Veränderungen zwischen Erst- und Folgeuntersuchung. Bereits bei der Beschreibung der Atemmuster können interessante Auffälligkeiten diskutiert werden. Der Einsatz der Brust-, Flanken- und Bauchatmung, dargestellt durch die Dehnungsverläufe der drei Bänder, erscheint in der Folgeuntersuchung deutlich differenzierter und gleichmäßiger als zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung. Die Daten zeigen zu Beginn der professionellen Gesangsausbildung eine ausgeprägte Umfangsabnahme des Flankenbandes bis in den negativen Bereich. Eine solche Abnahme bis in den negativen Bereich zeigt sich bei den Dehnungsverläufen der Bänder in der Folgeuntersuchung nicht. In der Erstuntersuchung konnte folglich bei der forcierten Ausatmung in der Referenzmessung der minimale Dehnungswert der Bänder nicht erreicht werden. Nach vier Jahren Gesangsausbildung war es den Studenten durch eine erlernte Umstellung der Muskelkoordination möglich, sich nach Aufforderung dem minimalen Dehnungswert der Bänder schon in der Referenzmessung zu nähern. Die Rangzahlverläufe der Atem- und Bauchmuskulatur bilden zu beiden Untersuchungszeitpunkten, durch eine konstante Zunahme der Beanspruchung, die besondere Bedeutung dieser Muskeln für die Phonation ab. Die Rangzahlverläufe der Atemmuskulatur zeigen in der Folgeuntersuchung in der zweiten Übungshälfte eine auffällige Umorganisation der Muskelkoordination. In der Erstuntersuchung kommt es während der Gesangsübungen zu einer kontinuierlichen Zunahme der Rangzahlwerte, was als Zeichen einer eher druckbetonten Ausatmung zu sehen ist. In der Folgeuntersuchung stellt sich eine, eher der spezifischen Übung angepasste Koordination der Aktivierung der Muskulatur dar. Dieses Phänomen verdeutlicht eine Veränderung der Gesangstechnik im Verlauf der professionellen Gesangsausbildung. Auch bei der Bauchmuskulatur können Effekte der Gesangsausbildung beobachtet werden. Es zeigt sich eine etwas geringere Umfangsabnahme des zugehörigen Bauchbandes bei gleichzeitig hohen Rangzahlen. Somit kann ein differenzierter Einsatz dieser Muskelgruppe bei der Atemstütze vermutet werden. Bereits in der Arbeit von Jähkel (2014) wurde die Bedeutung dieser Muskelgruppe für die Stützfunktion der Atmung beschrieben. Eine weitere Arbeit von Thorpe et al. (2001) beschreibt ebenfalls die Bedeutung der Bauchmuskulatur für die „Stütze“. Auch

bei der Betrachtung der Hals- und Nackenmuskulatur zeigen sich Auffälligkeiten im Verlaufe der professionellen Gesangsausbildung. Die Besonderheiten der Rangzahlverläufe beider Muskeln, welche bereits von Jähkel (2014) ausführlich beschrieben wurden, finden sich auch in der Folgeuntersuchung wieder. Auch in den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit zeigen sich zu Übungsbeginn die hohen mittleren Rangzahlen des SCM und sein deutlich variabler Rangzahlverlauf, welcher von den entsprechenden Anforderungen beim Singen abhängig ist. Es stellt sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten eine deutliche, übungsspezifische Betonung der muskulären Aktivierung dar, welche in der Folgeuntersuchung, insbesondere beim SCM, zuzunehmen scheint. Diese Veränderung steht im Widerspruch zu der in der Erstuntersuchung postulierten, muskulären Überbeanspruchung dieses Muskels. Pettersen und Westgaard (2002) konnten zeigen, dass die starke Beanspruchung des SCM mittels Biofeedback-Verfahren gesenkt werden kann. Folglich konnte eher eine Abnahme der Rangzahlen dieses Muskels beziehungsweise dieser Muskelgruppe erwartet werden. Die aktuellen Beobachtungen widersprechen folglich der Hypothese. Bei der tiefen Rückenmuskulatur stellen sich zu beiden Untersuchungszeitpunkten auffällig hohe Rangzahlwerte zu Übungsbeginn dar, welche im Verlauf dann sehr deutlich abnehmen. Hier zeigt sich die besondere Funktion dieser Muskelgruppe zum Zeitpunkt des Tonansatzes direkt nach der Einatmung in Form einer Stabilisierung der unteren Wirbelsäule und ein Offenhalten der unteren Brustkorböffnung. Insbesondere beim Schwellton fallen auch Veränderungen in der Folgeuntersuchung auf. Während in der Erstuntersuchung die Rangzahlmaxima am Ende der Übung zu finden waren, liegen jene in der Folgeuntersuchung genau im Bereich des Plateaus des Schwelltons. Somit kann hier ein gezielteres und anhaltendes Einsetzen der Stützfunktion der tiefen Rückenmuskeln zum Zeitpunkt sehr hoher gesangstechnischer Anforderung als Effekt der professionellen Gesangsausbildung diskutiert werden. Bei der oberflächlichen Rückenmuskulatur zeigen sich ebenfalls Veränderungen im Studienverlauf. Werden beispielsweise die Gesangsübungen zur Tonleiter betrachtet, fallen deutlich „aufgefächerte“ Aktivierungen aller beteiligten Muskeln im unmittelbaren Umfeld der None auf. Im Gegensatz dazu sind die Rangzahlmaxima aller beteiligten Muskeln in der Erstuntersuchung genau zum Zeitpunkt der None scharf abgegrenzt vorzufinden. Somit erscheint der Einsatz dieser Muskeln bei dieser Gesangsübung deutlich variabler und wieder weniger druckbetont lediglich den höchsten gesungenen Ton betreffend. Beim Schwellton und beim Dreiklang zeigt sich jeweils ein ähnliches Verlaufsmuster wie bei der tiefen Rückenmuskulatur. Hier bildet sich eine geringere Aktivierung der beteiligten Muskeln am Ende der entsprechenden Gesangsübung ab. Die beobachteten Veränderungen der

Rückenmuskulatur deuten eine Intensivierung der Verwendung dieser Muskeln bei der Atemstütze an. Es zeigt sich, mehr noch als in der Erstuntersuchung, eine übungsspezifische Beanspruchung dieser Muskeln. Diese Sachverhalte können als eine Form der Ökonomisierung der Muskelbeanspruchung während einer professionellen Gesangsausbildung verstanden werden. Offensichtlich findet während des intensiven Gesangstrainings eine Optimierung der Gesangstechnik in Folge einer Umorganisation der Muskelkoordination statt.

7.2 FRAGESTELLUNGEN DER EINLEITUNG

7.2.1 HYPOTHESE 1

Durch eine Optimierung der Muskelkoordination während einer professionellen Gesangsausbildung kommt es gegenüber der Situation zu Beginn der Ausbildung zu einer Veränderung der muskulären Aktivierung, insbesondere im Hinblick auf eine stärkere, funktionelle Orientierung. Spezifische Charakteristika im Rangzahlverlauf sollten sich in der Nachuntersuchung deutlich ausgeprägter darstellen.

Zur Beantwortung der Fragestellung werden die spezifischen Charakteristika der Rangzahlverläufe der zeitabhängigen Ergebnisse für die Phase der Einatmung sowie für jede Gesangsübung interpretiert. Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung der herausgearbeiteten Besonderheiten.

Werden zunächst die Rangzahlverläufe der einzelnen Muskeln in der Phase der Einatmung betrachtet, so fallen in der Nachuntersuchung bereits Veränderungen der Rangzahlcharakteristika auf. Die Rangzahlmaxima der untersuchten Muskeln erscheinen deutlicher zeitlich synchronisiert. Zur besseren Übersichtlichkeit und Veranschaulichung dieser Veränderungen wurden in Abbildung 29 jeweils vertikale Linien im Bereich der höchsten Rangzahlwerte eingebracht. Die Rangzahlmaxima fast aller dargestellten Muskeln befinden sich eine Auflösungseinheit (entspricht einem Zeitabschnitt von 10%) früher im Verlauf der Einatmungsphase. Besonders auffällig zeigt sich an dieser Stelle, ausführlich unter 7.1.1.3 beschrieben, der Rangzahlverlauf des OI in der Nachuntersuchung. Hier kommt es im letzten Drittel der Einatmungsphase zu deutlich höheren Rangzahlwerten. Somit scheint sich die inspiratorische Funktion dieses Muskels im Ausbildungsverlauf zu verstärken. Des Weiteren erscheinen die Dehnungsverläufe der drei Bänder in der Folgeuntersuchung deutlich differenzierter und gleichmäßiger. Im Bereich der Flanken zeigt sich eine frühzeitigere und stärker ausgeprägte Umfangszunahme zum Zeitpunkt der Folgeuntersuchung. Weiterhin ist zum Ende der Phase der Einatmung eine deutlich geringere Umfangsabnahme der Bänder zu erkennen, weshalb sich daraus schließen lässt, dass die maximale Dehnung besser aufrechterhalten werden kann.

Bei den Gesangsübungen zeigen sich ebenfalls sehr deutliche Veränderungen der Charakteristika der Rangzahlverläufe der untersuchten Muskeln zu beiden Untersuchungszeitpunkten. Bei der Betrachtung des Vokalausgleichs finden zwischen Erst-

und Folgeuntersuchung nur sehr geringe Unterschiede. Die Rangzahlmaxima aller beteiligten Muskeln befinden sich in der Erst- und Folgeuntersuchung jeweils etwa zum Zeitpunkt 90%. Beim Dreiklang können hingegen bei fast allen Muskelgruppen sehr deutliche Veränderungen in der Charakteristik der Rangzahlverläufe in der Nachuntersuchung beobachtet werden. In der Erstuntersuchung sind, mit Ausnahme des übungsspezifisch akzentuierten Verlaufes der Rangzahlen bei der Hals- und Nackenmuskulatur, bei allen Muskeln stetig ansteigende Rangzahlen mit einem Maximum fast durchgehend am Ende der Gesangsübung zu verzeichnen. Demgegenüber stellt sich in der Folgeuntersuchung eine regelmäßige zeitliche Synchronisierung der Rangzahlen mit einem deutlichen Maximum zum Übungszeitpunkt bei 70% der Übung dar. Folglich befindet sich das Rangzahlmaximum bei einer Vielzahl der untersuchten Muskeln in der Nachuntersuchung um drei Auflösungseinheiten nach vorn verschoben. Bei dieser Gesangsübung zeigt sich demnach, nach vier Jahren Gesangsausbildung bei den Probanden, eine sehr ausgeprägte Umorganisation der Muskelkoordination. Bei der Betrachtung der Tonleiter fallen ebenfalls leichte Veränderungen im abgebildeten Rangzahlverhalten zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf. In der Erstuntersuchung sind die maximalen Rangzahlwerte zeitlich etwa zum Zeitpunkt 50% abgebildet. Einzige Ausnahme stellt hier der TD der Hals- und Nackenmuskulatur dar. In der Nachuntersuchung verschiebt sich dieses Rangzahlmaximum um etwa eine Auflösungseinheit nach hinten. Die maximalen Rangzahlwerte finden sich hier etwa zum Zeitpunkt 60%. Ausnahmen sind erneut der TD der Hals- und Nackenmuskulatur sowie die gesamte Muskulatur des Brustkorbes. In der Gesamtheit betrachtet ist auch bei dieser Gesangsübung eine Veränderung der Rangzahlcharakteristika im Ausbildungsverlauf festzustellen. Beim Schwellton stellen sich ähnliche Veränderungen dar wie zuvor bereits beim Dreiklang beobachtet werden konnten. Besonders auffällig ist die erneute Verlagerung der Rangzahlmaxima in der Nachuntersuchung verglichen mit den Daten von Jähkel (2014). In der Erstuntersuchung ist das Rangzahlmaximum, einzige Ausnahme ist hier der SCM der Hals- und Nackenmuskulatur, am Ende der Gesangsübung lokalisiert. Nach einem ersten „Rangzahlgipfel“, welcher nach einem Abschluss von ca. 60% der Gesangsübung erreicht wurde, folgt ein weiterer Anstieg der Rangzahlen zu ihrem jeweiligen Maximum am Übungsende. In der Nachuntersuchung findet sich nun das erste Maximum der Rangzahlkurven zum Zeitpunkt 60% deutlich ausgeprägter als in der Vergleichsuntersuchung zu Studienbeginn. Bei einem Teil der untersuchten Muskeln (DP, ICO8, QL, MF, EL) hat sich das Rangzahlmaximum bereits in diesen Übungsbereich vorverlagert. Möglicherweise würde sich dieses Phänomen der zeitlich synchronisierten Vorverlagerung der

Rangzahlmaxima zu einem späteren Untersuchungszeitpunkt noch deutlicher abbilden. Auch diese Veränderung ist ein Ausdruck einer charakteristischen Umorganisation der Muskelkoordination im Laufe einer professionellen Gesangsausbildung.

Zusammenfassend betrachtet sind bei den Charakteristika der Rangzahlverläufe während der Einatmung und auch während der einzelnen Gesangsübungen ähnliche Veränderungen im Studienverlauf zu beobachten. In der Einatmungsphase zeigt sich eine deutliche Verlagerung der Rangzahlmaxima um eine Auflösungseinheit nach vorn sowie eine zeitliche Synchronisierung fast aller Rangzahlmaxima in diesem Bereich. Ebenfalls sehr auffällig stellt sich das Verhalten der Rangzahlen des OI, besonders im letzten Drittel der Einatmung, dar. Auch bei den einzelnen Gesangsübungen lassen ähnliche Veränderungen der Rangzahlcharakteristika nach vier Jahren professioneller Gesangsausbildung vorweisen. Hervorzuheben sind hierbei insbesondere die Ergebnisse der zeitabhängigen Betrachtungen beim Dreiklang, ansatzweise auch erkennbar beim Schwellton. Bei diesen Übungen stellt sich die erwähnte Vorverlagerung der Rangzahlmaxima sowie eine zeitliche Synchronisierung der maximalen Rangzahlwerte sehr deutlich dar. Beim Dreiklang zeigen sich die maximalen Rangzahlenwerte bei fast allen untersuchten Muskeln um drei Auflösungseinheiten nach vorn verlagert. Während es bei der Tonleiter in der Nachuntersuchung zu einer Verlagerung der Rangzahlmaxima um eine Auflösungseinheit nach hinten gekommen ist, finden sich beim Vokalausgleich keine erwähnenswerten Veränderungen im Studienverlauf.

Schlussendlich zeigen sich während der Phase der Einatmung auffällige Veränderungen der muskulären Aktivierung. Diese für den Gesang sehr entscheidende Phase kann im Laufe der Gesangsausbildung intensiviert und somit effektiver gestaltet werden. Eine entsprechend verbesserte, funktionelle Orientierung der Muskelaktivierung findet sich, beispielhaft dargestellt durch den Rangzahlverlauf des OI der Bauchmuskulatur, in der Nachuntersuchung. Auch bei den einzelnen Gesangsübungen ergeben sich deutliche Veränderungen der muskulären Aktivierung zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten. Die Gesangsstudenten sind nach vier Jahren Gesangsausbildung in der Lage, eine starke Muskelaktivierung während einer anspruchsvollen Gesangsübung schon frühzeitig sehr gezielt einzusetzen. Dieses hohe Aktivierungsniveau kann dann im Übungsverlauf bis zum Ende der Übung aufrechterhalten werden. Diese Veränderungen zeigen sehr deutlich den Effekt einer professionellen Gesangsausbildung, dargestellt durch eine Umorganisation der Muskelkoordination, insbesondere im Hinblick auf eine stärkere funktionelle Orientierung während des Gesangsvorgangs.

7.2.2 HYPOTHESE 2

Im Verlauf der Gesangsausbildung kommt es zu einer Abnahme der Amplitudenanteile der Atemhilfsmuskeln, speziell beim SCM und dem TD, und zu einer Zunahme der Anteile der obligat an der Atmung beteiligten Muskeln. Vordergründig betrifft dies das DP, ICO5 und ICO8 sowie die an der Atemstütze beteiligte Rumpfmuskulatur (tiefe und oberflächliche Rückenmuskulatur sowie Bauchmuskulatur).

Um diese Hypothese zu beantworten, werden die Differenzen der mittleren Muskelaktivitäten, sowie jene in Bezug zur Referenz, der Erst- und Folgeuntersuchung der zeitunabhängigen Betrachtungen interpretiert und diskutiert.

Betrachtet man die Differenz der mittleren Muskelaktivitäten beim Vokalausgleich in Abbildung 6, zeigen sich im Studienverlauf, mit Ausnahme des TD der Atemhilfsmuskulatur, nur gering ausgeprägte systematische Veränderungen bei gleichzeitig sehr hohen Streuungen. Beim TD nimmt die mittlere Muskelaktivität entsprechend der formulierten Hypothese nach vier Jahren Gesangsausbildung sehr deutlich ab. Auf der rechten Körperseite finden sich hier signifikante Veränderungen für die Vokalbereiche A bis O. Interessant ist auch die zunehmende Tendenz des SCM bei dieser Übung, jedoch ohne statistischen Nachweis. Dieser Sachverhalt widerspricht der formulierten Hypothese der Überbeanspruchung dieses Muskels von Jähkel (2014) sowie der hier formulierten Hypothese, welche die Abnahme der mittleren Muskelaktivitäten der Atemhilfsmuskeln formuliert. Beide Veränderungen dieser Muskeln finden sich, bezogen auf die Referenz in Abbildung 7, auch bei den mittleren Muskelaktivitäten. Weiterhin steht diese Veränderung im Widerspruch zu Beobachtungen, welche eine Beeinflussung dieses Muskels mittels Biofeedback-Verfahren und somit ebenfalls eine Form der Überbeanspruchung beim Gesangsvorgang postulieren (Pettersen und Westgaard (2002)). Ein sehr deutlicher Streubereich findet sich beim OI der Bauchmuskulatur beidseits. Des Weiteren zeigen sich leichte Zunahmen der Muskelaktivitäten bei einzelnen Muskeln der oberflächlichen Rückenmuskulatur. Vordergründig zu nennen wären hierfür der EL sowie LD beidseits. Diese Aktivitätszunahme kann entsprechend der Hypothese als ein verstärkter Einsatz dieser Muskeln bei der Atemstütze interpretiert werden. Alle weiteren untersuchten Muskeln, insbesondere jene der tiefen Rückenmuskulatur sowie der Atemmuskulatur, zeigen nach vier Jahren Gesangsausbildung bei dieser Gesangsübung nur geringe Veränderungen. Beim MF der tiefen Rückenmuskulatur ist im Vergleich mit der Erstuntersuchung eine diskrete Aktivitätsabnahme festzustellen. Auch dies steht im Widerspruch zur eingangs aufgestellten Hypothese, muss jedoch aufgrund des ausgeprägten

Streubereiches bei den Daten dieses Muskels kritisch hinterfragt werden. Bei der Interpretation des Dreiklangs, dargestellt in Abbildung 12, finden sich, wie eben beim Vokalausgleich beschrieben, sehr ähnliche Veränderungen. Die mittleren Muskelaktivitäten des TD beidseits nehmen auch bei dieser Gesangsübung nach vier Jahren Gesangsstudium ab. Diese Ergebnisse werden allerdings nicht signifikant. Des Weiteren ist auch bei dieser Übung eine Zunahme der mittleren Aktivitäten beim SCM beidseits zu beobachten. Bei dieser Gesangsübung zeigen sich signifikante Ergebnisse für alle drei Übungsbereiche auf der linken Körperseite und den zweiten und dritten Übungsbereich auf der rechten Seite. Bei dieser Übung sind die Veränderungen regelhaft auch bei den mittleren Muskelaktivitäten bezogen auf die Referenz, dargestellt in Abbildung 13, zu beobachten. Die Atem- und Atemstützmuskulatur zeigt erneut nur relativ geringe Veränderungen der mittleren Muskelaktivitäten im Vergleich zwischen Erst- und Folgeuntersuchung. Eine geringe Abnahme der Aktivitäten kann beim DP links und beim ICO5 beidseits beobachtet werden. Aufgrund der ausgeprägten Streubreite der Daten sind diese Veränderungen jedoch nur als Tendenz zu werten. Betrachtet man die Daten für den Endtonbereich der Tonleiter in Abbildung 18, so fallen deutlichere Veränderungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten auf. Die Atemhilfsmuskulatur zeigt mit einer leichten Zunahme der Aktivität des SCM und einer leichten Abnahme der Aktivität beim TD beidseits ähnliche Veränderungen wie schon bei den bereits besprochenen Gesangsübungen. Bei der Atemmuskulatur fallen erstmals deutliche Veränderungen auf. Es kommt, entgegen der hypothetischen Vorüberlegungen, zu einer Abnahme der mittleren Muskelaktivitäten fast aller beteiligten Muskeln. Beim ICO8 auf der rechten Körperseite ist die Aktivitätsabnahme als signifikant zu werten. Ein ähnliches Bild findet sich bei den für die Atemstütze so bedeutungsvollen tiefen und vereinzelt auch bei den oberflächlichen Rückenmuskeln. Möglicherweise sind die ermittelten Daten durch die professionelle Gesangsausbildung als eine Art Trainingseffekt zu verstehen, durch welche der Student mit einer geringeren, muskulären Beanspruchung dieselben Anforderungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten bewerkstelligen kann. Bei der Gesangsübung zum Schwellton sind in Abbildung 24 ebenfalls Veränderungen zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten nachweisbar. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur zeigen sich, wie schon bei allen anderen Gesangsübungen, eine leichte Zunahme der Muskelaktivität beim SCM beidseits im Bereich Übungsmitte und am Übungsende sowie eine deutliche Abnahme der mittleren Aktivitäten beim TD auf der rechten Körperseite. Beim SCM auf der rechten Seite sind die genannten Aktivitätszunahmen in einem signifikanten Bereich zu sehen. Bei der tiefen Rückenmuskulatur sind, erneut entgegen der hypothetischen Überlegungen, tendenziell eher

abnehmende Muskelaktivitäten zu beobachten. Der EL der oberflächlichen Rückenmuskulatur stellt sich auf beiden Körperseiten, wie schon beim Dreiklang beschrieben, mit einer Zunahme der mittleren Aktivitäten und folglich einer Verstärkung der muskulären Beanspruchung dar. Diese Veränderung entspricht somit der hier zu diskutierenden Hypothese. Eine eher abnehmende Beanspruchungstendenz zeigen hingegen der EI und der LD dieser Muskelgruppe. Auch bei der Atemmuskulatur kommt es, mit Ausnahme der mittleren Muskelaktivitäten des DP beidseits, zu einer Abnahme der Beanspruchung nach vier Jahren Gesangsausbildung. Beim ICO5 und ICO8 auf der rechten Körperseite können signifikante Ergebnisse im Endbereich der Gesangsübung festgestellt werden. Wie schon bei der tiefen Rückenmuskulatur stehen dieser Veränderungen im Widerspruch zur Hypothese. Lediglich beim DP sind auf beiden Seiten die zu erwartenden diskreten Aktivitätszunahmen nachweisbar.

Zusammenfassend betrachtet bilden sich bei der Hals- und Nackenmuskulatur die auffälligsten Veränderungen ab. Bei der Darstellung der mittleren Muskelaktivitäten nach vier Jahren Gesangsausbildung zeigen sich eine durchgehende Abnahme der Amplitudenwerte beim TD und eine Zunahme beim SCM. Beide Muskeln können als stark psychosomatische Muskeln verstanden werden. Folglich kann bei den Messungen nach vier Jahren durch eine Art „Routine“ während der Messung aufgrund einer geringeren Psycho-Vegetativen-Belastung eher eine Abnahme der Muskelamplituden erwarten werden. Beim TD findet sich dieses Phänomen deutlich ausgeprägt wieder. Der SCM wird offensichtlich im Hinblick auf seine psychische Komponente auch nach vier Jahren Gesangsausbildung weiterhin überbeansprucht. Seine Funktion als Atemhilfsmuskel nimmt während der professionellen Gesangsausbildung sogar noch zu. Weiterhin kommt es, besonders im Endtonbereich der Tonleiter und beim Schwellton, zu Abnahmen der mittleren Muskelaktivitäten im Studienverlauf. Diese Veränderungen sind hauptsächlich bei den Atemmuskeln und vereinzelt auch bei Muskeln des Rückens vorzufinden. Hier kann als Ursache ein Trainingseffekt im Laufe der Gesangsausbildung angenommen werden. Im Vergleich zum Ausbildungsbeginn kann er Student nach vier Jahren Gesangsausbildung eine anspruchsvolle, gesangstechnische Übung mit einer geringeren, muskulären Beanspruchung absolvieren. Des Weiteren zeigen jedoch auch einzelne Muskeln, beispielhaft zu nennen sei hier der EL der oberflächlichen Rückenmuskulatur, eine Zunahme der Muskelaktivitäten im Studienverlauf. Folglich kann die eingangs aufgeführte Hypothese nicht eindeutig beantwortet werden.

7.2.3 HYPOTHESE 3

Da eine Ökonomisierung der Muskelaktivität als entscheidende Voraussetzung im Berufsalltag eines Sängers bzw. einer Sängerin angesehen werden kann, führt das professionelle Gesangstraining zu einer Optimierung der maßgeblich an der Atmung und Stimmgebung beteiligten Muskulatur, was, bezogen auf die Gesangsunabhängige Referenz, wiederum in einem Absinken des entsprechenden relativen Aktivitätsniveaus zu sehen ist.

Um diese Hypothese zu analysieren, werden die Ergebnisse der zeitunabhängigen Betrachtungen für die jeweiligen Gesangsübungen separat interpretiert. Zur Beantwortung der Fragestellung werden die mittleren Muskelaktivitäten, bezogen auf die Referenz, vergleichend zwischen Erst- und Folgeuntersuchung dargestellt. Es wird hierbei lediglich auf ausgeprägte Veränderungen im Studienverlauf eingegangen.

Werden die entsprechenden mittleren Muskelaktivitäten in Bezug auf die Referenz bei der Gesangsübung des Vokalausgleichs in Abbildung 7 betrachtet, so fallen im Studienverlauf einige Veränderungen auf. Insbesondere bei der Hals- und Nackenmuskulatur kommt es zu einer leichten Zunahme der Muskelaktivität beim SCM auf beiden Körperseiten. Der TD zeigt hingegen eine sehr ausgeprägte Abnahme der Muskelaktivitäten bezogen auf die Referenz. Auf der rechten Körperseite sind diese Veränderungen bei allen Vokalbereichen signifikant. Bei der Thoraxmuskulatur stellt sich die mittlere Muskelaktivität in der Folgeuntersuchung beim PM beidseits und beim SA auf der linken Seite eher zunehmend dar. Bei der tiefen Rückenmuskulatur kann eine sehr ausgeprägte Abnahme der Muskelaktivität beim MF auf beiden Körperseiten beobachtet werden. Bei der übrigen Muskulatur stellen sich im Studienverlauf nur wenige tendenzielle Veränderungen zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten dar.

Beim Dreiklang, dargestellt in Abbildung 13, zeigen sich ähnliche Veränderungen wie schon beim eben beschriebenen Vokalausgleich. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur ist erneut eine deutliche Zunahme der mittleren Muskelaktivitäten des SCM sowie eine ausgeprägte Abnahme der Muskelaktivitäten beim TD jeweils auf beiden Körperseiten nachweisbar. Beim SCM sind diese Veränderungen auf beiden Körperseiten in allen Bereichen der Gesangsübung signifikant. Auch bei der Muskulatur des Thoraxes findet sich, ausgenommen des SA auf der rechten Seite, eher eine Zunahme der mittleren Muskelaktivitäten im Vergleich zur Erstuntersuchung. Bei der Atemmuskulatur kommt es fast regelhaft bei allen

Muskeln dieser Gruppe zu einer leichten Abnahme der Muskelaktivität im letzten Übungsbereich. Einzige Ausnahme ist hierbei der ICO8 auf der linken Seite. Diese Besonderheit ist ebenfalls bei einzelnen Muskeln der tiefen- und oberflächlichen Rückenmuskulatur festzustellen. Die übrige Muskulatur stellt sich in der Nachuntersuchung weitestgehend unverändert dar und zeigt lediglich gering ausgeprägte Zu- oder Abnahmen der Muskelaktivitäten im Studienverlauf.

Beim Vortragen der Tonleiter, dargestellt in Abbildung 19, und dem dabei erfassten Endtonbereich fallen fast bei allen gemessenen Muskeln sehr regelmäßige Veränderungen in der Nachuntersuchung auf. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur sowie bei der Muskulatur des Thoraxes können ähnliche Veränderungen beobachtet werden wie bereits beim Vokalausgleich und beim Dreiklang. Beim SCM zeigt sich erneut eher eine Tendenz zur Aktivitätszunahme. Die mittlere Muskelaktivität des TD nimmt hingegen auf beiden Körperseiten, verglichen mit den Daten der Erstuntersuchung, wieder sehr deutlich ab. Der PM der Thoraxmuskulatur zeigt eine Zunahme der Muskelaktivität, während es beim SA derselben Muskelgruppe beidseits zu einer Abnahme der Aktivität kommt. Auf der rechten Seite sind die Veränderungen des SA jedoch nicht zu interpretieren. Die übrige Muskulatur, insbesondere auch die gesamte Rücken- und Bauchmuskulatur, zeigt in Bezug auf die Referenz bis auf wenige Ausnahmen in der Folgeuntersuchung eine Abnahme der mittleren Muskelaktivitäten.

Wird der Schwellton betrachtet, dargestellt in Abbildung 25, so sind ebenfalls Veränderungen der mittleren Muskelaktivitäten der gemessenen Muskeln zu beiden Untersuchungszeitpunkten nachweisbar. Die Hals- und Nackenmuskulatur sowie die Thoraxmuskulatur zeigen ein ähnliches Verhalten wie schon bei den bereits beschriebenen Gesangsübungen. Während es beim SCM erneut zu einer Zunahme der Muskelaktivität kommt, bildet sich beim TD eher eine Abnahme ab. Als Ausnahme sei hier der TD der linken Körperseite zu nennen, welcher ein deutlich anderes Aktivitätsverhalten aufzeigt als auf der gegenüberliegenden Seite. Bei der Thoraxmuskulatur findet sich mit einer Zunahme der Aktivität des PM und einer Abnahme der Muskelaktivität beim SA ein fast identisches Verhalten wie bei den bereits diskutierten Übungen. Besonders auffällig ist jedoch eine Abnahme der mittleren Muskelaktivitäten am Ende der jeweiligen Übung, bezogen auf die Referenz, bei fast allen Muskeln. Dies ist insofern von besonderem Interesse, da dieser Bereich der Gesangsübung als Zeitpunkt besonderer, gesangstechnischer Beanspruchung zu verstehen ist. Folglich ist eine Abnahme der Muskelaktivität beim Vortragen des Schwelltons

im Studienverlauf bei fast allen Muskeln zum Zeitpunkt besonders hoher, gesangstechnischer Anforderungen, nachweisbar.

Zusammenfassend sind bei den einzelnen Gesangsübungen ähnliche Veränderungen der mittleren Muskelaktivitäten im Studienverlauf festzustellen. Bei der Hals- und Nackenmuskulatur kommt es bei allen Gesangsübungen zu einer Zunahme der Muskelaktivitäten beim SCM sowie zu einer Abnahme beim TD. Ebenfalls eine sehr regelmäßige Veränderung stellt sich bei der Muskulatur des Brustkorbes dar. Hier nimmt die Aktivität des PM bei allen Übungen leicht zu. Der SA auf der linken Körperseite zeigt, ebenfalls bei allen Gesangsübungen, ein entgegengesetztes Verhalten. Die rechte Körperseite wird, wie bereits beschrieben, nicht mit interpretiert. Bei der übrigen Muskulatur kommt es teils nur zu gering ausgeprägten Zu- oder Abnahmen der Muskelaktivitäten in der Nachuntersuchung. Sehr bemerkenswerte Tendenzen finden sich hierbei allerdings im Endtonbereich der Tonleiter sowie beim Schwellton, angedeutet auch im letzten Übungsbereich des Dreiklangs. Bei fast allen Muskeln, insbesondere aber bei der Atem-, Bauch- und Rückenmuskulatur, kommt es zu einer Abnahme der mittleren Muskelaktivitäten in der Folgeuntersuchung. Dieses Phänomen ist insofern von besonderem Interesse, da diese Übungsbereiche in der Regel einem Abschnitt besonderer gesangstechnischer Beanspruchung entsprechen. Folglich zeigt sich tendenziell, dass der Gesangsstudent nach vier Jahren professionellem Gesangstrainings, entsprechend der Dresdner Schule, die sehr anspruchsvollen Abschnitte der Gesangsübungen in der Nachuntersuchung mit geringerer mittlerer Muskelaktivität bewältigen kann. Entsprechend der eingangs formulierten Hypothese kommt es somit tatsächlich zu einer Form der Ökonomisierung der Muskelaktivitäten im Ausbildungsverlauf. Einzige Ausnahmen sind hierbei die Veränderungen der Muskelaktivitäten beim SCM der Hals- und Nackenmuskulatur sowie beim PM der Thoraxmuskulatur.

7.2.4 HYPOTHESE 4

Bei der durch die Sänger in ihrer Länge frei wählbaren Gesangsübung des Schwelltons nimmt die Übungslänge im Vergleich zur Erstuntersuchung bedingt durch eine während der Gesangsausbildung erworbene, effektivere muskuläre Koordination zu. Gleichzeitig ist das auf die Referenz bezogene Aktivitätsniveau der beteiligten Muskeln bei der Folgeuntersuchung am Übungsende niedriger ausgeprägt als zu Beginn des Studiums.

Zur Beantwortung dieser Hypothese werden die Ergebnisse der zeitunabhängigen Betrachtungen des Schwelltons interpretiert. Hierfür werden die Übungslängen sowie die mittleren Muskelaktivitäten, bezogen auf die Referenz, vergleichend zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten dargestellt.

Beim Vokalausgleich, beim Dreiklang und bei der Tonleiter wurde die Dauer der Gesangsübung vom Übungsleiter angeleitet und vorgegeben. Lediglich bei der Gesangsübung zum Schwellton hat der Student die Möglichkeit die Länge des Gesanges frei zu bestimmen. Aus diesem Grund bietet sich diese Übung für einen zeitlichen Vergleich zwischen Erst- und Folgeuntersuchung besonders an. Wird nun die mittlere Dauer dieser Gesangsübung, dargestellt in Abbildung 27, bei allen Probanden zu beiden Untersuchungszeitpunkten miteinander verglichen, zeigt sich eine leichte Zunahme um etwa 0,4 Sekunden in der Nachuntersuchung bei einer medianen Gesamtübungslänge von 9,9 Sekunden über die gesamte Gruppe. Der Gesangstudent ist somit nach vier Jahren professioneller Gesangsausbildung in der Lage, den gesungenen Ton während dieser anspruchsvollen Übung für einen ca. 5% gegenüber der Ausgangssituation längeren Zeitraum zu halten. Dieses Phänomen kann jedoch nur als eine Tendenz interpretiert werden, da die Ergebnisse hierbei weder signifikant noch relevant sind.

Werden die entsprechenden mittleren Muskelaktivitäten, bezogen auf die Referenz, insbesondere am Ende der Gesangsübung betrachtet, fallen bei fast allen Muskeln die zu erwartenden Veränderungen zwischen Erst- und Folgeuntersuchung auf. Bei ICO5 und ICO8 der Atemmuskulatur sowie bei der gesamten Bauch- und Rückenmuskulatur sind am Übungsende in der Nachuntersuchung leicht niedrigere, mittlere Muskelaktivitäten abgebildet. Lediglich der EL der oberflächlichen Rückenmuskulatur auf der linken Körperseite zeigt dieses Phänomen nicht. Beim TD der Hals- und Nackenmuskulatur finden sich niedrigere Muskelaktivitäten am Ende der Gesangsübung, wobei diese auf der rechten

Körperseite deutlich ausgeprägter ausfallen als auf der gegenüberliegenden Seite. Der SCM hingegen zeigt eher eine Zunahme der Muskelaktivitäten bei großer gesangstechnischer Beanspruchung besonders am Ende der Übung. Folglich kommt es auch hier, wie schon bei den anderen Gesangsübungen dargestellt und unter 7.1.2.4 ausführlich beschrieben, zu einer im Laufe der Gesangsausbildung noch zunehmenden Aktivierung dieses Atemhilfsmuskels. Grundlegend können die in der Folgeuntersuchung festgestellten niedrigeren, mittleren Muskelaktivitäten als eine Form der Ökonomisierung, wie bereits ausführlich unter 7.2.3. diskutiert, der Muskelkoordination verstanden werden.

Zusammenfassend stellen sich die Veränderungen der Übungslängen als nicht signifikant sowie die Abnahmen der mittleren Muskelaktivitäten am Übungsende nur als gering ausgeprägt dar. Mögliche Ursachen für die festgestellten Varianzen könnten beispielsweise Lautheitsunterschiede im Bereich des gehaltenen Tones zwischen beiden Untersuchungszeitpunkten sein. Weiterhin kann während der Untersuchung nicht festgestellt werden, ob crescendo und decrescendo in der Erst- und Folgeuntersuchung gleich intensiv vorgetragen wurden. Des Weiteren wurde die Dauer der entsprechenden Gesangsübung zu keinem Zeitpunkt in den Übungsanweisungen thematisiert. Der Schwellton sollte in erster Linie möglichst intensiv und gleichmäßig vorgetragen werden. Somit können hier lediglich Tendenzen beschrieben und diskutiert werden. Diese tendenziellen Entwicklungen im Studienverlauf zeigen sich jedoch sehr regelmäßig und entsprechen letztendlich den Überlegungen der eingangs formulierten Hypothese.

7.3 FEHLERBETRACHTUNGEN

7.3.1 PROBANDEN

Wie bereits unter 5.1. aufgeführt und von Jähkel (2014) ausführlich beschrieben, wurden die Probanden entsprechend ihres Ausbildungsstandes ausgewählt. Einziges Aufnahmekriterium war das unmittelbar begonnene Gesangsstudium an einer der erwähnten Hochschulen für Musik. Mithilfe dieser Arbeit sollte herausgefunden werden, ob es bei der Gesamtheit der Studienteilnehmer im Laufe der professionellen Gesangsausbildung zu einer Umorganisation der etablierten Muskelkoordination kommt. Aus der Arbeit von Jähkel (2014) geht hervor, dass es keine ausgeprägten interindividuellen Varianzen in den Koordinationsmustern zwischen den Probanden zu Ausbildungsbeginn gibt. Somit kann der eventuelle Einfluss einer vorbestehenden klassischen Gesangsausbildung weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Probanden unterscheiden sich hinsichtlich Körpergröße, Gewicht und Konstitution teils sehr deutlich voneinander. Das demnach sehr unterschiedlich ausgeprägte Fettgewebe und damit der stark variierende Abstand zwischen Elektrode und Potential hat großen Einfluss auf die gemessenen Muskelaktivitäten (Lowery et al. 2002). Diese anatomischen und physiologischen systematischen Fehlergrößen können mittels Normierungsverfahren auf probandenspezifische Referenzgrößen (Referenzmaxima, übungsspezifische Maxima, intermuskuläre Koordination) weitestgehend minimiert werden (Mathiassen et al. 1995). Eine Vergleichbarkeit der Daten ist hiermit durch die ermittelten relativen Aktivitätsanteile trotzdem gewährleistet.

7.3.2 UNTERSUCHUNGSABLAUF

Um eine Vergleichbarkeit der Daten mit der Ausgangsuntersuchung von Jähkel (2014) zu gewährleisten, wurde auf einen identischen Untersuchungsaufbau sowie Untersuchungsablauf geachtet. Alle vorgetragenen Gesangsübungen sind etablierte gesangstechnische Übungen, welche am Studio für Stimmforschung der Hochschule für Musik in Dresden schon seit mehreren Jahren zur Analyse der Gesangsstimme genutzt werden. Alle Studienteilnehmer haben diese Übungen zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung in exakt derselben Reihenfolge und unter den gleichen Bedingungen vorgetragen wie in der Folgeuntersuchung. Auch bei der Folgeuntersuchung wurden die Studienteilnehmer in aufrechter Körperposition mit locker herabhängenden Armen untersucht. Dieser äußere Aufbau gewährleistet durch die identischen Bedingungen über alle Gesangsübungen zu beiden Untersuchungszeitpunkten hinweg eine Vergleichbarkeit der Daten untereinander. Die Messungen wurde mittels einer Digitalkamera

aufgezeichnet und im Nachgang bei der Auswertung der Daten noch ein weiteres Mal auf Richtigkeit kontrolliert. Somit konnte sichergestellt werden, dass der Aufbau und der Ablauf der Messungen von allen Probanden eingehalten wurde. Weiterhin erfolgte die Ausgangsuntersuchung sowie die Nachuntersuchung von ein und derselben Person. Der beschriebene Untersuchungsablauf wurde ebenfalls immer von der gleichen Person kontrolliert und gegebenenfalls vor Ort korrigiert. Somit ist die äußere Situation der Messungen der einzelnen Gesangsübungen untereinander sowie im Hinblick auf die Ausgangsuntersuchung stets vergleichbar.

Wie schon in der Erstuntersuchung festgestellt, zeigt sich auch bei den Messungen der Folgeuntersuchung, dass die gewählte Gesangsposition nicht von allen Teilnehmern durchgehend als angenehm empfunden wurde. Oft wurden von den Studienteilnehmern Arme und Armbewegungen mit in den Gesang einbezogen. Demnach mussten die Studenten häufig darauf hingewiesen werden, die statische Position beim Singen möglichst einzuhalten. Dieses Phänomen wurde bereits zum Zeitpunkt der Erstuntersuchung beschrieben. Somit bleibt eine geringe Restunsicherheit bestehen, da auch in der Nachuntersuchung nicht geklärt werden kann, inwieweit dies Einfluss auf die Gesamtaktivität der Muskulatur während der Messung hatte.

Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und des Ablaufs der Untersuchung findet sich unter 5.2.1 und 5.2.2.

7.3.3 ELEKTRODENPOSITIONIERUNG

Die zur Messung benötigten Elektroden wurden zu beiden Untersuchungszeitpunkten immer von derselben Person nach internationalen Richtlinien (Hermens et al. 1999) angebracht. Auf diese Weise konnten Fehler während der Messung, hervorgerufen durch falsche Elektrodenpositionierung, weitestgehend ausgeschlossen werden. McGill et al. (1996) konnten zeigen, dass es bei der Messung von tiefer gelegenen Muskeln, wie beispielsweise beim QL, keine nennenswerten Unterschiede zwischen OEMG und Nadel-EMG gibt. Somit kann die Methode des OEMGs zur Ableitung dieser tiefer im Gewebe liegenden Muskeln ohne Bedenken angewendet werden. Des Weiteren erfolgte eine sorgfältige Fixierung jedes einzelnen Elektrodenkabels. Eine Belastung der Elektroden auf Druck oder Zug, durch welche es zu Signalveränderungen durch Dislokation (Hermens und Vollenbroek-Hutten 2004) hätte kommen können, konnte somit ausgeschlossen werden.

Hier ist anzumerken, dass im Laufe der Analyse für den rechten SA als unplausibel anzusehende Werte identifiziert wurden. Es handelt sich am ehesten um ein technisches Problem des Messgerätes, welches bei der Vielzahl der zu beobachtenden Kanäle während der Messung selber nicht identifiziert werden konnte. Um diesbezügliche Fehlinterpretationen auszuschließen wurden die entsprechenden Werte in der Analyse und Interpretation der Daten ignoriert.

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Abschließend kann zusammenfassend festgestellt werden, dass es im Verlauf einer professionellen Gesangsausbildung bei den untersuchten Probanden zu einer Umorganisation der Muskelkoordination gekommen ist. Insbesondere in der Einatmungsphase zeigen sich sehr deutliche Veränderungen im Vergleich zur Arbeit von Jähkel (2014). Es wurde in der vorliegenden Arbeit besonders darauf geachtet, dass es beim Untersuchungsdesign und bei der Auswertung der Ergebnisse keine Abweichung zur Erstuntersuchung gegeben hat. Folglich können die Daten zu beiden Untersuchungszeitpunkten sehr gut miteinander verglichen werden. Die Vielzahl der untersuchten Muskeln sowie deren Veränderungen im Studienzeitraum erlauben es, einen Überblick über die Veränderungen der Muskelkoordination zu gewinnen.

Diese Methode ist somit zunächst als wissenschaftliche Untersuchung und Analyse sehr gut geeignet. Der Einfluss des entsprechenden Stiles der Gesangslehre kann mit dieser Methode in Form einer Veränderung der muskulären Aktivierung und Koordination objektiviert und demnach auch belegt werden.

Möglicherweise könnte diese Untersuchung, eventuell durch eine Anpassung des Untersuchungsdesigns, auch als eine Art diagnostisches Mittel verwendet werden. Es ist beispielsweise vorstellbar, dass diese Methode nach entsprechender Anpassung des Ablaufs auch in Form einer Einzeluntersuchung zur Analyse von Fehlkoordination und Fehlbeanspruchung verwendet werden kann. Folglich könnte diese Problematik während des Gesangs zu Studienbeginn oder aber auch im Verlauf der Gesangsausbildung objektiviert werden. Ein solches Konzept wäre mittels Bänderanalyse oder durch die Verwendung einzelner Kennmuskeln denkbar. Die einzelnen untersuchten Muskeln zeigen innerhalb der einzelnen Muskelgruppen häufig ein sehr ähnliches Verhalten. Einzelne Muskeln könnten somit stellvertretend für entsprechende ganze Muskelgruppen untersucht werden. Um funktionelle Dysbalancen zu vermeiden, sollte dabei stets mindestens ein Muskel von der Vorderseite und von der Rückseite untersucht werden. Folglich wäre ein Untersuchungsaufbau mit beispielweise vier Muskelpaaren (OI, OE, MF und QL) vorstellbar.

Dem Gesangslehrer könnte so ein Werkzeug zur Objektivierung von gesangstechnischen Defiziten an die Hand gegeben werden. Auf diese Weise können gezielte Hinweise gegeben werden, woran im Einzelfall noch gearbeitet werden muss.

9 LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS

- Aumüller G, Aust G, Doll A, Engele J, Kirsch J, Mense S, Reißig D, Salvetter J, Schmidt W, Schmitz F, Schulte E, Spanel-Borowski K, Wolff W, Wurzinger LJ, Zilch H-G. 2007. *Duale Reihe Anatomie*. Georg Thieme Verlag.
- Basmajian JV, De Luca CJ. 1985. *Muscles Alive*. 5 Aufl. Baltimore, London, Sydney: Williams and Wilkins.
- Beck TW, Housh TJ, Cramer JT, Stout JR, Ryan ED, Herda TJ, Costa PB, Defreitas JM. 2009. Electrode placement over the innervation zone affects the low-, not the high-frequency portion of the EMG frequency spectrum. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19 (4):660-666:DOI: 10.1016/j.jelekin.2008.04.001.
- Binazzi P, Lanini B, Bianchi R, Romagnoli I, Nerini M, Gigliotti F, Duranti R, Milic-Emili J, Scano G. 2006. Breathing pattern and kinematics in normal subjects during speech, singing and loud whispering. *Acta Physiol (Oxf)*, 186 (3):233-246.
- Burden A, Bartlett R. 1999. Normalisation of EMG amplitude: an evaluation and comparison of old and new methods. *Med Eng Phys*, 21 (4):247-257.
- Collyer S, Kenny DT, Archer M. 2009a. Listener perception of the effect of abdominal kinematic directives on respiratory behavior in female classical singing. *J Voice*, 25 (1):15-24.
- Collyer S, Kenny DT, Archer M. 2009b. The effect of abdominal kinematic directives on respiratory behaviour in female classical singing. *Log Phon Vocol*, 34 (3):100-110.
- Collyer S, Thorpe CW, Callaghan JP, Davis PJ. 2008. The influence of fundamental frequency and sound pressure level range on breathing patterns in female classical singing. *J Speech Lang Hear Res*, 51 (3):612-628.
- De Luca CJ. 1979. Physiology and Mathematics of Myoelectric Signals. *IEEE Trans Biomed Eng*, 26 (6):313-325.
- De Luca CJ. 1997. The use of surface electromyography in biomechanics. *J Appl Biomech*, 13 (2):135-163.
- De Luca CJ, Knaflitz M. 1992. *Surface Electromyography: What's New?* Turin: C.L.U.T.
- De Luca G. 2001. *Fundamental Concepts in EMG Signal Acquisition*. Delsys.
- Echternach M, Traser L, Richter B. 2014a. Vocal tract configurations in tenors' passaggio in different vowel conditions-a real-time magnetic resonance imaging study. *J Voice*, 28 (2):DOI 10.1016/j.jvoice.2013.10.009.
- Echternach M, Traser L, Markl M, Richter B. 2011. Vocal tract configurations in male alto register functions. *J Voice*, 25 (6):670-677:DOI 10.1016/j.jvoice.2010.09.008.
- Echternach M, Popeil L, Traser L, Wienhausen S, Richter B. 2014b. Vocal tract shapes in different singing functions used in musical theater singing-a pilot study. *J Voice*, 28 (5):DOI 10.1016/j.jvoice.2014.01.011.
- Emmons S. 1988. Breathing for singing. *Journal of Voice*, 2 (1):30-35.
- Farina D, Cescon C, Merletti R. 2002. Influence of anatomical, physical, and detection-system parameters on surface EMG. *Biol Cybern*, 86 (6):445-456.
- Forchhammer J. 1937. *Stimmbildung auf stimm- und sprachphysiologischer Grundlage*. München: Verlag von J. F. Bergmann.
- Frederick H, Rodd-Marling Y. 1978. *Singen. Die physische Natur des Stimmorganes. Anleitung zum Aufschliessen der Singstimme*. 2 Aufl.: Mainz: Schott, (1978).
- Freiwald J, Baumgart C, Konrad P. 2007. *Einführung in die Elektromyographie*. Balingen: Spitta.
- Göpfert B. 2002. *Handbuch der Gesangkunst*. Florian Noetzel Verlag.
- Hermens HJ, Vollenbroek-Hutten MM. 2004. Effects of electrode dislocation on electromyographic activity and relative rest time: effectiveness of compensation by a normalisation procedure. *Med Biol Eng Comput*, 42 (4):502-508.

- Hermens HJ, Freriks B, Merletti R, Stegeman DF, Blok J, Rau G, Disselhorst-Klug C, Hägg G. 1999. European Recommendations for Surface ElectroMyoGraphy, results of the SENIAM project. Enschede: Roessingh Research and Development b.v.
- Hirano M, Ohala J, Vennard W. 1969. The function of laryngeal muscles in regulating fundamental frequency and intensity of phonation. *J Speech Lang Hear Res*, 12 (3):616-628.
- Hirano M, Vennard W, Ohala J. 1970. Regulation of register, pitch and intensity of voice. An electromyographic investigation of intrinsic laryngeal muscles. *Folia Phoniatr*, 22 (1):1-20.
- Iwarsson J. 2001. Effects of inhalatory abdominal wall movement on vertical laryngeal position during phonation. *J Voice*, 15 (3):384-394.
- Iwarsson J, Sundberg J. 1998. Effects of lung volume on vertical larynx position during phonation. *J Voice*, 12 (2):159-165.
- Jähkel S. 2014. Polyelektromyografische Untersuchung der Rumpfmuskulatur bei Sängern : Statusbesimmung zum Studienbeginn Jena: Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Konrad P. 2005. EMG-Fibel – Eine praktische Einführung in die kinesiologische Elektromyographie Noraxon INC. USA.
- Löfqvist A, McGarr NS, Honda K. 1984. Laryngeal muscles and articulatory control. *J Acoust Soc Am*, 76 (3):951-954.
- Lohse H, Ludwig R, Röhr M. 1982. Statistische Verfahren für Psychologen, Pädagogen und Soziologen. Berlin: Volk und Wissen.
- Lowery MM, Stoykov NS, Taflove A, Kuiken TA. 2002. A multiple-layer finite-element model of the surface EMG signal. *IEEE Trans Biomed Eng*, 49 (5):446-454:DOI: 10.1109/10.995683.
- Marras WS, Davis KG. 2001. A non-MVC EMG normalization technique for the trunk musculature: Part 1. Method development. *J Electromyogr Kinesiol*, 11 (1):1-9.
- Marras WS, Davis KG, Maronitis AB. 2001. A non-MVC EMG normalization technique for the trunk musculature: Part 2. Validation and use to predict spinal loads. *J Electromyogr Kinesiol*, 11 (1):11-18.
- Mathiassen SE, Winkel J, Hägg GM. 1995. Normalization of surface EMG amplitude from the upper trapezius muscle in ergonomic studies -- A review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 5 (4):197-226.
- McGill S, Jucker D, Kropf P. 1996. Appropriately placed surface EMG electrodes reflect deep muscle activity (psoas, quadratus lumborum, abdominal wall) in the lumbar spine. *J Biomech*, 29 (11):1503-1507.
- Merletti R, Rainoldi A, Farina D. 2001. Surface electromyography for noninvasive characterization of muscle. *Exerc Sport Sci Rev*, 29 (1):20-25.
- Mörl F, Anders C, Graßme R. 2010. An easy and robust method for ECG artifact elimination of SEMG signals Aalborg: Omnipress.
- Pettersen V. 2006. Preliminary findings on the classical singer's use of the pectoralis major muscle. *Folia Phoniatr Logop*, 58 (6):427-439.
- Pettersen V, Westgaard RH. 2002. Muscle activity in the classical singer's shoulder and neck region. *Logoped Phoniatr Vocol*, 27 (4):169-178.
- Pettersen V, Westgaard RH. 2004. The association between upper trapezius activity and thorax movement in classical singing. *J Voice*, 18 (4):500-512.
- Pettersen V, Westgaard RH. 2005. The activity patterns of neck muscles in professional classical singing. *J Voice*, 19 (2):238-251.
- Pettersen V, Bjorkoy K, Torp H, Westgaard RH. 2005. Neck and shoulder muscle activity and thorax movement in singing and speaking tasks with variation in vocal loudness and pitch. *J Voice*, 19 (4):623-634.

- Richter B. 2013. Die Stimme - Grundlagen, Künstlerische Praxis, Gesunderhaltung. Henschel Verlag, Seemann Henschel GmbH & Co. KG, Leipzig.
- Roubeau B, Henrich N, Castellengo M. 2009. Laryngeal vibratory mechanisms: the notion of vocal register revisited. *J Voice*, 23 (4):425-438.
- Rua Ventura SM, Freitas DR, Ramos IM, Tavares JM. 2013. Morphologic differences in the vocal tract resonance cavities of voice professionals: an MRI-based study. *J Voice*, 27 (2):132-140.
- Sachs L. 1997. *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Sand S, Sundberg J. 2005. Reliability of the term 'support' in singing. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 30 (2):51-54.
- Schmidt RF, Lang F, Heckmann M. 2011. *Physiologie des Menschen*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg.
- Seidner W, Wendler J. 2010. *Die Sängerstimme: Phoniatische Grundlagen für die Gesangsausbildung*. Henschel.
- Shiavi R, Bugle HJ, Limbird T. 1987. Electromyographic gait assessment, Part 1: Adult EMG profiles and walking speed. *J Rehabil Res Dev*, 24 (2):13-23.
- Shipp T. 1975. Vertical laryngeal position during continuous and discrete vocal frequency change. *J Speech Lang Hear Res*, 18 (4):707-718.
- Shipp T, Izdebski K. 1975. Letter: Vocal frequency and vertical larynx positioning by singers and nonsingers. *J Acoust Soc Am*, 58 (4):1104-1106.
- Sonninen A, Laukkanen AM, Karma K, Hurme P. 2005. Evaluation of support in singing. *J Voice*, 19 (2):223-237.
- Sundberg J. 1997. *Die Wissenschaft von der Singstimme*. Orpheus - Verlag GmbH.
- Thiel W. 1969. *Anton Hafferl Lehrbuch der Topographischen Anatomie*. Springer - Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Thorpe CW, Cala SJ, Chapman J, Davis PJ. 2001. Patterns of breath support in projection of the singing voice. *J Voice*, 15 (1):86-104.
- Traser L, Burdumy M, Richter B, Vicari M, Echternach M. 2013. The effect of supine and upright position on vocal tract configurations during singing--a comparative study in professional tenors. *J Voice*, 27 (2):141-148:DOI 10.1016/j.jvoice.2012.11.002.
- Traser L, Burdumy M, Richter B, Vicari M, Echternach M. 2014. Weight-bearing MR imaging as an option in the study of gravitational effects on the vocal tract of untrained subjects in singing phonation. *PLoS One*, 9 (11):DOI 10.1371/journal.pone.0112405.
- Vasconcelos MJ, Ventura SM, Freitas DR, Tavares JM. 2011. Towards the automatic study of the vocal tract from magnetic resonance images. *J Voice*, 25 (6):732-742.
- Watson AH, Williams C, James BV. 2012. Activity patterns in latissimus dorsi and sternocleidomastoid in classical singers. *J Voice*, 26 (3):95-105.
- Watson PJ, Hoit JD, Lansing RW, Hixon TJ. 1989. Abdominal muscle activity during classical singing. *J Voice*, 3 (1):24-31.
- Yang JF, Winter DA. 1984. Electromyographic amplitude normalization methods: improving their sensitivity as diagnostic tools in gait analysis. *Arch Phys Med Rehabil*, 65 (9):517-521.

10 ANHANG

10.1 LEBENS LAUF

Bildungsweg:

2008-2015	Studium der Humanmedizin an der Friedrich-Schiller-Universität Jena Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung 05/2015 (Note: gut) Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung 04/2014 (Note: gut) Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung 09/2010 (Note: sehr gut)
2004-2007	Ausbildung zum Veterinär-medizinisch-technischen Laborassistenten am IFBE Bildungszentrum in Zwickau (Note: gut)
2003-2004	Zivildienst am Rudolph-Virchow-Klinikum Glauchau
1995-2003	Georgius-Agricola-Gymnasium Glauchau (Note: 2,5)
1991-1995	Erich-Weinert-Grundschule Glauchau

Praktisches Jahr:

12/2014-04/2015	Chirurgie: Thüringen-Kliniken „Georgius Agricola“, Saalfeld
09/2014-12/2014	Innere Medizin: Katholisches Krankenhaus St. Johann Nepomuk Erfurt
05/2014-09/2014	Neurologie: Friedrich-Schiller-Universität Jena, Klinik für Neurologie

Famulaturen:

07/2013	Allgemeinmedizin
03/2013	Neurologie
09/2011	Herz-Thorax-Chirurgie
08/2011	Radiologie

Jena, den 30.06.2015

Robert Schwabe

10.2 DANKSAGUNG

Eine wissenschaftliche Arbeit ist nie in Gänze das Werk einer einzelnen Person. Ich möchte hiermit die Gelegenheit nutzen und denjenigen Menschen meinen Dank aussprechen, die mir bei der Fertigstellung dieser Arbeit behilflich gewesen sind.

Ich danke Herrn PD Dr. med. Christoph Anders vom Universitätsklinikum Jena für die Vergabe des Promotionsthemas sowie die sehr gute wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Für wichtige Hinweise und Korrekturen im Bereich Rechtschreibung und Grammatik möchte ich mich bei Frau Nicole Garbe aus Erlangen bedanken. Abschließend möchte ich mich neben meinen Freunden hauptsächlich bei meiner Familie und meinen Eltern Ulf und Dagmar Schwabe für die bedingungslose Unterstützung während meines gesamten Studiums bedanken. Ohne Ihre Hilfe hätte ich das Studium der Humanmedizin nicht erfolgreich abschließen, sowie eine Unterbrechung der Studienzeit für die Fertigstellung der vorliegenden Arbeit nicht durchführen können.

10.3 EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist, ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind, mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Herr PD Dr. med. Ch. Anders (Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie; Funktionsbereich Motorik, Pathophysiologie und Biomechanik), die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Jena, den 30.06.2015

Robert Schwabe