

Mehrdimensionale Clusteranalyse raumakustischer Parameter:

Welche Werte sprechen für eine besonders gute Konzertsaalakustik?

Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz¹, Christoph Reuter², Benjamin Pfändner³ und Stefan Ostrowski⁴

¹ Peutz Consult GmbH, 40599 Düsseldorf, E-Mail: khl@peutz.de

² Universität Wien, Institut für Musikwissenschaft, 1090 Wien, E-Mail: christoph.reuter@univie.ac.at

³ Peutz Consult GmbH, 90433 Nürnberg, E-Mail: bp@peutz.de

⁴ admost GmbH, 40479 Düsseldorf, E-Mail: stefan@admost.de

Einleitung

Die Methode der mehrdimensionalen Repräsentation der Werte raumakustischer Parameter verschiedener Räume und Nutzungstypen seit 2017 ermöglicht eine vergleichende Analyse von raumakustischen Daten mit umfangreichen Möglichkeiten der Auswertung auf der Basis von nun mehr als 500 Datensätzen von unterschiedlichsten Räumen.

In den vorangegangenen Untersuchungen konnte mit Hilfe dieser Analyseverfahren gezeigt werden, dass Räume aufgrund ihrer raumakustischen Werte spezifische, für ihre Nutzungsart charakteristische Cluster in drei- oder mehrdimensionalen Visualisierungen des Parameterraums bilden, innerhalb derer bezüglich ihrer Hörsamkeit als besonders gut bewertete Räume charakteristische Schwerpunkte (Centroide) und Wertebereiche aufweisen.

Im vorliegenden Beitrag soll mithilfe dieser Methode aufbauend auf diesen Ergebnissen und der mittlerweile vorliegenden Datenbasis der Frage nachgegangen werden, innerhalb welcher charakteristischer Wertebereiche Konzertsäle bezüglich ihrer Akustik als besonders gut bewertet werden, und ob sich aus dem Ergebnis allgemeine Aussagen zu objektiven Voraussetzungen für als besonders gut bewertete Konzertsaalakustiken gewinnen lassen.

Ein Augenmerk soll hierbei auf Unterschiede zwischen historischen und moderneren Sälen gelegt werden sowie zwischen europäischen und anderen Sälen, um auch zeitliche bzw. geschichtliche und kulturelle bzw. geografische Einflüsse in die Auswertungen einbeziehen zu können

Erweiterte Datenbasis der Untersuchung

Als die Methode der 3+ - dimensionalen Analyse raumakustischer Parameterwerte anlässlich der DAGA 2017 vorgestellt wurde [1], bestand die analysierte Datenbasis noch aus 104 Datensätzen bzw. N-Tupeln im Parameterraum, wobei jedes N-Tupel einen Raum bzw. Raumzustand repräsentiert. Für die vorliegende Untersuchung wurde diese Basis auf mittlerweile 519 Datensätze erweitert: 170 Konzertsäle, 49 Kammermusiksäle, 120 Opernsäle, 92 Kirchen, 38 Hörsäle, 24 Theater und 22 Probesäle, davon mehr als 200 Datensätze aus eigenen raumakustischen Messungen, siehe [1] und [2].

Alle weiteren Daten wurden der einschlägigen Fachliteratur entnommen.

Abbildung 1 zeigt eine Ansicht der derzeit vorliegenden 519 Datensätze der Datenbasis in einem $T_{occ,3}-V-G_{theo}$ Plot [2].

Die Markerfarbe bezeichnet darin die Raumnutzungstypen, ergänzt wurden darin auch die Centroiden der Raumtypen [3]. Bei dieser Betrachtungsweise in einem kartesischen Koor-

dinatensystem für die 3 Hauptvariablen wird o. B. d. A. davon ausgegangen, dass die den Parameterraum aufspannenden Größen voneinander unabhängig sein sollten, was bei raumakustischen Parametern nicht per se der Fall ist.

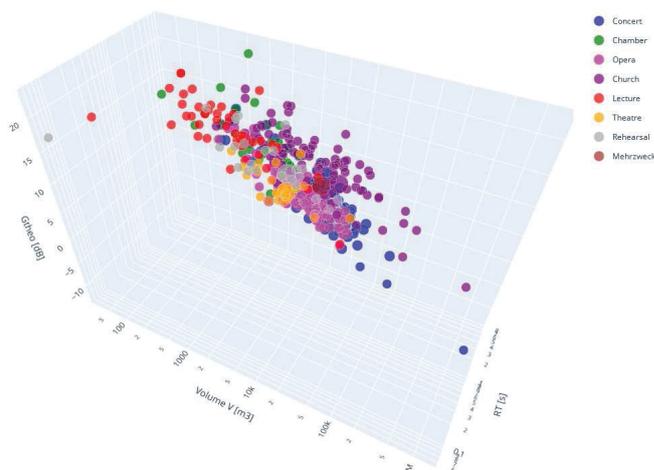


Abbildung 1: Ansicht der derzeit vorliegenden 519 Datensätze in einem T-V- G_{theo} Plot. Markerfarben: Raumtyp (170 Konzertsäle, Kammermusiksäle, Opernsäle, Kirchen, Theater, Hörsäle, Probesäle). Größere Marker: Centroiden der Raumtypen

Abbildung 2 zeigt alle Datensätze mit den Centroiden der Raumnutzungstypen samt charakteristischen Raumbereichen darum herum, welche durch die Standardabweichungen $\pm \sigma$ um die Centroiden definiert wurden, siehe [3].

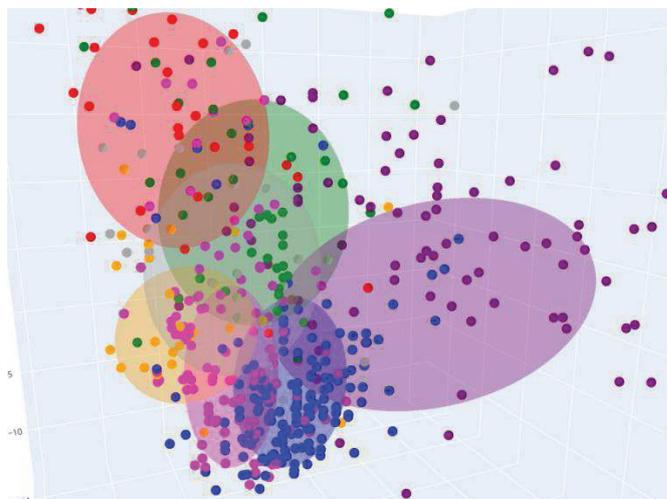


Abbildung 2: Detailansicht aller Datensätze im T-V- G_{theo} Plot. Markerfarben: Raumtyp (Konzertsäle, Kammermusiksäle, Opernsäle, Kirchen, Theater, Hörsäle, Probesäle) Farbig markierte Bereiche: Centroiden [4] der Raumtypen $\pm \sigma$

Mit dieser Betrachtungsweise lässt sich zeigen, dass sich die verschiedenen Nutzungstypen deutlich in charakteristischen Parameterraumbereichen häufen, mit Schnittmengen [2], [3], wobei die Werte der Centroide für jeden Raum-Typ ein jeweils eigenes Zentrum bilden, das über die Bildung eines arithmetischen Mittelwerts bestimmt wurde.

Der mit der Standardabweichung darum herum definierte charakteristische Raumbereich für Konzertsäle (blau) zeigt Schnittmengen mit denen für Kirchen (violett), Probe- (grau) und Opernsäle (pink), nicht jedoch mit Kammermusik- (grün), Theater- (gelb) oder Hörsälen (rot).

Korrelationsanalyse

Bei dieser Betrachtungsweise in einem kartesischen Koordinatensystem steht vor allem die Visualisierung zuvor noch nicht bekannter Zusammenhänge im Vordergrund. Um aus den zur Verfügung stehenden Daten weitere Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen den verwendeten raumakustischen Parametern zu erlangen, wurden die vorliegenden Datensätze samt Bewertung mit Hilfe von JASP einer Korrelationsanalyse unterzogen, siehe Abbildung 3, deren aussagekräftigste Ergebnisse in Tabelle 1 aufgeführt sind.

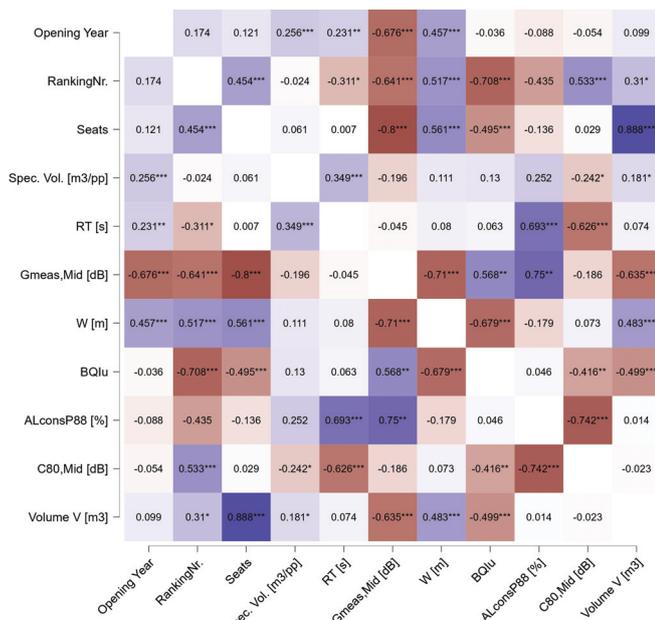


Abbildung 3: Pearson's r-Heatmap der hier betrachteten raumakustischen Parameter der vorliegenden Datenbasis.

Tabelle 1: Ausgewählte Ergebnisse der Korrelationsanalyse

Größe 1	Größe 2	Pearson's r	p
Beranek-Ranking	G _{mess} [dB]	-0,64	< 0,001
Beranek-Ranking	BQI _U	-0,71	< 0,001
Beranek-Ranking	C _{80,3} [s]	0,53	< 0,001
Beranek-Ranking	Breite W [m]	0,52	< 0,001
Beranek-Ranking	Platzzahl N	0,45	< 0,001
BQI _U	Breite W [m]	-0,68	< 0,001
Eröffnungsjahr	Breite W [m]	0,46	< 0,001
G _{mess} [dB]	Breite W [m]	-0,71	< 0,001
G _{mess} [dB]	Platzzahl N	-0,80	< 0,001
G _{mess} [dB]	BQI _U	0,57	< 0,001
Volumen V [m ³]	Platzzahl N	0,89	< 0,001

Mit aller gebotenen Vorsicht in Bezug auf Schein- und verdeckten linearen Korrelationen nach Pearson lassen sich daraus einige bemerkenswerte Schlüsse ziehen:

- im in diesen Untersuchungen zur Kennzeichnung der subjektiv bewerteten raumakustischen Qualität verwendeten Ranking nach Leo Beranek [5] korreliert eine höhere Konzertsaal-Qualität deutlich mit höheren Werten von gemessenem Stärkemaß G und Binaural Quality Index BQI sowie geringeren Raumbreiten, Klarheitsmaßwerten und Platzzahlen;
- die Raumbreite korreliert erwartungsgemäß negativ mit dem Stärkemaß und mit dem BQI;
- Das gemessene Stärkemaß G_{mess} korreliert mit steigenden Werten des BQI und des AL_{consP88} sowie erwartungsgemäß mit geringeren Werten von Raumbreite W, Volumen V und Platzzahl N.

Es ist mithin nicht trivial, unabhängige Größen zu finden, um einen Parameterraum daraus aufzuspannen, zumal auch nicht immer alle Daten für alle Datensätze vorliegen (z. B. finden sich in der einschlägigen Literatur nicht immer Angaben zum gemessenen Stärkemaß oder zum BQI).

In diesem Zusammenhang wäre es zudem sehr interessant, diese Untersuchung auf den Seitenschallgrad auszuweiten, aber für diese Größe ist die Datenlänge leider noch dürftiger.

Datenanalyse

Wenn für die betrachteten Säle Angaben zur Nachhallzeit nur im unbesetzten Zustand vorlagen, wurden daraus Nachhallzeiten für den besetzten Zustand näherungsweise berechnet gemäß DIN 18041:2016 [5], siehe Gleichung (1):

$$T_{\text{besetzt}} = \frac{T_{\text{unbesetzt}}}{1 + \frac{T_{\text{unbesetzt}} \cdot (\Delta A_{\text{Personen}})}{0,16 \cdot V}} \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

Auch wenn die Größen Volumen, Nachhallzeit und Stärkemaß nicht unabhängig sind, stellen sie eine gute erste Ausgangsbasis für weiterführende Untersuchungen dar, zumal für alle Datensätze aus den Angaben zum Raumvolumen und zur Nachhallzeit basierend auf der Annahme eines Diffusschallfeldes ein theoretisches Stärkemaß nach der erweiterten Diffusfeldtheorie nach Kuttruff und Barron [6] über die Beziehung der Gleichung (2) bestimmbar ist. Die Korrelationsanalyse zeigt, dass der theoretische Wert des Stärkemaßes G_{theo} (im besetzten Zustand) und dessen Messwerte G_{mess} (im unbesetzten Zustand) mit r = 0,89 und p < 0,001 hoch korreliert sind.

$$G_{\text{theo}} = 45 - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{V}{T} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Bei den anderen Parameterwerten (G_{mess}, C₈₀, BQI, AL_{cons}) handelt es sich i. d. R. um die des gemessenen Zustands.

Clusteranalyse in der V-T-G-Darstellung

Abbildung 4 zeigt eine Darstellung der 170 Datensätze der Konzertsäle im V-T_{occ,3}-G_{theo}-Diagramm mit ergänztem

Qualitätsranking nach Leo Beranek [4]. Hellgrüne Marker bezeichnen darin exzellente, grüne gute bis sehr gute Säle, orangefarbene Marker die der Kategorie nach Beranek „B“, rote der Kategorie „C“. Für Säle mit grauen Markern lagen objektivierte Bewertungen akustischer Qualität nicht vor.

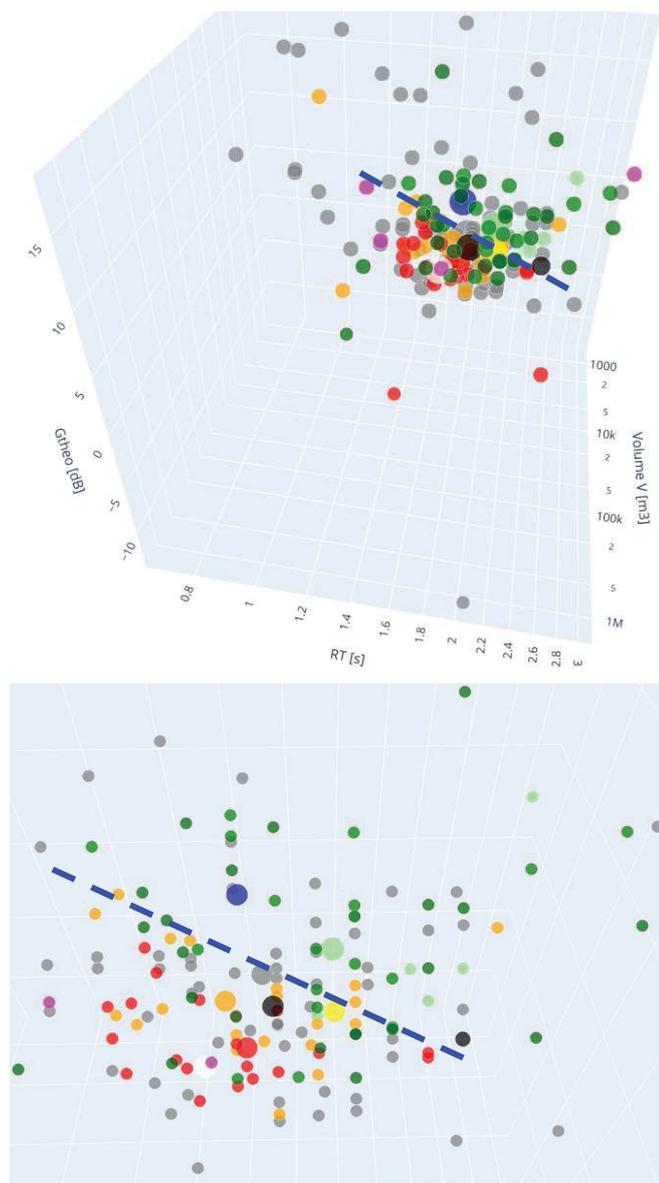


Abbildung 4: Darstellungen der 170 Datensätze der Konzertsäle im $V-T_{occ,3}-G_{theo}$ -Diagramm mit ergänztem Qualitätsranking nach Leo Beranek. Hellgrüne Marker bezeichnen darin exzellente, grüne gute bis sehr gute Säle, orange Marker die der Kategorie B, rote der Kategorie C. Größere Marker: Centroide der Untergruppen, s. Tabelle 2.

Links unterhalb der eingezeichneten gestrichelten blauen Linie, also im Bereich mit höheren Volumina, geringeren Nachhallzeiten und niedrigeren Werten des Stärkemaßes finden sich gehäuft Säle der Kategorie C und B, wohingegen im Raumbereich rechts oberhalb der Linie sich Säle mit der Hörsamkeitsbewertung gut, sehr gut oder exzellent häufen. Man beachte weiters die Datensätze mit größeren Markern: dabei handelt es sich um Centroide von Untermengen der 170 Konzertsaaldatensätze. So bezeichnet der größere graue Marker den Centroid aller 170 Konzertsaaldatensätze, der blaue größere Marker denjenigen der historischen Säle bis

1930, der schwarze die modernen Säle ab 1930, der hellgrüne die qua Ranking nach Leo Beranek bezüglich der Hörsamkeit als gut bis exzellent bewerteten Säle, der orange diejenigen der Rating-Kategorie B, rot desgleichen, jedoch Kategorie C, der weiße für die amerikanischen Datensätze, und der gelbe die asiatischen Säle. Es wird deutlich, dass die Centroide der Untergruppen bezüglich ihrer Position im Parameterraum charakteristisch separieren, siehe untere Detailansicht in Abbildung 4. Der dem Centroid der sehr guten bis exzellenten Säle nächste Datenpunkt ist der des Herkulesaals in München, siehe auch Tabelle 2.

Beraterisch beeinflussbare Größen

Nun liegt es nahe, zu betrachten, wie die Verteilung der Datensätze sich in einem Parameterraum darstellt, der von beraterisch direkt beeinflussbaren Größen aufgespannt wird, nämlich Volumen V , Breite B und Anzahl Plätze N , siehe Abbildung 5. Dabei zeigt sich, dass sich die Konzertsäle mit einem Qualitätsrating guter bis exzellenter Hörsamkeit im linken unteren Raumbereich häufen, siehe blau gestrichelte Markierung, mithin bei begrenzten Werten von Volumen, Platzanzahl und Breite. Drei Viertel dieser Säle weisen zudem als Grundgeometrie eine Quaderform auf.

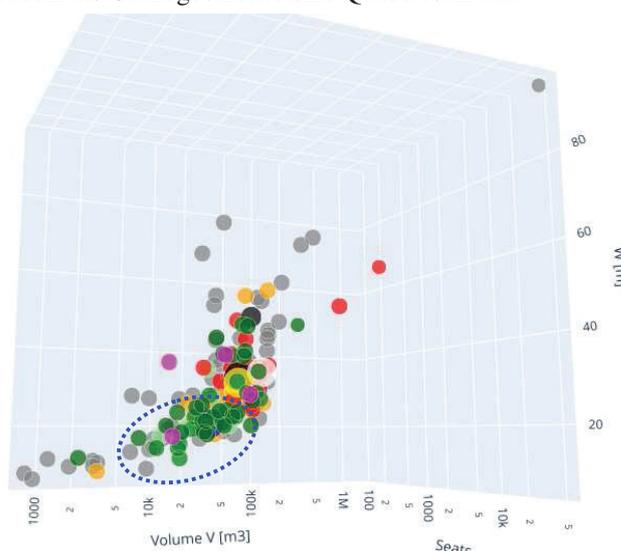


Abbildung 5: Darstellung der 170 Datensätze der Konzertsäle im $W-N-V$ -Diagramm mit Qualitätsranking nach L. Beranek [4]. Markerfarben wie Abbildung 4.

Tabelle 2 sind die Werte der raumakustischen Parameter der Centroide der oben genannten Untermengen der in dieser Untersuchung betrachteten 170 Konzertsäle zu entnehmen.

Tabelle 2: Daten der Centroide der Konzertsaal-Untergruppen

Sub-Gruppe	V [m ³]	N	T _{occ,3} [s]	G _{mess} [dB]	W [m]	BQI
Alle Konzerts.	16.050	1.900	1,77	5,8	28	0,57
Gute-exzell. S.	14.500	1.500	1,94	5,7	24	0,58
Herkulesaal	13.600	1.300	1,90		22	0,60
Kategorie B	17.000	1.900	1,68	4,9	27	0,59
Kategorie C	22.000	2.350	1,73	3,6	32	0,44
Historische S.	12.000	1.450	1,72	8,1	21	0,60
Moderne Säle	18.000	2.150	1,79	4,2	31	0,54
Amerikan. S.	22.500	3.450	1,63	2,4	32	0,50
Asiatische S.	19.000	1.850	1,94	4,6	30	0,65

Ergebnisse und Fazit

Aus den an dieser Stelle vorgestellten Untersuchungen der raumakustischen Parameterwerte von 170 Konzertsälen mit Hilfe von 3+ -dimensionalen visuellen Clusteranalysen [1] inklusive räumlicher Centroide [3] ergeben sich bezüglich der Frage nach guten Voraussetzungen für eine als gut bewertete raumakustische Qualität der Konzertsäle folgende Ergebnisse:

- Die Centroide der verschiedenen Subgruppen der Konzertsäle haben unterschiedliche Koordinaten im Parameterraum, die charakteristisch und typisch sind für die jeweiligen Subgruppen;
- Die hier nach Leo Beraneks Qualitätsranking [4] bezüglich ihrer Hörsamkeit als sehr gut bis exzellent bewerteten Konzertsäle weisen i. d. R. weniger als ca. 2.000 Plätze, weniger als 29 m Breite und weniger als 20.000 m³ Volumen auf.

Gemäß den hier durchgeführten Untersuchungen sind demnach zielführende Voraussetzungen für eine als sehr gut bis exzellent bewertete Hörsamkeit folgende Wertebereiche für die Raummittelwerte der raumakustischen Parameter mit Abständen von der Quelle $> 2 r_H$:

- Nachhallzeit: 1,8 s $< T_{occ,3} < 2,4$ s \wedge
- Stärkemaß: + 5 dB $< G_{mess} < + 8$ dB \wedge
- BQI: 0,55 $< BQI < 0,65$ \wedge
- Klarheitsmaß: - 3 dB $< C_{80,3} < - 1$ dB.

Man beachte dabei die UND - Verknüpfungen („ \wedge “). In den hier betrachteten und als gut bis exzellent bewerteten Sälen geht dies einher mit folgenden Daten der betreffenden Konzertsäle, welche als Richtwerte dienen können:

- Saalbreite: 20 m $< W < 29$ m \wedge ;
- Platzanzahl: 800 $< N < 2.000$ \wedge ;
- Raumvolumen: 10.000 m³ $< V < 20.000$ m³ \wedge ;
- Spezifisches V.: 11 m³/pP $< V/N < 12$ m³/pP.

Diese Wertebereiche stehen dem in der Geschichte der Konzertsäle deutlich zu beobachtendem Trend zu mehr Plätzen und somit zu verkaufenden Konzertkarten entgegen, was immer größere Räume und in der Folge auch größere Besetzungen erforderte, um vergleichbare Lautstärken zu ermöglichen, verbunden mit geringeren Nachhallpegeln.

Methodenkritik

Die Methode der 3+ -dimensionalen Clusteranalyse mit der Ergänzung durch räumliche Centroide ist ein geeignetes Werkzeug für Ziele und Durchführung dieser Untersuchung.

1. Das in diesen Untersuchungen zur Kennzeichnung der subjektiv bewerteten raumakustischen Qualität verwendete Ranking nach Leo Beranek, ergänzt um weitere anerkannt gute bis exzellente Säle, ist jedoch nicht das einzig mögliche, sondern nur das mit der derzeit größten Basis von im Hinblick auf die Hörsamkeit bewerteten Sälen (58 Säle, ergänzt in den Kategorien A+ bis B auf 90 Säle). Eine neue Untersuchung mit ggf. größerer Daten- und Probandenbasis mag im Detail zu abweichenden subjektiven Bewertungen der Hörsamkeit kommen. Nichtsdestotrotz entsprechen

gerade die als Kategorie A+ klassifizierten exzellenten Konzertsäle den Bewertungen aus Befragungen von Dirigenten, siehe z. B. [7].

2. Diese Form des Rankings stützt sich dabei auf die Bewertung der Eignung eines Saals als Ganzes, ohne Berücksichtigung lokaler Variationen der Hörsamkeit. So wäre es z.B. denkbar, die Ausdehnung der Marker abhängig zu machen von der Variation der Parameterwerte in einem Raum.

3. Ranking und Betrachtungen geschahen ohne weitere Differenzierung der Eignung für verschiedene Besetzungen, Repertoire oder Stile der Darbietungen.

4. Unterschiedliche klangliche Vorlieben verschiedener Hörergruppen [8] wurden hier nicht weiter betrachtet.

5. Obgleich es eine lohnenswerte Erweiterung der Datenbasis und Ergänzung dieser Untersuchungen wäre, wurde der Seitenschallgrad als wichtiger Parameter nicht betrachtet, da Daten dazu für relativ wenige Säle vorliegen.

Ausblick

Die Erweiterung der Datenbasis um weitere Säle und Räume ist in Arbeit – Daten weiterer Räume sind stets willkommen.

Danksagung

Größter Dank gilt den (technischen) Leitungen für Ermöglichung und Unterstützung der raumakustischen Messungen in über 45 Konzertstätten seit 1996, und allen Mithelfenden bei Eingabe und Analysen der Datensätze.

Widmung

Dieser Beitrag sei dem im Januar 2023 verstorbenen Prof. Dr. Georg Heike und seinem Andenken gewidmet.

Literatur

- [1] Lorenz-Kierakiewitz, K.-H., et al.: Mehrdimensionale visuelle Clusteranalyse raumakustischer Parameterwerte von Konzertsälen, Opernhäusern und anderen Raumtypen, DAGA - Fortschritte der Akustik, Kiel, 2021
- [2] Lorenz-K., K.-H.; Reuter, C.; Pfändner, B.; Ostrowski, S.: Multidimensional Visual Cluster Analysis of Room Acoustical Parameter Values as Means to gain Scientific Insights and Design / Consulting Tool, Proceedings 23rd ICA, Aachen, 2019
- [3] Lorenz-Kierakiewitz, K.-H., et. al.: Mehrdimensionale Clusteranalyse raumakustischer Parameterwerte: räumliche Centroide und deren Interpretation, DAGA - Fortschritte der Akustik, Stuttgart, 2022
- [4] Beranek, L.: Subjective Rank-Orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls, Acta Acustica united with Acustica, Vol. 89 (2003), 494-508
- [5] DIN 18041, Hörsamkeit in Räumen, Berlin, März 2016
- [6] Barron, M.: Theory and measurement of early, late and total sound level in rooms, JASA 137 (2015), p. 3098
- [7] Winkel, F: Die besten Konzertsäle der Welt, Baukunst und Werkform, Jg. 8, Heft 12, Nürnberg, 1955, S. 753
- [8] Lorenz-Kierakiewitz, K.-H.: Recording Acoustics of Concert Halls: About the variation of preference judgements with varying music stimuli, Beitrag zur 25. Tonmeistertagung, Leipzig, 2008.