Mehrdimensionale visuelle Clusteranalyse der raumakustischen Parameterwerte von Wiener Sälen, Kirchen und Auditorien

Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz[1], Christoph Reuter[2], Sebastian Kraync[3], Benjamin Pfändner[4]

[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] *Ecophon Österreich, 1100 Wien, E-Mail: Sebastian.Kraync@ecophon.at*
[4] *Peutz Consult GmbH, 90433 Nürnberg, E-Mail: bp@peutz.de*

Einleitung

Wien ist eine der lebenswertesten Städte mit einem seit Jahrhunderten reichen kulturellen Leben, und verfügt über zahlreiche Kulturstätten und Auditorien sowie musikalisch und musikwissenschaftlich sehr bedeutende Räume.
Für die DAGA 2021 in Wien lag es daher nahe, die Hörsamkeit Wiener Auditorien näher zu untersuchen.
In diesem Beitrag sollen mit Hilfe der Methode der visuellen Clusteranalyse raumakustischer Parameter die akustischen Eigenschaften von über 78 Wiener Räumen und Auditorien analysiert und mit Datensätzen anderer Städte weltweit verglichen werden.

Methode

Auf der DAGA 2017 wurde ein Verfahren zur visuellen mehrdimensionalen Analyse raumakustischer Parameter in Konzertsälen, Opernhäusern und Kammermusikräumen vorgestellt, mit welchem raumakustische Parameterwerte wie z.B. Nachhallzeit T_{Mid}, Stärkemaß $G_{Mid,10m}$ und Raumvolumen V, aber auch Platzanzahl N und Eröffnungsjahr etc. mehrdimensional dargestellt und visuell analysiert werden können [2]. Dabei konnte gezeigt werden, dass die verschiedenen Raumtypen im Parameterraum charakteristische Bereiche einnehmen und bezüglich der Hörsamkeit als gut beurteilte Räume innerhalb der Raumtypen in teildisjunkte Cluster separieren. Dieses Verfahren wurde für die DAGA 2018 [3] und für den ICA 2019 [4] um weitere Raumtypen, Analyseansätze und zahlreiche weitere Raumdatensätze erweitert, welche als Daten-n-Tupel pro Raum bzw. Raumzustand vorliegen.

Aktuelle Digitaltechnologie ermöglicht eine vergleichsweise einfache (3+)-dimensionale grafische Darstellung von Daten. Für die visuelle Analyse der in [2] und [3] dargestellten Daten-n-Tupel pro Raum wurde ein MATLAB®-Skript verwendet, für die erweiterte Anlalyse in [4] ein GNU octave-skript, Version 4.2.1. Für die vorliegende Studie wurde in einer Python-Umgebung eine Dash-App unter der Verwendugn der Plotly-Bibliothek völlig neu implementiert, um die verfügbaren Parameterwerte der Datensätze in (3+)-dimensionalen Graphen auf beliebigen kartesischen Achsen aufzutragen. Jeder Raum / Raumzustand ist dabei als n-Tupel durch eine eindeutige Position im gewählten Parameterraum definiert. Zusätzliche Dimensionen über drei hinaus können durch Markerfarbe, -form und -größe dargestellt und visuell analysiert werden, siehe z. B. Abbildung 1. In diesen Graphen erlaubt eine Vielzahl von Darstellungsparametern wie Parameter, Blickwinkel (Azimut, Elevation), Achsenskalierung (logarithmisch, linear, Bereich) eine fragestellungbezogene Analyse.

Erweiterte Datenbasis

Als Datengrundlage für die multidimensionale Analyse wurden pro Raum folgende Daten erhoben:

- Name, Stadt, Land, Kontinent, Eröffnungsjahr;
- Form (Quader, Sechseck, Fächer, Hufeisen, Surround/Weinberg, Ellipsoid) und Raumbreite W;
- Volumen V, Anzahl der Sitzplätze N, daraus folgend Werte für das spezifische Volumen V/N;
- räumliche Mittelwerte der raumakustischen Parameter für Plätze mit Bühnenabstand $d > 2\ r_H$:
- Nachhallzeit $T_{Mid,occ.}$; Klarheitsmaß $C_{80,Mid,unocc}$; gemessenes theoretisches Stärkemaß $G_{meas,Mid,unocc.}$ sowie $G_{theo,Mid,unocc.}$, das sich aus T und V nach der Diffusfeldtheorie ergibt; $BQI_{Mid,unocc}$, sowie AL_{cons}.
- Qualitätsbewertung (nach Beranek und Hidaka [4]), ergänzt um Bewertungen weiterer Räume (z. B. Historische Stadthalle Wuppertal, Jesus-Christus-Kirche Berlin-Dahlem und Dvořák-Saal im Rudolfinum Prag als Kategorie A).

Die Datenbasis aus [4] wurde für die vorliegende Untersuchung dazu durch Literaturrecherche einschlägiger Quellen und Messungen auf mittlerweile über 500 Daten-n-Tupel erweitert. Abbildung 1 zeigt eine Ansicht der derzeit vorliegenden Datenbasis in einem T-V-G Plot.
Die Markerfarbe bezeichnet darin die Raumtypen, die Markergröße ist proportional zur Anzahl Plätze im Raum.

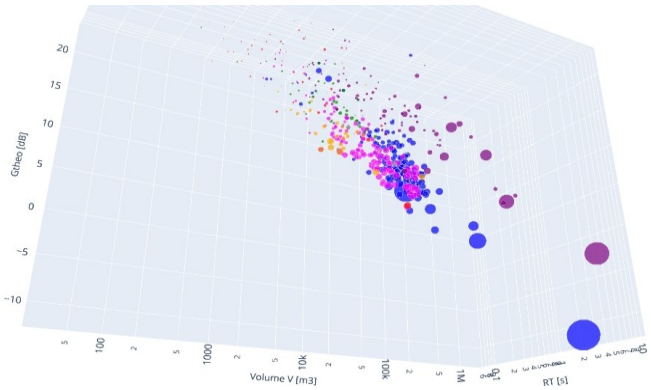

Abbildung 1: Ansicht aller derzeit vorliegenden 500 Datensätze in einem T-V-G Plot. Markerfarben: Raumtyp (Konzertsäle, Kammermusik, Oper, Kirchen, Theater, Hörsäle, Probesäle), Markergröße ~Anzahl Sitzplätze,

Besonders auffallend in Abbildung 1 sind neben der deutlichen Separation der Raumtypen die Datensätze des Petersdoms ganz rechts in purpur, links davon die Stadthalle D, weiter unten die Amsterdam Arena (beide in blau) sowie die Aula Magna in Caracas als unterster roter Datenpunkt.

Datenbasis Wiener Räume und Auditorien

Von diesen bislang mehr als 500 Datensätzen sind 78 Datensätze von Wiener Räumen, siehe Abbildung 2. 55 davon wurden in raumakustischen Messungen in Praktika des Instituts der Musikwissenschaft von März 2012 bis Januar 2021 und daraus hervorgehenden Arbeiten untersucht [1], darunter der goldene Saal und der Brahmssaal des Musikvereins, großer und Mozartsaal des Konzerthauses, Karlskirche, Michaeler Kirche und Votivkirche, Festsaal der alten Universität (nun Österreichische Akademie der Wissenschaften), viele Fest- und andere Säle der Universität sowie die Säulenhalle des Österreichischen Parlaments.
Die restlichen Datensätze aus Wien sind der Literatur entnommen, insbesondere aus [5].

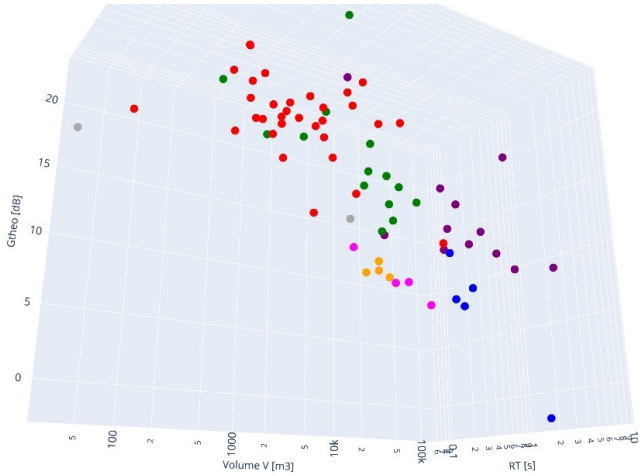

Abbildung 2: Ansicht der 78 derzeit vorliegenden Wiener Datensätze in einem T-V-G Plot. Markerfarbe: Raumtypen (s.o.)

Analyse Wiener Räume und Auditorien

Bereits in Abbildung 2 ist deutlich eine Separation der verschiedenen Raumtypen zu erkennen: Im mittleren Parameterraumbereich des T-V-G-Plots konzentrieren sich die meisten Kammermusikräume, links davon finden sich zunehmend die Hörsäle (in rot; fast ganz links: der raumakustisch für inklusiven Unterricht optimierte Seminarraum des Institus für Musikwissenschaft der Universität), rechts davon zu größeren Volumina hin die Kirchen, darunter die Konzertsäle, darunter zu geringeren Stärkemaßen hin die bisher erfassten Theater und Opernsäle.

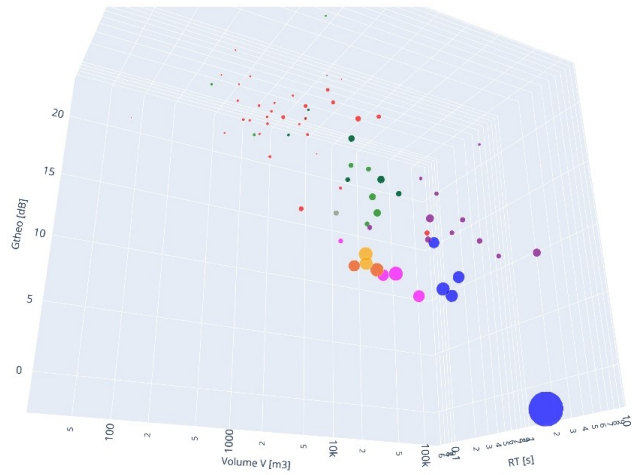

Abbildung 3: Ansicht der 78 erfassten Wiener Datensätze im T-V-G-N Plot. Markerfarben: (s.o.); Markergröße ~ Platzanzahl

In Abbildung 3 ist als zusätzliche Dimension die Platzanzahl über die Markergröße mitberücksichtigt. Die Separation der verschiedenen Raumtypen in teildisjunkten Typenclustern wird damit noch deutlicher.

Spatial Centroids als Raumtypenmittelwerte

Tabelle 1 sind Mittelwerte ausgewählter Parameter für die bisher untersuchten Raumtypen in Wien zu entnehmen, in Klammern sind die Mittelwerte über alle anderen Räume mit aufgeführt. Diese Mittelwerte können wiederum als neue Datensätze/n-Tupel und Punkte im Parameterraum betrachtet werden und bilden dann den jeweiligen *spatial centroid* für den jeweiligen Raumtyp - modulo des Umstands, dass nicht alle Räume des jeweiligen Typs aus Wien erfasst werden konnten, sondern nur eine gewisse Auswahl, die Datenerhebung somit für die Gesamtheit der Räume eines Raumtyps nicht repräsentativ ist. Ungeachtet dessen und inwieweit diese Betrachtungsweise Aussagen über die Hörsamkeit erlaubt, wird eine weitgehende Separation der Raumtypen der betrachteten Wiener Fallbeispiele deutlich, siehe Abbildung 4, wie auch der Raumtypen der anderen Städte, und Unterschiede zwischen diesen *spatial centroids*.

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter Parametermittelwerte - der *spatial centroids* - der bisher untersuchten Wiener Räume, in Klammern der Räume anderer Städte; *kursiv*: bislang nur 1 Wiener Probesaal erfasst

Raumtyp	Parametermittelwerte der untersuchten Räume			
	N	V [m^3]	$T_{Mid,occ.}$ [s]	G_{theo} [dB]
Kirchen	350	12.900	3,9	9,8
10 (80)	(1.230)	(23.000)	(3,3)	(6,5)
Konzert	2.150	14.300	1,7	5,8
12 (158)	(2.010)	(16.400)	(1,8)	(5,4)
Kammerm.	320	2.150	1,6	11,3
15 (32)	(410)	(3.500)	(1,5)	(7,0)
Opernsäle	1.640	5.800	0,9	7,0
5 (115)	(1.290)	(9.100)	(1,4)	(6,8)
Theater	2.070	4.300	0,8	7,8
3 (21)	(780)	(5.300)	(1,2)	(8,7)
Hörsäle	120	1.000	1,3	11,7
28 (7)	(390)	(2.900)	(1,3)	(7,8)
Proberäume	*370*	*2.200*	*0,9*	*11,1*
1 (17)	(240)	(4.500)	(1,4)	(10,0)

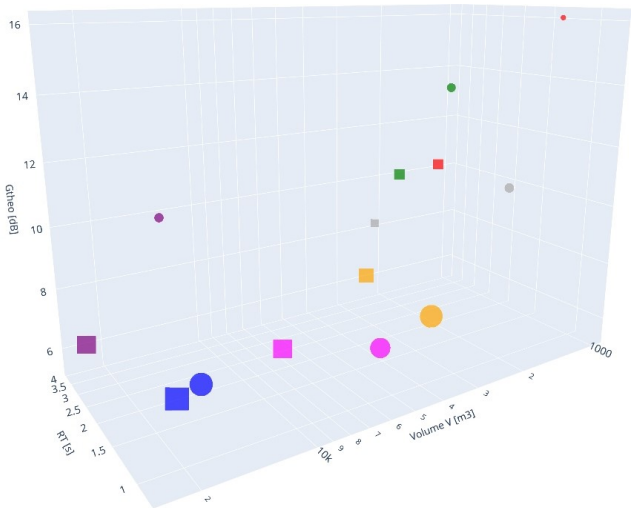

Abbildung 4: *Spatial centroids* der untersuchten Wiener Raumtypen (Punkte) im Vergleich zu denen der anderen Raumtypen des Datenpools (Quadrate) in einem V-T-G-N Plot; Markerfarben: Raumtypen (s.o.); Markergröße ~ Platzanzahl

Erste Ergebnisse Untersuchung Wiener Räume

Es ist interessant, wie sich die Positionen der spatial centroids der hier betrachteten Wiener Raumtypen von denen der restlichen Datenbasis unterscheiden: Die untersuchten Wiener Räume sind gemittelt über fast alle hier betrachteten Raumtypen tendenziell etwas kleiner und weisen etwas höhere Nachhallzeiten, stets jedoch etwas höhere Werte des Stärkemaßes auf (mithin also weniger Absorption) - mit Ausnahme der Theater, von denen in Wien bislang nur die Daten dreier historischer Säle aus [5] in der Betrachtung berücksichtigt werden konnten. Insbesondere die im Rahmen von [1] untersuchten 28 Hörsäle und Seminarräume in Wien zeigen im Mittel eine Tendenz zu geringeren Volumina und höheren Werten des Stärkemaßes als dies bei der Vergleichsgruppe andernorts der Fall ist.

Visualisierung historischer Tendenzen

Betrachtet man mit Hilfe dieser Visualisierungsmethode z.B. die historische Entwicklung der untersuchten Wiener Räume, siehe Abbildung 4, so ist als generelle Tendenz im Verlauf der Entwicklung ein Trend zu mehr Plätzen und somit auch höheren Raumvolumina zu erkennen (graue Pfeile). Auch ein Auftreten neuer Raumtypen wie Opern-, Konzert- und Hörsaalsaal ist darin deutlich identifizierbar:

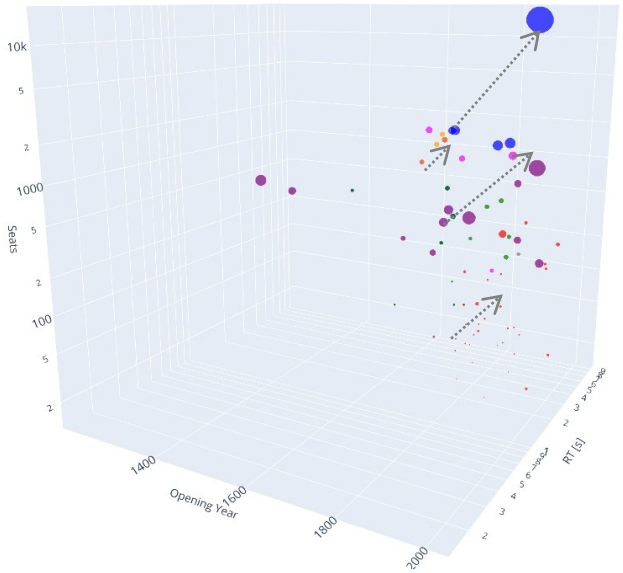

Abbildung 5: Ansicht der Wiener Datensätze in einem T-Y-N-V Plot zum Aufzeigen historischer Tendenzen. Markerfarben: Raumtyp (s.o.); Markergröße ~ Raumvolumen

Visualisierung Effekte akustischer Maßnahmen

Abbildung 4 zeigt einen T-Y-N-Plot der Wiener Räume, in dem der Effekt raumakustischer Maßnahmen sichtbar wird. Das Besipiel rechts unten in Abbildung 4 zeigt den Effekt der Veränderungen durch zielführende raumakustische Maßnahmen im Foyer des Instituts für Kunstgeschichte, links daneben im Hörsaal 2 des Instituts für Musikwissenschaft der Universität durch je einen Datenpunkt vor und nach Durchführung der Maßnahmen, die Pfeile zeigen in Richtung der neuen Situation.
Die Effekte der raumakustischen Optimierungsmaßnahmen sind in diesen raumakustischen Parameterräumen deutlich erkennbar als Positionsänderungen der Datenpunkte.

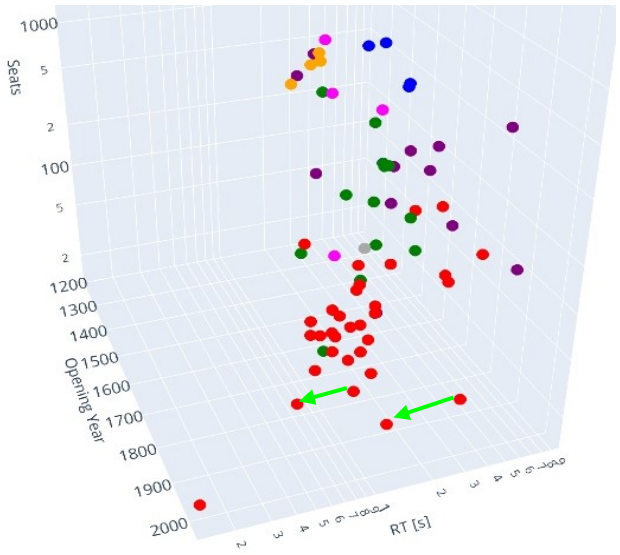

Abbildung 6: Ansicht der Wiener Datensätze in einem T-Y-N Plot mit vorher - nachher-Vergleichen (Pfeile vorher → nachher). Markerfarbe: Raumtyp wie vor.

Fazit

Aus den mehrdimensionalen Analysen der raumakustischen Parameterwerte der bisher untersuchten Daten von Wiener Räumen und Raumtypen ergeben sich folgende Ergebnisse:

- Historische Entwicklungen zeigen sich in solchen Ansichten als Trajektorien in den Parameterräumen, neue Raumtypen entstanden, Platzzahlen wuchsen;
- Effekte raumakustischer Maßnahmen resultieren in Positionsänderungen in den Parameterräumen;
- Die untersuchten Wiener Räume sind im Mittel halliger als die Räume der restlichen Daten, da sie meist weniger Volumen und Absorption aufweisen;
- Verschiedene Raumtypen separieren deutlicher in disjunkten Parameterraumbereichen als anderswo.

Literatur

[1] Lorenz-K., K.-H.; Reuter, C.; Kraync, S.: Raumakustik-Praktika am Institut für Musikwissenschaft der Universität Wien vor und während der Pandemie, 47. DAGA, Wien, 2021

[2] Lorenz-K., K.-H.; Fuß, A.; Pfändner, B.; Ostrowski; S.: Mehrdimensionale visuelle Clusteranalyse raumakustischer Parameterwerte von Konzertsälen, Opernhäusern und anderen Raumtypen, 43. DAGA, Kiel, 2017

[3] Lorenz-K., K.-H.; Fuß, A.; Pfändner, B.; Ostrowski; S.: Mehrdimensionale visuelle Clusteranalyse raumakustischer Parameterwerte: Erweiterung auf andere Raumtypen und Vergleiche Vorher/Nachher, 44. DAGA, München, 2018

[4] 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

[5] Weinzierl, S.: Beethovens Konzerträume, Frankfurt am Main, 2001