

Aus der Klinik für Audiologie und Phoniatrie
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Entwicklung, Normierung und klinische Implementierung des Stimmumfangsmaßes in der phoniatischen Stimmfunktionsdiagnostik

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae (Dr. med.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von
Marie-Louise Freymann
aus Berlin

Datum der Promotion:

06. März 2020

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	II
Abstract	III
Zusammenfassung	IV
1. Einleitung	1
2. Material und Methodik	2
2.1 Entwicklung des SUM als neuen Parameter in der Stimmdiagnostik.....	2
2.2 Geschlechtsspezifische Referenzbereiche des SUM bei jungen Erwachsenen ...	4
2.3 Einsatz des SUM zur Therapieevaluation von Stimmproblemen bei Sängern.....	6
3. Ergebnisse	8
3.1 Entwicklung des SUM als neuen Parameter in der Stimmdiagnostik.....	8
3.2 Geschlechtsspezifische Referenzbereiche des SUM bei jungen Erwachsenen ...	9
3.3 Einsatz des SUM zur Therapieevaluation von Stimmproblemen bei Sängern.....	10
4. Diskussion	11
5. Literaturverzeichnis	17
Eidesstattliche Versicherung	20
Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen	21
Publikation 1	22
Publikation 2	33
Publikation 3	43
Lebenslauf	62
Publikationsliste	63
Danksagung	64

Abkürzungsverzeichnis

AVA	Automatisierte Vokalanalyse
A_{VRP}	Fläche des Stimmumfangsprofils
DiVAS	digitales Videoarchivierungs- und Evaluationssystem
DSI	Dysphonie Schweregrad Index
F_{0high}	höchster Ton
F_{0low}	niedrigster Ton
F_{0max}	Frequenzbereich (F _{0high} - F _{0low})
ggt.	Tropfen (lat. <i>guttae</i>)
Hz	Hertz
I_{high}	höchste Intensität
I_{low}	niedrigste Intensität
I_{max}	Dynamikbereich (I _{high} - I _{low})
I_{mean}	mittlerer Dynamikbereich pro Halbton
MPT	maximale Phonationsdauer (engl. <i>maximum phonation time</i>)
MW	Mittelwert
P_{VRP}	Umfang des Stimmumfangsprofils
Q	Quartil
RBH	Rauigkeit (R), Behauchtheit (B), Heiserkeit (H)
RR	Referenzbereich (engl. <i>reference range</i>)
SD	Standardabweichung (engl. <i>standard deviation</i>)
SE	Standardfehler (engl. <i>standard error</i>)
SPL	Schalldruckpegel (engl. <i>sound pressure level</i>)
SUM	Stimmumfangsmaß (engl. <i>vocal extent measure, VEM</i>)
SUP	Stimmumfangsprofil (engl. <i>voice range profile, VRP</i>)
TIVA	Totale Intravenöse Anästhesie
sVHI	Singing Voice Handicap Index
VHI-9i	Voice Handicap Index (gekürzte 9-item-Fassung)
VLS	Videolaryngostroboskopie

Abstract

The present cumulative doctoral thesis deals with the development, standardization and clinical implementation of the Vocal Extent Measure (VEM) in phoniatric voice function diagnostics. The main purpose in the VEM conception consisted of the construction of a parameter, which allows an easy, stable and objective interpretation of Voice Range Profiles (VRP) as they are registered as a component of instrument-based objective voice diagnostics. In contrast to the established Dysphonia Severity Index (DSI) the VEM was further developed as a positive measure for the quantification of vocal capacity.

The recording of a VRP can be done with different standardized registration programs. The respective measurement results, however, show differences. The objective of the first study was to prove these differences statistically and to develop the VEM as a robust parameter, which is not influenced by the measurement program. VRP of 97 subjects were recorded simultaneously by two experienced examiners using the established registration programs DiVAS (XION Medical, Berlin) and LingWAVES (WEVOSYS, Forchheim). The registration programs depicted significant differences for all parameters except for VEM, DSI, maximum phonation time (MPT) and lowest frequency ($F_{0\text{low}}$). A significant gender influence for DSI was found with DiVAS but not with LingWAVES. In contrast to DSI, the VEM was less susceptible to the registration program.

In a second study focusing on VEM standardization, 202 subjects without voice complaints were examined. Reference ranges were captured by combining a retrospective analysis of subjects who came to the clinic and received a medical fitness certificate ($n=135$) and a prospective analysis of adult volunteers without voice complaints ($n=67$). The mean of the VEM amounted to 124 (SD 13) for males and 114 (SD 13) for females. The values differed significantly between both sexes and correlated significantly with the corresponding DSI. The results can serve as a basis to interpret VEM values and to evaluate treatment success.

In a third clinical trial, the efficacy of three different voice treatments as well as the suitability of the VEM to register treatment effects were examined. Overall 76 singers received either conservative pedagogic or logopedic voice treatment or a phonosurgical intervention. Three months post-therapeutically the VEM had increased significantly from 113 (SD 20) to 124 (SD 14). Phonosurgery had the biggest impact on the

improvement of vocal function. Conservative therapies provided smaller quantitative enhancements but resulted in a restoration of artistic capabilities, too. The results show that all treatment methods are effective, measurable, objectively and subjectively satisfactory options to improve vocal function. Additionally, the VEM is an appropriate tool to detect treatment success.

Zusammenfassung

Die vorliegende kumulative Dissertation befasst sich mit der Entwicklung, Normierung und klinischen Implementierung des Stimmumfangsmaßes (SUM) in der phoniatischen Stimmfunktionsdiagnostik. Das Hauptziel bei der Konzeption des SUM bestand in der Konstruktion eines Parameters, mit dessen Hilfe sich die Interpretation von Stimmumfangprofilen (SUP), wie sie im Rahmen der objektiven apparativen Stimm diagnostik registriert werden, erleichtern und objektivieren lässt. Im Gegensatz zum etablierten Dysphonia Severity Index (DSI) sollte mit dem SUM zudem eine positiv orientierte Messgröße zur quantitativen Einschätzung der stimmlichen Leistungsfähigkeit entwickelt werden.

Die SUP-Aufzeichnung erfolgt mithilfe standardisierter Registrierungsprogramme, die jedoch je nach verwendetem Programm unterschiedliche Messwerte generieren können. Ziel der ersten Studie war es, diese Unterschiede statistisch zu belegen und mit dem SUM eine robuste Messgröße zu entwickeln, die vom verwendeten Registrierungsprogramm unbeeinflusst bleibt. Dafür wurden bei 97 Probanden SUP mit den etablierten Programmen DiVAS (XION Medical, Berlin) und LingWAVES (WEVOSYS, Forchheim) von zwei erfahrenen Untersuchern simultan aufgezeichnet. Die Registrierungsprogramme zeigten für alle Stimmparameter mit Ausnahme von DSI, SUM, maximale Phonationszeit (MPT) und niedrigste Frequenz ($F0_{low}$) signifikante Unterschiede. Ein signifikanter Einfluss des Geschlechts auf den DSI wurde bei der Aufzeichnung mittels DiVAS, jedoch nicht mittels LingWAVES festgestellt. Im Gegensatz zum DSI zeigte sich das SUM weniger vom Registrierungsprogramm beeinflusst.

In einer zweiten Studie zur Normierung des SUM wurden 202 Testteilnehmer ohne Stimmbeschwerden untersucht. Die Referenzbereiche wurden durch die Kombination einer retrospektiven Analyse stimmgesunder Probanden mit bestandenem phoniatischen Stimmgutachten ($n=135$) und einer prospektiven Analyse gesunder Erwachsener ohne Stimmbeschwerden ($n=67$) ermittelt. Das SUM betrug für Männer im Mittel 124 (SD 13) und für Frauen 114 (SD 13). Die Werte unterschieden sich signifikant zwischen den beiden Geschlechtern und korrelierten signifikant mit den korrespondierenden DSI-Werten. Die Ergebnisse können als erstes Bezugssystem für die Interpretation von SUM Werten und die Einschätzung von Therapieeffekten dienen.

In einer dritten klinischen Studie wurde die Wirksamkeit etablierter stimm-

therapeutischer Maßnahmen miteinander verglichen und die Tauglichkeit des SUM zur Erfassung von Therapieeffekten untersucht. Insgesamt erhielten 76 Sängerinnen und Sänger entweder Gesangsunterricht, logopädische Stimmübungstherapie oder eine mikrophonochirurgische Behandlung. Drei Monate posttherapeutisch hatte sich das SUM von 113 (SD 20) auf 124 (SD 14) signifikant verbessert. Phonochirurgische Interventionen zeigten den größten Einfluss auf die Verbesserung der Singstimme. Konservative Therapien lieferten quantitativ kleinere Verbesserungen, führten aber auch zur Wiederherstellung der künstlerischen Fähigkeiten. Die Ergebnisse lassen schlussfolgern, dass alle drei untersuchten Behandlungsmethoden effektive, quantifizierbare, subjektiv und objektiv zufriedenstellende Therapien zur Stimmverbesserung darstellen und das SUM zur klinischen Erfassung dieser Therapieerfolge geeignet ist.

1. Einleitung

Objektive apparative Methoden der Stimmbeurteilung, wie die Erstellung eines Stimmumfangsprofils (SUP, auch „Stimmfeld“ genannt) unter standardisierten Bedingungen, stellen einen wichtigen Bestandteil der fünf Säulen der phoniatischen Stimmdiagnostik dar [1,2]. Mit Hilfe der im SUP erfassten Parameter niedrigste Intensität (I_{\min}) und höchste Frequenz ($F0_{\text{high}}$) sowie aus den akustisch-aerodynamischen Parametern jitter und maximale Phonationszeit (MPT) lässt sich anschließend der in der Stimmdiagnostik ebenfalls fest etablierte Dysphonia Severity Index (DSI) berechnen [3]. Die stimmliche Leistungsfähigkeit eines Patienten oder Sängers¹ wird bis dato aus einigen exponierten Werten des SUP sowie aus der Betrachtung des Stimmfeldes geschätzt und deskriptiv beschrieben. Ein wesentliches Anliegen unserer ersten Studie bestand daher in der Entwicklung eines neuen Parameters, mit dessen Hilfe eine einfache, objektive und besser vergleichbare Beurteilung von SUP ermöglicht wird. Im Gegensatz zum DSI als negativ ausgerichtetes Maß für den Schweregrad einer Dysphonie, sollte das neu entwickelte Stimmumfangsmaß (SUM) eine positiv orientierte Messgröße zur Erfassung der stimmlichen Leistungsfähigkeit darstellen und somit eine bisher numerisch nicht erfasste Aussage zur Stimmfunktion ermöglichen. Um eine Implementierung in vorhandene phoniatische Untersuchungsprotokolle zu erleichtern, sollte der neue Parameter zudem einfach zu erheben und interpretieren sein und beispielsweise keiner größeren finanziellen Investition oder Neuanschaffung bedürfen. Auch wenn die Aufzeichnung von SUP mithilfe standardisierter Registrierungsprogramme wie DiVAS (XION Medical, Berlin) oder LingWAVES (WEVOSYS, Forchheim) erfolgt, zeigt die klinische Erfahrung, dass beide Programme zum Teil unterschiedliche Messwerte liefern. Ein weiteres Ziel der ersten Studie bestand daher darin, diese Messunterschiede statistisch zu untersuchen und mit dem SUM eine robuste und von der verwendeten Software unbeeinflusste Messgröße zu entwickeln.

Nach der Entwicklung planten wir eine zweite Studie zur Normierung des SUM. Ziel hierbei war es, Referenzbereiche des SUM für junge Erwachsene ohne Stimmbeschwerden zu ermitteln und damit ein erstes Bezugssystem für die Interpretation von SUM Werten und die Einschätzung von Therapieeffekten zu schaffen. Darüber hinaus sollten der Einfluss des Geschlechts auf das SUM genauer exploriert

¹ In dieser Arbeit wird aus Gründen der Lesbarkeit die männliche Form verwendet. Frauen sind automatisch stets mitgemeint.

und die Korrelation des SUM mit etablierten stimmdiagnostischen Parametern wie dem DSI und dem Voice Handicap Index (Kurzversion VHI-9i) genauer untersucht werden. In einer dritten prospektiv klinischen Studie versuchten wir das SUM schließlich in die etablierte phoniatische Stimmfunktionsdiagnostik zu implementieren. Dazu wurde das SUM bei funktionell beeinträchtigten sowie organisch erkrankten (semi-) professionellen Sängerinnen und Sängern neben den traditionell verwendeten subjektiven und objektiven Stimmparametern prä- und posttherapeutisch miterfasst und bei der Auswertung mit den etablierten Parametern verglichen. Die spezifischen Ergebnisse gesangspädagogischen Trainings (Gesangsunterricht), logopädischer Stimmübungs-therapie sowie phonomikrochirurgischer Interventionen wurden analysiert und einander gegenübergestellt. Schließlich sollte die klinische Eignung des SUM als Parameter der Therapieevaluation untersucht werden.

2. Material und Methodik

2.1 Entwicklung des SUM als neuen Parameter in der Stimmdiagnostik

Das SUM hat das Ziel die stimmliche Leistungsfähigkeit einer Person in Form eines eindimensionalen intervallskalierten Wertes ohne Einheit zu quantifizieren. In der Stimmdiagnostik wird die stimmliche Leistungsfähigkeit standardmäßig durch die Registrierung eines SUP ermittelt. Je größer der Dynamik- und Frequenzumfang einer Stimme in einem SUP sind, desto größer ist die Stimmkapazität. Neben der SUP-Größe wird die stimmliche Leistungsfähigkeit zudem an der SUP-Form gemessen. Eine leistungsfähige Stimme zeichnet sich durch ein kompaktes Stimmfeld aus, in dem die Kurven des leisen und lauten Singens über einen möglichst langen Frequenzbereich parallel zueinander verlaufen, d.h. einen gleichmäßigen Dynamikverlauf zeigen. Dynamikspitzen bzw. -einbrüche sprechen hingegen für eine geringere Stimmkapazität. Diese Tatsachen berücksichtigend erfolgt die Berechnung des SUM anhand des Umfangs (P_{VRP}) und des Flächeninhalts (A_{VRP}) des Stimmfeldes. Je kleiner der Umfang und je größer der Flächeninhalt eines SUP sind, desto größer ist die Leistungsfähigkeit der Stimme. Die mathematische Berechnung des SUM folgt der Idee, dass ein optimales Stimmfeld kreisförmig sein müsste, da bei einem Kreis verglichen mit anderen geometrischen Figuren der Umfang im Vergleich zum Flächeninhalt am geringsten ist. Je größer der Umfang eines Stimmfeldes ist, d.h. je mehr die Form von der eines Kreises abweicht, desto geringer ist die stimmliche Kapazität. Für die

Berechnung des SUM wird daher der Flächeninhalt des Stimmfeldes (A_{VRP}) mit dem Quotienten aus dem theoretischen Umfang eines Kreises mit gleicher Fläche wie dem SUP und dem tatsächlichen Umfang des Stimmfeldes (P_{VRP}) multipliziert. Die resultierenden Werte liegen meist zwischen 0 und 120, wobei diese Grenzen auf beiden Seiten unter- beziehungsweise überschritten werden können. Hohe SUM-Werte drücken eine große stimmliche Leistungsfähigkeit aus und umgekehrt. Abbildung 1 zeigt die Ableitung der Formel zur Berechnung des SUM. In der phoniatischen Praxis erfolgt die Berechnung automatisiert mithilfe des Stimmdokumentations- und Stimmdiagnostikprogramms „Automatisierte Vokalanalyse“, kurz AVA [4].

<p>Die Fläche (A) und der Umfang (U) eines Kreises sind definiert als:</p>	$A_{Kreis} = \pi r^2$	$U_{Kreis} = 2 \pi r$
<p>Der Umfang eines Kreises mit bekannter Fläche ist daher:</p>	$U_{Kreis} = 2 \pi \sqrt{\frac{A_{Kreis}}{\pi}}$	
<p>Das SUM_{exp} ist das Produkt aus der Stimmfeldfläche und dem Quotienten aus dem Umfang, den ein Kreis mit dem Flächeninhalt des Stimmfeldes hätte, und dem tatsächlichen Stimmfeldumfang. Es ergibt sich ein exponentielles Verhalten, welches jedoch für Korrelationen mit linearen Größen ungünstig ist.</p>	$\begin{aligned} SUM_{exp} &= A_{Stimmfeld} \frac{U_{Kreis}}{U_{Stimmfeld}} \\ &= A_{Stimmfeld} \frac{2 \pi \sqrt{\frac{A_{Stimmfeld}}{\pi}}}{U_{Stimmfeld}} \end{aligned}$	
<p>Logarithmiert man das Produkt, wird es unhandlich klein. Daher wurden noch ein Koeffizient und ein Subtrahend hinzugefügt, so dass das SUM abschließend anhand der folgenden Formel berechnet wird:</p>	$SUM = 50 \ln \left(A_{Stimmfeld} \frac{2 \pi \sqrt{\frac{A_{Stimmfeld}}{\pi}}}{U_{Stimmfeld}} \right) - 200$	

Abbildung 1 Herleitung der Formel zur Berechnung des SUM. (Die Abbildung wurde entnommen aus Caffier und Möller [5])

Bei einer Kohorte aus 97 Patienten, die sich in der Sprechstunde der Klinik für Audiologie und Phoniatrie der Charité Universitätsmedizin Berlin vorstellten, wurden simultan zwei SUP von zwei erfahrenen Untersuchern unter praktisch identischen Bedingungen aufgenommen. Der eine Untersucher nutzte hierfür das DiVAS-Programm, während der andere das LingWAVES-Programm verwendete. Für die Aufzeichnung der Sprechstimme wurden die Patienten aufgefordert in 4 Intensitätsstufen – leise, in Zimmerlautstärke, in Vortragslautstärke und mit ihrer

Rufstimme – von 21 bis 25 zu zählen. Für die Registrierung der Singstimme wurden die Patienten gebeten, jeweils beginnend bei einem Ton mittlerer Höhe zuerst immer tiefere und dann immer höhere Töne zu singen. Dieses Vorgehen wurde erst für die leise Singstimme durchgeführt und anschließend für die laute Singstimme wiederholt. Die Dokumentation der Werte erfolgte parallel zu ihrer Aufzeichnung in einem Koordinatensystem, bei dem die Frequenz (Hz) der Töne auf der Abszisse und die Lautstärke (SPL) auf der Ordinate abgebildet waren. Alle SUP-Dateien wurden einer standardisierten Auswertung unterzogen. Bestimmt wurden die Parameter MPT, jitter, höchster Ton ($F0_{high}$) und niedrigster Ton ($F0_{low}$) mit dazwischenliegendem Frequenzbereich ($F0_{max}$), niedrigste Intensität (I_{low}) und höchste Intensität (I_{high}) mit dazwischenliegendem Dynamikbereich (I_{max}) und mittlerem Dynamikbereich pro Halbton (I_{mean}), DSI, A_{VRP} , P_{VRP} und SUM. Zur Vervollständigung der phoniatriischen Diagnostik erhielt jeder Patient eine Videolaryngostroboskopie (VLS) mit einem hochauflösenden starren Videolaryngoskop (XION Medical, Berlin). Zudem erfolgte eine auditiv-perzeptive Beurteilung der Stimme nach dem RBH-Schema. Hierfür lasen die Patienten den standardisierten, phonetisch ausgewogenen Mustertext „Der Nordwind und die Sonne“. Während des Lesens beurteilte der Untersucher die Stimme des Sprechers hinsichtlich ihrer Rauigkeit (R), Behauchtheit (B) und allgemeinen Gesamtheiserkeit (H) [6,7].

Für die Auswertung wurden die mit den verschiedenen Registrierungsprogrammen aufgezeichneten Parameter miteinander verglichen, mit der subjektiven H-Bewertung korreliert und auf geschlechtsspezifische Unterschiede untersucht. An statistischen Verfahren kamen der T-Test für unabhängige und gepaarte Stichproben, sowie die Berechnung der Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_p) und Spearman (r_s) für intervall- bzw. ordinal skalierte Variablen zum Einsatz.

2.2 Geschlechtsspezifische Referenzbereiche des SUM bei jungen Erwachsenen

Zuerst wurden in einer retrospektiven Untersuchung die stimmdiagnostischen Ergebnisse aller 135 Patienten analysiert, die sich in der Zeit von Januar 2008 bis März 2018 in der Sprechstunde der Klinik für Audiologie und Phoniatrie vorstellten, um sich die Tauglichkeit ihrer Stimme für einen sprech-/stimmintensiven Beruf (z.B. Lehrer, Erzieher, Moderator, Schauspieler) bescheinigen zu lassen. Um die Stichprobe zu vergrößern, wurden zudem 67 stimmgesunde junge Erwachsene im Zeitraum von August 2017 bis Februar 2018 prospektiv phoniatriisch untersucht, nachdem sie über

die Studie aufgeklärt wurden und in ihre Teilnahme eingewilligt hatten. Die Akquise der Probanden erfolgte aus einem Pool von Medizinstudierenden der Charité, Auszubildenden der Logopädie, Mitarbeitern der Klinik für Audiologie und Phoniatrie der Charité, sowie aus dem persönlichen Umfeld der Autoren. Da sich in früheren Untersuchungen ein Einfluss des Alters auf stimmliche Parameter zeigte [8,9], wurden nur Probanden zwischen 18 und 40 Jahren in die Studie eingeschlossen.

Die Anamneseerhebung erfolgte in Form eines semi-strukturierten Interviews, in dem die Probanden Fragen über das Vorliegen aktueller sowie vergangener stimmlicher Probleme, einer aktuell stattfindenden logopädischen Stimmübungstherapie und stattgehabter Operationen am Kehlkopf bzw. an den Stimmlippen beantworten mussten. Bejahte ein Proband eine oder mehrere der Fragen, führte dies zum Studienausschluss. Da nur Freizeit- bzw. Hobbysänger mit in die Studie eingeschlossen werden sollten, wurde zudem der Grad einer potentiellen Gesangsausbildung erfragt. Die weitere phoniatische Diagnostik orientierte sich an den Empfehlungen der europäischen laryngologischen Gesellschaft [1] sowie nach ihrem Erscheinen im Jahr 2014 an den Kriterien zur Begutachtung von Störungen der Stimmfunktion [10]. Um organische oder funktionelle Auffälligkeiten ausschließen zu können, erhielten alle Probanden eine digitale VLS mittels eines hochauflösenden starren Videolaryngoskops mit integriertem Mikrofon (XION Medical, Berlin). Während mit der laryngoskopischen Untersuchung die allgemeine Gewebemorphologie und die Stimmlippenbeweglichkeit begutachtet wurde, ermöglichte die Stroboskopie eine detaillierte Beurteilung des Stimmlippenschlusses, der Regelmäßigkeit und Symmetrie der Stimmlippenschwingung sowie der Qualität der Schleimhautwelle. Eine subjektiv-perzeptive Einschätzung der Stimme erfolgte anhand des RBH-Schemas. Unter Verwendung der Software DiVAS wurden akustisch-aerodynamische Parameter (MPT, jitter) erhoben und für jeden Probanden ein SUP aufgezeichnet. Anhand der gewichteten Kombination der objektiven Stimmparameter I_{\min} , $F0_{\text{high}}$, MPT und jitter ließ sich anschließend der DSI bestimmen. Abschließend wurden mit Hilfe der Software AVA die Parameter A_{VRP} , P_{VRP} und SUM berechnet. Eine subjektive Selbsteinschätzung ihrer Stimme nahmen die Probanden anhand der Beantwortung der Fragen des VHI-9i vor. Mit Hilfe dieses Fragebogens war es möglich, aufgrund stimmlicher Probleme potentiell bestehende Alltagseinschränkungen auf physischer, emotionaler sowie funktioneller Ebene zu erfassen.

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe des Statistikprogramms SPSS Version 25.0

(IBM Corp., Armonk, N.Y., USA). Deskriptive Statistiken wurden für ausgewählte metrische (Alter, MPT, jitter, I_{\min} , $F0_{\max}$, DSI) und ordinal skalierte Variablen (VHI-9i) berechnet. Mithilfe des t-Tests für unabhängige Stichproben wurde überprüft, ob sich die Mittelwerte des SUM in Abhängigkeit von physiologischen bzw. pathologischen Werten bereits etablierter Parameter wie dem DSI und VHI-9i unterscheiden (basierend auf der DSI-Schweregradklassifikation von Gonnermann [11]). Die Spearman-Rangkorrelation (r_s) sowie die Pearson-Rangkorrelation (r_p) sollten die Stärke und Richtung der Assoziation der Variablen Alter, DSI und VHI-9i jeweils mit A_{VRP} , P_{VRP} und dem SUM untersuchen. Schließlich wurden die Mittelwerte, Standardabweichungen, Standardfehler und 95%-Referenzbereiche (Mittelwert $\pm 1,96 \times SD$) für die Variablen SUM, P_{VRP} und A_{VRP} geschlechtsspezifisch berechnet und damit erste Normwerte definiert. Das Vorliegen signifikanter Mittelwertunterschiede zwischen den Geschlechtern erfolgte erneut mittels des t-Tests für unabhängige Stichproben. Zur Visualisierung der Verteilung von Werten wurden Boxplots und Streudiagramme verwendet. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ festgelegt.

2.3 Einsatz des SUM zur Therapieevaluation von Stimmproblemen bei Sängern

In diese klinisch prospektive Studie wurden 76 (semi-) professionelle Sänger mit funktioneller oder organischer Dysphonie eingeschlossen, die sich in der Zeit von April 2011 bis März 2017 in unserer interdisziplinären Musikermedizinischen Sprechstunde vorstellten. Die Datenerhebung fand prä- und drei Monate postinterventionell statt. Zudem wurde den Patienten bei Interesse eine einmal jährliche Kontrolluntersuchung angeboten. In Abhängigkeit der zugrundeliegenden Pathologie sowie des Schweregrades der Dysphonie und des vorangegangenen Krankheitsverlaufs wurden die Patienten in eine von drei Interventionsgruppen eingeteilt. Entweder erfolgte eine konservative Behandlung in Form von logopädischer Stimmübungstherapie oder gesangspädagogischem Unterricht, oder es wurde eine phonomikrochirurgische Operation durchgeführt. Um Therapieeffekte später ganz klar einer Interventionsform zuordnen zu können, wurden die Patienten angehalten, für die Dauer der Studie nur an der ihnen zugeteilten Therapieform teilzunehmen. Die konservativen Therapien wurden von erfahrenen Gesangslehrern bzw. von auf Stimmtherapie spezialisierten Logopäden durchgeführt und fanden über 30 Sitzungen mit einer Frequenz von zwei Terminen pro Woche á 45 Minuten statt. Die phonochirurgischen Eingriffe führten erfahrene

Phonochirurgen der Klinik für Audiologie und Phoniatrie durch. Je nach zugrundeliegender Pathologie wurden die Operationen entweder in Vollnarkose mittels direkter Mikrolaryngoskopie oder am wachen, sitzenden Patienten mithilfe des starren transoralen Laryngoskops durchgeführt. Während für ersteres OP-Verfahren die totale intravenöse Anästhesie (TIVA bestehend aus Propofol/Remifentanyl) verwendet wurde, wurden die Patienten für Letzteres nur lokal anästhesiert (10ml Tetracain 1%, 6 gtt. Adrenalin, 6 gtt. Tacholiquin). Sowohl die prä- als auch die postinterventionelle phoniatische Untersuchung und damit die Therapieevaluation setzte sich erneut aus den bereits in den Kapiteln 2.1 und 2.2 beschriebenen Bestandteilen – digitale VLS, auditiv-perzeptive Stimmbewertung (RBH), Selbsteinschätzung der Stimme (VHI-9i), objektive Stimmdiagnostik mit Registrierung von SUP, akustisch-aerodynamischen Parametern, DSI und SUM – zusammen. Die VLS diente der Diskriminierung zwischen funktionellen und organisch bedingten Stimmstörungen sowie der Subklassifikation organischer Dysphonien. Die Selbsteinschätzung der Stimme erfolgte nicht ausschließlich anhand des VHI-9i, sondern darüber hinaus zusätzlich mit dem Sänger-spezifischen Singing Voice Handicap Index (sVHI) [12]. Dieser besteht aus 36 Aussagen, deren Zutreffen die Sänger wie beim VHI-9i auf einer Skala von 0 bis 4 einschätzen sollten (0 = nie, 1 = selten, 2 = manchmal, 3 = oft, 4 = immer). Eine abschließende Frage zielt auf die Globaleinschätzung des Störungsgrades der Singstimme ab und wird auf einer dreistufigen Skala beantwortet (0 = keine Störung, 1 = leichtgradige Störung, 2 = mittelgradige Störung, 3 = hochgradige Störung).

Die statistische Auswertung erfolgte mithilfe des Statistikprogramms R Version 3.2.5. (GNU-Projekt, Free Software Foundation, Boston, MA, USA). Deskriptive Statistiken wurden für alle prä- und posttherapeutischen Stimmfunktionsparameter sowie für deren Änderungen berechnet. Zur Visualisierung der Verteilungen von Werten wurden verschiedene graphische Techniken wie Boxplots, Histogramme und Kerndichtekurven verwendet. Die Spearman-Rangkorrelation (r_s) sollte die Stärke und Richtung der Assoziation zwischen prä- und posttherapeutisch gemessenen Merkmalen untersuchen. Der Mann-Whitney-Wilcoxon-Test diente der Überprüfung, ob sich die Stimmfunktionsparameter aufgrund der Behandlung signifikant verbesserten. Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle für diese Änderungen wurden berechnet. Das Signifikanzniveau wurde auch hier auf $\alpha = 0,05$ festgelegt.

3. Ergebnisse

3.1 Entwicklung des SUM als neuen Parameter in der Stimmdiagnostik

Die Studienkohorte umfasste 65 Frauen und 32 Männer im Alter zwischen 12 und 75 Jahren [MW 44 (SD 17 Jahre)]. Während 7 Probanden eine gesunde Stimme hatten, wiesen 29 Patienten eine funktionelle Dysphonie und 61 Patienten organische Stimmlippenveränderungen auf. Die auditiv-perzeptive Beurteilung zeigte bei 38 Patienten keine (R0 B0 H0), bei 35 Patienten eine milde (R0-1 B0-1 H1), bei 19 Patienten eine mäßige (R1-2 B1-2 H2) und bei 5 Patienten eine schwere Beeinträchtigung (R2-3 B2-3 H3). Patienten beider Geschlechter unterschieden sich nicht signifikant hinsichtlich ihrer Heiserkeit oder der zugrundeliegenden Pathologie der Dysphonie. Wie geplant wurden bei allen Probanden zwei Stimmfelder simultan aufgezeichnet (1x mit DiVAS, 1x mit LingWAVES). Insgesamt lagen somit 194 Stimmfelder für die statistische Analyse vor. Der Vergleich der Aufnahmen beider Programme ergab unterschiedliche Ergebnisse für die verschiedenen Parameter. Von allen Messgrößen war nur die MPT in beiden Programmen absolut identisch. Auch wenn sich bei der Aufzeichnung von DSI und SUM mittels DiVAS höhere Mittelwerte als bei der Aufzeichnung mittels LingWAVES zeigten (DSI 3,4 vs. 3,2; SUM 77 vs. 72), waren diese Unterschiede nicht signifikant. Dies galt nicht nur bezogen auf die gesamte Kohorte, sondern auch für die Untergruppen mit den Heiserkeitsniveaus H1 (DSI 2,9 vs. 2,5; SUM 72 vs. 68), H2 (DSI 0,4 vs. -1,2; SUM 40 vs. 36), und H3 (DSI -2,1 vs. -5,8; SUM -12 vs. -16). Für die H0-Patientengruppe ohne Heiserkeit zeigte die DSI- und SUM-Erfassung mittels DiVAS und LingWAVES divergierende Ergebnisse (DSI 5,8 vs. 6,7; SUM 116 vs. 112). Ebenfalls nicht signifikant unterschieden sich die Messwerte für $F0_{low}$. Die Werte für jitter und I_{high} ($p < 0,05$) sowie für den Frequenzbereich $F0_{max}$ ($p < 0,01$) und für die Parameter $F0_{high}$, I_{low} , I_{max} , I_{mean} , P_{VRP} und A_{VRP} ($p < 0,001$) unterschieden sich dagegen signifikant. Sowohl für die mit DiVAS als auch die mit LingWAVES aufgezeichneten Werte zeigte sich eine signifikante Korrelation zwischen dem Grad der Heiserkeit und den Parametern DSI (DiVAS $r = -0,65$; LingWAVES $r = -0,70$; je $p < 0,001$) und SUM (DiVAS $r = -0,75$; LingWAVES $r = -0,66$; je $p < 0,001$). SUM und DSI korrelierten mit durchschnittlich $r = 0,84$ (DiVAS) bzw. $r = 0,85$ (LingWAVES) ebenfalls signifikant miteinander ($p < 0,001$).

Die geschlechtsspezifischen Unterschiede waren mit LingWAVES für die Parameter $F0_{low}$, $F0_{high}$ und $F0_{max}$ signifikant ($p < 0,001$). Dagegen konnte kein signifikanter Einfluss

des Geschlechts auf die Parameter SUM, DSI, I_{low} , I_{high} und I_{mean} festgestellt werden. Auch für DiVAS ergab sich ein signifikanter geschlechtsspezifischer Einfluss auf die Parameter $F0_{low}$, $F0_{high}$ und $F0_{max}$ ($p < 0,001$). Der Einfluss auf den DSI erwies sich im Gegensatz zu LingWAVES auch als signifikant ($p < 0,01$). Das Geschlecht zeigte keinen signifikanten Einfluss auf die Parameter VEM, I_{low} , I_{high} und I_{mean} . Bei keinem der Programme wurde ein signifikanter Einfluss des Geschlechts auf andere Parameter festgestellt. Der Vergleich von DSI und SUM zwischen ausgewählten Patienten verdeutlichte, dass deutlich unterschiedliche SUP und damit divergierende SUM Werte durchaus mit annähernd identischen DSI Werten einhergehen können.

3.2 Geschlechtsspezifische Referenzbereiche des SUM bei jungen Erwachsenen

Die Studienkohorte umfasste insgesamt 202 Probanden, von denen 21 aufgrund ihres Alters (<18, >40 Jahre), 8 aufgrund kleiner Pathologien in der digitalen VLS, 13 aufgrund einer funktionellen Dysphonie, eine Probandin aufgrund anamnestisch wiederkehrender stimmlicher Beeinträchtigungen, 6 Probanden aufgrund einer abgeschlossenen Gesangsausbildung und 3 Probanden aufgrund unvollständiger Daten ausgeschlossen werden mussten. Die Kohorte der restlichen 151 Probanden setzte sich aus 99 Frauen und 52 Männern im Alter von 18 bis 39 Jahren [MW 24 (SD 5 Jahre)] zusammen. Es bestand kein signifikanter Unterschied zwischen dem Alter der beiden Geschlechter [Männer: 25,6 (SD 5 Jahre); Frauen: 23,2 (SD 4 Jahre) $p=0,755$]. Ferner fand sich keine signifikante Korrelation zwischen dem Alter und dem SUM (Männer: $r_p=0,122$, $p=0,388$; Frauen: $r_p=0,163$, $p=0,107$). Die Probanden hatten einen mittleren DSI von 6,3 (SD 1,5), der VHI-9i lag im Median bei 3 (Q1 1, Q3 5). Insgesamt zeigten 12 Probanden pathologische DSI Werte ($< 4,2$), 24 Probanden erzielten einen per definitionem pathologischen VHI-9i Wert (> 5). Die Mittelwerte von SUM, A_{VRP} und P_{VRP} unterschieden sich signifikant zwischen Probanden mit physiologischem und pathologischem DSI ($DSI \geq 4,2$ vs. $DSI < 4,2$). Des Weiteren korrelierte der DSI für beide Geschlechter signifikant mit A_{VRP} (Männer: $r_p=0,725$, $p < 0,001$; Frauen: $r_p=0,712$, $p < 0,001$), P_{VRP} (Männer: $r_p=0,691$, $p < 0,001$; Frauen: $r_p=0,711$, $p < 0,001$) und dem SUM (Männer: $r_p=0,651$, $p < 0,001$; Frauen: $r_p=0,643$, $p < 0,001$). Signifikante Mittelwertunterschiede zwischen Probanden mit physiologischem und pathologischem VHI-9i ($VHI-9i \leq 5$ vs. $VHI > 5$) fanden sich hingegen nicht. Auch die durchgeführten Korrelationsanalysen zwischen VHI-9i und P_{VRP} (Männer: $r_p=-0,188$, $p=0,191$; Frauen:

$r_p = -0,156$, $p = 0,147$), A_{VRP} (Männer: $r_p = -0,237$, $p = 0,097$; Frauen: $r_p = -0,205$, $p = 0,055$) beziehungsweise SUM (Männer: $r_p = -0,246$, $p = 0,085$; Frauen: $r_p = -0,196$, $p = 0,066$) waren nach Ausschluss der Ausreißer nicht signifikant. Die Normwerte für das SUM wurden ebenfalls anhand der Daten der 151 Probanden bestimmt und lagen für die Männer bei 123,7 (SD 12,6) und für die Frauen bei 114,4 (SD 13,3) ($p < 0,001$). Auch die Mittelwerte und Standardabweichungen für A_{VRP} [Männer: 952,3 (SD 219,2); Frauen: 813,1 (SD 191,2), $p < 0,001$] und P_{VRP} [Männer: 154,8 (SD 22,5); Frauen: 146,1 (SD 20,3), $p = 0,022$] wurden geschlechtsspezifisch ermittelt. Schließlich wurden für diese drei Parameter geschlechtsspezifische Referenzbereiche (95% - RR) berechnet, bei denen Männer (A_{VRP} : 522,7 – 1381,8 / P_{VRP} : 110,8 – 198,9 / SUM : 99,0 – 148,3) jeweils signifikant höhere Werte als Frauen (A_{VRP} : 438,3 – 1187,8 / P_{VRP} : 106,2 – 185,9 / SUM : 88,3 – 140,6) erzielten.

3.3 Einsatz des SUM zur Therapieevaluation von Stimmproblemen bei Sängern

Die Studienkohorte ($n = 76$) umfasste 57 Sängerinnen und 19 Sänger im Alter zwischen 17 und 64 Jahren [MW 38 (SD 11 Jahre)], von denen 61 professionell, 9 semiprofessionell, 2 als ambitionierte Amateure und 4 als erfolgreiche Gesangslehrer arbeiteten. Alle Stimmgattungen waren vertreten: 46 Sopranistinnen, 11 Altistinnen, 7 Tenöre, 9 Baritone und 3 Bässe. 28% der Sänger (21/76) wiesen eine funktionelle Dysphonie auf, bei 72% (55/76) wurden organische Stimmlippenveränderungen diagnostiziert. Randödeme ($n = 25$), Knötchen ($n = 9$) und Polypen ($n = 8$) stellten die häufigsten pathologischen Befunde in der digitalen VLS dar. Die prätherapeutische auditiv-perzeptive Stimmbeurteilung offenbarte keine Beeinträchtigung bei 38 (R0 B0 H0), leichte Beeinträchtigungen bei 35 (R0-1 B0-1 H1) und mäßige Beeinträchtigungen bei 3 (R1-2 B1-2 H2) Probanden. Die subjektive Selbsteinschätzung der Stimmen im VHI-9i und im sVHI reichte von leichten bis zu mittelschweren Beeinträchtigungen [VHI-9i MW 11 (SD 8), sVHI MW 70 (SD 29)]. Die präinterventionellen objektiven, akustischen und aerodynamischen Parameter zeigten im Vergleich zu gesunden Nicht-Sängern gute Ergebnisse. Dennoch waren die meisten Sänger in ihrer künstlerischen Leistungsfähigkeit objektiv und/oder subjektiv beeinträchtigt. Therapeutisch erhielten 57% der Sänger (43/76) eine phonochirurgische Intervention, 43% (33/76) eine konservative pädagogische (14/33) oder logopädische (19/33) Behandlung. Bei den Sängern der Phonochirurgie-Gruppe konnten alle organischen Pathologien erfolgreich

minimalinvasiv entfernt werden. Innerhalb der mittleren postoperativen Beobachtungszeit von 291 ± 294 Tagen (Median 168 Tage) traten keine Nebenwirkungen oder Rezidive auf. Die VLS zeigte eine narbenfreie Abheilung mit stabilem Epithel. Zudem erlangten alle Patienten postoperativ gerade Stimmlippenränder, einen vollständigen Glottisschluss und normalisierte Stimmlippenoszillationen. Konservative Behandlungen zeigten vor allem bei Patienten mit Randödemen sehr gute Behandlungserfolge. Pathologien wie Stimmlippenknötchen ($n=2$), Kontaktgranulome ($n=1$) oder Dystonie ($n=1$) zeigten sich in der VLS postinterventionell hingegen unverändert. 3 Monate nach der entsprechenden Behandlung zeigten die Sänger aller drei Interventionsgruppen signifikante Verbesserungen in allen akustischen und aerodynamischen Parametern mit Ausnahme des jitters. Der DSI verbesserte sich im Mittel von 6,1 (SD 2,0) auf 7,4 (SD 1,8) ($p < 0,001$), das SUM von 113 (SD 20) auf 124 (SD 14) ($p < 0,001$). Beide Parameter korrelierten signifikant miteinander ($r_s = 0,41$). I_{\min} nahm von 48,8 (SD 6,5) auf 46,0 (SD 2,9) ab, $F0_{\max}$ verbesserte sich von 819,1 (SD 257,2) auf 885,4 (SD 257,4). Auch die subjektiven Parameter verbesserten sich signifikant. So sank der sVHI im Mittel von 70 (SD 29) auf 30 (SD 22) und der VHI-9i von 11 (SD 8) auf 6 (SD 5) (jeweils $p < 0,01$). Darüber hinaus zeigte der mittlere RBH-Status weniger Rauigkeit, Behauchtheit und Gesamtheiserkeit ($p < 0,001$). Im Vergleich der Behandlungsgruppen untereinander zeigte sich, dass phonochirurgische Interventionen den größten Einfluss auf die Verbesserung der Singstimme hatten. Konservative Therapien führten quantitativ zwar zu kleineren Verbesserungen als die Phonochirurgie, dennoch erlangten die meisten Sänger auch durch sie eine Wiederherstellung ihrer stimmlichen Fähigkeiten. Alter, Geschlecht, Stimmregister und Gesangsstil hatten keinen Einfluss auf das Behandlungsergebnis.

4. Diskussion

Die im Rahmen der vorliegenden kumulativen Dissertation konzipierten Studien zur Entwicklung, Normierung und klinischen Implementierung des SUM in der phoniatischen Stimmfunktionsdiagnostik konnten erfolgreich durchgeführt werden. In unserer ersten Arbeit berichteten wir über die Konstruktion des SUM als quantitatives Korrelat der individuellen stimmlichen Leistungsfähigkeit. Nach der Erhebung eines SUP kann das stimmliche Potential weder isoliert aus dem Tonhöhenumfang noch isoliert aus dem Dynamikbereich abgeleitet werden. Daher verwendet das SUM die

SUP-Fläche als geeigneteres Korrelat für die Quantifizierung. Da ein Sänger seine Stimme nur entlang einer homogenen Dynamiklinie künstlerisch differenziert einsetzen kann, während Dynamikspitzen oder -einbrüche bei einzelnen Tönen die effektive Stimmleistung beeinträchtigen, wurde darüber hinaus auch der SUP-Umfang in die Berechnung des neuen Stimmparameters einbezogen. Durch die Erfassung der Gleichmäßigkeit des dynamischen Verlaufs der SUP-Grenzen, d.h. der Kurven des leisen und lauten Singens, wird also auch ein qualitatives Stimmcharakteristikum berücksichtigt. Wie im Methodenteil ausführlich erläutert, ergibt sich das SUM aus dem Produkt des Flächeninhalts des Stimmfeldes (A_{VRP}) mit dem Quotienten aus dem theoretischen Umfang eines Kreises mit gleicher Fläche wie dem SUP und dem tatsächlichen Umfang des Stimmfeldes (P_{VRP}). Aus dieser Berechnungsgrundlage ergeben sich mehrere Vorteile: So bleibt das SUM – im Gegensatz zum DSI – zum einen unbeeinflusst von störanfälligen akustisch-aerodynamischen Messungen wie dem Jitter. Zum anderen ist es unabhängig von der Stimmintensität und damit tolerant gegenüber differierenden Mikrofonabständen. Bei der Aufzeichnung des SUM mit verschiedenen standardisierten Registrierungsprogrammen stellten wir zudem eine hohe Reliabilität und Reproduzierbarkeit des SUM fest. Schließlich zeigte der Vergleich von DSI und SUM, dass deutlich unterschiedliche SUP und damit divergierende SUM Werte unter Umständen mit fast identischen DSI Werten einhergehen können. Dies verdeutlicht die unterschiedliche Intention beider Parameter. Während der DSI als negativ orientierte Größe eine Aussage über den Schweregrad einer Dysphonie zulässt, dient das SUM als positiv orientiertes Maß zur Erfassung der stimmlichen Leistungsfähigkeit. Es stellt daher eine sinnvolle Ergänzung der bis dato bestehenden objektiven apparativen Stimmdiagnostik dar.

In unserer zweiten Studie ist es gelungen, erste Referenzbereiche für das SUM sowie für A_{VRP} und P_{VRP} für junge stimmgesunde Erwachsene zu ermitteln. So betrug das SUM für Frauen im Mittel 114 (SD 13) und für Männer 123 (SD 13). Die Werte liegen damit an der oberen Grenze des geschätzten Intervalls zwischen 0 und 120. Wie in bisherigen Studien [5,13] fanden auch wir eine signifikante Korrelation zwischen dem DSI und dem SUM. Je höher der DSI und somit je stimmgesunder ein Proband war, desto größer war auch die jeweilige stimmliche Leistungsfähigkeit. Ebenfalls korrespondierend zu den Ergebnissen einer früheren Studie [13], fanden wir hingegen

keine signifikante Korrelation zwischen dem SUM und dem VHI-9i. Dies könnte daran liegen, dass sich entgegen unserer Erwartung ein Teil der Probanden trotz einer physiologischen VLS und ihrer Zusicherung, dass sie sich subjektiv stimmgesund fühlten, im VHI-9i sehr kritisch einschätzte und damit hohe und manchmal per definitionem pathologische Punktsummen erzielte. So erreichte in einem Extremfall eine stimmgesunde Probandin ein SUM von 109 und gleichzeitig einen VHI-9i Gesamtwert von 17, was einer mittelschwer gestörten Stimme entspräche. Des Weiteren beziehen sich die bisher bestehenden Grenzwerte auf Berechnungen zur Schweregradklassifikation des VHI-12, die wiederum primär auf Untersuchungen von Patienten und nicht von Personen mit einer gesunden Stimme basieren [14]. Eine Evaluation oder Normierung des VHI-9i für stimmgesunde Personen steht bis dato noch aus.

Im Gegensatz zu den Beobachtungen in unserer ersten Studie unterschieden sich die SUM Werte für Männer und Frauen signifikant voneinander. Eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse könnte darin bestehen, dass unsere erste Studie die Verteilung des SUM primär bei Patienten mit funktionellen sowie verschiedenen organischen Stimmstörungen untersuchte, sodass signifikante Unterschiede möglicherweise vor allem bei gesunden Stimmen auftreten und sich bei Patienten mit Dysphonie gegeneinander aufwiegen. Indirekte Hinweise auf die Plausibilität größerer SUM Werte bei Männern liefern Studien, die sich mit der Normierung von SUP-Parametern bei Erwachsenen mit untrainierter Stimme befassen und in denen männliche im Vergleich zu weiblichen Probanden zum Teil größere Tonhöhenumfänge [15,16] und Dynamikbereiche [16,17] erzielten. In einer Studie von Siupsinskiene und Lycke [16] wiesen Männer darüber hinaus auch eine signifikant größere Stimmfeldfläche auf. Erwähnenswert an dieser Stelle ist jedoch auch, dass die aktuelle Studienlage zu den genannten Parametern widersprüchliche Ergebnisse liefert und beispielsweise Sanchez et al. [18] bei Frauen signifikant größere Stimmfeldflächen fanden. Eine genauere Untersuchung der geschlechtsspezifischen Verteilung des SUM in zukünftigen Studien erscheint daher wünschenswert und sinnvoll.

Um die stimmdiagnostischen Ergebnisse unserer Stichprobe besser einordnen zu können, führten wir einen Vergleich unserer mit den Ergebnissen früherer (Normierungs-) Studien [3,8,9,18-21] durch. Auffällig war, dass die Werte insgesamt erheblichen Schwankungen unterlagen. So variierten die Mittelwerte des DSI für Männer von 2,3 (SD 1,4) bis 5,4 (SD 1,8) und für Frauen von 2,3 (SD 2) bis 6,0 (SD 1,4). In Gegenüberstellung mit den früheren Studien wiesen unsere Probanden

vergleichbare Ergebnisse für die Parameter MPT, jitter und $F0_{high}$ auf. Gleichzeitig erreichten unsere Probanden jedoch durchschnittlich eine niedrigere minimale Intensität (I_{low}) sowie den höchsten DSI. Für diese Unterschiede sehen wir mehrere mögliche Ursachen: Erstens erfolgte der Ein- bzw. Ausschluss unserer Probanden anhand sehr strikter Kriterien. So wurde die Stimmgesundheit der Teilnehmer neben den getätigten Angaben in der Anamneseerhebung immer mittels einer VLS überprüft. Personen mit kleinsten Pathologien, die potentiell mit der stimmlichen Leistungsfähigkeit interferieren könnten, wurden ausgeschlossen. Zweitens gewährten wir nur Personen mit professioneller Gesangsausbildung keine Studienteilnahme; Singen in der Freizeit stellte hingegen kein Ausschlusskriterium dar. Folglich ist es möglich, dass unsere Probanden größere stimmliche Kapazitäten aufwiesen, als die Probanden der Vergleichsstudien. Drittens inkludierten einige der älteren Untersuchungen [3,9,18-20] Probanden mit einer größeren Altersspanne und fanden heraus, dass der DSI mit steigendem Alter abnimmt. Da sich unsere Studie auf die Untersuchung junger Erwachsener zwischen 18 und 40 Jahren fokussierte, könnte dies einen weiteren Grund für die hohen DSI Werte darstellen. Viertens zeigte sich unter anderem in unserer ersten aber auch in weiteren Studien [22], dass die Größe einiger Parameter vom verwendeten Registrierungsprogramm beeinflusst wird. Somit könnten Teile der gemessenen Unterschiede auch auf die Verwendung unterschiedlicher Registrierungsprogramme zurückzuführen sein.

Unsere dritte Studie bestätigt die bisherigen Erkenntnisse anderer Veröffentlichungen und systematischer Übersichtsarbeiten, die die Wirksamkeit der Phonochirurgie bei organischen Dysphonien [23-26] und konservativer Behandlungen bei funktioneller Dysphonie sowie Dysodie belegen [27-33]. Im detaillierten Vergleich der etablierten Behandlungsmethoden zeigen unsere Ergebnisse, dass die Phonochirurgie den größten Einfluss auf die Singstimme hatte. Konservative Therapien gingen mit quantitativ kleineren Verbesserungen einher, führten aber auch zur Wiedererlangung der künstlerischen Fähigkeiten. Numerisch ließen sich die stimmlichen Veränderungen nicht nur mit den etablierten Parametern wie dem DSI und dem VHI sondern auch mithilfe des SUM feststellen. Das SUM kann somit als ein geeignetes Maß zur Erfassung von Therapieeffekten betrachtet werden. Es ermöglicht eine insbesondere für Sänger bedeutsame quantitative, objektive und besser vergleichbare Erfassung der stimmlichen Leistungsfähigkeit. Schließlich liefert die Studie erste Hinweise auf die

Größe des SUM bei (semi-) professionellen Sängerinnen und Sängern und trägt somit zu einer besseren Einordbarkeit von SUM Werten bei. Einige Limitationen unserer Studie müssen jedoch Erwähnung finden: So war der Nachbeobachtungszeitraum von 3 Monaten zu kurz, um Aussagen über ein Langzeit-Outcome zu ermöglichen. Obwohl wir in unserem Follow-up keine Verschlechterungen oder relevanten Rezidive feststellten, wären längerfristig regelmäßige Wiedervorstellungen erforderlich, um z.B. bei Patienten mit Larynxpapillomatose den Therapieerfolg im weiteren Verlauf zu überprüfen. Des Weiteren war unsere Stichprobengröße zu klein, um eine informative Aufschlüsselung für alle Genres zu gewährleisten. Auch wenn wir unsere Patienten dazu anhielten, keine andere als die ihnen zugewiesene Therapieform in Anspruch zu nehmen, kann nicht hundertprozentig ausgeschlossen werden, dass einige der Teilnehmer insgeheim weitere Hilfsmaßnahmen anwendeten. Dennoch weisen unsere Ergebnisse daraufhin, dass sowohl die Phonochirurgie als auch die logopädische Stimmübungstherapie und der Gesangsunterricht geeignete und individuell quantifizierbare Maßnahmen der Stimmrehabilitation darstellen. Die spezifische Behandlungsempfehlung für eines der drei Verfahren sollte durch den erfahrenen Phoniater erfolgen und von der Art der Pathologie abhängen sowie die Anamnese, Symptome und individuellen Fähigkeiten und Anforderungen an die Stimme berücksichtigen. Dabei darf im klinischen Alltag kein „entweder – oder“ im Vordergrund stehen. Vielmehr sollten die einzelnen Fachrichtungen interdisziplinär zusammenarbeiten, um als Team das optimale Behandlungsergebnis für die Patienten zu erzielen.

Neben studienspezifischen Limitationen ist es wichtig, auf einige allgemeine Ursachen hinzuweisen, die zu einer Über- bzw. Unterschätzung des SUM führen können: Da die Berechnung des SUM auf der Grundlage des SUP – konkret anhand der Parameter A_{VRP} und P_{VRP} – erfolgt, kann das SUM numerisch immer nur das abbilden, was im SUP aufgezeichnet wurde. Demzufolge ist die SUP Qualität essentiell für die Richtigkeit des SUM. Erfolgt die Registrierung unvollständig, indem zum Beispiel Töne des Passaggio bzw. Registerübergangs nicht mit aufgezeichnet werden, führt dies zu einer Verkleinerung des Stimmfeldumfangs (P_{VRP}) und folglich fälschlicherweise zu einer Überschätzung des SUM. Umgekehrt führt die Aufzeichnung zu vieler Töne zu einer Vergrößerung des Stimmfeldumfangs (P_{VRP}), was in einem falsch niedrigen SUM resultieren würde. Um die Validität des SUM zu erhöhen, wäre es daher sinnvoll, die Anzahl aufzuzeichnender Töne zu standardisieren und damit die Wahrscheinlichkeit

einer Über-/Unterschätzung des Stimmfeldumfangs (P_{VRP}) zu reduzieren. Zudem wird die SUP Qualität sowohl von der Erfahrung des Untersuchers als auch von der Motivation und Musikalität des Untersuchenden bestimmt. So bildet das SUP nie die tatsächliche Stimmkapazität ab, sondern nur die Stimme, die eine Person in dem Moment der Untersuchung produzieren wollte bzw. zu produzieren vermochte. Für unsere drei Studien gilt, dass die SUP Registrierung stets durch erfahrene Untersucher unter standardisierten Bedingungen erfolgte. Zudem wurden alle Probanden/Patienten während der Untersuchung angeleitet und dazu motiviert, tatsächlich an die Grenzen ihrer stimmlichen Leistungsfähigkeit zu gehen. Somit versuchten wir eine hohe SUP Qualität zu erzielen und folglich valide SUM Werte zu ermitteln.

Die Aufgabe zukünftiger Studien wird es sein, die SUM Normwerte an größeren Stichproben hinsichtlich ihrer Reliabilität weiter zu prüfen und dabei auch die Notwendigkeit altersspezifischer Referenzwerte genauer zu untersuchen. Da die bisherigen Untersuchungen unterschiedliche Beobachtungen über den Einfluss des Geschlechts auf das SUM zeigten, sollten zukünftige Studien auch diesen Aspekt weiter erforschen. Auch wenn eine unserer Studien erste Hinweise auf die Größenordnung des SUM bei professionell ausgebildeten Sängern lieferte, wären genauere Untersuchungen zum SUM bei Personen mit ausgesprochen großer stimmlicher Kapazität interessant. Für den klinischen Alltag wäre es schließlich relevant, SUM Intervalle in Abhängigkeit zum Heiserkeitsgrad (H0 bis H3) zu definieren.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass das neu entwickelte SUM als positives Maß der Stimmkapazität eine sinnvolle Ergänzung zu den etablierten stimm-diagnostischen Parametern darstellt. Das SUM ermöglicht erstmals die im SUP visualisierte Stimmleistung mit einem konkreten eindimensionalen Wert quantitativ zu beurteilen, anstatt sie anhand der visuellen Betrachtung und einiger weniger exponierter Messwerte zu schätzen. Die zudem ermittelten ersten geschlechtsspezifischen Referenzbereiche für junge Erwachsene dienen als Basis für eine bessere Einordbarkeit und Interpretation von SUM Werten. Schließlich überzeugt das SUM in ersten klinischen Untersuchungen auch als Parameter der Therapieevaluation. Eine weitere Implementierung des einfach zu erhebenden sowie leicht verständlichen Parameters in die phoniatische Stimm diagnostik erscheint daher gerechtfertigt und wünschenswert.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Dejonckere PH, Bradley P, Clemente P, Cornut G, Crevier-Buchman L, Friedrich G, Van De Heyning P, Remacle M, Woisard V; Committee on Phoniatrics of the European Laryngological Society (ELS). A basic protocol for functional assessment of voice pathology, especially for investigating the efficiency of (phonosurgical) treatments and evaluating new assessment techniques. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 2001;258:77-82.
- [2] Nawka T, Franke I, Galkin E. Objektive Messverfahren in der Stimmdiagnostik [Objective measurement procedures in voice diagnostics]. *Forum Logopädie* 2006;4:14-21.
- [3] Wuyts FL, De Bodt MS, Molenberghs G, Remacle M, Heylen L, Millet B, Van Lierde K, Raes J, Van de Heyning PH. The Dysphonia Severity Index: An Objective Measure of Vocal Quality Based in a Multiparameter Approach. *J Speech Lang Hear Res* 2000;43:796-809.
- [4] Möller A. Vocal extent measure as a new parameter in instrumental voice diagnostics [unveröffentlichte Bachelorarbeit]. Stralsund: Fachhochschule; 2010.
- [5] Caffier PP, Möller A. Das Stimmumfangsmaß SUM als neuer Parameter in der objektiven Stimmdiagnostik [The Vocal Extent Measure (VEM) as a Novel Parameter in Objective Voice Diagnostics]. *Sprache Stimme Gehör* 2016;40:183-187.
- [6] Ptok M, Schwemmler C, Iven C, Jessen M, Nawka T. Zur auditiven Bewertung der Stimmqualität [On the auditory evaluation of voice quality]. *HNO* 2006;54:793-802.
- [7] Nawka T, Anders LC, Wendler J. Die auditive Beurteilung heiserer Stimmen nach dem RBH-System [The auditory evaluation of hoarse voices using the RBH-scheme]. *Sprache Stimme Gehör* 1994;18:130-133.
- [8] Goy H, Fernandes DN, Pichora-Fuller MK, van Lieshout P. Normative Voice Data for Younger and Older Adults. *J Voice* 2013;27:545-555.
- [9] Barsties v. Latoszek B, Ulozaite-Stanienė N, Maryn Y, Petrauskas T, Uloza V. The Influence of Gender and Age on the Acoustic Voice Quality Index and Dysphonia Severity Index: A Normative Study. *J Voice* 2019;33:340-345.
- [10] Nawka T, Rosanowski F, Gross M. Begutachtung der Stimmfunktionsstörung [How to Render an Expert Opinion on Dysphonia]. *Laryngo-Rhino-Otol* 2014;93:591-598.
- [11] Gonnermann U. Quantifizierbare Verfahren zur Bewertung von Dysphonien [Quantifiable techniques for evaluation of Dysphonias]. Frankfurt/Main: Peter Lang Verlag; 2007.
- [12] Cohen SM, Jacobsen BH, Garrett CG, Noordzij JP, Stewart MG, Attia A, Ossoff RH, Cleveland TF. Creation and validation of the Singing Voice Handicap Index. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2007;116:402-406.

- [13] Salmen T, Ermakova T, Möller A, Seipelt M, Weikert S, Rummich J, Gross M, Nawka T, Caffier PP. The Value of Vocal Extent Measure (VEM) Assessing Phonomicrosurgical Outcomes of Vocal Fold Polyps. *J Voice* 2017;31:114.e7-114.e15.
- [14] Gonnermann U, Nawka T. Klassifikation der Werte des VHI-12 nach Schweregraden [Severity classification of the VHI-12]. 24. Wissenschaftliche Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Phoniatrie und Pädaudiologie, Innsbruck, Austria; 2007. http://www.dgpp.de/cms/media/download_gallery/VHI-12%20Klassifizierung%20.pdf
- [15] Sulter AM, Schutte HK, Miller DG. Differences in Phonetogram Features Between Male and Female Subjects With and Without Vocal Training. *J Voice* 1995;4:363-377.
- [16] Siupsinskiene N, Lycke H. Effects of Vocal Training on Singing and Speaking Voice Characteristics in Vocally Healthy Adults and Children Based on Choral and Nonchoral Data. *J Voice* 2011;25:e177-e189.
- [17] Leino T, Laukkanen A-M, Ilomäki I, Mäki E. Assessment of Vocal Capacity of Finnish University Students. *Folia Phoniatr Logop* 2008;60:199-209.
- [18] Sanchez K, Oates J, Dacakis G, Holmberg EB. Speech and voice range profiles of adults with untrained normal voices: Methodological implications. *Logoped Phoniatr Vocol* 2014;39:62-71.
- [19] Nemr K, Simoes-Zenari M, de Souza GS, Hachiya A, Tsuji DH. Correlation of the Dysphonia Severity Index (DSI), Consensus Auditory-Perceptual Evaluation of Voice (CAPE-V), and Gender in Brazilians With and Without Voice Disorders. *J Voice* 2016;30:765.e7-765.e11.
- [20] Hakkesteeft MM, Brocaar MP, Wieringa MH, Feenstra L. Influence of Age and Gender on the Dysphonia Severity Index. A study of Normative Values. *Folia Phoniatr Logop* 2006;58:264-273.
- [21] Awan SH, Ensslen AJ. A Comparison of Trained and Untrained Vocalists on the Dysphonia Severity Index. *J Voice* 2010;24:661-666.
- [22] Aichinger P, Feichter F, Aichstill B, Bigenzahn W, Schneider-Stickler B. Inter-device reliability of DSI measurement. *Logoped Phoniatr Vocol* 2012;37:167-173.
- [23] Caffier PP, Salmen T, Ermakova T, Forbes E, Ko SR, Song W, Gross M, Nawka T. Phonomicrosurgery in Vocal Fold Nodules: Quantification of Outcomes in Professional and Non-Professional Voice Users. *Med Probl Perform Art* 2017;32:187-194.
- [24] Béquignon E, Bach C, Fugain C, Guilleré L, Blumen M, Chabolle F, Wagner I. Long-term results of surgical treatment of vocal fold nodules. *Laryngoscope* 2013;123:1926-1930.
- [25] Zeitels SM, Hillman RE, Desloge R, Mauri M, Doyle PB. Phonomicrosurgery in singers and performing artists: treatment outcomes, management theories, and future directions. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 2002;190:21-40.

- [26] do Amaral Catani GS, Hamerschmidt R, Moreira AT, Timi JR, Wiemes GR, Ido J, Macedo E. Subjective and Objective Analyses of Voice Improvement After Phonosurgery in Professional Voice Users. *Med Probl Perform Art* 2016;31:18-24.
- [27] Hazlett DE, Duffy OM, Moorhead SA. Review of the impact of voice training on the vocal quality of professional voice users: implications for vocal health and recommendations for further research. *J Voice* 2011;25:181-191.
- [28] Ruotsalainen J, Sellman J, Lehto L, Verbeek J. Systematic review of the treatment of functional dysphonia and prevention of voice disorders. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2008;138:557-565.
- [29] Sielska-Badurek E, Osuch-Wójcikiewicz E, Sobol M, Kazanecka E, Rzepakowska A, Niemczyk K. Combined Functional Voice Therapy in Singers With Muscle Tension Dysphonia in Singing. *J Voice* 2017;31:509.e23-509.e31.
- [30] Reetz S, Bohlender JE, Brockmann-Bauser M. Do Standard Instrumental Acoustic, Perceptual, and Subjective Voice Outcomes Indicate Therapy Success in Patients With Functional Dysphonia? *J Voice* 2019;33:317-324.
- [31] Livingstone SR, Choi DH, Russo FA. The influence of vocal training and acting experience on measures of voice quality and emotional genuineness. *Front Psychol* 2014;5:156.
- [32] Lycke H, Siupsinskiene N. Voice Range Profiles of Singing Students: The Effects of Training Duration and Institution. *Folia Phoniatr Logop* 2016;68:53-59.
- [33] Dastolfo-Hromack C, Thomas TL, Rosen CA, Gartner-Schmidt J. Singing voice outcomes following singing voice therapy. *Laryngoscope* 2016;126:2546-2551.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Marie-Louise Freymann, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Entwicklung, Normierung und klinische Implementierung des Stimmumfangsmaßes in der phoniatischen Stimmfunktionsdiagnostik“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an den ausgewählten Publikationen entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an den erfolgten Publikationen

Marie-Louise Freymann hatte folgenden Anteil an den eingereichten Publikationen:

Publikation 1: Caffier PP, Möller A, Forbes E, Müller C, **Freymann ML**, Nawka T. The Vocal Extent Measure: Development of a Novel Parameter in Voice Diagnostics and Initial Clinical Experience. *Biomed Res Int* 2018;2018:3836714. doi: 10.1155/2018/3836714. eCollection 2018.

Beitrag im Einzelnen: Durchführung von Literaturrecherchen (Datenbanken Medline, Embase, Cochrane Library, Web of Science, SocIndex, PsyIndex, Psychinfo), Mitwirkung bei der Primärdaten-Auswertung, Erstellung von Tabelle 1, Mitwirkung bei der Erstellung des Manuskripts.

Publikation 2: **Freymann ML***, Mathmann P*, Rummich R, Müller C, Neumann K, Nawka T, Caffier PP. Gender-Specific Reference Ranges of the Vocal Extent Measure in young and healthy Adults. *Logoped Phoniatr Vocol* 2019; Jun 3:1-9. doi: 10.1080/14015439.2019.1617894. [Epub ahead of print].

* geteilte Erstautorenschaft

Beitrag im Einzelnen: Probandenrekrutierung und -betreuung im Studienverlauf, Durchführung von Literaturrecherchen, Erhebung und Sammlung der objektiven und subjektiven Daten (Anamnesen, RBH-Status, VHI-9i-Fragebögen, Stimmumfangsprofile), Mitwirkung bei der statistischen Auswertung der Primärdaten, Erstellung der Abbildungen 1-3, Erstellung der Tabellen 1-3, Hauptanteil bei der Verfassung des Manuskripts.

Publikation 3: Ropero Rendón MDM, Ermakova T, **Freymann ML**, Ruschin A, Nawka T, Caffier PP. Efficacy of Phonosurgery, Logopedic Voice Treatment and Vocal Pedagogy in Common Voice Problems of Singers. *Adv Ther* 2018;35(7):1069-1086. doi: 10.1007/s12325-018-0725-x.

Beitrag im Einzelnen: Durchführung von Literaturrecherchen (Datenbanken Medline, Embase, Cochrane Library, Web of Science, SocIndex, PsyIndex, Psychinfo), Mitwirkung bei der Auswertung der Primärdaten, Mitarbeit bei der Erstellung und Einreichung des Manuskripts (entsprechende Abschnitte zum SUM im Methodenteil sowie in der Diskussion).

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift der Doktorandin

Publikation 1

Caffier PP, Möller A, Forbes E, Müller C, **Freyman ML**, Nawka T. The Vocal Extent Measure: Development of a Novel Parameter in Voice Diagnostics and Initial Clinical Experience. *Biomed Res Int* 2018;2018:3836714. doi: 10.1155/2018/3836714. eCollection 2018.

Link: <https://doi.org/10.1155/2018/3836714>

Publikation 2

Freymann ML, Mathmann P, Rummich J, Müller C, Neumann K, Nawka T, Caffier PP. Gender-Specific Reference Ranges of the Vocal Extent Measure in young and healthy Adults. *Logoped Phoniatr Vocol* 2019; Jun 3:1-9. doi: 10.1080/14015439.2019.1617894. [Epub ahead of print].

Link: <https://doi.org/10.1080/14015439.2019.1617894>

Publikation 3

Ropero Rendón MDM, Ermakova T, **Freyman ML**, Ruschin A, Nawka T, Caffier PP. Efficacy of Phonosurgery, Logopedic Voice Treatment and Vocal Pedagogy in Common Voice Problems of Singers. *Adv Ther* 2018;35(7):1069-1086. doi: 10.1007/s12325-018-0725-x.

Link: <https://doi.org/10.1007/s12325-018-0725-x>

Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.

Publikationsliste

Caffier PP, Möller A, Forbes E, Müller C, **Frey mann ML**, Nawka T. The Vocal Extent Measure: Development of a Novel Parameter in Voice Diagnostics and Initial Clinical Experience. *Biomed Res Int* 2018;2018:3836714. doi: 10.1155/2018/3836714. eCollection 2018.

Ropero Rendón MDM, Ermakova T, **Frey mann ML**, Ruschin A, Nawka T, Caffier PP. Efficacy of Phonosurgery, Logopedic Voice Treatment and Vocal Pedagogy in Common Voice Problems of Singers. *Adv Ther* 2018;35(7):1069-1086. doi: 10.1007/s12325-018-0725-x.

Frey mann ML, Mathmann P, Rummich R, Müller C, Neumann K, Nawka T, Caffier PP. Gender-Specific Reference Ranges of the Vocal Extent Measure in young and healthy Adults. *Logoped Phoniatr Vocol* 2019; Jun 3:1-9. doi: 10.1080/14015439.2019.1617894. [Epub ahead of print].

Danksagung

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater PD Dr. med. Philipp Caffier danken, dass er mir das Thema dieser kumulativen Dissertation zur Verfügung gestellt und mich im Verlauf der Bearbeitung immer motiviert, unterstützt und mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat. Meinem Zweitbetreuer Prof. Dr. Tadeus Nawka danke ich für seine Unterstützung bei der Konzeption der Arbeit sowie für seine Anregungen im Verlauf des Schreibprozesses. Ganz besonders bedanken möchte ich mich auch bei Philipp Mathmann, ohne dessen Unterstützung bei der Datenerhebung (Videolaryngostroboskopien) die Erstellung der Arbeit niemals möglich gewesen wäre. Herrn Julius Rummich danke ich für seine geduldige Einarbeitung in die objektive Stimm diagnostik sowie für seine Hilfestellung in allen technischen Fragen. Zudem danke ich dem restlichen Team der Klinik für Audiologie und Phoniatrie, Charité – Universitätsmedizin Berlin für ihre Unterstützung.

Ein ganz besonderer Dank gilt auch allen freiwilligen Probanden, ohne deren Teilnahme die Erhebung der Daten niemals möglich gewesen wäre.

Meiner Familie sowie meinen engen Freunden danke ich herzlich, dass sie mir immer unterstützend und liebevoll zur Seite stehen.