Der Einfluss von Aerosolfiltern auf den Klang von Blechblasinstrumenten

Saleh Siddiq[1,2], Christoph Reuter[1] , Isabella Czedik-Eysenberg[1] , Matthias Eder[1]
[1] *Institut für Musikwissenschaft, Universität Wien*
[2] *E-Mail: saleh.siddiq@univie.ac.at*

Abstract

COVID-19 wird hauptsächlich über Tröpfchen oder Aerosole verbreitet. Blasinstrumente „blasen“ zwar keine Tröpfchen aus, allerdings emittieren sie Aerosole. Als Gegenmaßnahme wurden Aerosolfilter aus Zellulose bzw. Molton vorgeschlagen. In dieser Studie wurde untersucht, ob die vorgeschlagenen Filter Klang und Abstrahlverhalten der Musikinstrumente beeinflussen. Dazu wurden die Klänge von fünf Blasinstrumenten (Flöte, Horn, Posaune, Trompete, Tuba) jeweils mit und ohne Filter aus Molton (ein- und zweilagig) aufgenommen und im Hörversuch bewertet. Das Abstrahlverhalten wurde mittels akustischer Kamera aufgezeichnet. Während einlagige Filter kaum Einfluss auf den Klang hatten, ist der Unterschied bei zweilagigen Filtern signifikant. Insgesamt war der Einfluss auf die Intonation deutlich größer als auf den Klang an sich. Unterschiede in der Schallabstrahlung wurden nicht festgestellt.

Hintergrund

COVID-19 wird hauptsächlich über Tröpfchen oder Aerosole verbreitet [1][2]. Die wichtigsten Maßnahmen zum Unterbrechen von Infektionsketten sind das Einhalten von Mindestabständen (Tröpfchen) sowie das Tragen von Mund-Nase-Bedeckungen der Klasse FFP-2 (Aerosole). Während der aktuellen Pandemie durchgeführte Studien zeigen, dass Singen mehr Aerosolpartikel und Tröpfchen produziert als Sprechen [3][4]. Auch Blasinstrumenten wurde in mehreren Studien, besonders zu Beginn der Pandemie, erhöhte Aerosolproduktion attestiert [5][6].

Klangproduktion bei Blechbläsern

Das Mundstück wird an die Lippen gesetzt und durch diese luftdicht abgeschlossen. Der beim Ausatmen („Blasen“) entstehende Luftstrom erzeugt einen Staudruck im Mund, welcher die Lippen einen Spalt öffnet und dadurch ins Instrument einströmt. In der Strömung zwischen den Lippen entsteht aufgrund des Bernoullieffekts ein Unterdruck. Unterstützt durch die Eigenspannung der Lippen schließt der Unterdruck den Spalt wieder. Staudruck und Unterdruck sorgen im Wechselspiel für periodische Lippenschwingungen, die als Schallquelle dienen. Blechblasinstrumente werden allein durch diese Lippenschwingung zum Klingen gebracht, während der expiratorische Luftstrom durch das Instrument aus klanglicher Sicht irrelevant ist [7].

Tröpfchen- und Partikelemission von Blasinstrumenten

Tatsächlich fungieren (Blech-)Blasinstrumente durch ihre Impedanz sogar als Bremse für den expiratorischen Luftstrom. Insgesamt emittieren Blasinstrumente so gut wie keine Tröpfchen und deutlich weniger Aerosole als z.B. beim Sprechen oder Singen abgegeben werden [8]. Bei der Risikobewertung müssen allerdings zwei wichtige Unterscheidungen getroffen werden:

1. Holzbläser weisen insgesamt stärkere Luftbewegungen auf als Blechbläser. Eine gewisse Sonderstellung nimmt die Querflöte ein, da der Luftstrom über das Instrument hinweg ungehindert in die Umgebung abgegeben wird [9][5][6].

2. Stärke und Weite der Luftbewegung sind nicht gleichzusetzen mit der Anzahl emittierter Aerosolpartikel. So gibt die Trompete z.B. die meisten Partikel ab [10], obwohl die Luftbewegungen bei Holzbläsern größere Reichweiten hat. Ebenso wenig sind Luftbewegungsbereich und Aerosolbereich gleichzusetzen. Letzter ist offenbar auf einen Bereich von 30 cm begrenzt. Außerhalb dominiert die durch die Körperabwärme der Musiker*innen entstehende Konvektionsströmung und verdünnt die Partikelkonzentration rasch auf das allgemeine Hintergrundniveau des Mediums [10].

Als Maßnahme gegen Aerosole aus Blasinstrumenten wurden Filter aus handelsüblicher Zellulose [11] bzw. Textil [10] vorgeschlagen. Diese Filter wurden bisher hinsichtlich ihrer Filterwirkung untersucht, potentielle Einflüsse auf den Klang der Instrumente fanden dabei allerdings kaum Beachtung.

Fragestellung

Um das Gesamtbild um die musikalische Perspektive zu erweitern, wurde in der hier vorgestellten Studie der Einfluss von Aerosolfiltern auf den Klang von Blasinstrumenten untersucht. Es stellen sich im Kern folgende Fragen: Haben Aerosolfilter einen nennenswerten Einfluss auf die Klangfarbe von Blechblasinstrumenten? Und: Beeinflussen Aerosolfilter das Abstrahlverhalten von Blechblasinstrumenten?

Methode

Instrumente

Diese Studie beschränkt sich aus praktischen Gründen auf Blechblasinstrumente, da sich die Schallabstrahlung auf den Schalltrichter begrenzt, während Holzbläser mit teilweise offenen Mundstücken bzw. offenen Tonlöchern zusätzliche Abstrahlbereiche aufweisen [12].

Als einziges Holzblasinstrument wurde die Flöte mit in die Untersuchung aufgenommen. Akustisch kann die Flöte als Dipol, mit beiden Rohrenden als Hauptabstrahlpunkte betrachtet werden [12]. Allerdings wird die Luft quer über das Mundloch geblasen, so dass Partikel entweder gar nicht erst ins Instrument gelangen oder sich größtenteils im Bereich des Mundlochs absetzen [10]. Folglich können die Filterbemühungen bei der Flöte auf den Luftstrom konzentriert werden.

Insgesamt wurden die vier orchestertypischen Blechblasinstrumente Trompete, Tenorposaune, Waldhorn, Tuba sowie die Querflöte untersucht.

Filter

Die Filter wurden nach den von Becher et al. [10] zur Verfügung gestellten Durchmessern aus Molton genäht und zur rückstandsfreien Anbringung mit einem elastischen Saum versehen.

Hinsichtlich der Filterwirkung erweisen sich die Moltonfilter als realistische Alternative im Vergleich zu Filtern aus Zellstoff. Am Max-Planck-Institut für Chemie durchgeführte Messungen zeigen für dem Durchmesser des Sars-CoV-2 Virus entsprechende Partikelgrößen von 100 nm bei verschiedenen Flussraten (25 l/min bzw. 10 l/min) eine Abscheideeffizienz von rund 33 bzw. 27 % (Molton, zweilagig), rund 20 bzw. 15 % (Molton, einlagig), rund 30 bzw. 25 % (zweilagige Küchenrolle mit Papiertaschentuch dazwischen). Interessanterweise zeigen die meisten getesteten Materialien ausgerechnet bei Partikeldurchmessern um 100 nm die schwächste Filterwirkung. Tröpfchen und große Partikel werden durch alle Materialien sehr gut gefiltert und auch bei kleineren Partikeln (Ø 30 nm) steigt die Effizienz wieder an (rund 63 bzw. 52 %, zweilagiger Molton; rund 60 bzw. 47 %, zweilagige Küchenrolle) [13].

Zweilagige Filter wurden realisiert, indem ein zweiter Filter über den ersten gezogen wurde. Die entsprechenden Testbedingungen (einlagig, zweilagig) werden folglich als „ein Filter“ oder „zwei Filter“ bezeichnet.

Stimuli

Jedes der fünf Instrumente wurde in drei „Registern“ (tief, mittel, hoch) seines natürlichen Tonumfangs getestet. Die Stimuli wurden im Bühnenraum des MediaLab der philologisch-kulturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Wien aufgenommen. Als Stimulus wurde in jedem Register eine einfache diatonische Dur-Tonleiter Tonika–Quinte–Tonika auf und ab gespielt. Tabelle 1 zeigt die Tonbereiche der einzelnen Register:

Tabelle 1: Register- bzw. Tonhöhenbereiche der Stimuli

Instrument	,	groß	klein	’	”	”’
Flöte				C4–G4	C5–G5	C6–G6
Trompete			F3–C4	F4–C5	B5–F5	
Horn		F2–C3	F3–C4	F4–C5		
Posaune		E2–H2	E3–H3	E4–H4		
Tuba	F1–C2	F2–C3	F3–C4			

Jeder Stimulus wurde sowohl in zwei Dynamikstufen (*pp*, *ff*), als auch in drei Bedingungen (ohne Filter, ein Filter, zwei Filter) gespielt. Als einzige Ausnahme wurde die Querflöte lediglich mit null und einem Filter getestet. Daraus ergeben sich 18 Stimuli pro Instrument (bzw. 12 bei der Querflöte) und 84 Stimuli insgesamt.

Hörversuch

Versuchspersonen sollten die Stimuli hinsichtlich ihres Klangs (drei Skalen: *warm–brillant*, *voll–dünn*, *weich–hart*), der Intonation (*unsauber–sauber*), des Ansatzes (zwei Skalen: *langsam–schnell*, *unsauber–sauber*) sowie des Gesamteindrucks (Gefallen: *schlecht–gut*) jeweils auf 6-stufigen Skalen bewerten.

der Versuch wurde online über SoSci Survey durchgeführt. Um die Bedingungen möglichst konstant zu halten, wurde das Abhörgerät (Kopfhörer, Boxen, integrierte Lautsprecher, Ohrhörer) abgefragt und ggf. der Wechsel auf Kopfhörer bzw. Boxen empfohlen. Die Lautstärke sollte zu Beginn einmalig anhand eines repräsentativen Klangs so eingestellt werden, dass sie „laut, aber nicht unangenehm“ war. Nach schriftlichen Instruktionen folgten vier Übungsdurchgänge mit zufällig ausgewählten Stimuli, bevor der eigentliche Versuch begann. Die Stimuli wurden in randomisierter Reihenfolge präsentiert, auch die Reihung der drei Klang-Skalen wurde für jeden Stimulus randomisiert, um Positionseffekte zu vermeiden. Klänge konnten bei Bedarf beliebig oft wiederholt werden, Pausen waren jederzeit möglich, die durchschnittliche Versuchsdauer lag bei etwa 30 Minuten.

Stichprobe

Aus allen Teilnahmen ergaben sich 47 gültige Datensätze (w = 14, m = 27, k.A. = 6). Die Teilnehmer*innen waren zwischen 20 und 80 Jahren alt (Ø = 48,41, SD = 16,17). Die musikalische Erfahrung lag zwischen 3 und 53 Jahren (Ø = 26,54, SD = 13,87), wobei 31 Personen aktuell, fünf ehemals und elf niemals musikalisch aktiv waren.

Auswertung

Die subjektiven Bewertungen der einzelnen Bedingungen (0–1 Filter, 0–2 Filter) wurden mittels Paardifferenzentest verglichen. Zusätzlich wurden spektrale Low-Level Features für die Stimuli berechnet, um auch den Einfluss der Filter auf die akustischen Eigenschaften der Stimuli beurteilen zu können. die Features der Klänge über die obengenannten Bedingungen wurden ebenfalls mittels Paardifferenzentest verglichen. Um den potentiellen Einfluss der Filter auf die Abstrahlung zu untersuchen, wurde während der Aufnahmen zusätzlich eine akustische Kamera (gfai Mikado 69 40) eingesetzt.

Ergebnisse

Weder die musikalische Erfahrung, noch die Abhörsituation hatten Einfluss auf die Bewertungen, daher wird diesbezüglich in weiterer Folge nicht unterschieden.

Es lässt sich festhalten, dass die Filter keinen signifikanten Einfluss auf die Gesamtbewertung der Klänge hatten. Auch auf die Ansprache hatten die Filter scheinbar keinen nennenswerten Einfluss. Zwar ist bei der Verteilung der Bewertungen erkennbar, dass die zweilagigen Filter weniger gut bewertet wurden (siehe Abb. 1), allerdings ist der Unterschied statistisch insignifikant: 0–1 Filter: $t(501) = -1{,}76$, $p = 0{,}08$, $\Delta\mu = -0{,}1$; 0–2 Filter: $t(401) = 1{,}39$, $p = 0{,}17$, $\Delta\mu = 0{,}1$. Wie in Abbildung 2 zu erkennen, besteht keinerlei Zusammenhang zwischen Filtern und Einschwingzeiten („Attack Time“). Auch dieser t-Test fällt insignifikant aus: 0–1 Filter: $t(19) = -0{,}17$, $p = 0{,}87$, $\Delta\mu = -0{,}004$; 0–2 Filter: $t(15) = -0{,}84$, $p = 0{,}41$, $\Delta\mu = -0{,}028$.

Auf den Klang scheinen die Filter einen gewissen Einfluss zu haben. Die Bewertungsverteilung entlang der Achse *voll–*

dünn ist hinsichtlich der Filterbedingungen insignifikant. Die Achsen *warm–brillant* und *weich–hart* zeigen jeweils sehr ähnliche Verteilungen zwischen null und einem Filter, während zu zwei Filtern Unterschiede erkennbar sind (für *warm–brillant* siehe Abb. 3), die auch statistisch signifikant sind. Warm–brillant, 0–1 Filter: $t(501) = -0{,}84$, $p = 0{,}4$, $\Delta\mu = -0{,}048$; 0–2 Filter: $t(401) = 2{,}13$, $p = 0{,}03$, $\Delta\mu = 0{,}13$. Weich–hart, 0–1 Filter: $t(501) = -0{,}28$, $p = 0{,}78$, $\Delta\mu = -0{,}02$; 0–2 Filter: $t(401) = 3{,}2$, $p = 0{,}002$, $\Delta\mu = 0{,}22$. Die spektralen Features zeigen übereinstimmend sehr hohe Korrelationen zwischen allen Bedingungen (siehe Spectral Centroid Abb. 4), was das geringe Ausmaß der Unterschiede verdeutlicht. Entsprechend fallen die Unterschiede meist insignifikant aus. Lediglich beim Spectral Centroid liefern zwei Filter ein signifikantes Ergebnis: 0–1 Filter: $t(19) = 1{,}88$, $p = 0{,}08$, $\Delta\mu = 58{,}61$; 0–2 Filter: $t(15) = 2{,}73$, $p = 0{,}02$, $\Delta\mu = 123{,}58$.

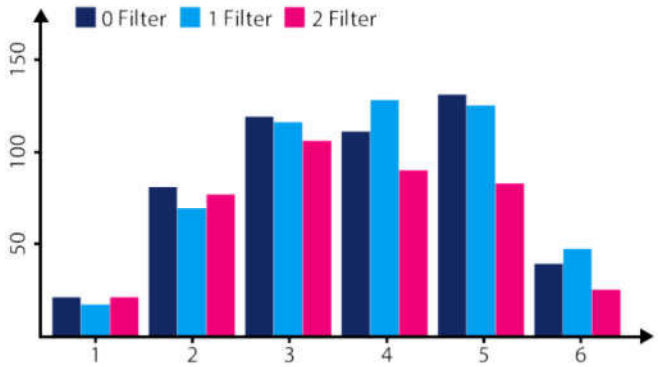

Abbildung 1: Verteilung der Bewertungen des Ansatzes entlang der Achse *langsam–schnell* (1 = langsam, 6 = schnell).

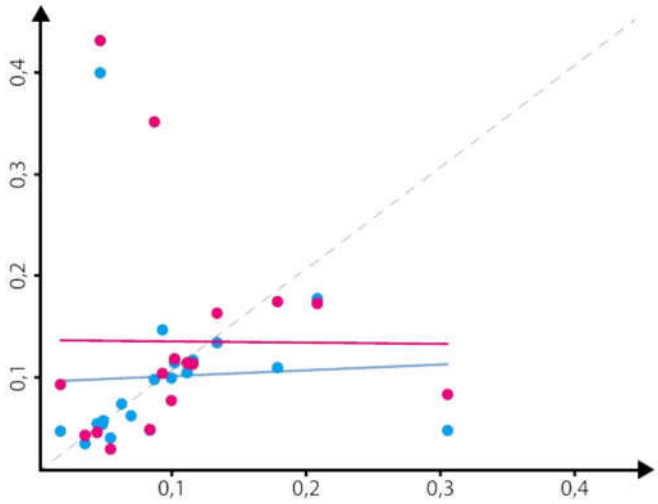

Abbildung 2: Werte für „Attack time". X-Achse = 0 Filter, Y-Achse = 1 Filter (Cyan), 2 Filter (Magenta). Diagonale = linearer Zusammenhang. Keine systematischen Zusammenhänge zwischen Attack Time und den Filterbedingungen. 0–1 Filter: r (Pearson) = 0,05; p = 0,84; 0–2 Filter: r = −0,008; p = 0,98.

Interessanterweise war der Einfluss der Filter auf die Intonation am deutlichsten. Bei der Bewertungsverteilung fällt zum einen auf, dass die Intonation insgesamt überwiegend gut bewertet wurde (Skalenbereich 5–6). Zum anderen wird gerade bei diesen beiden Werten ein Abfall von null zu einem zu zwei Filtern erkennbar (siehe Abb. 5). Dieser Abfall schlägt sich auch in signifikanten t-Werten für beide Vergleiche nieder: 0–1 Filter: $t(501) = 2{,}27$, $p = 0{,}023$, $\Delta\mu = 0{,}15$; 0–2 Filter: $t(401) = 2{,}81$, $p = 0{,}005$, $\Delta\mu = 0{,}22$.

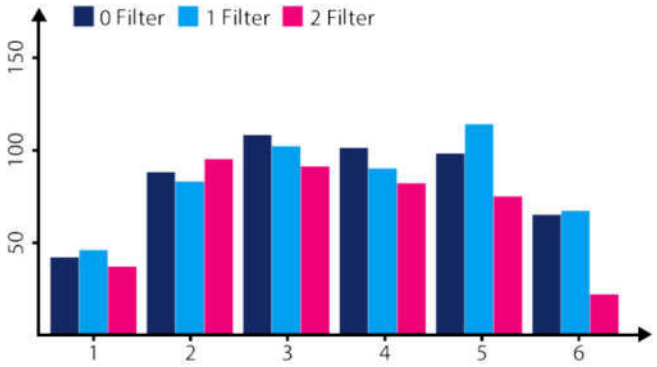

Abbildung 3: Verteilung der Bewertungen des Klangs entlang der Skala *warm–brillant* (warm = 1, brillant = 6).

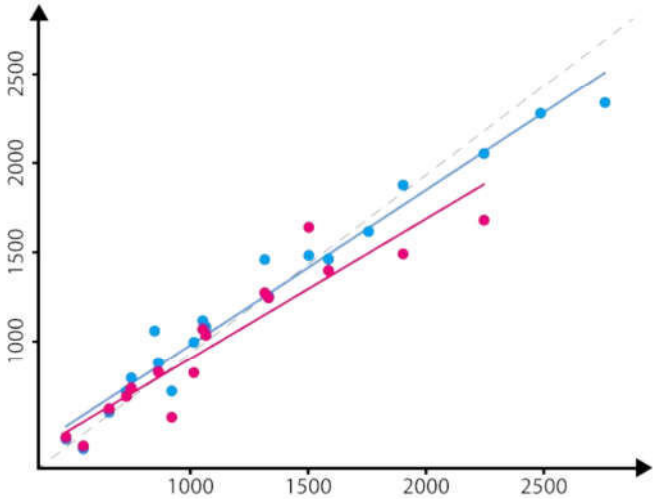

Abbildung 4: Werte für Spectral Centroid. X-Achse = 0 Filter, Y-Achse = 1 Filter (Cyan), 2 Filter (Magenta). Diagonale = linearer Zusammenhang. Die Konzentration der Werte um die Diagonale verdeutlicht den starken Zusammenhang. 0–1 Filter: r (Pearson) = 0,98, $p < 0{,}001$, 0–2 Filter: r = 0,94, $p < 0{,}001$.

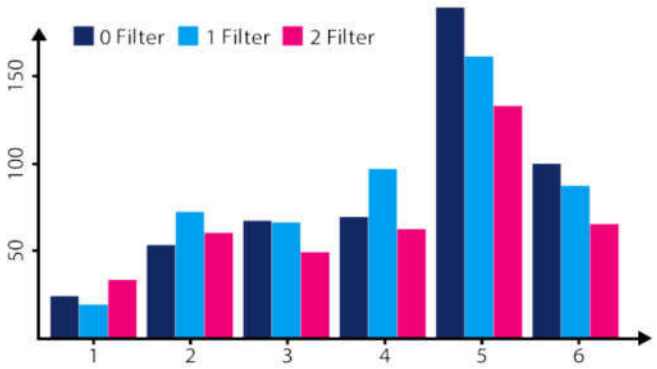

Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Bewertungen der Intonation (1 = unsauber, 6 = sauber).

Der Einfluss auf die Abstrahlung ist praktisch vernachlässigbar. Abgesehen von minimalen Lautheitsverlusten sind keine Unterschiede zwischen den Filterbedingungen zu erkennen (siehe Abb. 6).

Abbildung 6: Abstrahlung der Trompete, aufgezeichnet mittels akustischer Kamera. Links = ohne Filter, rechts = mit Filter. Erkennbar ist das gleiche Abstrahlmuster, bei allerdings offensichtlich unterschiedlichen Amplituden.

Diskussion und Ausblick

Die hier getesteten Moltonfilter beeinflussen den Klang der Blechblasinstrumente offenbar nur in der zweilagigen Konfiguration in nennenswertem Ausmaß. Obwohl eine minimale Dämpfung auch einlagiger Filter hörbar ist und auch aus den subjektiven Bewertungen der Versuchsteilnehmer*innen erschlossen werden kann, ist der Einfluss nur für zwei Filter signifikant. Auf die Ansprache bzw. das Einschwingverhalten haben die Filter offenbar keinen entscheidenden Einfluss. Am stärksten war der Einfluss sowohl ein- als auch zweilagiger Filter auf die Intonation.

Eine Mögliche Erklärung könnte die filterbedingt veränderte Impedanz sein. Während die klangliche Dämpfung für die Musiker*innen lediglich ein passiver Nebeneffekt ist, hat die Impedanz unmittelbare Auswirkung auf das Verhalten des Instruments und muss ausgeglichen werden. Die Musiker*innen hatten vor den Aufnahmen nur eine kurze Warmspielphase, um sich mit den Filtern vertraut zu machen. Sehr wahrscheinlich nimmt der Einfluss mit zunehmender Gewohnheit in gewissem Maß ab, so dass für zukünftige Versuche eine längere Eingewöhnungszeit sinnvoll sein könnte.

Ein weiterer Aspekt, der in zukünftigen Untersuchungen berücksichtigt werden sollte, ist er durch die Filter erhöhte Kraftaufwand, der sich über die Dauer einer gesamten Aufführung negativ auf die Ausdauer, z.B. hinsichtlich der Erreichbarkeit extremer Tonbereiche, auswirken könnte. Allerdings ist auch hier der Einfluss längerer Eingewöhnungszeiten unklar. Dies könnte durch eine Längsschnittstudie genauer untersucht werden. Alternativ könnten die Filter den Musiker*innen im Vorfeld der Aufnahmen längerfristig zur Verfügung gestellt werden, um eine profunde Eingewöhnung und Anpassung zu ermöglichen. Für diesen Fall wäre zu erwarten, dass v.a. der Einfluss auf die Intonation zumindest kurzfristig geringer ausfallen würde.

Literatur

[1] Meselson, M. *Droplets and Aerosols in the Transmission of SARS-CoV-2*. In: *The New England Journal of Medicine* 382/21 (2020), 2063. doi: 10.1056/NEJMc2009324

[2] Wiersinga, J. et al. *Pathophysiology, Transmission, Diagnosis, and Treatment of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19): A Review*. In: *JAMA* 324/8 (2020), 782–93. doi: 10.1001/jama.2020.12839

[3] Alsved, M. et al. *Exhaled respiratory particles during singing and talking*. In: *Aerosol Science and Technology*, 54/11 (2020), 1245–1248. doi: 10.1080/02786826.2020.1812502

[4] Echternach, M. et al. *Impulse Dispersion of Aerosols during Singing and Speaking: A Potential COVID-19 Transmission Pathway*. In: *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 202/11 (2020), 1584–1587. doi: 10.1164/rccm.202009-3438LE

[5] Kähler, C. & Hain, R.. *Musizieren während der Pandemie – was rät die Wissenschaft? Über Infektionsrisiken beim Chorsingen und Musizieren mit Blasinstrumenten*. Forschungsbericht, Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München, 2020.

[6] Gantner, S. et al. *Impulse dispersion of aerosols during playing wind instruments*. In: *PLOS ONE* 17/3 (2022), e0262994. doi: 10.1371/journal.pone.0262994

[7] Campbell, M., Gilbert, J., & Myers, A. *The science of brass instruments*. Springer, Cham, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-55686-0

[8] McCarthy, L. et al. *Aerosol and droplet generation from performing with woodwind and brass instruments*. In: *Aerosol Science and Technology* 55/11 (2021), 1277–1287. doi: 10.1080/02786826.2021.1947470

[9] Becher, L. et al. *Risikoeinschätzung zur Ausbreitung der Atemluft beim Spielen von Blasinstrumenten und beim Singen während der COVID-19 Pandemie*. Forschungsbericht der Professur für Bauphysik, Universität Weimar, 2020.

[10] Abraham, A. et al. *Risk assessment and mitigation of airborne disease transmission in orchestral wind instrument performance*. In: *Journal of Aerosol Science* 157 (2021), 105797. doi: 10.1016/j.jaerosci.2021.105797

[11] Becher, L. et al.. *Einsatz von Filtern zur Reduktion der Ausbreitung der Atemluft beim Spielen von Blasinstrumenten und beim Singen während der COVID-19 Pandemie*. Forschungsbericht der Professur für Bauphysik, Universität Weimar, 2020.

[12] Meyer, J. *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*. Bochinsky, Bergkirchen, 2015.

[13] Drewnick, F. et al. *Abscheideeffizienz von Mund-Nasen-Schutz Masken, selbstgenähten Gesichtsmasken und potentiellen Maskenmaterialien*. Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, 2020.