

Aus der Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde
Klinikum der Ludwig-Maximilians-Universität München



Impulsabstrahlung von Aerosolen beim Singen und Sprechen

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

vorgelegt von
Caroline Westphalen

aus
Konstanz

Jahr
2025

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

Erstes Gutachten:	Prof. Dr. Matthias Echternach
Zweites Gutachten:	Prof. Dr. Dennis Nowak
Drittes Gutachten:	Prof. Dr. Bernhard Richter
Dekan:	Prof. Dr. med. Thomas Gudermann
Tag der mündlichen Prüfung:	21.07.2025

Affidavit



Dekanat Medizinische Fakultät
Promotionsbüro



Eidesstattliche Versicherung

Westphalen, Caroline

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

Impulsabstrahlung von Aerosolen beim Singen und Sprechen

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 20.08.25

Ort, Datum

Caroline Westphalen

Unterschrift Caroline Westphalen

Inhaltsverzeichnis

<u>AFFIDATIV.....</u>	<u>3</u>
<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	<u>4</u>
<u>PUBLIKATIONSLISTE</u>	<u>5</u>
<u>1. BEITRAG ZU DEN VERÖFFENTLICHUNGEN</u>	<u>7</u>
1.1 BEITRAG ZUR ERSTEN PUBLIKATION	7
1.2 BEITRAG ZUR ZWEITEN PUBLIKATION.....	8
<u>2. EINLEITUNG</u>	<u>9</u>
2.1 ÜBERTRAGUNGSWEGE RESPIRATORISCHER INFektionsKRANKHEITEN	9
2.1.1 KONTAKTÜBERTRAGUNG.....	9
2.1.2 TRÖPFCHENÜBERTRAGUNG.....	9
2.1.3 AEROSOLÜBERTRAGUNG.....	10
2.2 ÜBERTRAGUNGSWEGE VON SARS-CoV-2	10
2.2.1 KONTROVERSE ÜBER AEROSOLTRANSMISSION VON SARS-CoV-2.....	11
2.2.2 SUPERSPREADER EVENTS UND AEROSOLÜBERTRAGUNG.....	12
2.3 PARTIKELEMISSION BEI PHONATORISCHEN AKTIVITÄTEN.....	13
2.4 PARTIKELVERTEILUNG BEI PHONATORISCHEN AKTIVITÄTEN	13
2.5 QUELLEN ERHÖHLTER IMPULSABSTRAHLUNG	14
2.6 SCHUTZMECHANISMEN	14
2.7 STUDIENZIEL	15
<u>3. ERGEBNISSE</u>	<u>16</u>
<u>4. DISKUSSION</u>	<u>18</u>
<u>5. ZUSAMMENFASSUNG</u>	<u>21</u>
<u>6. ABSTRACT</u>	<u>23</u>
<u>7. 1. PUBLIKATION</u>	<u>24</u>
<u>8. 2. PUBLIKATION</u>	<u>25</u>
<u>9. LITERATURVERZEICHNIS</u>	<u>26</u>
<u>DANKSAGUNG</u>	<u>31</u>
<u>ÜBEREINSTIMMUNG ABGEGEBENER EXEMPLARE.....</u>	<u>32</u>

Publikationsliste

1. Westphalen C, Kniesburges S, Veltrup R, Gantner S, Peters G, Benthaus T, Jakubaß B, Köberlein M, Döllinger M, Echternach M. Sources of Aerosol Dispersion During Singing and Potential Safety Procedures for Singers. *J Voice*. 2021 Apr 10:S0892-1997(21)00101-6. doi: 10.1016/j.jvoice.2021.03.013.
2. Echternach M, Gantner S, Peters G, Westphalen C, Benthaus T, Jakubaß B, Kuranova L, Döllinger M, Kniesburges S. Impulse Dispersion of Aerosols during Singing and Speaking: A Potential COVID-19 Transmission Pathway. *Am J Respir Crit Care Med*. 2020 Dec 1;202(11):1584-1587. doi: 10.1164/rccm.202009-3438LE.
3. Echternach M, Westphalen C, Köberlein MC, Gantner S, Peters G, Benthaus T, Jakubaß B, Kuranova L, Döllinger M, Kniesburges S. Reply to Philip *et al.*: Aerosol Transmission of SARS-CoV-2: Inhalation as well as Exhalation Matters for COVID-19. *Am J Respir Crit Care Med*. 2021 Apr 15;203(8):1042-1043. doi: 10.1164/rccm.202101-0051LE. PMID: 33529548; PMCID: PMC8048754.
4. Echternach M, Herrmann L, Gantner S, Tur B, Peters G, Westphalen C, Benthaus T, Köberlein M, Kuranova L, Döllinger M, Kniesburges S. The Effect of Singers' Masks on the Impulse Dispersion of Aerosols During Singing. *J Voice*. 2021 Oct 2:S0892-1997(21)00285-X. doi: 10.1016/j.jvoice.2021.08.011. Epub ahead of print. PMID: 34610881.
5. Kniesburges S, Schlegel P, Peters G, Westphalen C, Jakubaß B, Veltrup R, Kist AM, Döllinger M, Gantner S, Kuranova L, Benthaus T, Semmler M, Echternach M. Effects of surgical masks on aerosol dispersion in professional singing. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2022 Sep;32(5):727-734. doi: 10.1038/s41370-021-00385-7. Epub 2021 Oct 5. PMID: 34611302; PMCID: PMC8491963.
6. Hermann LA, Tur B, Köberlein MC, Gantner S, Westphalen C, Benthaus T, Döllinger M, Kniesburges S, Echternach M. Aerosol Dispersion During Different Phonatory Tasks in Amateur Singers. *J Voice*. 2021 Dec 26:S0892-1997(21)00387-8. doi: 10.1016/j.jvoice.2021.11.005. Epub ahead of print. PMID: 34963518.
7. Gantner S, Echternach M, Veltrup R, Westphalen C, Köberlein MC, Kuranova L, Peters G, Jakubaß B, Benthaus T, Döllinger M, Kniesburges S. Impulse dispersion of aerosols during playing wind instruments. *PLoS One*. 2022 Mar 3;17(3):e0262994. doi: 10.1371/journal.pone.0262994. PMID: 35239657; PMCID: PMC8893631.
8. Köberlein MC, Hermann L, Gantner S, Tur B, Westphalen C, Kuranova L, Döllinger M, Kniesburges S, Kruse SA, Echternach M. The Effect of Water Resistance Therapy on the Impulse Dispersion of Aerosols During Sustained Phonation. *J Voice*. 2022 Jul 5:S0892-1997(22)00153-9. doi:

10.1016/j.jvoice.2022.05.019. Epub ahead of print. PMID: 35803772; PMCID: PMC9256517.

9. Köberlein M, Hermann L, Gantner S, Tur B, Peters G, Westphalen C, Benthous T, Döllinger M, Kniesburges S, Echternach M. Impulse dispersion of aerosols during playing the recorder and evaluation of safety measures. PLoS One. 2022 Sep 26;17(9):e0266991. doi: 10.1371/journal.pone.0266991. PMID: 36156597; PMCID: PMC9512216.

1. Beitrag zu den Veröffentlichungen

1.1 Beitrag zur ersten Publikation

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Universitätsklinikum Erlangen unter Leitung von Prof. Dr. med. Matthias Echternach und PD. Dr. -Ing. Dr. habil. med. Stefan Kniesburges durchgeführt. Außerdem waren von der Ludwig-Maximilians-Universität Sophia Gantner, Dr. Liudmila Kuranova und Dr. sc. hum. Marie Köberlein beteiligt. Seitens des Universitätsklinikums Erlangen waren neben PD. Dr. -Ing. Dr. habil. med. Kniesburges, Dr. -Ing. Gregor Peters, Rheinhard Veltrup, Bernhard Jakubaß und Prof. Dr. -Ing. Michael Döllinger beteiligt. Ansprechpartner beim Bayerischen Rundfunk war Dr. med. Tobias Benthous. Das Projekt wurde vom Bayerischen Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert.

An der Versuchsplanung war ich insbesondere durch das Zusammentragen von Hintergrundinformationen zur Verteilung von Tröpfchen und Aerosolen, sowie der damit verbundenen Krankheitsübertragung beteiligt, was zur Konzeption des Versuchsaufbaus und -durchführung beitrug. Darüber hinaus filterte ich die aktuellen Forschungserkenntnisse zu SARS-CoV-2 nach relevanten Erkenntnissen für die Studie, fasste diese zusammen und bewertete sie.

An der Durchführung der Versuche war ich durch Organisation, Kommunikation zwischen den Beteiligten und Führen des Studienprotokolls beteiligt.

Ich wertete die Aufnahmen der Profisängerinnen und Profisänger aus. Die Daten wurden in Erlangen von Dr. -Ing. Gregor Peters visualisiert. Darüber hinaus war ich verantwortlich für die Kommunikation aller Beteiligten im Auswertungsprozess.

Am Schreibprozess der Veröffentlichung war ich durch Mitschreiben sowie Korrekturlesen beteiligt.

1.2 Beitrag zur zweiten Publikation

Da die Daten zur zweiten Publikation im Rahmen derselben Studie entstanden, entsprachen meine Aufgaben bei der Versuchsplanung und -durchführung denen der ersten Publikation.

Ich erarbeitete Auswertungsstrategien und wertete die Versuche entsprechend aus. Die Daten wurden von Reinhard Veltrup visualisiert. Ich schrieb als Erstautorin die Publikation, welche nach Korrektur von Prof. Dr. med. Echternach, PD. Dr. -Ing. Dr. habil. med. Kniesburges, Frau Dr. Köberlein und Prof. Dr.-Ing. Döllinger veröffentlicht wurde.

2. Einleitung

2.1 Übertragungswege respiratorischer Infektionskrankheiten

Respiratorische Infektionskrankheiten werden von zahlreichen Erregern übertragen und äußern sich klinisch in gemeinsamen Symptomen wie Husten, Schnupfen, Halsschmerzen (1). Durch die ähnliche Symptomatik sind die Erreger klinisch oft schwer zu unterscheiden (1).

Gemeinsam verzeichnen diese Erkrankungen eine hohe Morbidität und Mortalität und sind nicht nur von gesundheitlicher, sondern auch von sozialer, ökonomischer und wirtschaftlicher Bedeutung (1-6). Ausbrüche können auf Grund einer hohen Transmissibilität einzelner Erreger schwer einzugrenzen sein und sich pandemisch verbreiten (1). So entwickelte sich ein lokaler Ausbruch des Severe acute respiratory syndrome coronavirus type 2 (SARS-CoV-2) in China im Dezember 2019 zu einer weltweiten Pandemie mit bis August 2024 mehr als 775 Millionen Infektionen und über 7 Millionen Todesfällen, die im Zusammenhang mit der Erkrankung stehen (7).

Die Übertragung respiratorischer Infektionskrankheiten geschieht über den Kontakt pathogener respiratorischer Sekrete infizierter Personen mit Schleimhäuten exponierter Personen (1). In der Literatur wird grundsätzlich zwischen der Kontaktübertragung und der Übertragung durch Tröpfchen und Aerosole unterschieden (8).

2.1.1 Kontaktübertragung

Die Kontaktübertragung erfolgt durch Selbstinokulation pathogener Erreger auf Schleimhäute (9). Dies geschieht entweder direkt und in unmittelbarer Nähe, durch physischen Kontakt zu einer infizierten Person, zum Beispiel durch Händeschütteln, oder indirekt, durch das Berühren von kontaminierten Zwischenobjekten und anschließendem Berühren der eigenen Schleimhäute (8, 9).

2.1.2 Tröpfchenübertragung

Die Tröpfchenübertragung bezieht sich auf pathogene Tröpfchen, welche zum Beispiel beim Sprechen, Singen, Husten, Niesen entstehen (9, 10). Die größeren Tröpfchen folgen ballistischen Flugbahnen und sinken dabei auf Grund ihres Eigengewichts und der Anziehung durch die Gravitation rasch zu Boden (11, 12). Somit legen sie eine

Strecke von 1-2m zurück (13). Viren können übertragen werden, wenn sich diese Tröpfchen auf Schleimhäuten exponierter Personen ablagern (8, 14). Die Übertragung durch Tröpfchen findet somit in unmittelbarer Nähe statt (15).

2.1.3 Aerosolübertragung

Aerosolpartikel sind kleine Partikel, welche bei Bewegungen der Schleimhäute des Atemapparats aus Sputum entstehen und emittiert werden (16). Darüber hinaus können sie als sogenannte „Tröpfchenkerne“ durch Verdampfung flüssiger Anteile größerer Tröpfchen entstehen (9). Werden sie von infizierten Personen ausgestoßen, können sie Viren enthalten (9). Einige Autoren unterscheiden Tröpfchen und Aerosole anhand ihrer Größe und benennen Partikel $<5\text{-}10\mu\text{m}$ als Aerosolpartikel und größere Partikel als Tröpfchen (17).

Entscheidend für die Übertragung durch diese potenziell virushaltigen Aerosolpartikel sind ihre physikalischen Eigenschaften. Im Gegensatz zu den größeren Tröpfchen können Aerosole stundenlang in der Luft suspendiert bleiben, akkumulieren oder sich den umgebenden Konvektionsströmen folgend verteilen (14, 18, 19). Die Aerosolübertragung kann somit sowohl in unmittelbarer Nähe, durch die direkte Inhalation ausgestoßener Aerosolpartikel des Gegenübers, als auch durch Virusinhalation über größere räumliche und zeitliche Distanz hinweg stattfinden (20).

2.2 Übertragungswege von SARS-CoV-2

Als das Forschungsprojekt im März 2020 begann war wenig über die Übertragungswege von SARS-CoV-2 bekannt, was zu einer großen Unsicherheit im Umgang mit dem Virus beitrug.

Heute geht man davon aus, dass das größte Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in unmittelbarer Umgebung der infizierten Person von 1 bis 2 Metern vorherrscht (10). Hauptübertragungswege sind dabei Tröpfchen und Aerosole (10). Die Viruskonzentration und mit ihr das Übertragungsrisiko verringern sich mit zunehmendem Abstand von der Indexperson aufgrund von pathogenhaltigen Tröpfchenausfall, sowie Verringerung der Aerosolkonzentration durch Verdünnung mit der Umgebungsluft (9). Dabei ist die Verdünnungsrate nicht proportional zum Abstand, sondern abhängig von Konvektionsströmen und Temperaturschwankungen (9). Darüber hinaus ist die Viruslast der Partikel

entscheidend für das Übertragungsrisiko. Die ausgeatmete Aerosolmenge ist nicht gleichzusetzen mit dieser, da die Viruslast sich je nach Ausprägung der Infektion unterscheiden kann (21).

Eine Transmission über kontaminierte Oberflächen ist ebenfalls möglich (9, 10). Unter Laborbedingungen konnte vermehrungsfähiges SARS-CoV-2 bis zu 72h lang abhängig vom Material nachgewiesen werden (22). Die virale Lebensfähigkeit und Infektiosität ist dabei abhängig von Temperatur, ultravioletter Strahlung und Luftfeuchtigkeit (9).

Die Wahrscheinlichkeit einer aerogenen Übertragung über 1-2m hinaus ist insbesondere bei bestimmten Gegebenheiten erhöht (10). Zu diesen gehören Zusammentreffen in überfüllten, kleinen, schlecht durchlüfteten Räumen (9). Auf Grund einer schlechten Belüftung können die von einer infizierten Person ausgestoßenen, virushaltigen Aerosole in einem Raum akkumulieren und von anderen, sich in diesem Raum befindenden Personen eingeatmet werden (9). Eine Exposition länger als 15 Minuten erhöht das Risiko weiterhin (9). Darüber hinaus können Tätigkeiten, welche zu erhöhten Partikelemissionen führen, wie Schreien oder lautes Singen, das Risiko einer Übertragung erhöhen (9, 10). Ebenso kann das Risiko bei Tätigkeiten, welche mit einer vermehrten und tieferen Einatmung verbunden sind, wie zum Beispiel Sport aber auch Singen, erhöht sein (10).

2.2.1 Kontroverse über Aerosoltransmission von SARS-CoV-2

Zu Beginn der Forschungsarbeit im März 2020, wurde davon ausgegangen, dass SARS-CoV-2 vorwiegend über Tröpfchen und Kontaktübertragung übertragen wird (23). Eine Aerosolübertragung wurde lediglich im Rahmen medizinischer, aerosolgenerierender Eingriffe, wie In- und Extubation oder Bronchoskopie, in Erwägung gezogen (23, 24).

Im Pandemieverlauf wurde jedoch zunehmend auf die Bedeutung der luftgetragenen Übertragung durch Aerosole hingewiesen (25). Insbesondere wurde hierbei auf retrospektive Analysen aufmerksam gemacht, bei denen aerosolegetragene Virusübertragungen am wahrscheinlichsten waren (25). Zu diesen gehörten auch Superspreader Events in Folge von Chorproben.

In einem Update vom 09.07.2020 räumte die WHO ein, dass eine Aerosolübertragung auch außerhalb des medizinischen Settings nicht auszuschließen sei (17).

In ihrem Update vom 23.12.2021 erweiterte die WHO die Transmission um die aerosolgetragene, mit dem höchsten Infektionsrisiko in unmittelbarer Nähe zur Indexperson, sowie in schlecht ventilierten, überfüllten Räumen mit langer Aufenthaltszeit (26).

2.2.2 Superspreader Events und Aerosolübertragung

Massenausbrüche, sogenannte „Superspreader Events“, stützten die Hypothese, dass Aerosole auch außerhalb des medizinischen Bereichs an der Übertragung von SARS-CoV-2 beteiligt sein können (25). Als Superspreader Events werden Veranstaltungen beschrieben, bei denen sich, ausgehend von einer oder wenigen infizierten Personen, überdurchschnittlich viele Anwesende infizieren und somit das Pandemiegeschehen ankurbeln (27, 28). Sie treten insbesondere in überfüllten, schlecht durchlüfteten Räumen auf (27, 28). Zu diesen Veranstaltungen gehörten auch Ausbrüche in Folge von Chorproben oder -auftritten wie beispielsweise in Skagit County, Amsterdam, Berlin oder Frankreich.

So entwickelten in Skagit County, Washington, ausgehend von vermutlich einer mit SARS-CoV-2 infizierten Person, 53 von insgesamt 61 Probenteilnehmenden Symptome (29, 30). 33 Personen wurden positiv auf SARS-CoV-2 getestet, bei den weiteren 20 war eine Infektion als wahrscheinlich anzunehmen. Zwei infizierte Personen starben (29, 30).

In Zusammenhang mit einer dreistündigen Aufführung des Het Amsterdam Gememgd Koor mit 130 Mitgliedern, wurden 102 Neuinfektionen gemeldet (31). Nach einer Chorprobe in Frankreich im März 2020 erkrankten 19 der 27 Teilnehmenden, von denen sieben hospitalisiert werden mussten (32). Alle Anwesenden gaben an, zum Zeitpunkt der Probe und die 10 Tage davor keine Symptome gehabt zu haben, welche auf eine Infektion hindeuteten (32).

In Berlin entwickelten nach einer Chorprobe 60 der 80 Mitglieder der Berliner Domkantorei Symptome. Unter ihnen waren auch Anwesende wie Dirigent und Pianistin, welche sich mehr als 2m von der infizierten Indexperson entfernt befanden (33).

Anhand der hohen Anzahl an Sekundärinfektionen, ausgehend von einer oder wenigen Indexpersonen, erscheint eine reine Tröpfchen- und Kontaktübertragung bei diesen Veranstaltungen als unwahrscheinlich und die Übertragung durch Aerosole denkbar (14, 29).

2.3 Partikelemission bei phonatorischen Aktivitäten

Aus der Literatur geht hervor, dass die Tätigkeit des Singens mit einem höheren Risiko für Krankheitsübertragungen einhergehen könnte als andere phonatorische Aktivitäten:

Bekannt ist, dass die Partikelemission mit steigender Lautstärke zunimmt (34-36).

Darüber hinaus besteht die Annahme, dass beim Singen im Vergleich zum Sprechen mehr Partikel emittiert werden. So maßen Alsved et al. eine 2.5-fach höhere Partikelemission beim Singen im Vergleich zum Sprechen (34). Morawska et al. fanden, dass beim Singen, definiert als Vokalisation des Vokals /a/, ca. dreimal so viele Partikel emittiert werden wie beim stimmhaften Zählen und elfmal so viele Partikel wie beim Atmen (37). Gregson et al. stellten bei erhöhter Lautstärke von 90-100dB eine 1,5-3,4fach höhere Aerosolemission beim Singen im Vergleich zum Sprechen fest (36).

Darüber hinaus ist anzunehmen, dass die Partikelemission auch mit stärkerer Betonung zunimmt (35). So maßen Alsved et al. eine 1.5fach erhöhte Partikelemission beim stark betonten Singen im Vergleich zu normalem Singen (35).

Als Reaktion auf diese Ausbrüche und Forschungsergebnisse wurden musikalische und andere kulturelle Gruppenaktivitäten in vielen Ländern zunächst unter Hygienevorschriften eingeschränkt und später untersagt (38).

2.4 Partikelverteilung bei phonatorischen Aktivitäten

Im Rahmen des Infektionsschutzes ist über die Partikelemission hinaus die Fragestellung wichtig, wie sich die emittierten Partikel im Raum ausbreiten.

Diese Ausbreitung erfolgt in zwei Phasen, der Impulsabstrahlung und der sich daran anschließenden Verteilung der einzelnen Partikel im Raum (20).

Die Partikel verlassen ihrem Impuls gerichtet in einer Gaswolke den Mund (39). Ihre Impulsstärke bestimmt ihre Abstrahlung nach vorne. Bei explosiven Aktivitäten wie Husten ist diese stärker als beim Atmen (18). Die großen Tröpfchen fallen auf Grund ihres Eigengewichts und ihrer Anziehung durch die Gravitation aus und zu Boden (9). Die flüssigen Anteile der kleineren Tröpfchen verdampfen, bis sie ihre Gleichgewichtsgröße erreicht haben (40). Die Geschwindigkeit dieser Prozesse ist abhängig von Umgebungs-

faktoren wie Luftfeuchtigkeit, Konvektionsströmen und Temperatur (16). Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 6-65% und Temperatur von 20-29°C wurde die Gleichgewichtsgröße von Tröpfchen als ca. 20% ihrer Ursprungsgröße beschrieben (40).

Nach dem Verlassen des Mundes wird die Gaswolke von der Umgebungsluft verdünnt und abgebremst (12). Die Partikel können initial innerhalb der Wolke so weit geschleudert werden, bis dieser seinen Impuls verliert (39).

Die durch Verdampfung entstandenen Schwebeteilchen können sich nun weiter mit der Umgebungsluft vermischen, auf Grund ihrer höheren Wärme als diese aufsteigen, akkumulieren, oder sich, Konvektionsströmen folgend, im Raum verteilen (16, 39).

2.5 Quellen erhöhter Impulsabstrahlung

Um das Risiko des Singens weitergehend zu bewerten, ist es darüber hinaus bedeutsam, Quellen erhöhter Impulsabstrahlung zu identifizieren. Wie oben beschrieben werden bei starker Betonung mehr Partikel emittiert (35, 41). Unklar ist, ob diese auch weiter abgestrahlt werden.

Darüber hinaus kann vermutet werden, dass die Artikulation von Konsonanten, durch eine höhere Luftstromgeschwindigkeit innerhalb des Vokaltraktes zu einer höheren Abstrahlung führt als die Artikulation von Vokalen (42, 43).

2.6 Schutzmechanismen

Das Risiko der Krankheitsübertragung beim Singen in Gruppen kann durch das Anwenden von Schutzmechanismen, welche die Aerosole abschirmen, weiter reduziert werden. Als effektiv zur Transmissionsreduktion wurden neben regelmäßiger Hand- und Oberflächendesinfektion das Halten von Abstand, sowie das Tragen von Masken befunden (44).

Masken reduzieren durch ihre Filterwirkung den Partikelaustritt und dienen damit dem Fremdschutz (45). Darüber hinaus bieten sie durch ihre Filterwirkung auch Schutz bei der Einatmung (46). Tragen emittierende und exponierte Person eine Maske, tritt ein synergetischer Effekt ein (46). Voraussetzung für ihre volle Schutzwirkung ist, dass die Masken dem Gesicht lückenlos anliegen, sodass die gesamte ausgestoßene Luft gefiltert werden kann (16).

2.7 Studienziel

Ziel der Studie war es, Rahmenbedingungen für die sichere Durchführung von Proben und Auftritten von Orchestern und Chören im Rahmen der Corona-Pandemie zu untersuchen. Die Versuche wurden in Zusammenarbeit mit dem Symphonieorchester und dem Chor des Bayerischen Rundfunks durchgeführt. In den Veröffentlichungen werden die Ergebnisse der Versuche der Sängerinnen und Sänger dargestellt.

Die Veröffentlichungen konzentrieren sich auf die Impulsabstrahlung der primären Aerosolwolken. Diese kennzeichnet den Bereich, in dem die potenziell Pathogen haltigen Aerosole, in einem kompakten Strahl gebunden, in hoher Konzentration vorliegen. Das direkte Einatmen des Gegenüber von Luft aus diesem Bereich scheint folglich mit einem hohen Infektionsrisiko im Prozess der Aerosolübertragung einherzugehen (47). Eine Aussage über die Menge der Aerosole wird nicht getroffen.

In der ersten Veröffentlichung werden Ergebnisse zur Impulsabstrahlung und bei verschiedenen phonatorischen Aktivitäten wie Atmen, Husten Sprechen und Singen in unterschiedlichen Lautstärken bei Mitgliedern des Chores des Bayerischen Rundfunks dargestellt.

In der zweiten Veröffentlichung werden Quellen erhöhter Impulsabstrahlung, sowie potenzielle Schutzmechanismen für Sängerinnen und Sänger untersucht, welche die Aerosole abbremsen. Darüber hinaus wird das Singen zu zweit mit verschiedenen Abständen analysiert.

Aus den Ergebnissen konnten und können Inhalte für Hygienekonzepte, wie Sicherheitsabstände und potentielle Schutzmechanismen zum sicheren Musizieren in Gruppen im Rahmen einer möglichen Übertragung von respiratorischen Infektionskrankheiten abgeleitet werden (48-50).

3. Ergebnisse

Die Impulsabstrahlung nach vorne, gemessen ausgehend von dem Mund der Versuchspersonen, waren im Median 0,86m für das laute Singen mit Text, 0,78m für das leise Singen mit Text, 0,82m für das laute Sprechen des Textes und 0,74m für das leise Sprechen des Textes (51). Für die Vokalise der Melodie auf den Vokal /a/ wurden niedrigere Abstrahlungen von im Median 0,62m für die laute und 0,49m für die leise Vokalise gemessen (51). Die Abstrahlungen beim Atmen und Husten waren mit Werten von 1,19m und 1,32m im Median weiter (51). Tendenziell waren somit die Abstrahlungen nach vorne bei lauten Teilaufgaben weiter als bei leisen, sowie die Abstrahlungen nach vorne beim Singen weiter als beim Sprechen (51). Diese Tendenz zeigte jedoch keine statistische Signifikanz (51). Die Abstrahlungen zu den Seiten zeigten sich geringer. Der Durchmesser der Aerosolwolken lag im Median zwischen 0,57m bis 0,88m (51).

Eine erhöhte Abstrahlung wurde bei der Artikulation von Konsonanten gegenüber Vokalen gemessen (52). Zudem zeigte sich eine erhöhte Abstrahlung bei einer starken Betonung des gesungenen Textes (52). Nach vorne erreichte die Primärwolke eine Distanz von 0,74m beim Singen mit übertriebener Betonung und somit 0,09m weiter als beim lauten Singen des Textes und 0,21m weiter als bei der Vokalise (52).

Darüber hinaus scheint die Kopfposition der Singenden die Impulsabstrahlung zu beeinflussen. Die weiteste Abstrahlung nach vorne wurde mit 0,84m für eine neutrale Kopfposition im Vergleich zu 0,78m für eine 45° nach oben gerichtete Kopfposition und 0,36m für eine 45° nach unten gerichtete Kopfposition gemessen (52). Bei letzter breitete sich die Primärwolke grundsätzlich eher nach hinten und zur Seite aus (52).

Beim gemeinsamen Singen zweier, sich frontal gegenüberstehenden Sänger im Abstand von 2,6m und 3m akkumulierten die emittierten Dampfwolken vor den Singenden und breiteten sich den Konvektionsströmen folgend aus (52). Bei einer Distanz von 3m vermischten sich die Gaswolken innerhalb der Beobachtungszeit von 2:50 Minuten nicht. Bei einer Distanz von 2,6m vermischten sich die Wolken nach einer Minute und erreichten nach 1:35 Minuten das Nahfeld des Gegenübers, aus welchem dieser seine Einatemluft bezieht (52). Dieses Nahfeld wurde für einen der beiden Sänger mit einem Atemzugvolumen von 0,6l mit ca. 6,4cm berechnet (52). Die Dichte der Gaswolke war zu diesem Zeitpunkt jedoch stark reduziert (52).

Beim gemeinsamen Singen zweier hintereinanderstehenden Sänger im Abstand von 1,5m mit einem zusätzlichen Höhenunterschied von 45cm vermischten sich die Gaswolken bereits nach 30 Sekunden und erreichten nach 50 Sekunden die Nahfelder beider Sänger (52). Beim Atmen in oben beschriebener Konstellation verloren die Wolken rasch ihren Vorwärtsimpuls und breiteten sich vermehrt zum hinteren Sänger aus (52).

Alle getesteten Masken bremsten den initialen Impuls der Dampf Wolke, wobei die FFP2 Maske am effektivsten war (52). Die Impulsabstrahlung nach vorne am Ende der Teilaufgabe war mit 0,17m lediglich 1/5 der Abstrahlung ohne Maske (52). Jedoch emittierte der Dampf durch Leckagen, beispielsweise an den Seiten der Masken oder um die Nase, bei denen diese dem Gesicht nicht lückenlos anlagen (52). Beim Singen mit einem medizinischen Mundnasenschutz waren diese Leckagen am ausgeprägtesten mit einer Abstrahlung von 0,61m zur linken Seite (52). Die Abstrahlung nach vorne betrug 0,63m am Ende der Aufgabe (52). Beim Singen mit einem um den Mund gebundenen Seidentuch emittierte der Dampf durch das Textil hindurch und erreichte eine Distanz von 0,64m nach vorne am Ende der Aufgabe (52). Das Gesichtsvisier blockte ebenfalls den initialen Impuls. Jedoch emittierte auch bei diesem der ausgestoßene Dampf um die Kanten des Visiers und verteilte sich seinem Impuls folgend (52). Eine Distanz von 0,63m nach vorne und 0,45m nach hinten wurde am Ende der Aufgabe gemessen (52).

Beim Singen vor einer Plexiglasscheibe und mit einer Partitur wurde der Impuls der Dampf Wolke ebenfalls größtenteils abgebremst, allerdings akkumulierte der Dampf um die Seiten herum und verteilte sich anschließend im Raum (52). Beim Singen mit einer Partitur wurde somit eine Distanz von 0,7m nach vorne am Ende der Aufgabe gemessen (52). Beim Singen vor einer Plexiglasscheibe akkumulierte ein großer Teil der Dampf Wolke zwischen Sängerin und Plexiglasscheibe (52). Der obere Teil der Dampf Wolke emittierte jedoch über die obere Kante der Scheibe hinweg und erreichte somit ebenfalls eine Distanz von ca. 0,7m (52).

4. Diskussion

In den Studien wird die Impulsabstrahlung von künstlich hinzugefügten Aerosolen untersucht, in Einzelfallversuchen verschiedene Aspekte des Singens näher beleuchtet, sowie unterschiedliche Schutzmaßnahmen getestet. Die von den Primärwolken erreichten Distanzen nach vorne lagen im Median unter einem Meter, jedoch variierten die gemessenen Abstrahlungen stark zwischen Versuchsteilnehmenden mit Impulsabstrahlungen von bis zu 1,4m beim Singen (51). In Bezug auf die Impulsabstrahlung der Gaswolke werden daher Sicherheitsabstände von 2-2.5m nach vorne, sowie 1.5m zur Seite empfohlen (51). Die Sicherheit beim Singen in Gruppen sollte jedoch nicht nur in Bezug auf das oben beschriebene Nahfeld bewertet werden, da die Aerosole akkumulieren und sich Konvektionsströmen folgend verteilen können (52). So vermischten sich die Gaswolken beim gemeinsamen Singen zweier Sänger ohne kontinuierliche Lüftung mit einem Abstand von 2,6m miteinander und erreichten das Nahfeld von zumindest einem Sänger, aus dem dieser seine Einatemluft bezieht (52). Dieses Nahfeld wurde sehr klein beschrieben, daher scheinen die potenziell pathogenhaltigen Aerosole in die unmittelbare Umgebung des Gegenübers gelangen zu müssen, um von diesem eingeatmet zu werden (52). Diese Experimente zeigen, dass trotz ausreichendem Abstand, um dem Impuls der Primärwolke des Gegenübers zu entgehen, die Aerosole kontinuierlich entfernt werden müssen und unterstreicht die Relevanz einer effektiven Belüftung and adäquaten Luftaustauschrate (52).

Eine erhöhte Impulsabstrahlung trat beim lauten Singen, bei der Artikulation von Konsonanten gegenüber Vokalen und bei starker Betonung auf (52). Lautstärke wird durch die transglottische Druckdifferenz bestimmt, die die Stärke des Luftstroms beeinflusst (51, 53). Zudem wird angenommen, dass auch die Aerosolproduktion beim lauten Sprechen erhöht ist (34). Aufgrund einer vermehrten Aerosolproduktion und einer weiteren Ausbreitungsdistanz nach vorne scheint das potenzielle Übertragungsrisiko bei lauter Phonation erhöht (51).

Die höhere Abstrahlung bei der Artikulation von Konsonanten im Vergleich zu Vokalen könnte ebenfalls in deren Bildung innerhalb des Vokaltraktes begründet liegen: Bei der Bildung von Vokalen kommt es zu keiner Obstruktion oberhalb der Glottis, während insbesondere bei stimmlosen, plosiven Konsonanten plötzliche Obstruktionen und Entweichen des Luftstroms mit hohem Druck auftreten (52, 54). Die Geschwindigkeit des

Luftstroms und damit dessen Abstrahlung ist somit erhöht (42, 43, 52). In dieser Studie wurde nur die Impulsabstrahlung analysiert, nicht die Menge der emittierten Aerosole. Diese scheint, aufgrund einer vermehrten Schwingung der Stimmbänder und damit verbundenen höheren Verdampfung des die Stimmbänder umgebenden Mukus bei der Artikulation von Vokalen im Gegensatz zu Konsonanten, erhöht zu sein (54-56). Somit ist anzunehmen, dass die Distanz der emittierten Aerosole bei der Artikulation von Konsonanten gegenüber Vokalen erhöht, ihre Anzahl jedoch verringert ist (52).

Eine übertriebene Betonung führte ebenfalls zu einer weiteren Abstrahlung (52). Zudem ist bekannt, dass die Menge der emittierten Aerosole beim Singen mit vermehrter Betonung zunimmt (35). In Kombination mit einer erhöhten Abstrahlung scheint dies ein erhöhtes Infektionsrisiko darzustellen (52).

Alle getesteten Masken bremsten die initiale Impulsabstrahlung nach vorne. Die Dampfabschirmung durch die FFP2-Maske war am effektivsten (52). Zudem wird auch die Tröpfchen- und Aerosolemission durch das Tragen von Masken, insbesondere FFP2 Masken, reduziert (44, 45). Beim Seidentuch zeigte sich ein Durchtritt des Dampfes aufgrund geringer Materialdichte. Es ist anzunehmen, dass auch der Aerosoldurchtritt durch das Material erhöht ist (52). Beim Singen mit Masken kam es zu Dampfverlust durch Leckagen, an denen die Maske dem Gesicht der Versuchsperson lückenhaft anlag (52). Vor Versuchsdurchführung gab es keine Schulung der Versuchsteilnehmenden im korrekten Anlegen der Masken, um diese Leckagen möglichst gering zu halten. Es ist anzunehmen, dass das Übertragungsrisiko beim Singen in Gruppen durch das Tragen von Masken reduziert werden kann, vorausgesetzt, diese liegen dem Gesicht entsprechend an (52). Allerdings ist zu beachten, dass Masken die Klangqualität beeinflussen und die Artikulation limitieren können (52, 57, 58). Dies ist insbesondere im Profibereich relevant. In einer Folgestudie mit Profisängerinnen und Profisängern, in der das Singen mit speziellen Sängermasken näher untersucht wurde und durch einen Fragebogen deren Praktikabilität von den Versuchsteilnehmenden bewertet werden sollte, lehnten die Mehrzahl der Versuchsteilnehmenden Masken beim Singen als persönliche Schutzausrüstung ab (57). Insbesondere für den Laiengesang ist der Einsatz von Masken beim Singen eine sinnvolle Option.

Gesichtsvisiere wurden zu Beginn der Coronapandemie vermehrt beim Singen eingesetzt. Ihr Vorteil liegt darin, dass sie die Artikulation nicht beeinflussen (52). Die Gaswolke wurde in dieser Studie zwar durch das Gesichtsvision gebremst, jedoch emittierte der Dampf um die Seiten des Visiers und verteilte sich anschließend im Raum(52). Vor dem Hintergrund einer aerosolgetragenen Transmission ist eine ausreichende Schutzwirkung durch ein Gesichtsvision zu bezweifeln (52). Auch das Center for Disease Control and Prevention empfiehlt Gesichtsvision primär als zusätzliche, nicht ausschließliche Schutzausrüstung (59).

Das Singen vor einer Plexiglasscheibe bremste zwar den initialen Impuls, jedoch ist auch ihr Einsatz zur Transmissionsprävention umstritten, da sie die Luft im gemeinsamen Raum nicht komplett trennen (52, 60). Die ausgestoßenen Aerosole können weiterhin von anderen Personen eingeatmet werden. Darüber hinaus ist die Entfernung der Aerosole erschwert, da die Luft aus dem Bereich hinter der Plexiglasscheibe durch Belüftungssysteme nur zögerlich ausgetauscht werden kann (46).

5. Zusammenfassung

Im Rahmen der Corona-Pandemie kam es zu zahlreichen Superspreader events, unter anderem im Rahmen von Chorproben, welche begleitet von einer Unsicherheit bezüglich des Übertragungsmodus von SARS-CoV-2 zu starken Beschränkungen in der Arbeit von Sängerinnen und Sängern führten (29, 30, 32, 38). So wurden Chorproben, Live Auftritte und Unterrichtsstunden, insbesondere im Hinblick einer vermehrten Bedeutung der möglichen aerosolgetragenen Übertragung von SARS-Cov-2, zunehmend untersagt (38). Folgen für die Musizierenden waren von wirtschaftlicher, sozialer, psychischer und kreativer Bedeutung.

In den Veröffentlichungen dieser Arbeit sind die Ergebnisse zur Impulsabstrahlung und von künstlich hinzugefügten Aerosolen bei Profisängerinnen und Profisängern während des Singens, Sprechens, Atmens, Hustens und während der Vokalise auf dem Vokal /a/ mit unterschiedlicher Lautstärke dargestellt (51). Des Weiteren werden Quellen erhöhter Abstrahlung betrachtet, das Singen mit verschiedenen Sicherheitsabständen untersucht, sowie verschiedene Abschirmungsmaßnahmen getestet (52).

Es zeigte sich eine erhöhte Abstrahlung nach vorne beim Singen im Vergleich zum Sprechen, sowie eine erhöhte Abstrahlung bei lauten im Vergleich zu leisen Teilaufgaben (51). Basierend auf den Ergebnissen werden Sicherheitsabstände von 2-2,5m nach vorne und 1,5m zur Seite in Bezug auf die Impulsabstrahlung empfohlen (51). Voraussetzung ist, dass in gut ventilierten Räumen gesungen wird, da es auch bei oben beschriebenem Abstand nach dem initialen Impuls zur Akkumulation der Aerosole mit anschließender Verteilung im Raum und möglicher Pathogenübertragung kommen kann (51, 52).

Quellen erhöhter Abstrahlung waren zudem die Artikulation von Konsonanten und eine starke Betonung (52). Auch die Kopfposition scheint die Impulsabstrahlung zu beeinflussen mit der weitesten Abstrahlung für eine neutrale Kopfposition (52).

Alle getesteten Masken bremsten den initialen Impuls der Dampf Wolke, wobei die FFP2 Maske am effektivsten war (52). Allerdings emittierte der Dampf durch Leckagen, bei denen die Maske dem Gesicht der Singenden nicht lückenlos anlag und konnte nicht vollkommen abgeschirmt werden (52).

Beim Singen mit einem Gesichtsvision, vor einer Plexiglasscheibe und mit einer Partitur wurde der Impuls der Dampf Wolke zwar gebremst, allerdings akkumulierte der Dampf um die Seiten herum und verteilte sich anschließend seinem Impuls folgend im Raum (52). Das Risiko des Singens in Gruppen könnte durch das Tragen von Masken reduziert werden. Voraussetzung ist, dass diese dem Gesicht lückenlos anliegen (52). Weiterhin ist eine ausreichende Belüftung mit adäquater Luftaustauschrate essenziell, um die durch Leckagen emittierten Aerosole zu entfernen (51, 52).

6. Abstract

During the COVID-19 pandemic, numerous superspreader events occurred, including choir rehearsals (29, 30, 32, 38). This led to severe restrictions on the work of singers, especially due to an increasing significance of a potential airborne transmission of SARS-CoV-2 (38). Choir rehearsals, live performances, and singing lessons were first restricted, later prohibited (38). The consequences for musicians were significant, encompassing economic, social, psychological, and creative aspects.

The publications present results on the impulse dispersion of artificially added aerosols in professional singers during singing, speaking, breathing, coughing, and vocalizing on the vowel /a/ at different volumes (51). Furthermore, sources of increased dispersion are identified, singing with different safety distances is analyzed and various tools to impede the dispersion were tested (52).

The dispersion to the front was greater for singing compared to speaking and greater for loud phonation compared to soft phonation (51). Based on the results, safety distances of 2-2.5m to the front and 1.5m to the sides are recommended (51). Additionally constant aeration is crucial to remove accumulated aerosols (51, 52).

Sources of increased dispersion include the articulation of consonants and exaggerated diction. The head position also seems to influence impulse dispersion, with the greatest dispersion for a neutral head position (52).

All tested masks impeded the initial jet and forward movement of the cloud, with the FFP2 mask being most effective (52). However, vapor emitted through leaks where the mask did not fit the singers face properly, preventing complete shielding (52).

When singing with a face shield, in front of a plexiglass barrier or with a score, the initial expiratory jets were partly blocked. However, the vapor accumulated around the edges and subsequently dispersed throughout the room (52).

It could be assumed that the risk of singing in groups could be lowered when masks are worn (52). Additionally constant aeration is crucial in order to remove accumulated aerosols or aerosols that emit through leaks where the mask doesn't fit the singers face properly (51, 52).

7. 1. Publikation

Echternach M, Gantner S, Peters G, Westphalen C, Benthous T, Jakubaß B, Kuranova L, Döllinger M, Kniesburges S. Impulse Dispersion of Aerosols during Singing and Speaking: A Potential COVID-19 Transmission Pathway. *Am J Respir Crit Care Med*. 2020 Dec 1;202(11):1584-1587. doi: 10.1164/rccm.202009-3438LE.

8. 2. Publikation

Westphalen C, Kniesburges S, Veltrup R, Gantner S, Peters G, Benthaus T, Jakubaß B, Köberlein M, Döllinger M, Echternach M. Sources of Aerosol Dispersion During Singing and Potential Safety Procedures for Singers. *J Voice*. 2021 Apr 10:S0892-1997(21)00101-6. doi: 10.1016/j.jvoice.2021.03.013.

9. Literaturverzeichnis

1. Leung NHL. Transmissibility and transmission of respiratory viruses. *Nat Rev Microbiol.* 2021;19(8):528-45.
2. Fendrick AM, Monto AS, Nightengale B, Sarnes M. The economic burden of non-influenza-related viral respiratory tract infection in the United States. *Arch Intern Med.* 2003;163(4):487-94.2
3. Prasad N, Newbern EC, Trenholme AA, Thompson MG, McArthur C, Wong CA, et al. The health and economic burden of respiratory syncytial virus associated hospitalizations in adults. *PLoS One.* 2020;15(6):e0234235.
4. Diez-Domingo J, Perez-Yarza EG, Melero JA, Sanchez-Luna M, Aguilar MD, Blasco AJ, et al. Social, economic, and health impact of the respiratory syncytial virus: a systematic search. *BMC Infect Dis.* 2014;14:544.
5. James SL, Abate D, Abate KH, Abay SM, Abbafati C, Abbasi N, et al. Global, regional, and national incidence, prevalence, and years lived with disability for 354 diseases and injuries for 195 countries and territories, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet.* 2018;392(10159):1789-858.
6. Roth GA, Abate D, Abate KH, Abay SM, Abbafati C, Abbasi N, et al. Global, regional, and national age-sex-specific mortality for 282 causes of death in 195 countries and territories, 1980-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet.* 2018;392(10159):1736-88.
7. World-Health-Organization. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard With Vaccination Data. Available at: <https://covid19.who.int/>. Accessed August 7th 2024.
8. Kutter JS, Spronken MI, Fraaij PL, Fouchier RA, Herfst S. Transmission routes of respiratory viruses among humans. *Curr Opin Virol.* 2018;28:142-51.
9. Centers-for-Disease-Control-and-Prevention. Scientific Brief: SARS-CoV-2 Transmission 2020. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34009775>. Accessed August 7th 2024.
10. Robert-Koch-Institut. Epidemiologischer Steckbrief zu SARS-CoV-2 und COVID-19. Stand. 2021;11:2021. Available at: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html. Accessed August 7th 2024.
11. Tellier R, Li Y, Cowling BJ, Tang JW. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infect Dis.* 2019;19(1):101.
12. Bourouiba L, Dehandschoewercker E, Bush JW. Violent expiratory events: on coughing and sneezing. *Journal of Fluid Mechanics.* 2014;745:537-63.

13. Bagheri G, Thiede B, Hejazi B, Schlenczek O, Bodenschatz E. An upper bound on one-to-one exposure to infectious human respiratory particles. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2021;118(49).
14. Correia G, Rodrigues L, Gameiro da Silva M, Goncalves T. Airborne route and bad use of ventilation systems as non-negligible factors in SARS-CoV-2 transmission. *Med Hypotheses*. 2020;141:109781.
15. Murbe D, Kriegel M, Lange J, Rotheudt H, Fleischer M. Aerosol emission in professional singing of classical music. *Sci Rep*. 2021;11(1):14861.
16. Asbach C, Held A, Kiendler-Scharr A, Scheuch G, Schmid H-J, Schmitt S, et al. Positionspapier der Gesellschaft für Aerosolforschung zum Verständnis der Rolle von Aerosolpartikeln beim SARS-CoV-2 Infektionsgeschehen. 2021. Available at: https://www.info.gaef.de/_files/ugd/fab12b_a5f114a183cf4f27ab8ac713e8a5b8ef.pdf. Accessed August 7th 2024.
17. World-Health-Organization. Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. Scientific brief. 9 July 2020 Available at: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/333114/WHO-2019-nCoV-Sci_Brief-Transmission_modes-2020.3-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Accessed August 7th 2024.
18. Jayaweera M, Perera H, Gunawardana B, Manatunge J. Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. *Environ Res*. 2020;188:109819.
19. Morawska L, Cao J. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environ Int*. 2020;139:105730.
20. Jones RM, Brosseau LM. Aerosol transmission of infectious disease. *J Occup Environ Med*. 2015;57(5):501-8.
21. Puhach O, Meyer B, Eckerle I. SARS-CoV-2 viral load and shedding kinetics. *Nat Rev Microbiol*. 2023;21(3):147-61.
22. van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, et al. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N Engl J Med*. 2020;382(16):1564-1567.
23. World-Health-Organization. Modes of Transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations. March 27th 2020. Available at: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>. Accessed August 7th 2024.
24. Gomes C. Report of the WHO-China joint mission on coronavirus disease 2019 (COVID-19). *Brazilian Journal of Implantology and health sciences*. 2020;2(3).
25. Morawska L, Milton DK. It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Clin Infect Dis*. 2020;71(9):2311-3.

26. World-Health-Organization. Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted??. Update: December 23rd 2021. Available at: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted>. Accessed August 7th 2024.
27. Althouse BM, Wenger EA, Miller JC, Scarpino SV, Allard A, Hebert-Dufresne L, Hu H. Superspreading events in the transmission dynamics of SARS-CoV-2: Opportunities for interventions and control. *PLoS Biol.* 2020;18(11):e3000897.
28. Majra D, Benson J, Pitts J, Stebbing J. SARS-CoV-2 (COVID-19) superspreader events. *J Infect.* 2021;82(1):36-40.
29. Miller SL, Nazaroff WW, Jimenez JL, Boerstra A, Buonanno G, Dancer SJ, et al. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air.* 2021;31(2):314-23.
30. Hamner L, Dubbel P, Capron I, Ross A, Jordan A, Lee J, et al. High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice - Skagit County, Washington, March 2020. *MMWR Morb Mortal Wkly Rep.* 2020;69(19):606-10.
31. Van der Lint P. Die ene Passion die wel doorging, met rampzalige gevolgen. *Trouw.* May 9th 2020.
32. Charlotte N. High Rate of SARS-CoV-2 Transmission Due to Choir Practice in France at the Beginning of the COVID-19 Pandemic. *J Voice.* 2023;37(2):292 e9- e14.
33. Neuendorff M. 60 Chormitglieder im Berliner Dom infiziert. *Märkische Onlinezeitung.* May 19th 2020, 03:15.
34. Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep.* 2019;9(1):2348.
35. Alsved M, Matamis A, Bohlin R, Richter M, Bengtsson P-E, Fraenkel C-J, et al. Exhaled respiratory particles during singing and talking. *Aerosol Science and Technology.* 2020;54(11):1245-8.
36. Gregson F, Watson N, Orton C, Haddrell A, McCarthy L, Finnie T, et al. Comparing the Respirable Aerosol Concentrations and Particle Size Distributions Generated by Singing, Speaking and Breathing. *ChemRxiv* 2020. ChemRxiv.12789221:v1.Preprint
37. Morawska L, Johnson G, Ristovski Z, Hargreaves M, Mengersen K, Corbett S, et al. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of aerosol science.* 2009;40(3):256-69.
38. Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege. Zwölfte Bayerische Infektionsschutzmaßnahmenverordnung (12. BayIfSMV). Bayerische Staatskanzlei. München. 2021.1-15

39. Bourouiba L. Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19. *JAMA*. 2020;323(18):1837-8.
40. Lieber C, Melekidis S, Koch R, Bauer HJ. Insights into the evaporation characteristics of saliva droplets and aerosols: Levitation experiments and numerical modeling. *J Aerosol Sci*. 2021;154:105760.
41. International Coalition of Performing Arts. Aerosol Study Round 2. Preliminary recommendations from international performing arts aerosol study based on initial testing results. Available at: <https://www.nfhs.org/media/4119369/aerosol-study-prelim-results-round-2-final-updated.pdf>. Accessed August 7th 2024.
42. Gupta JK, Lin CH, Chen Q. Characterizing exhaled airflow from breathing and talking. *Indoor Air*. 2010;20(1):31-9.
43. Emanuel FW, Counihan DT. Some characteristics of oral and nasal air flow during plosive consonant production. *Cleft Palate J*. 1970;7:249-60.
44. Chu DK, Akl EA, Duda S, Solo K, Yaacoub S, Schunemann HJ, COVID-19 Systematic Urgent Review Group Effort (SURGE) study authors. Physical distancing, face masks, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis. *Lancet*. 2020;395(10242):1973-87.
45. Asadi S, Cappa CD, Barreda S, Wexler AS, Bouvier NM, Ristenpart WD. Efficacy of masks and face coverings in controlling outward aerosol particle emission from expiratory activities. *Sci Rep*. 2020;10(1):15665.
46. Ueki H, Furusawa Y, Iwatsuki-Horimoto K, Imai M, Kabata H, Nishimura H, Kawaoka Y. Effectiveness of Face Masks in Preventing Airborne Transmission of SARS-CoV-2. *mSphere*. 2020;5(5).
47. Echternach M, Westphalen C, Koberlein MC, Gantner S, Peters G, Benthous T, et al. Reply to Philip et al.: Aerosol Transmission of SARS-CoV-2: Inhalation as well as Exhalation Matters for COVID-19. *Am J Respir Crit Care Med*. 2021;203(8):1042-3.
48. Deutscher Musikrat e. V. und Konferenz der Landesmusikräte im Deutschen Musikrat. Empfehlungen zur Wiederaufnahme des musikalischen Betriebs im Amateur- und Profibereich unter Beachtung entsprechender Hygienekonzepte. 2021. Available at: <https://miz.org/de/dokumente/empfehlungen-zur-wiederaufnahme-des-musikalischen-betriebs-im-amateur-und-profibereich-unter-beachtung-entsprechender-hygienekonzepte>. Accessed August 7th 2024.
49. Kompetenznetzwerk Neustart Amateurmusik. Grundlagen für das Musizieren unter Pandemiebedingungen. 2021. Available at: https://bundesmusikverband.de/wp-content/uploads/2021/04/2021-04_21_Grundlagen_Musizieren_unter_Pandemiebedingungen_V1-1.pdf. Accessed August 7th 2024.
50. Deutschen Gesellschaft für Musikphysiologie und Musikermmedizin. Musizieren während der SARS-CoV-2-Pandemie Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für

- Musikphysiologie und Musikermmedizin (DGfMM) zum Infektionsschutz beim Musizieren. 2020. Available at: https://dgfmm.org/fileadmin/zeitschriften/2020-02_03_Musizieren_waehrend_der_SARS-CoV-2-Pandemie_-_Empfehlungen_der_DGfMM.pdf. Accessed August 7th 2024.
51. Echternach M, Gantner S, Peters G, Westphalen C, Benthous T, Jakubass B, et al. Impulse Dispersion of Aerosols during Singing and Speaking: A Potential COVID-19 Transmission Pathway. *Am J Respir Crit Care Med*. 2020;202(11):1584-7.
52. Westphalen C, Kniesburges S, Veltrup R, Gantner S, Peters G, Benthous T, et al. Sources of Aerosol Dispersion During Singing and Potential Safety Procedures for Singers. *J Voice*. 2023;37(4):504-14.
53. Sundberg J. The science of the singing voice. DeKalb, IL: Northern Illinois University Press; 1987.
54. Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD. Effect of voicing and articulation manner on aerosol particle emission during human speech. *PLoS One*. 2020;15(1):e0227699.
55. Loudon RG, Roberts RM. Singing and the dissemination of tuberculosis. *Am Rev Respir Dis*. 1968;98(2):297-300.
56. Holding L, Carroll TL, Nix J, Johns MM, LeBorgne WD, Meyer D. COVID-19 After Effects: Concerns for Singers. *J Voice*. 2022;36(4):586 e7- e14.
57. Echternach M, Hermann L, Gantner S, Tur B, Peters G, Westphalen C, et al. The Effect of Singers' Masks on the Impulse Dispersion of Aerosols During Singing. *J Voice*. 2024;38(1):247 e1- e10.
58. Corey RM, Jones U, Singer AC. Acoustic effects of medical, cloth, and transparent face masks on speech signals. *J Acoust Soc Am*. 2020;148(4):2371.
59. Roberge RJ. Face shields for infection control: A review. *J Occup Environ Hyg*. 2016;13(4):235-42.
60. Naunheim MR, Bock J, Doucette PA, Hoch M, Howell I, Johns MM, et al. Safer Singing During the SARS-CoV-2 Pandemic: What We Know and What We Don't. *J Voice*. 2021;35(5):765-71.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Echternach für die ausgezeichnete Betreuung und die Möglichkeit, bei einem so aktuellen Projekt mitwirken zu können.

Prof. Dr. Nowak und Prof. Dr. Gröger danke ich für die engagierte und unkomplizierte Mitbetreuung.

Bei Sophia Gantner, Dr. Marie Köberlein und Dr. Liudmilla Kuranova möchte ich mich ebenfalls herzlich für ihre Unterstützung bedanken.

Darüber hinaus möchte ich mich beim gesamten Team der Universität Erlangen, PD Dr. Dr. Kniesburges, Dr. Gregor Peters, Bernhard Jakubaß, Rheinhard Veltrup und Prof. Dr. Döllinger für die Zusammenarbeit bedanken.

Allen Musikerinnen und Musikern vom Chor und Orchesters des Bayerischen Rundfunks möchte ich für ihre motivierte Teilnahme an den Versuchen danken.

Bei allen am Projekt beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Bayerischen Rundfunks möchte ich mich für die professionelle und unkomplizierte Zusammenarbeit bedanken.

Übereinstimmung abgegebener Exemplare



Erklärung zur Übereinstimmung der gebundenen Ausgabe der Dissertation mit der elektronischen Fassung

Ihr Name: Caroline Westphalen

Ihre Adresse:

Hiermit erkläre ich, dass die elektronische Version der eingereichten Dissertation mit dem Titel

Impulsabstrahlung von Aerosolen beim Singen und Sprechen

in Inhalt und Formatierung mit den gedruckten und gebundenen Exemplaren übereinstimmt.

München, 20.08.25

Ort, Datum

Caroline Westphalen

Unterschrift Caroline Westphalen