

# Vergleich der Aerosolpartikelemissionen von Grundschulkindern und Erwachsenen beim Atmen, Sprechen, Singen und Rufen

Dirk Mürbe<sup>1</sup>, Lukas Schumann<sup>3</sup>, Anne Hartmann<sup>3</sup>, Liliana Ifrim<sup>1</sup>, Dorothea von Zadow<sup>1</sup>, Jonas Lüske<sup>1</sup>, Joachim Seybold<sup>2</sup>, Martin Kriegel<sup>3</sup>, Mario Fleischer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Klinik für Audiologie und Phoniatrie, Charité – Universitätsmedizin Berlin

<sup>2</sup>Vorstand Krankenversorgung, Charité – Universitätsmedizin Berlin

<sup>3</sup>Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin

## Zusammenfassung

Sprechen und Singen sind Aktivitäten, die in Abhängigkeit von der eingesetzten Stimmstärke mit erhöhten Aerosolpartikelemissionen im Bereich der Atemwege verbunden sind. Aufgrund des Übertragungsrisikos von SARS-CoV-2-Viren durch virushaltige Aerosolpartikel bestehen seit Beginn der Pandemie erhebliche Einschränkungen für diese Aktivitäten in geschlossenen Räumen. Diese betreffen auch schulische Bildung und außerschulische Aktivitäten, zum Beispiel im Bereich des Präsenzunterrichtes und der Kinder- und Jugendchöre. Allerdings basieren bisherige Gefährdungsbeurteilungen auf bei Erwachsenen gemessenen Emissionsstärken. In einem Reinraum wurden daher die Partikelemissionen von 15 Grundschulern, alle zwischen 8 und 10 Jahre alt, mittels Laserpartikelzähler untersucht. Dabei wurden die Emissionsstärken für die Testbedingungen Ruheatmung, Sprechen, Singen und Rufen sowie für gehaltene Phonation unterschiedlicher Stimmstärke bestimmt. Beim Vergleich mit den Werten von 15 Erwachsenen zeigten sich für Ruheatmung, Sprechen und Singen signifikant geringere Emissionsraten für Kinder. Der Faktor zwischen Kindern und Erwachsenen betrug 2.8 bei Ruheatmung, 5.9 beim Sprechen sowie 13.4 beim Singen. Beim Rufen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen. Die Emissionsraten von Kindern und Erwachsenen unterschieden sich zudem bei gehaltener Phonation mit unterschiedlicher Stimmstärke. Diese erstmals für Grundschüler erhobenen Partikelemissionsraten sollten zur weiteren Spezifizierung des SARS-CoV-2-Risikomanagements für verschiedene Referenzsituationen im schulischen und außerschulischen Bereich genutzt werden.

## Einleitung

Die respiratorische Aufnahme virushaltiger Partikel ist der Hauptübertragungsweg für SARS-CoV-2-Viren. Ist eine Person mit SARS-CoV-2 infiziert, können die in den Atemwegen gebildeten Aerosolpartikel Viren enthalten, die damit in die Luft gelangen und von anderen Personen eingeatmet werden können. In dieser Untersuchung wird nur die Abgabe respiratorischer Partikel betrachtet. Da die Atemwege in Doppelfunktion auch die Instrumente des stimmbildenden Systems darstellen, werden nicht nur beim Atmen, sondern auch bei phonatorischen Prozessen (Entstehung von Stimmklang durch die schwingenden Stimmlippen im Kehlkopf) Aerosolpartikel gebildet, z.B. beim Sprechen, Singen und Rufen (Morawska et al., 2009). Beim Sprechen entstehen dabei deutlich stärkere Aerosolpartikelemissionen im Vergleich zur Ruheatmung, wobei die Emissionsrate erheblich von der Lautstärke abhängt (Asadi et al., 2019). Für das Singen werden im Vergleich zum Sprechen noch höhere Partikelemissionsraten angegeben (Alsved et al., 2020; Gregson et

al., 2021), die wiederum von den Emissionsraten beim Rufen übertroffen werden (Mürbe et al., 2020a). Neben der Aerosolpartikelbildung im Bereich der Lungenalveolen und der Artikulatoren werden in den Atemwegen bei Phonation auch Aerosolpartikel durch die schwingenden Stimmlippen generiert (Johnson & Morawska, 2009; Morawska et al., 2009).

Mit höheren Emissionsraten steigt das Risiko einer Übertragung virushaltiger Aerosolpartikel sowohl im Nahfeld einer infektiösen Person (unmittelbares Umfeld der Infektionsquelle), als auch im Fernfeld (gesamter Raum) durch steigende Konzentrationen infektiöser Aerosolpartikel in geschlossenen Räumen, insbesondere bei ungünstigen Rahmenbedingungen wie längerem Aufenthalt der infektiösen Person(en), unzureichender Lüftung/Frischluftzufuhr und kleinen Raumvolumina. Für solche Konstellationen mit besonders starker Partikelemission und hohen Konzentrationen, z.B. das gemeinsame Singen im Rahmen einer längeren Chorprobe, sind hohe Infektionsraten beschrieben (Hamner et al., 2020; Miller et al., 2020; Katelaris et al., 2021). Die Bewertung von Emissionsstärken von Aerosolpartikeln ist daher ein wesentlicher Faktor für die Gefährdungsbeurteilung bei SARS-CoV-2-Exposition und relevante Grundlage des Risikomanagements.

Bisherige Risikomanagementstrategien basieren auf Emissionsstärken von Aerosolpartikeln bei Erwachsenen, da für Kinder im Grundschulalter bislang keine Quelldaten vorliegen. Doch gerade im Kinder- und Jugendbereich ist eine Spezifizierung des Risikomanagements dringlich, um bei adäquatem Infektionsschutz bestmöglichen Bildungszugang und gesellschaftliche Teilhabe zu ermöglichen. Dies schließt unter anderem im schulischen Bereich eine altersspezifische Bewertung des Infektionsrisikos durch die Konzentration potentiell virushaltiger Aerosolpartikel in Innenräumen bei Präsenzunterricht ein. Im außerschulischen Bereich besteht besonderer Bedarf an einem differenzierten Risikomanagement für das Singen in Kinder- und Jugendchören aufgrund der Bedeutung des Singens für die soziale, sprachliche und emotionale Entwicklung in diesem Alter mit den entsprechenden Folgen bei längerfristigen Einschränkungen dieses Bildungsaspektes.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Aerosolpartikelemissionen für Schüler im Grundschulalter zu bestimmen und mit den Daten von Erwachsenen zu vergleichen. Dafür wurden Emissionsstärken von Kindern für Ruheatmung, Sprechen und Singen ermittelt und um Daten zum Rufen erweitert, da die damit verbundenen höheren Stimmstärken für einige kindliche Referenzsituationen typisch sind. Auf Basis der gemessenen Partikelemissionen von Grundschulern sollen entsprechende Gefährdungsbeurteilungen und Risikomanagementstrategien kinderspezifisch modifiziert werden.

## **Methode**

Vier Mädchen und 11 Jungen, alle zwischen 8 und 10 Jahre alt (Median 9,7 Jahre), nahmen an der Untersuchung teil. Sie waren Mitglieder zweier semiprofessioneller Kinderchöre (Staats- und Domchor Berlin, Mädchenchor der Sing-Akademie zu Berlin) mit Singerfahrung zwischen eineinhalb und viereinhalb Jahren. Als Referenzgruppe wurden 15 Mitglieder (8 Frauen, 7 Männer, Alter 23 bis 64 Jahre, Median 43,1 Jahre) eines semiprofessionellen Erwachsenenchores (Philharmonischer Chor Berlin) untersucht - alle mit mehrjähriger Singerfahrung. Die Studie folgte den ethischen Grundsätzen auf Grundlage der WMA-Deklaration von Helsinki und wurde von der Ethikkommission der Charité-Universitätsmedizin Berlin genehmigt.

Die Untersuchungen wurden in einem Reinraum (ISO-2-Klasse) des Hermann-Rietschel-Instituts der Technischen Universität Berlin durchgeführt. Um den thermischen Auftrieb an den Probanden effizient zu unterdrücken, wurde die Zuluft im gesamten Reinraum über eine quasi-laminare vertikale Strömung mit einer Geschwindigkeit von 0,3 m/s eingeleitet (siehe Abb., <https://journals.plos.org/plosone/article/figure?id=10.1371/journal.pone.0246819.g001>). Damit ist im Raum keine Hintergrundkonzentration an Partikeln vorhanden. Die Raumtemperatur betrug  $295,15 \pm 0,5$  K, die relative Luftfeuchtigkeit  $46 \pm 2$  %. Der statische Druck im Reinraum war etwa  $20 (\pm 2\%)$  Pa größer als außerhalb des Raumes.

Die Probanden trugen Reinraumkleidung inklusive Kopfbedeckung, um die Partikelemission ihrer persönlichen Kleidung zu minimieren. Zur Durchführung der Untersuchungen saßen sie vor der Öffnung eines Glasrohres mit einem Durchmesser von 295 mm, in dem durch Absaugung einer Filter-Fan-Unit (FFU) (Ziehl-Abegg, Künzelsau, Deutschland) ein konstanter Luftstrom von ca.  $400 \text{ m}^3/\text{h}$  erzeugt wurde. Die Probenahmesonde eines Laserpartikelzählers (LPC) (Lighthouse Solair 3100 E, Lighthouse Worldwide Solutions, Fremont, CA) mit einem Durchmesser von 37 mm wurde im Abstand von 810 mm von der Öffnung mittig im Kanal platziert. Durch einen Prallblende wurde eine homogene Durchmischung der Luftströmung ermöglicht. Zwischen den Messungen mit den einzelnen Probanden konnten stets Nullmessungen im Kanal durchgeführt werden.

Der Partikelzähler zählte mit einem Volumenstrom von  $28,3 \text{ l}/\text{min}$  und mit einem Zeitinkrement von 10 Sekunden. Die detektierten Partikel wurden sechs Größenklassen ( $>0,3$ ,  $>0,5$ ,  $>1,0$ ,  $>3,0$ ,  $>5,0$ ,  $>10,0 \text{ }\mu\text{m}$ ) zwischen  $0,3$ - $25,0 \text{ }\mu\text{m}$  zugeordnet. Die Emissionsrate  $P_M$  wurde aus der Skalierung der am LPC gemessenen Partikel auf den Volumenstrom im Kanal berechnet. Neben der Partikelmessung wurde auch der Schalldruckpegel  $L_{AFMAX}$  mit einem kalibrierten Schallpegelmesser (CENTER 322\_ Datalogger Sound Level Meter, Center Technologies, Houston, TX) gemessen.

In die Studie wurden zwei Teiluntersuchungen eingeschlossen. In Teiluntersuchung I wurden die Emissionsraten von Kindern und Erwachsenen für unterschiedliche Testbedingungen verglichen: (a) Ruheatmung als Ausgangslage, sowie (b) Sprechen, (c) Singen und (d) Rufen als verschiedene Phonationsarten. Testbedingung (a) bestand in der Bestimmung von  $P_M$  während der Ruheatmung primär durch die Nase. Testbedingung (b) beinhaltete das Sprechen des Textes "Seefahrt nach Rio" von James Krüss in mittlerer Stimmstärke. Testbedingung (c) bestand im Singen der Melodie "Freude schöner Götterfunken" in F-Dur (Ludwig van Beethoven, Ode an die Freude, 9. Sinfonie in d-moll op. 125), ein sowohl den Probanden im Kindes- als auch Erwachsenenalter vertrautes Stück (ebenfalls in mittlerer Stimmstärke). Für Test (d) wurden die Probanden gebeten, mit lauter Rufstimme lückenlos aufsteigend zu zählen. Das gesamte Zeitfenster für eine gemessene Sequenz betrug 30 Sekunden für die Testbedingungen (a), (b) und (c) und 10 Sekunden für Testbedingung (d). Jede Testbedingung wurde fünfmal durchgeführt.

In Teiluntersuchung II erfolgte der Vergleich der Emissionsraten von Kindern und Erwachsenen für leise (piano) und laute (forte) Stimmstärke bei für 10 Sekunden ausgehaltener Tongebung („gehaltene Phonation“). Die Kinder wurden gebeten, eine Silbenkette /lü:/ für 10 Sekunden unter beiden Lautheitsbedingungen zu phonieren. Dabei durfte die Tonhöhe vom Ausgangspunkt F4 (350 Hz) im Fünftonraum variiert werden. Die Erwachsenen hielten einen Ton auf den Vokal /a:/ in mittlerer Stimmlage ebenfalls in leiser und lauter Stimmstärke aus. Um 10 Sekunden Messzeit zu erleichtern, wurde allen Probanden erlaubt, ggf. innerhalb der Aufnahme kurz zu atmen. Auch in Teiluntersuchung II wurden beide Testbedingungen fünfmal durchgeführt.

Die Emissionsraten wurden auf die jeweilige Zeitlänge der Aufgaben (10 bzw. 30 Sekunden) normiert und stellen damit zeitlich gemittelte Werte dar. Die statistische Analyse, individuell für die beiden Teiluntersuchungen, erfolgte mittels linearer gemischter Modellierung (LMEM) in der Statistiksoftware R ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)). Für diese Studie wurden die logarithmierten  $P_M$ -Daten als abhängige Variable und die Testbedingung sowie die Alterszugehörigkeit als fester Effekt einbezogen. Des Weiteren wurde die ID der Teilnehmer als zufälliger Effekt berücksichtigt. Die p-Werte wurden mittels der Methode nach Satterthwaite ermittelt.

## **Ergebnisse**

Für jeden Probanden wurde zunächst der Median der fünf Messwiederholungen für jede Testbedingung der Teiluntersuchungen I und II ermittelt (Anhang, Tabelle 1).

### *Teiluntersuchung I*

Für die Ausgangssituation der Ruheatmung betrug der Median der Emissionsraten aller untersuchten Kinder 0 P/s (Partikel/Sekunde). Für die verschiedenen Vokalisationsarten Sprechen, Singen und Rufen lag der Median der Emissionsraten bei 24 P/s, 118 P/s und 1083 P/s.

In der Referenzgruppe der Erwachsenen betrug der Median der Emissionswerte für die Ruheatmung 16 P/s. Für die verschiedenen Vokalisationsarten Sprechen, Singen und Rufen lag der Median der Emissionsraten bei 204 P/s, 1640 P/s und 1295 P/s.

Die statistische Analyse zeigte signifikante Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen für die Testbedingungen Ruheatmung ( $p=0.004$ ), Sprechen ( $p<0.001$ ) und Singen ( $p<0.001$ ). Für die Testbedingung Rufen ergab sich kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Kindern und Erwachsenen ( $p=0.168$ ). Auf Basis der Modellierung betrug der Unterschied der Partikelemissionen zwischen Kindern und Erwachsenen bei Ruheatmung Faktor 2.8, beim Sprechen Faktor 5.9 und beim Singen Faktor 13.4. Beim Rufen betrug der Faktor 1.5 (Abb. 1).

Die verschiedenen Testbedingungen unterschieden sich auf Basis der Modellierung aller bei Kindern und Erwachsenen gemessenen Partikelemissionen mit Faktor 4.6 zwischen Ruheatmung und Sprechen, Faktor 5.4 zwischen Sprechen und Singen sowie Faktor 2.6 zwischen Singen und Rufen.

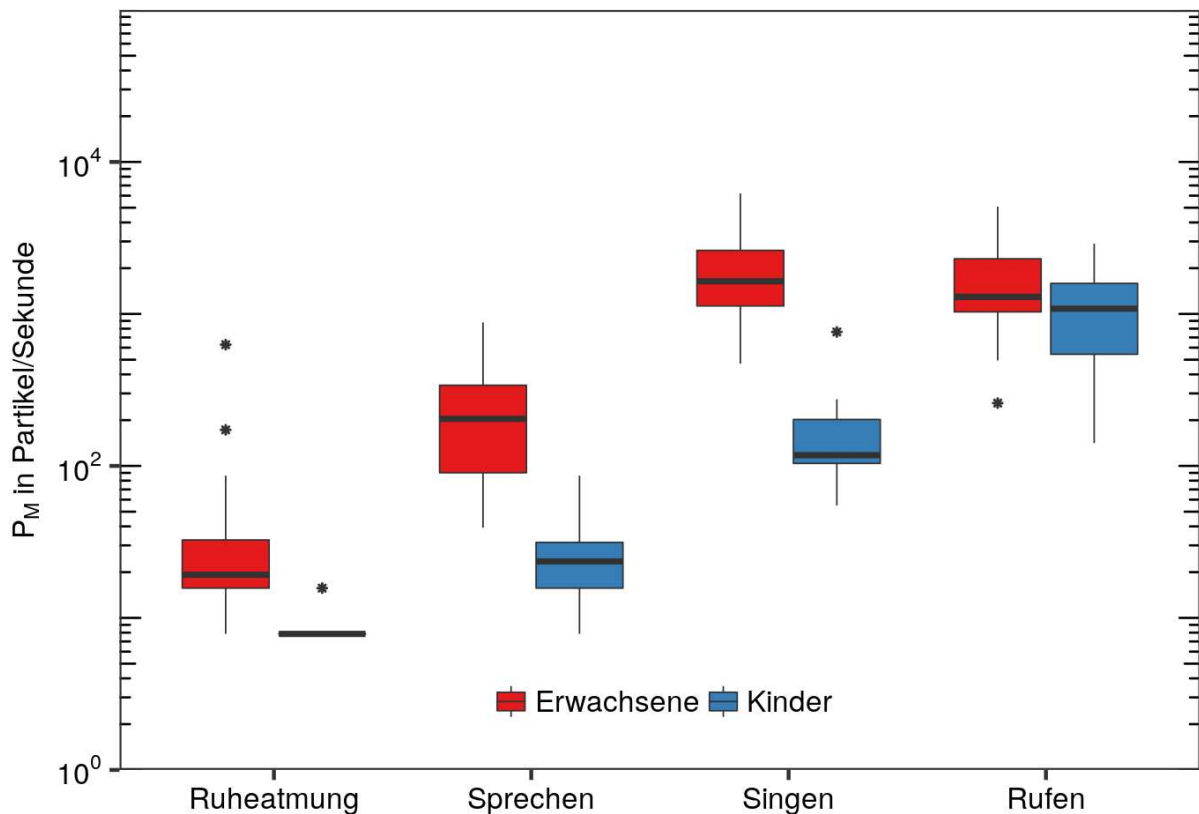


Abbildung 1. Vergleich der Emissionsraten  $P_M$  in Partikel pro Sekunde für Ruheatmung und die verschiedenen Phonationsarten Sprechen, Singen und Rufen. Die Boxplots repräsentieren die Werte aus den Medianen der jeweils fünf Messwiederholungen pro Testbedingung für die Gruppe der Kinder (blau,  $n=15$ ) und die Referenzgruppe der Erwachsenen (rot,  $n=15$ ). Aufgrund der sehr geringen Werte bei der Ruheatmung von Kindern (Median von Null) entspricht die Linie nicht dem Median, sondern dem 3. Quantil.

### Teiluntersuchung II

Bei gehaltener Phonation mit leiser Stimmstärke (piano) betrug der Median der Emissionsraten aller untersuchten Kinder 47 P/s. Bei gehaltener Phonation mit lauter Stimmstärke (forte) lag der Median der Emissionsraten bei 353 P/s.

In der Referenzgruppe der Erwachsenen betrug der Median der Emissionsraten bei gehaltener Phonation in piano 306 P/s. Bei gehaltener Phonation in forte lag der Median der Emissionsraten bei 1366 P/s.

Die statistische Analyse zeigte signifikante Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen für die Testbedingungen piano ( $p=0.001$ ) und forte ( $p=0.001$ ). Auf Basis der Modellierung betrug der Unterschied der Partikelemissionen zwischen Kindern und Erwachsenen bei leiser Stimmstärke Faktor 4.2 und bei lauter Stimmstärke Faktor 4.0 (Abb. 2).

Die verschiedenen Testbedingungen unterschieden sich auf Basis der Modellierung aller bei Kindern und Erwachsenen gemessenen Aerosolemissionen mit Faktor 5.3 zwischen leiser und lauter Stimmstärke.

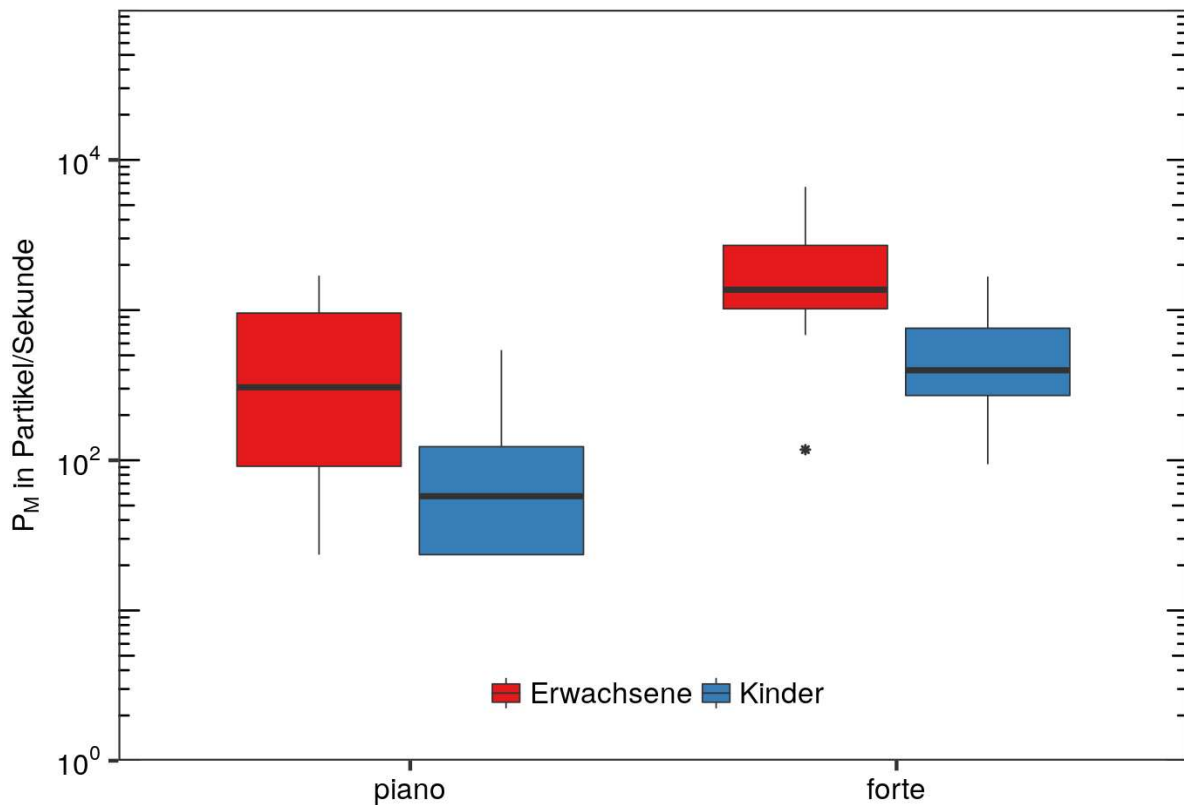


Abbildung 2. Vergleich der Emissionsraten  $P_M$  in Partikel pro Sekunde bei gehaltener Phonation mit leiser (piano) und lauter (forte) Stimmstärke. Die Boxplots repräsentieren die Werte aus den Medianen der jeweils fünf Messwiederholungen pro Testbedingung für die Gruppe der Kinder (blau,  $n=15$ ) und die Referenzgruppe der Erwachsenen (rot,  $n=15$ ).

Für die subjektiv mit leiser oder lauter Stimmstärke gesungenen Messungen mit gehaltener Phonation wurden in Abb. 3 sowohl die maximalen Schalldruckpegel  $L_{AFMAX}$  als auch das Verhältnis von Emissionsrate  $P_M$  und maximalem Schalldruck für die Gruppen der Kinder und der Erwachsenen dargestellt. Während Erwachsene im forte deutlich lauter phonierten als Kinder, zeigt sich im Verhältnis von Emissionsrate zu Schalldruck, dass die Quellstärke erheblich durch den Schalldruckpegel dominiert ist. Dies kann bei Erwachsenen auch im piano beobachtet werden. Bei Kindern dagegen zeigt sich im verringerten Verhältnis von Emissionsrate zu Schalldruck, dass auch andere Charakteristika der kindlichen Stimmproduktion die Emissionsrate beeinflussen.

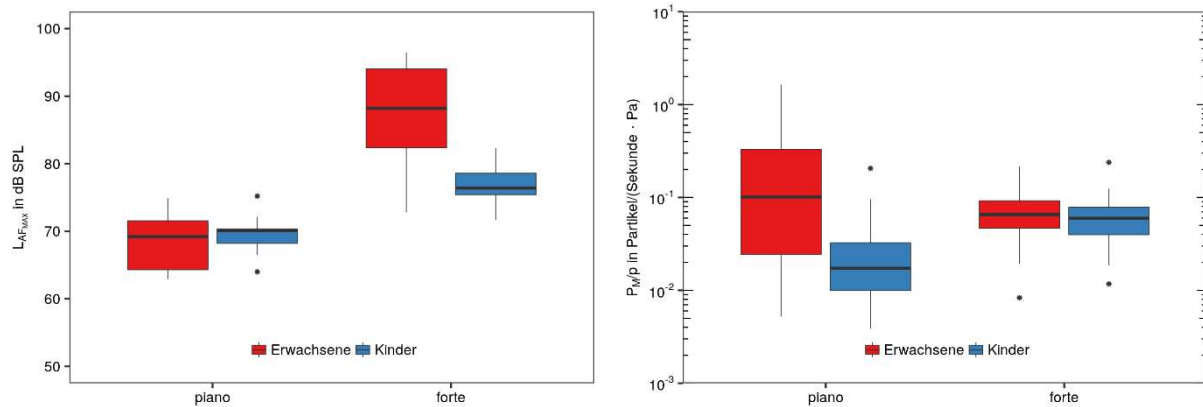


Abbildung 3. Links: Maximaler Schalldruckpegel  $L_{AFMAX}$  für Kinder und Erwachsene bei gehaltener Phonation für die Testbedingungen piano und forte. Rechts: Verhältnis von  $P_M$  und maximalem Schalldruck  $p$  ( $10^{L_{AFMAX}/20}$ ) für die gleichen Konstellationen. Die Boxplots repräsentieren in beiden Abbildungen die Werte aus den Medianen der jeweils fünf Messwiederholungen pro Testbedingung für die Gruppe der Kinder (blau, n=15) und die Referenzgruppe der Erwachsenen (rot, n=15).

### Bestimmung der Partikelgrößen

Die Bestimmung der Partikelgrößen im Bereich von 0,3-25,0  $\mu\text{m}$  ergab, dass bei den Erwachsenen mehr als 80% aller gemessenen Partikel kleiner als 1,0  $\mu\text{m}$ , und mehr als 99% kleiner als 3,0  $\mu\text{m}$  waren. Bei den Kindern waren mehr als 90% der Partikel kleiner als 3,0  $\mu\text{m}$  und mehr als 95% kleiner als 10,0  $\mu\text{m}$ .

### Diskussion

Analog zu vorangegangenen Untersuchungen der Partikelemissionen beim Sprechen und Singen bestätigte sich sowohl für die Gruppe der Kinder als auch für die Referenzgruppe der Erwachsenen eine große interindividuelle Variabilität der Partikelproduktion (Mürbe et al., 2020b; Gregson et al., 2021).

Bei Ruheatmung, beim Sprechen und beim Singen fanden sich für Kinder erheblich geringere Emissionsraten im Vergleich mit Erwachsenen. Kinder emittierten beim Sprechen eine Anzahl von Partikeln in der Größenordnung wie Erwachsene beim Atmen, und beim Singen emittierten sie ähnlich viele Partikel wie Erwachsene beim Sprechen. Die Messungen des leisen und lauten Singens mit gehaltener Phonation zeigten, dass Kinder im forte in etwa so viele Partikel emittierten wie Erwachsene im piano.

Ein wesentlicher Faktor für die Unterschiede der Emissionsraten beider Gruppen ist die Lautstärke (Asadi et al., 2019; Gregson et al., 2021). Für die Testbedingungen Sprechen und Singen wurden Kinder und Erwachsene gebeten, die Aufgabe in mittlerer Stimmstärke auszuführen, um realitätsnahe Referenzsituationen abzubilden. Die damit verbundenen geringeren Schallpegel in der Gruppe der Kinder begründen einen Teil der unterschiedlichen Emissionsraten. Weitere Ursachen sind in den anatomischen und physiologischen Unterschieden der Stimmproduktion von Kindern und Erwachsenen anzunehmen. Kinder haben kürzere Stimmlippen und zeigen geringere Kontaktzeiten der Stimmlippen im Schwingungszyklus im kindlichen Stimmregister (McAllister & Sundberg, 1998; Howard,

2010). Eine Altersabhängigkeit der Partikelemissionen konnte auch in einer vorangegangenen Studie mit Jugendlichen gezeigt werden, deren Emissionsraten zwischen den aktuell bestimmten Emissionsraten von Grundschulern und den Emissionsraten von Erwachsenen liegen (Mürbe et al., 2021a).

Der Vergleich der Partikelemissionen zwischen verschiedenen Testbedingungen, insbesondere zwischen Sprechen und Singen, bestätigt bislang für Erwachsene (Alsved et al., 2020; Gregson et al., 2021; Mürbe et al., 2021b) und für Jugendliche (Mürbe et al., 2021a) beschriebene höhere Emissionsraten für das Singen. Als Ursachen sind neben dem Einfluss von Stimmstärke und Schwingungscharakteristik die Größe der Pausensegmente und die unterschiedliche Kontinuität des Stimmsignals durch längere Vokalsegmente beim Singen anzugeben. Bei den im Vergleich zum Singen deutlich höheren Partikelemissionen der Kinder beim Rufen dominiert ursächlich der Faktor der Lautstärke.

Die in dieser Untersuchung eingesetzte Methode der Bestimmung von Partikelemissionen mittels Laserpartikelmessungen im Reinraum erlaubt keine Aussagen zu Größe und Konzentration der emittierten Partikel am Mund. Sie erfasst mit hoher Genauigkeit (hohe Zähleffizienz nach ISO 21501-4 für Partikel der Größe 0,5 µm) die Anzahl der Partikel im Gleichgewichtszustand nach Verdunstung, wobei die in der vorliegenden Untersuchung gefundenen Partikelgrößen andere Untersuchungen bestätigen (Chao et al., 2009).

Die im Vergleich zu Erwachsenen geringeren Emissionsraten von Aerosolpartikeln bei Kindern sind mit Bezug zur Prävalenz einer SARS-CoV-2-Infektion zu diskutieren, wobei die PCR-basierende Prävalenz bei Kindern in den meisten Studien niedriger als bei Erwachsenen liegt

([https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges\\_Coronavirus/Steckbrief.html](https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html) (abgerufen am 10.05.2021)). Bezüglich der Infektiosität von Kindern deuten aktuelle Daten darauf hin, dass jüngere Kinder eine niedrigere Viruslast als Erwachsene (Euser et al., 2021) bzw. gleichwertige (Jacot et al., 2020) wie Erwachsene haben.

Die für exemplarische Testbedingungen der Grundschüler gemessenen Aerosolpartikelemissionen sollten für eine weitere Spezifizierung der Gefährdungsbeurteilungen und der Hygienekonzepte im schulischen und außerschulischen Bereich genutzt werden. So kann auf Basis von Infektionsrisikomodellen (Buonanno et al., 2020; Lelieveld et al., 2020, Kriegel et al. 2020) anhand von alters- und situationsspezifischen Emissionsraten, Raum- und Lüftungsparametern sowie virologischen Kenndaten detaillierter das Infektionsrisiko für verschiedene Konstellationen in diesen Bereichen abgeschätzt werden. Dies kann zu einer weiteren Differenzierung der Abwägung von Gesundheitsschutz und gesellschaftlicher Teilhabe von Kindern und Jugendlichen, zum Beispiel im Rahmen des Präsenzunterrichts in geschlossenen Räumen, beitragen. Für die mit gemeinsamem Singen verbundenen Bildungsaufgaben ergibt sich aufgrund der durch die Pubertät begrenzten Zeitfenster eine besondere Dringlichkeit, um auch unter Pandemiebedingungen bestmöglich die Entwicklung sozialer, sprachlicher und emotionaler Kompetenzen zu unterstützen.

## **Danksagung**

Die Autoren danken den Mädchen und Jungen des Staats- und Domchores Berlin und des Mädchenchores der Singakademie zu Berlin und ihren Betreuerinnen sowie den Sängerinnen und Sängern des Philharmonischen Chores Berlin für ihr Interesse und ihre Bereitschaft, an dieser Studie mitzuwirken. Die Autoren danken zudem Julia Lange, Peiyu



Qin und Fei Yu (Hermann-Rietschel-Institut, TU Berlin) für die Unterstützung bei der Durchführung der Partikelmessungen.

## Literatur

Morawska, L.; Johnson, G.; Ristovski, Z.; Hargreaves, M.; Mengersen, K.; Corbett, S.; Chao, C.; Li, Y. & Katoshevski, D. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities *Journal of Aerosol Science*, **2009**, *40*, 256-269

Asadi, S.; Wexler, A. S.; Cappa, C. D.; Barreda, S.; Bouvier, N. M. & Ristenpart, W. D. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness *Scientific Reports*, **2019**, *9*, 2348

Alsved, M.; Matamis, A.; Bohlin, R.; Richter, M.; Bengtsson, P.-E.; Fraenkel, C.-J.; Medstrand, P. & Löndahl, J. Exhaled respiratory particles during singing and talking *Aerosol Science and Technology*, *Taylor & Francis*, **2020**, *54*, 1245-1248

Gregson, F. K.; Watson, N. A.; Orton, C. M.; Haddrell, A. E.; McCarthy, L. P.; Finnie, T. J.; Gent, N.; Donaldson, G. C.; Shah, P. L.; Calder, J. D. & others Comparing Aerosol Concentrations and Particle Size Distributions Generated by Singing, Speaking and Breathing *Aerosol Science and Technology*, *Taylor & Francis*, **2021**, 1-14

Mürbe, D.; Kriegel, M.; Lange, J.; Schumann, L.; Hartmann, A. & Fleischer, M. Aerosol emission of adolescents voices during speaking, singing and shouting *PLoS ONE, Public Library of Science*, **2021a**, *16*, 1-10

Johnson, G. R. & Morawska, L. The mechanism of breath aerosol formation *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*, **2009**, *22*, 229-237

Hamner, L.; Dubbel, P.; Capron, I.; Ross, A.; Jordan, A.; Lee, J.; Lynn, J.; Ball, A.; Narwal, S.; Russell, S.; Patrick, D. & Leibrand, H. High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice -- Skagit County, Washington, March 2020. *MMWR; Morbidity and Mortality Weekly Report*, **2020**, *69*, 606–610

Miller, S. L.; Nazaroff, W. W.; Jimenez, J. L.; Boerstra, A.; Buonanno, G.; Dancer, S. J.; Kurnitski, J.; Marr, L. C.; Morawska, L. & Noakes, C. Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event *Indoor Air*, **2021**, *31*, 314-323

Katellaris, A. L.; Wells, J.; Clark, P.; Norton, S.; Rockett, R.; Arnott, A.; Sintchenko, V.; Corbett, S. & Bag, S. K. Epidemiologic Evidence for Airborne Transmission of SARS-CoV-2 during Church Singing, Australia, 2020. *Emerging Infectious Diseases*, **2021**, *27*

Kriegel, M.; Buchholz, U.; Gastmeier, P.; Bischoff, P.; Abdelgawad, I.; Hartmann, A. Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2, medRxiv 2020, DOI: <https://doi.org/10.1101/2020.10.08.20209106>

McAllister, A. & Sundberg, J. Data on subglottal pressure and SPL at varied vocal loudness and pitch in 8-to 11-year-old children *Journal of Voice*, **1998**, *12*, 166-174

Howard, D. M. Electrolaryngographically revealed aspects of the voice source in singing *Logopedics Phoniatrics Vocology*, **2010**, *35*, 81-89

Mürbe, D.; Kriegel, M.; Lange, J.; Rotheudt, H. & Fleischer, M. Aerosol emission in professional singing of classical music **2021b**, submitted

Chao, C.; Wan, M.; Morawska, L.; Johnson, G.; Ristovski, Z.; Hargreaves, M.; Mengersen, K.; Corbett, S.; Li, Y.; Xie, X. & Katoshevski, D. Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening *Journal of Aerosol Science*, **2009**, *40*, 122 - 133

Euser, S.; Aronson, S.; Manders, I.; van Lelyveld, S.; Herpers, B.; Jansen, R.; Stekhoven, S. S.; van Houten, M.; Lede, I.; Stuart, J. C.; Megelink, F. S.; Kapteijns, E.; Boer, J. d.; Sanders, E.; Wagemakers, A. & Souverein, D. SARS-CoV-2 viral load distribution in different patient populations and age groups reveals that viral loads increase with age *medRxiv*, **2021**

Jacot, D.; Greub, G.; Jaton, K. & Opota, O. Viral load of SARS-CoV-2 across patients and compared to other respiratory viruses *Microbes and infection*, **2020**, *22*, 617-621

Lelieveld, J.; Helleis, F.; Borrmann, S.; Cheng, Y.; Drewnick, F.; Haug, G.; Klimach, T.; Sciare, J.; Su, H. & Pöschl, U. Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **2020**, *17*, 8114

Buonanno, G.; Stabile, L. & Morawska, L. Estimation of airborne viral emission: quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment *Environment International*, **2020**, *141*, 105794

## **Kontakt**

Prof. Dr. med. Dirk Mürbe  
Charité – Universitätsmedizin Berlin  
Klinik für Audiologie und Phoniatrie  
Tel.: 030/450555402  
E-Mail: dirk.muerbe@charite.de

Prof. Dr.- Ing. Martin Kriegel  
TU Berlin  
Hermann-Rietschel-Institut  
Tel.: 030/314 24170  
E-Mail: kontakt@hri.tu-berlin.de

## Anhang

Tabelle 1. Emissionsraten  $P_M$  in Partikel/Sekunde. Median der fünf Messwiederholungen für jeden Probanden (Kinder K1-K15, Erwachsene E1-E15) für die verschiedenen Testbedingungen der Teiluntersuchungen I und II: Ruheatmung, Sprechen, Singen, Rufen, gehaltene Phonation (piano) und gehaltene Phonation (forte).

	Ruheatmung	Sprechen	Singen	Rufen	piano	forte
K1	8	24	118	659	0	447
K2	0	16	55	1413	212	824
K3	0	0	761	447	541	1672
K4	0	31	126	1177	47	447
K5	8	78	118	2896	71	306
K6	0	16	204	2142	24	942
K7	0	8	110	353	71	330
K8	0	8	275	730	118	118
K9	8	24	0	141	0	0
K10	16	24	102	1083	24	1036
K11	0	86	110	447	24	212
K12	0	24	71	1577	0	259
K13	0	86	267	1601	24	353
K14	0	31	102	2119	47	94
K15	8	16	196	683	141	589
E1	0	63	848	1201	636	1248
E1	8	204	3940	2401	636	3155
E1	173	683	3539	3155	1436	942
E4	16	212	1475	2213	518	1366
E5	24	71	1938	494	1577	2307
E6	24	86	1570	1295	306	4850
E7	0	141	1020	942	47	800
E8	628	879	1640	5085	71	3955
E9	16	283	1868	1624	118	1672
E10	0	39	1248	259	24	1107
E11	86	408	6200	3885	1695	683
E12	16	126	942	753	118	1389
E13	16	94	1703	1130	188	1248
E14	24	251	3571	1931	1436	6616
E15	8	659	471	1201	24	118
<b>Median(K)</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>118</b>	<b>1083</b>	<b>47</b>	<b>353</b>
<b>Median(E)</b>	<b>16</b>	<b>204</b>	<b>1640</b>	<b>1295</b>	<b>306</b>	<b>1366</b>