Analyse der Geräusche von Publikum in Musikaufführungen

Matthias Görlach, Stefan Weinzierl
TU Berlin, Fachgebiet Audiokommunikation, Email: stefan.weinzierl@tu-berlin.de

Einleitung

Die Charakterisierung von Geräuschen, wie sie durch ein großes Publikum während der Darbietung von Musik und Sprache produziert werden, ist aus mehreren Gründen von Interesse. Zum einen begrenzen diese Geräusche die dynamische Bandbreite der Aufführung nach unten. Zum anderen wirken die Geräusche des Publikums selbst als Maskierer für technische Hintergrundgeräusche, etwa durch die Licht- und Klimatechnik, und sollten daher bei den hierfür angesetzten Grenzwerten berücksichtigt werden. Und schließlich sind Publikumsgeräusche auch für die Synthese von virtuellen akustischen Umgebungen von Bedeutung, da sie auf der Seite der Hörer ein wesentliches Element für den Eindruck von räumlicher und sozialer Präsenz im virtuellen Raum bilden. Um die Intensität und die spektrale Verteilung von Publikumsgeräuschen zu charakterisieren, wurden daher im Hallraum und im reflexionsarmen Raum der TU Berlin eine Schallleistungsbestimmung nach dem Hallraumverfahren und eine Tonaufzeichnung im Nahfeld der Quellen als Vorlage für einen Synthesealgorithmus durchgeführt. Die Messungen wurden mit einer Gruppe von fünf Personen auf Konzertsaal- und Theaterstühlen und drei verschiedenen Instruktionen im Hinblick auf das Verhalten des Publikums durchgeführt.

Stand der Forschung

Das vom Publikum erzeugte Geräusch enthält mehrere Komponenten: Bei einem äußerst aufmerksamen Publikum, das der Aufführung bewegungslos auf seinem Sitz folgt, kann man annehmen, dass nur Atemgeräusche auftreten. Hierfür hat Kleiner einen frequenzabhängigen Schallleistungspegel mit einem Maximum von 30 bis 37 dB zwischen 250 und 500 Hz gemessen, und eine Kurve, die oberhalb dessen um etwa 2–3 dB/Oktave abfällt (vgl. Abb. 3, türkise Linie) [1]. Das auf diese Werte führende Messverfahren wurde jedoch kaum dokumentiert, die Ergebnisse sind auf einen Frequenzbereich von 125–4000 Hz eingeschränkt, zudem erhielt Kleiner nur für männliche Probanden gültige Ergebnisse, und von diesen nur für zwei Personen Werte für den gesamten Frequenzbereich.

In einer realen Vortrags- oder Konzertsituation werden zum Publikumsgeäusch nur in wenigen Momenten mit maximaler Aufmerksamkeit ausschließlich die Atemgeräusche beitragen. Im Regelfall wird sich ein Teil des Publikums im Stuhl bewegen, ein Taschentuch oder einen Bonbon auspacken, Husten und Niesen oder gar mit dem Nachbarn flüstern.

Die sich daraus in einer realen Konzertsituation ergebende Verteilung von Schallpegeln wurde von Jeong et al. [2] untersucht. Die Autoren haben die Verteilung des Schalldruckpegels im Diffusfeld während eines Konzerts durch eine Überlagerung von Gaußverteilungen modelliert, von denen die Komponente bei großen Schallpegeln als Beitrag des Orchesters und die Komponente bei kleinen Schallpegeln als Beitrag des Publikums interpretiert wurde. Für die Publikums-Komponente ermittelten die Autoren bei fünf Konzerten in fünf verschiedenen Sälen Verteilungen mit einem Mittelwert zwischen 29 und 38 dB bei 500 Hz (Oktavpegel). Als Maß für die Geräusche von (aufmerksamem) Publikum verwendeten die Autoren das Quantil L_{90} der Verteilung, d.h. den Wert, der in 90% der Zeit erreicht bzw. überschritten wurde. Aus den gemessenen bzw. modellierten Verteilungskennwerten (Mittelwert, Standardabweichung) ergaben sich daraus Oktavpegel zwischen 20 und 27 dB für die Schallleistung in den verschiedenen Sälen.

Jeong et al. beobachteten weiterhin, dass der Pegel des Publikumsgeäuschs mit dem Pegel des technischen Hintergrundgeräuschs korreliert ist, dass sich das Publikum also umso leiser verhält, je leiser die weitgehend stationären Geräusche der technischen Anlagen sind. Diese Beobachtung wird auch durch eine jüngere Untersuchung der Publikumsgeräusche bei acht Veranstaltungen in verschiedenen Konzertsälen und Opernhäusern in Berlin bestätigt [3].

Ähnliche Messungen wurden von Melnikov et al. [4] bei 12 Aufführungen in vier verschiedenen, deutschen Opernhäusern durchgeführt. Die Autoren haben einen Wert $L_{\mathrm{min,1s}}$ für die Sekunde des geringsten Schalldruckpegels während der Aufführung bestimmt, d.h. für einen Moment maximaler Aufmerksamkeit, in der "das Publikum kollektiv den Atem anhält"[4, S. 32]. Hierfür wurden bei Opernaufführungen in der ersten Reihe im Parkett im 500 Hz-Oktavband im Mittel Schalldruckpegel von 31,7 dBA gemessen.

Methoden

Für die Bestimmung der Schallleistung von Publikum wurde im Hallraum der TU Berlin eine Gruppe von fünf Personen platziert. Da die Geräusche von Menschen, die sich auf ihrem Sitz bewegen, auch von der Art und Bepolsterung des Sitzes abhängen kann, wurde, in Zusammenarbeit mit einem Berliner Hersteller von Theater- und Konzertbestuhlung, eine Auswahl von fünf unterschiedlichen Konzertstühlen verwendet, wie sie derzeit im großen Sendesaal des RBB, in der Oper Wuppertal, im Konzertsaal der Universität der Künste, in der Stadthalle Chemnitz und in der Oper Leipzig installiert sind. Als Messverfahren für die Schallleistung wurde das Hallraumverfahren nach DIN EN ISO 3741 [6] gewählt. Zum

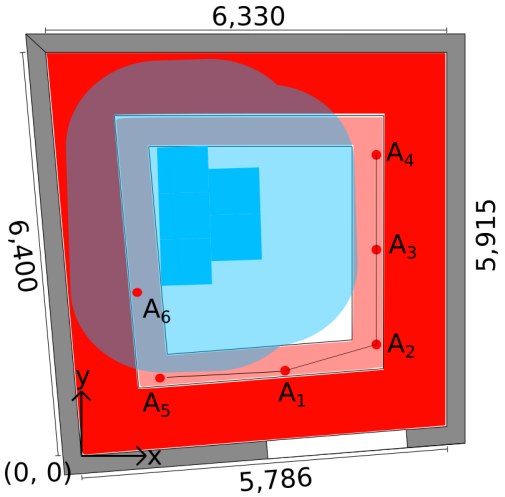

Abbildung 1: Anordnung der Publikums-Stichprobe (Quellen, blau) und Mikrophonpositionen (rote Punkte A_1 bis A_6) im Hallraum der TU Berlin. Markiert sind die nach DIN EN ISO 3741 erforderlichen Abstände zwischen Mikrophon und Wand (rot), Quelle und Wand (rot plus rosa) sowie zwischen Quelle und Messpunkt (transparant hellblau)

einen erfordert dies eine geringere Anzahl an Messpositionen als das Hüllflächenverfahren nach DIN EN ISO 3745 [5], zum anderen treten höhere Schalldruckpegel auf als bei einer Freifeldmessung mit den, aufgrund der relativ ausgedehnten Quelle (s. Tab. 1), großen notwendigen Mikrofonabständen. Eine Pegelabschätzung anhand der Schallleistungswerte für atmende Personen von Kleiner (vgl. Abb. 3(b) türkise Kurve, [1]) ergab einen erwarteten breitbandigen Schalldruckpegel von etwa 30 dB für das Hüllflächenverfahren und 50 dB für das Hallraumverfahren. Insofern wird die vor allem durch das Eigenrauschen der Mikrofone nach unten begrenzte Messdynamik durch das Hallraumverfahren besser ausgenutzt.

Tabelle 1: Quellabmessungen nach Sitzreihen und Gesamt

Reihe	Länge	Breite	Höhe	Volumen
	m	m	m	m^3
1. Reihe	1,25	0,80	1,30	1,30
2. Reihe	2,00	0,80	1,30	1,92
Gesamt	—	1,60	1,30	3,38

Die Anordnung der Publikums-Stichprobe aus fünf Personen, die Messpositionen sowie die durch die Abstandskriterien nach DIN EN ISO 3741 [6] definierten Bereiche im Hallraum zeigt Abbildung 1. Abbildung 2 zeigt ein Foto der Aufstellung im unbesetzten Zustand.

Tabelle 2: Abstandskriterien nach DIN EN ISO 3741 [6]

Position	Mindestabstand
Quelle Wände	1,5 m
Quelle Quelle	$\lambda_{100\,\mathrm{Hz}}/2 = 1,715\,\mathrm{m}$
Mikrophon Wände	1 m
Mikrophon Quelle	$d_{min} = 1,38\,\mathrm{m}$
Mikrophon Mikrophon	$\lambda_{100\,\mathrm{Hz}}/2 = 1,715\,\mathrm{m}$

Tabelle 3 zeigt die Koordinaten der Messpositionen in

Abbildung 2: Foto der Anordnung im Hallraum mit leeren Konzertstühlen

Tabelle 3: Messpositionen

Position	x	y	z
A_1	2,89	1,43	1,04
A_2	4,27	2,02	2,09
A_3	4,63	3,47	1,04
A_4	4,58	5,01	2,09
A_5	1,09	1,15	1,04
A_6	0,84	2,83	3,09

Abbildung 1, relativ zur linken unteren innenseitigen Ecke des Raums. Aufgrund der Anordnung der Schallsegel und der notwendigen Abstandskriterien in Tabelle 3 konnten keine weiteren Messpositionen als die sechs von der Norm geforderten Anfangspositionen gemessen werden.
Es wurde ein Handschallpegelmesssystem (Norsonic Tippkemper NOR145) mit einem Low-Noise 1/4"-Messmikrophon (GRAS 47HC) verwendet. Da es sich um ein Einkanalsystem handelt, wurde jede Position einzeln und sequentiell gemessen. Das Fremdgeräusch wurde vor und nach der gesamten Messreihe (drei Zustände à 6 Positionen) gemessen und gemittelt. Aufgrund des zu erwartenden, instationären Verhaltens der Quelle wurde die Messzeit von normativ mindestens 30 s auf 2 Minuten erhöht.

Die Schallleistung wurde für drei Bedingungen gemessen, die jeweils ein unterschiedliches Verhalten des Publikums repräsentieren, und die durch folgende Instruktionen an die Versuchspersonen definiert wurden:

1. „Stellen Sie Sich vor, dass Sie der Musik in einem Moment großer Spannung mit maximaler Aufmerksamkeit folgen und absolut bewegungslos auf Ihrem Sitz sind."

2. „Stellen Sie Sich vor, dass Sie der Musik aufmerksam folgen, aber ohne quasi "den Atem anzuhalten", d.h. sie bewegen sich auf Ihrem Sitz, wie das bei einem längeren Konzertabend hin und wieder natürlicherweise geschieht."

3. „Stellen Sie Sich vor, dass die Musik gerade ih-

re Aufmerksamkeit nicht vollständig in Anspruch nimmt. Sie interagieren mit den anderen Teilnehmern, flüstern mit Ihren Nachbarn oder holen etwas aus Ihrer Tasche hervor, beispielsweise Bonbons und lutschen diese."

Die Publikums-Stichprobe bestand aus drei männlichen (26, 29, 78 Jahre) und zwei weiblichen (21, 44 Jahre) Personen.

Ergebnisse

Alle Messwerte des Fremdgeräusches lagen in allen Terzbändern mindestens 7 dB unter den absoluten Kriterien für das Fremdgeräusch nach DIN EN ISO 3741[6]. Unter diesen Bedingungen erlaubt die Norm eine Interpretation der Messwerte, auch wenn der ansonsten erforderliche Pegelabstand von 6 bzw. 10 dB zwischen Nutz- und Störsignal nicht in allen Frequenzbändern erreicht wird. Im vorliegenden Fall ist dies von Bedeutung, weil für Bedingung 1 (maximal aufmerksames Publikum) dieser Abstand nicht erreicht wurde.

Abbildung 3a zeigt zunnächst die gemessenen Diffusfeldschalldruckpegel für die Personengruppe mit den drei Verhaltens-Instruktionen, außerdem das über alle Messungen gemittelte Fremdgeräusch. Abbildung 3b zeigt die daraus berechneten Schallleistungswerte, jeweils auf eine Person normiert sowie, zum Vergleich, den Mittelwert der Messungen von Kleiner an atmenden Personen [1] in Oktavbändern. Abb. 3a zeigt, dass für den ersten Zustand (bewegungsloses, nur atmendes Publikum) der von der DIN EN ISO 3741 geforderte Abstand zwischen Messsignal und Fremdgeräusch nicht erreicht wurde. Da jedoch die Absolutkriterien des Fremdgeräusches eingehalten wurden, können die Messwerte als Obergrenze für die Schallleistungspegel in diesen Bändern interpretiert werden [6, S. 12].

Ein Vergleich der gemessenen Schallleistungen mit den Werten von Kleiner (Abb. 3b) zeigt, dass letztere eher mit der Instruktion einer natürlichen Bewegung auf dem Sitz (Zustand 2) in unserer Messung übereinstimmen, nicht mit der Instruktion maximaler Aufmerksamkeit.

Um die Unterschiede in der Schallleistung von Geräuschen verschiedener Personen zu bestimmen und um Audiomaterial für eine Klangsynthese von Publikumsgeräuschen zu erhalten wurden zusätzlich zur Messung nach dem Hallraumverfahren Aufnahmen im reflexionsarmen Raum der TU Berlin durchgeführt. Hierbei wurde der identische Aufbau mit fünf Personen auf fünf Konzertstühlen im reflexionsarmen Raum installiert und der Schalldruck im Nahfeld der VP durch ein Studiomikrofon mit Nierencharakteristik und mit einem besonders niedrigen Ersatzgeräuschpegel von 7 dBA aufgenommen (Neumann TLM 103).

Abbildung 4 zeigt für die Instruktion (1) den Schalldruckpegel im Freifeld, normiert auf einen Abstand von $r = 0,01$ m. Dargestellt sind die Mittelwerte von Nahfeldaufnahmen im RaR der TU Berlin von dreier weiblichen (rot) und vier männlichen (türkis) Teilnehmern, wovon einer zweimal aufgenommen wurde. Die schwarze Kurve zeigt den Mittelwert aller Aufnahmen mit Minimal- und Maximalwerten in schwarz gepunktet. Im Vergleich ist zudem in blau der auf eine Person und demselben Abstand normierte Freifeldschalldruckpegel dargestellt, der sich aus dem Schallleistungspegel der Hallraummessung ergibt. Es wird deutlich, dass die Schallpegel der Atemgeräusche einzelner Personen um etwa ∓10 dB vom Mittelwert abweichen können, wobei die weiblichen Versuchsteilnehmer im Mittel weniger Schalldruck produzieren. Pegel und spektraler Verlauf der Freifelmessungen stimmen gut mit den Messungen im Diffusfeld überein.

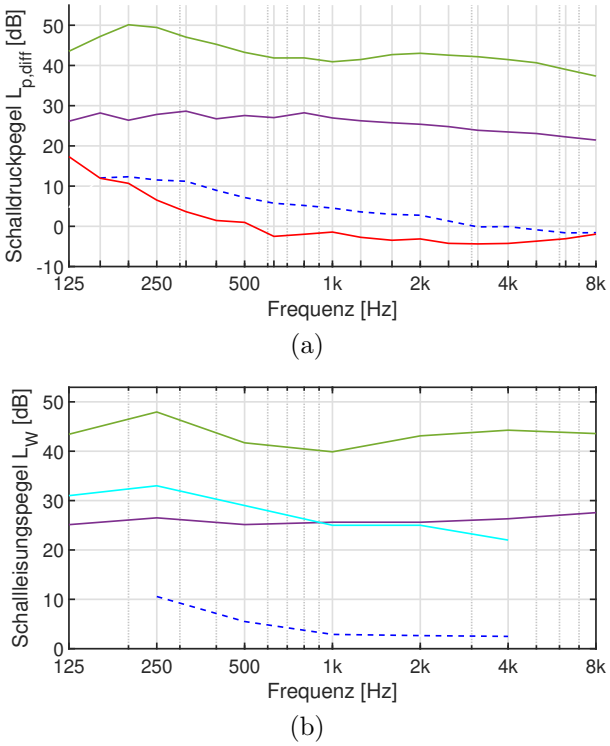

Abbildung 3: (a): Diffusfeldschalldruckpegel des ersten (blau), des zweiten (violett) und dritten Zustandes (grün) mit dem gemittelten Fremdgeräusch (rot).
(b): Schallleistungspegel in Oktavbändern der drei Zustände (Farbcodierung wie in a), auf eine Person normiert, und Mittelwert aller Versuchspersonen nach [1, Tabelle 1] (türkis)

Diskussion

Die Ergebnisse der Schallleistungsbestimmung einer Publikumsgruppe im Hallraum zeigen, dass das Publikumsgeräusch in einem großen Bereich variieren kann. Dies gilt sowohl für die durch drei Instruktionen definierten Verhaltens-Zustände der Publikumsgruppe als auch für die individuellen Unterschiede zwischen den Personen. Die maximale Schallleistung lag im Mittel für alle Zustände im Oktavband von 250 Hz, wo – normiert auf eine Person – maximal aufmerksame, bewegungslose Hörer*innen eine Schallleistung von 10 dB, aufmerksame, aber nicht bewegungslose Hörer*innen eine Leistung von 28 dB und Hörer*innen mit mäßiger, aber für Konzerte noch typischer Aufmerksamkeit eine Leistung von 48 dB produzierten. Weibliche Hörer produzieren im Mittel etwa 10 dB weniger Schallpegel, und je unruhiger sich das

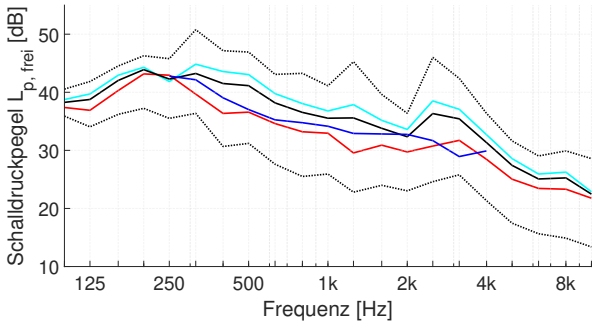

Abbildung 4: Vergleich von Nahfeldaufnahmen im RaR verschiedener Personen mit dem berechneten Freifeldschalldruckpegel des ersten Zustandes in dunkelblau (identischer Abstand, Achtelkugelcharakteristik, auf eine Person normiert und um das Eigenrauschen des Mikrophons korrigiert). Türkis: männlich, rot: weiblich, schwarz: gesamter Mittelwert

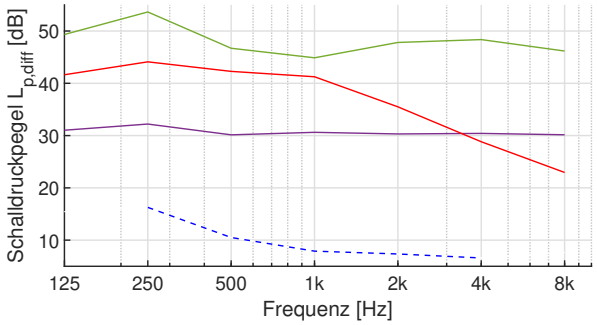

Abbildung 5: Vergleich der aus der Schallleistungsmessung berechneten Diffusfeldpegel mit den Messwerten von Melnikov et al. [4, Abb. 4 (e)] in Oktavändern

Publikum verhält, desto mehr verschiebt sich der spektrale Schwerpunkt zu hohen Frequenzen.

Um zu prüfen, inwieweit die für die verschiedenen Verhaltens-Instruktionen gemessenen Schallleistungen mit den unter den realen Bedingungen einer Musikaufführung gemessenen Werten übereinstimmen, wurde aus den Schallleistungen unserer Messung ein hypothetischer, diffuser Schalldruckpegel für eine Aufführung in der Bayerischen Staatsoper berechnet, d.h. für einen Raum mit einem Volumen von 21000 m^3, einer Nachhallzeit von $T_m = 1,24$ s und einer Besetzung durch 2100 Personen. Abbildung 5 zeigt die damit berechneten Diffusfeldpegel für die drei Zustände aus den im Hallraum ermittelten Schallleistungspegeln im Vergleich zu den Messergebnissen des Diffusfeldschalldruckpegels im Verlauf von Konzerten im gleichen Raum [4, Abb. 4 (e)]. Es zeigt sich, dass sogar die Messwerte für die leiseste Sekunde während der Aufführung noch über den Werten des zweiten Zustandes liegen, d.h. einem Verhalten entsprechen, das zwischen unseren Instruktionen „aufmerksam, nicht bewegungslos“ und „mäßig aufmerksam“ lag. In einer realen Konzertsituation ist das Publikum offensichtlich auch im Moment der größten Aufmerksamkeit nicht kollektiv und in Gänze bewegungslos.

Gegenüber den im Hallraum gemessenen Werten fällt der im Opernhaus gemessene Schalldruckpegel im Diffusfeld oberhalb von 1 kHz zu hohen Frequenzen mit etwa 6 dB/Oktave ab, was offensichtlich auf die höhere Absorption zurückzuführen ist, welche die Publikumsgeräusche durch die Bestuhlung und durch das Publikum erfahren, bevor sie in das Diffusfeld übergehen.

Die gemessenen Werte erlauben somit, ausgehend von den auf eine Person normierten Schallleistungswerten, eine Berechnung für den Bereich möglicher Schalldruckpegel, der von einem aufmerksamen Publikum beliebiger Größe in einem Raum erreicht werden kann. Während die Werte für den Zustand (1) eher theoretischer Natur sind, da sich ein großes Publikum in der Praxis nicht in Gänze absolut bewegungslos verhält, scheinen die Werte für Zustand (2), eher dem zu entsprechen, was ein Publikum in besonders aufmersamen Momenten während einer musikalischen Aufführung an Schallleistung produziert.

Ein Abgleich mit den Noise Rating (NR) oder Noise Criterion (NC) Kurven ermöglicht es so, in Abhängigkeit von der Größe des Publikums und den raumakustischen Eigenschaften des Saals, geeignete Grenzwerte für das technische Hintergrundgeräusch zu definieren. In einem nächsten Schritt sollen aus dem Datensatz Parameter für ein Analyse-Resynthese-System zur Erstellung von virtuellen akustischen Konzertumgebungen extrahiert werden.

Danksagung

Ein Dank geht an die Fa. TKH-Sitzsysteme für die Bereitstellung der Konzertstühle, die Fa. Norsonic Tippkemper GmbH für die Beratung zum Messsystem und die Georg Neumann GmbH für die Leihgabe der Mikrophone.

Literatur

[1] Kleiner, M.: On the audience induced background noise level in auditoria. Acta Acustica united with Acustica 46 (1980), 82–88.

[2] Jeong, C.-H., Marie, P., Brunskog, J., Petersen, C. M.: Audience noise in concert halls during musical performances. J. Acoust. Soc. Am. 131 (2012), 2753–2761.

[3] Böldt, S.: Modellierung von Publikumsgeräuschen. Masterarbeit TU Berlin, 2019.

[4] Melnikov, A., Witew, I., Maeder, M., Gatt, M., Scheffler, M., Marburg, S.: Sound pressure level limits for stage machinery noise in operas and theaters. Applied Acoustics 156 (2019), 29–39.

[5] DIN EN ISO 3745:2017. Akustik – Bestimmung der Schallleistungs-und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume. Berlin: Beuth Verlag.

[6] DIN EN ISO 3741:2011. Akustik – Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hallraumverfahren der Genauigkeitsklasse 1. Berlin: Beuth Verlag.