

Mehrdimensionale Clusteranalyse raumakustischer Parameterwerte: räumliche Centroide und deren Interpretation

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 raumakustischer Parameterwerte verschiedener Nutzungstypen, vorgestellt bei der DAGA 2017, wurde seither erweitert auf mehr als 500 Datensätze aus eigenen Messungen und Literatur, um Nutzungsmöglichkeiten schnell einzuschätzen, akustische Veränderungen nach baulichen Maßnahmen darzustellen und die Qualität von Aufführungsstätten anhand objektiver Kriterien zu ermitteln. Mithilfe dieser Methode konnte u.a. gezeigt werden, dass verschiedene Nutzungsarten im von den betrachteten Parametern aufgespannten Parameterraum charakteristische Bereiche einnehmen und dass bezüglich der Hörsamkeit gut bewertete Räume innerhalb der Typenbereiche begrenzte Cluster bilden. Diese Methode bietet umfangreiche Möglichkeiten der Analyse der vorliegenden Datenbasis: statistische Verfahren wie Korrelationsanalysen, Mittelwerte und Standardabweichungen. In diesem Beitrag soll untersucht werden, welche raumakustische Bedeutung die Schwerpunkte dieser Datenpunktverteilungen im Parameterraum, die sogenannten Centroide, haben, und zwar sowohl von der Gesamtheit der Datensätze, wie auch diejenigen der verschiedenen Raumnutzungstypen. Dabei soll untersucht werden, ob die von den verschiedenen Nutzungstypen im Parameterraum eingenommenen Punkteverteilungen mit der Standardabweichung der Mittelwerte gut beschrieben werden können, um eine prägnantere raumakustische Definition der Eigenschaften der Raumtypen zu formulieren. Weiters soll versucht werden zu zeigen, dass verschiedene Nutzungen im Durchschnitt über die hier untersuchten Datensätze jeweils unterschiedliche raumakustische Parameterwerte aufweisen, und wie dies mit subjektiv bewerteter akustischer Eignung und Hörsamkeit für bestimmte Nutzungen zusammenhängt.

Erweiterte Datenbasis der Untersuchung

Als die Methode der 3+ - dimensionalen Analyse raumakustischer Parameterdaten anlässlich der DAGA 2017 vorgestellt wurde, bestand die analysierte Datenbasis aus 104 Datensätzen bzw. N-Tupeln im Parameterraum. Zur DAGA 2021 [2] wurde diese Basis nochmals erweitert auf mittlerweile 500 Datensätze, nämlich 160 Konzertsäle, 47 Kammermusiksäle, 120 Opernsäle, 89 Kirchen, 38 Hörsäle, 24 Theater und 22 Probesäle, davon mehr als 200 auch aus eigenen raumakustischen Messungen, siehe auch [1]. Abbildung 1 zeigt eine Ansicht der derzeit vorliegenden Datenbasis in einem T-V-G Plot; die weiteren Abbildungen dieses Beitrags werden diesen Plottyp beibehalten.

Die Markerfarbe bezeichnet darin die Raumnutzungstypen.

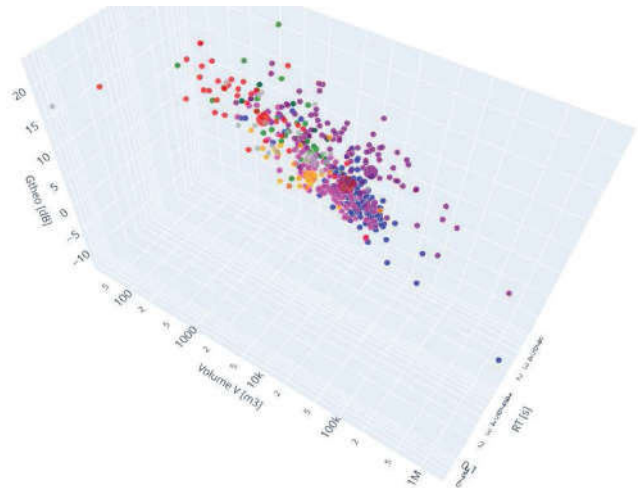


Abbildung 1: Ansicht der derzeit vorliegenden 500 Datensätze in einem T-V-G_{theo} Plot. Markerfarben: Raumtyp (Konzertsäle, Kammermusiksäle, Opernsäle, Kirchen, Theater, Hörsäle, Probesäle). Größere Marker: Centroide (braun: für alle Daten)

Zielfrage

Die Zielfrage für diesen Beitrag soll sein, wie sich diese pro Raumnutzungstyp teildisjunkten Punktwolken besser beschreiben lassen. Diese haben jeweils einen Mittelpunkt und eine Ausdehnung. Sind diese Werte der Raumtypenbereiche charakteristisch für die Typen? Hängen diese Werte mit der Bewertung der Hörsamkeit zusammen?

Betrachtung der räumlichen Centroide

Dazu sollen im Folgenden die sogenannten Centroide betrachtet werden, worunter hier diejenigen Punkte zu verstehen sind, deren Koordinaten von den Mittelwerten der Koordinaten der Datensätze gebildet werden.

Diese von der betrachteten Grundgesamtheit und deren Struktur, Größe und Auswahl abhängigen Mittelwerte stellen die Schwerpunkte der räumlichen Punktverteilungen dar und werden somit als neue Datensätze aufgefasst und wie die Datensätze realer Räume in den Diagrammen mit dargestellt, siehe z. B. Abbildung 1, zur leichteren Identifizierbarkeit mit größeren Markern. Aus der Mittelwertbildung wurden die 5 extremsten Datensätze ausgeschlossen (reflexionsarmer Raum, Petersdom, Amsterdam Arena, Aula Magna Caracas), um die Ergebnisse der Centroidbildung nicht zu stark einseitig zu beeinflussen. Abbildung 1 zeigt über die Detailansicht der Gesamtheit der Datensätze mit größeren Markern auch die Centroide als größere Datenpunkte in derselben Markerfarbe wie des jeweiligen Raumtyps. Der Centroid von allen 500 bisher betrachteten Datensätzen ist darin als brauner Punkt gekennzeichnet.

Anhand der erkennbar unterschiedlichen räumlichen Position der Centroide zeigt sich bereits eine Raumnutzungstypenseparation, was noch verdeutlicht wird, wenn man nur die Centroide betrachtet, siehe Abbildung 2.

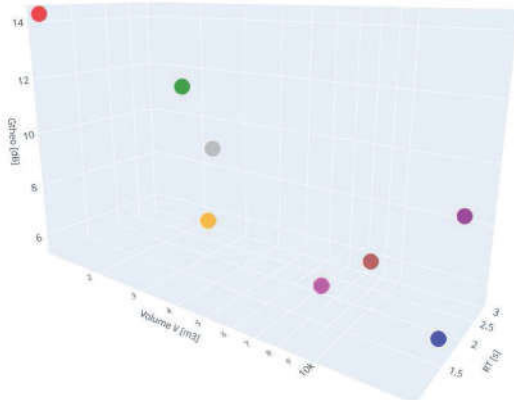


Abbildung 2: Ansicht der Centroide der vorliegenden Datensätze im T-V-G_{theo} Plot. Markerfarbe: Raumtyp (Konzertsäle, Opersäle, Kammermusik, Kirchen, Theater, Hörsäle, Probensäle, alle Daten)

Tabelle 1 zeigt die Mittelwerte der raumakustischen Parameterwerte für Quellabstände $d > 2 \cdot r_H$ der Parameter T (Nachhallzeit), G (Stärkemaß), BQI (Binaural Quality Index) und C_{80} (Klarheitsmaß) sowie die Daten V (Volumen), N (Kapazität), B (Raumbreite) der Centroide als Mittelwerte der vorliegenden Datensätze pro Raumtyp, gemittelt ohne die ausgeschlossenen 5 Extremdatensätze:

Tabelle 1: Centroide/Parametermittelwerte pro Raumtyp

Raumtyp	Parameter						
	V [m ³]	N	T _{occ,3} [s]	G _{m,3} [dB]	B [m]	BQI _u	C _{80,3} [dB]
Konzertsäle	15567	1929	1,7	5,8	27	0,57	-0,6
Kammern.	3101	382	1,5	12,9	15	0,72	0,4
Opersäle	8986	1306	1,4	4,7	25	0,57	3,0
Kirchen	14354	914	3,0	12,2	21	0,52	-4,2
Hörsäle	1294	161	1,1	12,5	11	-	4,6
Theater	5004	902	1,1	8,0	18	0,62	4,0
Probensäle	4229	240	1,4	11,4	18	0,70	1,5
alle Daten	10460	1190	1,76	8,2	22	0,59	0,6

Es stellt sich nun die Frage, wie charakteristisch diese Centroide als Mittelwerte der betrachteten Parameter für die hier untersuchten Raumtypen sind. Dazu wurden die Datensätze identifiziert, deren N-Tupel die geringsten Abstände zu den Centroiden aufweisen, siehe Tabelle 2:

Tabelle 2: Den Raumtyp-Centroiden benachbarte Datensätze

Raum	Parameter						
	V [m ³]	N	T _{occ,3} [s]	G _{m,3} [dB]	B [m]	C _{80,3} [dB]	
Usher Hall Edinburgh	16000	2548	1,8	5,5	28	-1,7	
Kl Tonhallens. Zürich	3234	610	1,6	11,9	12	-1,8	
Magyar Állami Operaház Budapest	8900	1227	1,3	6,8	16	1,9	
Ludwigskirche Saarbrücken	12000	660	2,8	8,7	38	-	
HS A Univ. Wien	1235	207	1,1	14,5	13	-2,0	
Theater MG-Rheydt	5000	841	1,1	8,5	16	2,8	
Probensaal DSO Berl.	3931	136	1,3	10,0	22	-	
Stadtcasino Basel	10500	1448	1,8	7,3	21	-2,3	

Bei der Betrachtung der Centroide und der diesen im Parameterraum nächstgelegenen Datensätze zeigt sich, dass letztere durchaus als typische Beispiele für die Raumnutzungen anzusehen sind, siehe Tabelle 2, was nicht heißt, dass es sich um subjektiv bezüglich der Hörsamkeit als besonders gut bewertete Beispiele handeln muss - dies hängt wie die exakte räumliche Position der Centroide im Parameterraum stark ab von der Auswahl der Datensätze der Datenbasis. So waren z.B. viele der in der vorliegenden Datenbasis betrachtete Hörsäle nicht die besten und just deshalb messtechnisch untersucht worden, siehe auch [2], was sich natürlich erkennbar auf die räumliche Position des Centroids des Nutzungstyps "Hörsaal" auswirkt - siehe auch Abbildung 2, wo sich der spatiale Centroid des Raumtyps Hörsaal insbesondere durch einen ziemlich hohen Wert des Stärkemaßes G auszeichnet, welcher die Lautstärke des Nachhallfeldes gegenüber dem Freifeld in 10 m Abstand von der Schallquelle beschreibt (in akustisch als gut zu bewertenden Hörsälen sollte der Nachhallpegel in Abhängigkeit vom Raumvolumen über entsprechende Mengen Absorption begrenzt werden). Auch die Position des Centroids für den Raumtyp der Kirchen ist dabei abhängig von den Eigenschaften der hier in der Datenbasis zur Verfügung stehenden Datensätzen - da unter den 89 Kirchen auch zahlreiche kleinere Beispiele sind (und der untypische große Petersdom bei der Centroidbildung ausgeschlossen wurde), fallen mittleres Raumvolumen und Nachhallzeit vergleichsweise begrenzt aus, siehe Abbildung 2 und Tabelle 1. Gegenüber den in [2] präsentierten Werten und Positionen der räumlichen Centroiden der verschiedenen Raumtypen fällt auf, dass deren Verteilung im Parameterraum nun vergleichbar ausfällt, wenn sich auch die Koordinaten etwas verschoben haben. Es ist zu erwarten, dass sich die Koordinaten der Centroiden insbesondere dieser beiden Raumtypen „Theater“ und „Kirchen“ bei einer Einbeziehung von mehr Datensätzen weiter verschieben wird. Interessant ist, dass der Centroid über alle Datensätze der Datenbasis der 500 bisher erfassten Räume ziemlich genau mit den Parameterdaten des Stadtcasino Basel zusammenfällt, welches als ausgezeichneter mittelgroßer Konzertsaal gilt. Dies ist natürlich beeinflusst von der Gewichtung durch eine große Anzahl Konzertsäle (160 Datensätze) in der Datenbasis z.B. im Vergleich zu bislang nur 22 Theatersälen, und insofern stellt der Centroid über alle Datensätze keine Durchschnittsakustik aller Raumtypen dar, sondern ist vielmehr der Auswahl der Datensätze der hier vorliegenden Datenbasis geschuldet.

Räumliche Ausdehnung der Centroide:

Neben den räumlichen Positionen der Schwerpunkte der jeweiligen Raumtypen, als welche die Centroiden interpretiert werden können, wäre eine aus den Daten bestimmbare räumliche Ausdehnung im Parameterraum interessant, und inwieweit diese Streuung für die Raumtypen charakteristisch ist. Stellen die Koordinaten der Centroiden die Mittelwerte der Parameterwerte der in der Datenbasis vorliegenden unterschiedlichen Raumtypen dar, liegt es nahe, als mögliche charakteristische Ausdehnung bzw. Streuung der Raumtypencluster im Parameterraum für jeden Parameter die Standardabweichung σ heranzuziehen, siehe Gleichung (1).

$$\sigma = \sqrt{\text{Var}(x)} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (1)$$

Wären die Datensätze der Datenbasis im statistischen Sinne normalverteilt, lägen 68% der Werte eines Parameters in einem Raumtypcluster im Intervall $[\mu - \sigma; \mu + \sigma]$. Tabelle 3 zeigt die Werte der Standardabweichung σ , welche aus den Parameterwerten der hier betrachteten Datensätze pro Raumtyp ermittelt wurden (für den Centroid aller Datensätze wurde auf eine Ermittlung und Betrachtung einer solchen Standardabweichung verzichtet).

Tabelle 3: Aus den Datensätzen ermittelte σ -Werte pro Typ

Raumtyp	Parameter						
	V [m ³]	N	T _{occ} [s]	G _{m,3} [dB]	B [m]	BQI _u	C _{80,3} [dB]
Konzertsäle	9511	2227	0,4	4,3	11	0,11	2,2
Kammerm.	2243	269	0,6	3,5	7	0,03	3,0
Opernsäle	6269	823	0,3	3,8	12	0,13	2,2
Kirchen	22722	1793	1,4	3,2	9	0,12	3,1
Hörsäle	1790	177	0,5	3,1	5	-	2,7
Theater	4646	671	0,4	3,1	5	0,10	3,7
Probensäle	4244	286	0,5	4,1	7	-	2,9

Aus Tabelle 3 wird ersichtlich, dass die Werte für σ je nach Raumtyp und betrachtetem Parameter sehr unterschiedlich ausfallen. Erwartungsgemäß zeigen die Kirchen in Bezug auf Raumvolumen, Platzanzahl und Nachhallzeit die größten Werte der Standardabweichung, was sofort offensichtlich wird, betrachtet man die sehr große Ausdehnung der Kirchen-Datensätze der Datenbasis im Parameterraum in Abbildung 1. Demgegenüber scheinen die hier betrachteten Datensätze der Raumtypen Theater und Kammermusikäle jeweils vergleichsweise ähnlich und nah beieinander. Bei diesen beiden Raumtypen liegen in der Datenbasis somit Datensätze mit geringerer Streuung vor als bei den Kirchen.

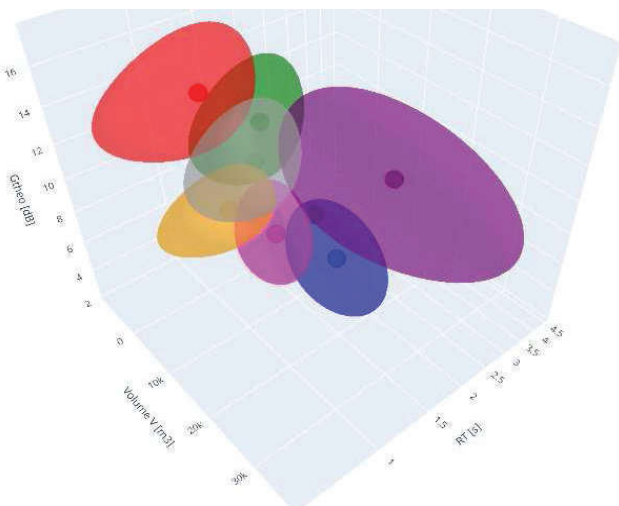


Abbildung 3: Ansicht der Centroiden der vorliegenden Datensätze im T-V-G_{theo} Plot mit räumlicher Ausdehnung +/- σ . Markerfarbe: Raumtyp (Konzertsäle, Opernsäle, Kammermusikäle, Kirchen, Theatersäle, Hörsäle, Probensäle)

In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass die bereits bei den Centroiden ersichtliche Raumtypenseparation weitgehend auch für die Raumbereiche mit +/- σ um die Centroiden herum klar erhalten bleibt, mit Ausnahme der Probensäle.



Abbildung 4: Detailansicht der Centroiden im T-V-G_{theo} Plot mit räumlicher Ausdehnung +/- σ und den vorliegenden Datensätzen. Markerfarbe: Raumnutzungstyp (Konzertsäle, Opernsäle, Kammermusikäle, Kirchen, Theatersäle, Hörsäle, Probensäle)

Aus der Detailabbildung 4 ist ersichtlich, dass die räumlichen Centroiden der Raumnutzungstypen zusammen mit der räumlichen Ausdehnung +/- σ als charakteristische Parameterraumbereiche für die betreffenden Raumtypen betrachtet werden können, auch wenn davon ausgegangen werden kann, dass die Punktwolken nicht notwendigerweise statistisch normalverteilt sind: zahlreiche Datensätze liegen innerhalb des durch die Centroiden +/- σ umschriebenen Parameterraumbereich pro Raumtyp und vergleichsweise weniger N-Tupel außerhalb der so definierten Parameterraumbereiche.

Beziehung von Centroiden +/- σ zur Hörsamkeit

Dass die Datensätze eines Raumtyps in für die Raumnutzung charakteristischen Parameterraumbereichen lokalisiert sind sagt jedoch nur bedingt etwas über die Hörsamkeit der Räume aus. Insofern stellt sich die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der in Rankings [3, 4] subjektiv bewerteten Eignung der Räume für deren Nutzung und den Koordinaten der Centroiden und räumlichen Ausdehnungen darum herum. Betrachten wir das Beispiel der Konzertsäle:

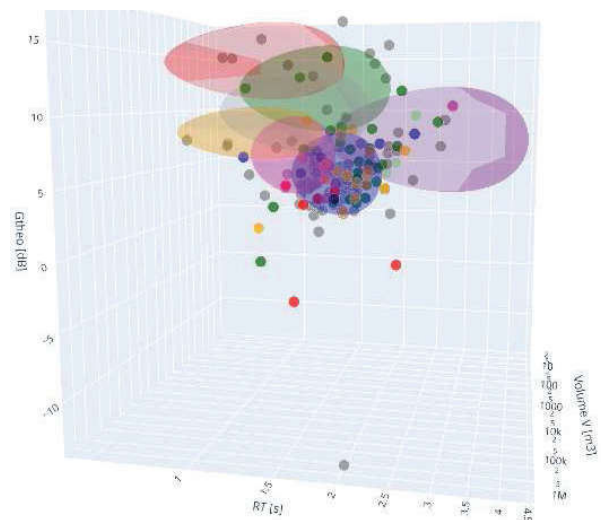


Abbildung 5: Ansicht der Centroiden mit räumlicher Ausdehnung +/- σ im T-V-G_{theo} Plot und den vorliegenden Datensätzen der Konzertsäle. Markerfarbe: Subjektive Bewertung aus Rankings (hellgrün: exzellent, grün: sehr gut, gelb: befriedigend, rot: weniger gut, grau: keine Bewertung)

Aus Abbildung 5 ist ersichtlich, dass die subjektiv als exzellent bewerteten Konzertsäle (hellgrün) außerhalb des für diesen Raumtyp von Centroid $\pm \sigma$ beschriebenen charakteristischen Raumbereichs gelegen sind, und zwar im benachbarten Bereich der Kirchen, wie auch die Datensätze der als weniger gut bewerteten Konzertsäle sich eher im Bereich der Opernsäle befinden oder ganz aus den Raumbereichen herausfallen, die von anderen Centroiden samt Raumbereich darum herum beschrieben werden. Diese qualitative Separation wird noch deutlicher in Abbildung 6, in welcher Centroide für die in Ratings als exzellent bis gut bewerteten Konzertsäle als größerer grüner Punkt ergänzt wurde, und für die weniger guten ein ebensolcher roter.

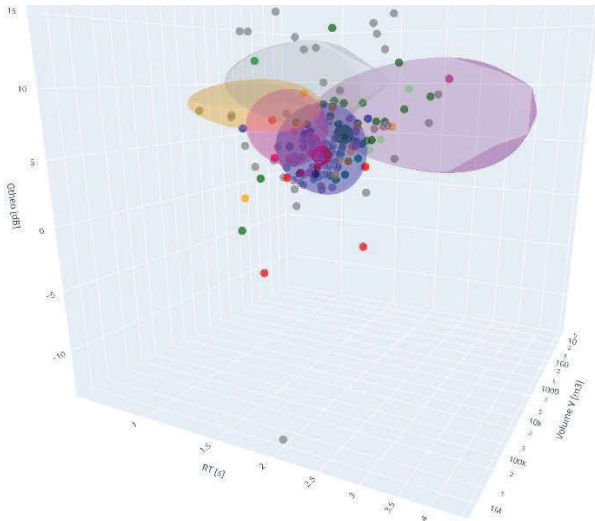


Abbildung 6: Ansicht wie Abbildung 5, Konzertsäle mit 2 Centroiden für gute und weniger gute Säle. Markerfarbe: Subjektive Bewertung aus Rankings (hellgün: exzellent, grün: sehr gut, gelb: befriedigend, rot: weniger gut, grau: keine Bewertung)

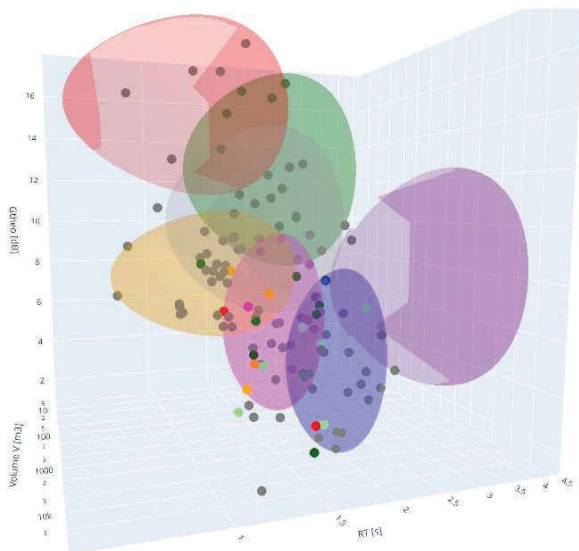


Abbildung 7: Ansicht der Centroide mit räumlicher Ausdehnung $\pm \sigma$ im T-V-G_{theo} Plot und den vorliegenden Datensätzen der Opernsäle. Markerfarbe: Subjektive Bewertung aus Ranking (hellgün: exzellent, grün: sehr gut, gelb: befriedigend, rot: weniger gut, grau: keine Bewertung)

Aus Abbildung 7 wird weiters deutlich, dass auch die subjektiv als sehr gut bewerteten Opernsäle (hellgrün) ebenfalls eher außerhalb des für diesen Raumtyp vom Centroid $\pm \sigma$ beschriebenen charakteristischen Bereichs

liegen, und zwar im benachbarten Bereich der Konzertsäle. Die Datensätze der als weniger gut bewerteten Opernsäle finden sich hingegen eher im Wertebereich der Theatersäle.

Ergebnisse und Fazit

Aus den hier vorgestellten 3+ -dimensionalen Analysen der raumakustischen Parameterwerte der bisher untersuchten Datensätze von 500 Räumen mit Hilfe der räumlichen Centroide samt einem Raumbereich darum herum von $\pm \sigma$ ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Die Centroide der verschiedenen Raumtypen haben unterschiedliche Koordinaten im Parameterraum, die charakteristisch und typisch sind für die Typen;
- aber nicht immer nahe den qua Hörsamkeit am besten bewerteten Datensätzen liegen;
- Die Parameterraumbereiche um die Centroide mit $\pm \sigma$ als Ausdehnung umfassen die für die Raumtypen charakteristischen Parameterbereiche und zeigen eine deutliche Separation im Parameterraum, mit Ausnahme der Probensäle;
- Die Korrelation der Centroide samt Ausdehnung mit der Hörsamkeit hängt ab von Anzahl und Struktur der Daten sowie vom Raumtyp;
- Bei den Opernsälen liegen die in Bezug auf die Hörsamkeit am besten bewerteten Säle im Parameterbereich der Konzertsäle,
- bei den Konzertsälen liegen die am besten bewerteten im Parameterbereich der Kirchen.

Die disjunkte Verteilung der Koordinaten der und Raumbereiche um die räumlichen Centroide der unterschiedlichen Raumnutzungen im Parameterraum ist ein deutliches Indiz dafür, dass die verschiedenen Raumtypen individuelle charakteristische Parameterwerte(bereiche) aufweisen. Es ist fraglich, ob eine „Kompromissakustik“ von Mehrzwecksälen ohne akustische Variabilität den Anforderungen der Nutzung raumakustisch gerecht werden kann, variable raumakustische Maßnahmen erlauben jedoch eine Anpassung der raumakustischen Parameterwerte an die Nutzung, welche sich im Parameterraum durch eine Veränderung der Koordinaten des jeweiligen Raums zeigt.

Literatur

- [1] 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, Proc. 23rd ICA, Aachen, 2019
- [2] Lorenz-K., K.-H.; Reuter, C.; Pfändner, B.; Ostrowski, S.: Mehrdimensionale visuelle Clusteranalyse der raumakustischen Parameterwerte von Wiener Sälen, Kirchen und Auditorien, 47. DAGA, Wien, 2021
- [3] Beranek, L.L.: Subjective Rank-Orderings and Acoustical Measurements for Fifty-Eight Concert Halls, Acta Acustica united with Acustica, May 2003
- [4] Hidaka, T.; Beranek, L.L.: Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan, and the Americas, J. Acoust. Soc. Am., 2000; 107(1):368-83