

# Mehrdimensionale visuelle Clusteranalyse raumakustischer Parameterwerte von Konzertsälen, Opernhäusern und anderen Raumtypen

Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz<sup>1</sup>, Alexander Fuß<sup>1</sup>, Benjamin Pfändner<sup>1</sup>, Stefan Ostrowski<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> admost Ostrowski, 40225 Düsseldorf, E-Mail: stefan@admost.de

## Einleitung

Die Analyse und Präsentation raumakustischer Parameterwertebereiche von in Bezug auf ihre Hörsamkeit beurteilten Räumen wurde lange in Tabellen und auf zwei Größen beruhenden zweidimensionalen Graphen vorgenommen. Die durch aktuelle Computersoftware zur Verfügung stehenden Möglichkeiten der Datenpräsentation und -analyse erlauben jedoch eine mehrdimensionale Analyse mehrerer raumakustischer Parameter gleichzeitig. Am Beispiel für einen Raum global kennzeichnender raumakustischer Parameterwerte wie Nachhallzeit  $T_{Mid}$ , Stärkemaß  $G_{Mid,10m}$  und Raumvolumen  $V$  soll (ohne Beschränkung der allgemeineren Gültigkeit des vorgestellten Verfahrens) mithilfe mehrdimensionaler Darstellungen verschiedener Beispiele unterschiedlicher Raumtypen im von den Parametern aufgespannten Parameterraum erörtert werden, welche Erkenntnisse aus einer dreidimensionalen Darstellung der die Räume charakterisierenden Parameter-Tripeln in einem solchen Parameterraum gewonnen werden können, z.B. durch schnelle visuelle Analyse. Indem diese Datenanalyse auf eine weitere Dimension erweitert wird, hier z. B. durch Ergänzung der Parameterwerte mit einer Qualitätsbeurteilung aus subjektiven Qualitätsrankings auf Wertequadrupel und eine entsprechende graphische Darstellung, soll in diesem Beitrag aufgezeigt werden, inwieweit für die verschiedenen Raumtypen bezüglich der Hörsamkeit als gut beurteilte Räume als Cluster in einem begrenzten Raumbereich dieses Parameterraums lokalisiert werden können. Letztendlich können aus dieser Analyse wiederum Anforderungen an die Wertebereiche der untersuchten raumakustischen Parameter gewonnen werden, welche als zielführend für eine als gut bewertete Hörsamkeit der verschiedenen Raumtypen betrachtet werden können.

## Motivation

Trotz jahrzehntelanger Forschung und Datensammlungen im Bereich der hochwertigen Raumakustik von Kulturbauten im Allgemeinen und Konzertsälen im Besonderen (siehe hierzu z. B. [2] (darin umfangreiche weitere Literaturangaben, oder auch [4]) ist zu beobachten, dass die herkömmlichen zweidimensionalen Analysemethoden (Korrelation zweier Größen, Graphen) begrenzt sind und ggf. nicht ausreichen, um die komplexen Zusammenhänge der hier beobachteten physikalischen Größen und subjektiven Bewertungen darzustellen und Korrelationen sichtbar zu machen. Für eine anschauliche und vergleichsweise einfache visuelle Analyse der vorliegenden Parameterwerte und Ratings z. B. zu Konzert- und Opernsälen wird hier daher eine mehrdimensionale Betrachtungsweise vorgeschlagen, um das Verständnis der Zusammenhänge zu vertiefen.

## Hörsamkeit und 1/2-dimensionale Betrachtung

Notwendige Vorbedingung für eine ausreichende Hörsamkeit ist i.A. eine Nachhallzeit im der Nutzung gemäßen Wertebereich, siehe hierzu auch Abb. 1.

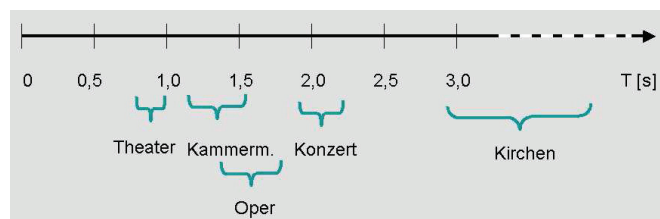


Abbildung 1: Eindimensionale Skala mit geeigneten Wertebereichen der Nachhallzeit verschiedener Nutzungen.

Für eine gute Hörsamkeit sollten jedoch darüber hinaus auch hinreichende Bedingungen erfüllt sein. Dies bedeutet, dass auch die Werte anderer Parameter ebenfalls im der Nutzung angemessenen Wertebereich liegen sollten, wie z. B.: EDT, BQI, LEF,  $C_{80}$  etc.. Eindimensionale Betrachtungen wie in Abb. 1 skizziert sind für eine Erfassung auch der hinreichenden Bedingungen für eine gute Hörsamkeit somit nicht ausreichend. Um auch die hinreichenden Bedingungen zu betrachten, können entsprechende zweidimensionale Betrachtungen angestellt werden; für eine Berücksichtigung mehrerer Größen bzw. Parameter sind dann auch mehrere zweidimensionale Betrachtungen notwendig. Zudem werden Abhängigkeiten zwischen mehreren betrachteten Größen in rein zweidimensionalen Betrachtungen nicht deutlich. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel aus [1] für eine zweidimensionale Darstellung mit darin enthaltener Andeutung einer dritten Größe, des Volumens, wobei die drei Größen  $V$ ,  $T$  und  $G$  im Diffusfeld über Beziehung (1) miteinander gekoppelt sind:

$$G_{theo,Diff} = 45dB - \left[ 10dB \cdot \log_{10} \left( \frac{V}{T} \right) \right] \quad [dB] \quad (1)$$

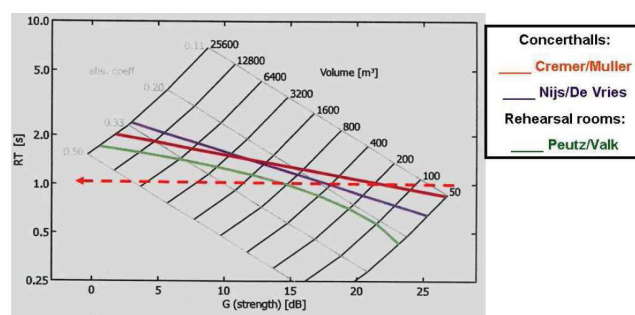


Figure 2. G-RT plot with some design lines [3,4,5]

Abbildung 2: zweidimensionale G-RT-Graphik mit Designlinien für Konzertsäle und Proberäume (aus [1]).

## Datenkategorien

Zumindest prinzipiell beeinflussbare und somit zu betrachtende Design-Größen beim Entwurf neuer Räume sind:

- Raumvolumen  $V$  und Grobgeometrie / Form;
- Absorption: Kapazität (Bestuhlung / Publikum);
- somit das Stärkemaß  $G$ ;
- Raumbreite und maximaler Bühnenabstand;
- Feingeometrie und Diffusion.

Als Datenbasis für eine umfassendere, mehrdimensionale Analyse bietet es sich daher an, pro Saal Daten aus den folgenden Kategorien zu betrachten. Für die weiteren Betrachtungen wurden folgende Daten betrachtet:

- Saalform (Quader, Hexagon, Fächer, Hufeisen, Surround/Weinbergstufen, Ellipsoid, Kalotte);
- Volumen  $V$  (sowie Anzahl Plätze  $N$ , daraus spezifisches Volumen ( $V/N$ ));
- Parameter-Raummittelwerte für den Saal  $d > 2 r_H$ :
  - Nachhallzeit  $T_{\text{Mid, besetzt}}$ ;
  - Stärkemaß  $G_{\text{mess, unbes.}}$  sowie  $G_{\text{theo, unbes.}}$ ;
  - $BQI_{\text{Mid, unbes.}}$ ;
  - Saalbreite vor Bühne,  $B$ ;
  - Klarheitsmaß  $C_{80, \text{Mid, unbes.}}$ ;
  - $AL_{\text{cons, P88, besetzt}}$ ;
- Rating / Rating-Stufe.

## Datenbasis der Untersuchung

Datensammlungen im Bereich der hochwertigen Raumakustik von Kulturbauten und Konzertsälen stellen viele objektive Daten sowie Korrelationen objektiver Daten mit subjektiven Präferenzurteilen [2, 4] zur Verfügung, wobei insbesondere die Ratingergebnisse nach [2] nur eine Möglichkeit der Beurteilung darstellen und durchaus diskutabel sind.

Die vorliegenden Daten können pro Saal in  $N$ -Tupeln pro Raum zusammengestellt werden, siehe hierzu folgende Auszüge aus der Datenbasis in Tabellenform (Tabellen 1-3):

**Tabelle 1:** Verwendete Daten für Opernsäle [2]

Stadt	Saal	Kürzel	Rating	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$T_{\text{mid, bes.}}$ [s]	$G_{\text{mess}}$ [dB]	$BQI_{\text{Mid, u}}$
Buenos Aires	Teatro Colon	TCB	1	21524	1,6	2,4	0,65
Dresden	Semperoper	SOD	2	12500	1,6	2,7	0,72
Mailand	Scala	SCM	3	11252	1,2	-0,3	0,48
Neapel	Teatro di San Carlo	TSC	5	13700	1,1	-0,2	
Paris	Opera Garnier	OGP	7	10000	1,2	0,7	0,50
Prag	Staatsoper	PSO	8	8000	1,2	2,2	0,64
Wien	Staatsoper	SOW	9	10665	1,2	2,8	0,60
New York	Metropolitan Opera	MET	10	24724	1,5	0,5	0,62
London	Royal Opera H.	CGL	14	12250	1,2	0,7	0,53

**Tabelle 3:** Verwendete Daten für Kammermusiksäle [2]

Stadt	Saal	Kürzel	Rating	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$T_{\text{mid, bes.}}$ [s]	$G_{\text{mess}}$ [dB]	$BQI_{\text{Mid, u}}$
Prag	Martinů Hall	MHP		2410	1,8	12,6	0,68
Wien	Brahms-saal	MVB		3390	1,6	13,6	0,77
Wien	Konzerth. Mozarts.	KWM		3920	1,5	10,8	0,70
Berlin	Konzerth. KMS	KKB		2150	1,1	10,9	0,67
Leipzig	Gewandhaus KS	GLK		4300	1,7		1,00
Zürich	Tonhalle Kleiner Saal	TZK		3234	1,6	13,2	0,70

**Tabelle 3:** Verwendete Daten für Konzertsäle [2, 4] (Auszug)

Stadt	Saal	Kürzel	Rating	$V$ [m <sup>3</sup> ]	$T_{\text{mid, bes.}}$ [s]	$G_{\text{mess}}$ [dB]	$BQI_{\text{Mid, u}}$
Wien	Musikverein	WMV	1	15000	2,1	6,6	0,64
Boston	Symphony Hall	BSH	2	18750	1,9	4,2	0,61
Berlin	Konzert-haus	KHB	4	15000	2,0	5,7	0,64
Amsterdam	Concertgebouw	CGA	5	18780	2,0	5,4	0,54
Zürich	Tonhalle	TZG	7	11400	2,0	7,5	0,64
New York	Carnegie Hall	NYC	8	24270	1,7		
Basel	Stadt-Casino	SCB	9	10500	1,8	6,9	0,62
Berlin	Philharmonie	BPH	16	21000	2,0	4,6	0,49
Toyko	Suntory Hall	TSH	17	21000	2,0	3,8	0,53
Bonn	Beethoven halle	BHB	21	15730	1,6		
Leipzig	Gewandhaus	GHL	29	21000	2,0		0,35
München	Philh. am Gasteig	MPG	31	29737	1,8	1,9	0,48
Rotterdam	De Doelen	DDR	33	24070	2,0		0,43
Wien	Konzert-haus	WKH	37	16600	1,8	4,0	0,66
New York	Avery Fisher Hall	AFN	42	20400	1,7		
London	Royal Festival Hall	RFH	46	21950	1,5	1,9	0,54
London	Royal Albert Hall	RAH	58	86650	2,4	0,0	0,39

## Erweiterung auf 3-dimensionale Darstellungen

Computer erlauben eine vergleichsweise simple (3+) - dimensionale graphische Darstellung von Daten. Für die hier vorgestellte Darstellung der in der Datenbasis vorliegenden Werte- $N$ -Tupel pro Raum wurde ein MATLAB<sup>®</sup>-Programm geschrieben, in welchem die Parameter-Raummittelwerte ( $T$ ,  $V$ ,  $G_{\text{mess}}$ , EDT,  $BQI$ ,  $C_{80}$  etc.) beliebig auf die Achsen eines dreidimensionalen, kartesischen Koordinatensystems verteilt werden können. Eine Vielzahl von Eingabeparametern wie Betrachtungswinkel (Azimuth, Elevation), Achsenskalierung (linear, logarithmisch, Wertebereich), Markerfarbe und -form etc. erlaubt es, die Eingangsdaten darin mehrdimensional in unterschiedlicher Art relativ zueinander darstellen und Abhängigkeiten deutlich machen zu können.

Für die hier vorgeschlagene Darstellung kann man ohne Beschränkung der Allgemeinheit einen zunächst als orthogonal angenommenen Parameterraum aus vorerst 3 beliebigen Parametern aufspannen, hier z. B.  $T_{mid, bes.}$ ;  $G_{mess, mid, u}$  und  $V$ , um diese 3-dim. Darstellung von Tripeln einer visuellen Analyse zu unterziehen, siehe für alle Raumtypen z.B. Abbildung 3.

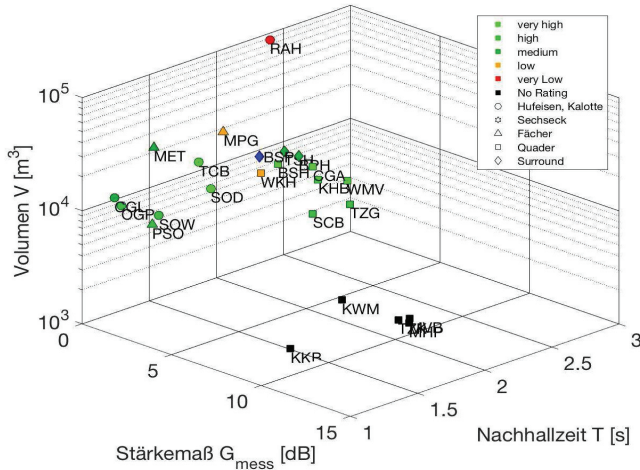


Abbildung 3: Parameterraum T / G / V + Form + Rating

Als weitere Dimensionen sind in Abbildung 3 die Raumform durch die Form des Markers und der Wert des Qualitätsratings durch die Farbe der Marker ersichtlich; Räume ohne Rating (hier: Kammermusiksäle) haben hier schwarze Marker.

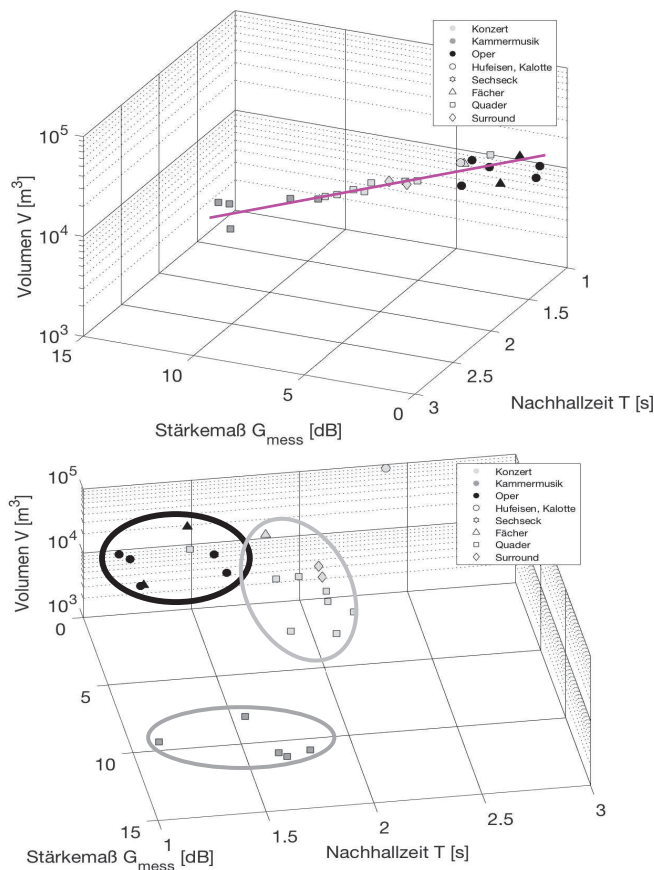


Abbildung 4: Parameterraum T/V/G+Form, alle Raumtypen: oben: Schnittebene mit Abhängigkeit aus Beziehung (1); unten: senkrechte Aufsicht auf Ebene mit Separation der Raumtypen

Es ergibt sich, dass in einer solchen 3-dim. Betrachtung, welche unter den unterschiedlichsten Betrachtungswinkeln möglich ist, Abhängigkeiten zwischen den visualisierten Größen deutlich sichtbar werden, geeignet gewählte Betrachtungswinkel vorausgesetzt:

Es ergibt sich, dass die hier o.B.d.A. zunächst gewählten, den Parameterraum aufspannenden Größen  $T_{mid, bes.}$ ;  $G_{mess, mid, u}$  und  $V$  augenscheinlich *keine* unabhängige Größen darstellen, denn bei entsprechendem Winkel liegen die hier betrachteten Räume bis auf einige Ausreißer an den Enden (Opernsäle) nahezu auf einer Geradenprojektion im Raum, siehe Abbildung 4 (oben, pinkfarbene Linie).

Senkrecht dazu betrachtet, stellt sich heraus, dass die T / G / V - Tripel aller Räume aller hier betrachteten Raumtypen im Parameterraum *in einer Ebene* liegen und sich für die verschiedenen Raumtypen in verschiedenen Raumbereichen *Cluster* bilden, siehe Abbildung 4 (unten). Dies ist ein Hinweis, dass bei Abständen  $d > 2r_H$  in den meisten der hier betrachteten Räume annähernd ein Diffusfeld vorliegt.

### 3-dim. Darstellung unabhängiger Parameter

Die Darstellung im mehrdimensionalen Parameterraum sollte besonders aussagekräftig sein, wenn ein Parameterraum gewählt wird, in welchem die aufspannenden Parameter voneinander möglichst unabhängig sind. Um voneinander unabhängige Parameter zu identifizieren, wurden die vorhandenen Datensätze auf die Korrelation jeweils zweier Parameter hin untersucht. Tabelle 4 zeigt beispielhaft die Ergebnisse dieser Betrachtungen für den Raumtyp der Konzertsäle (**fett**: geringe Korrelation):

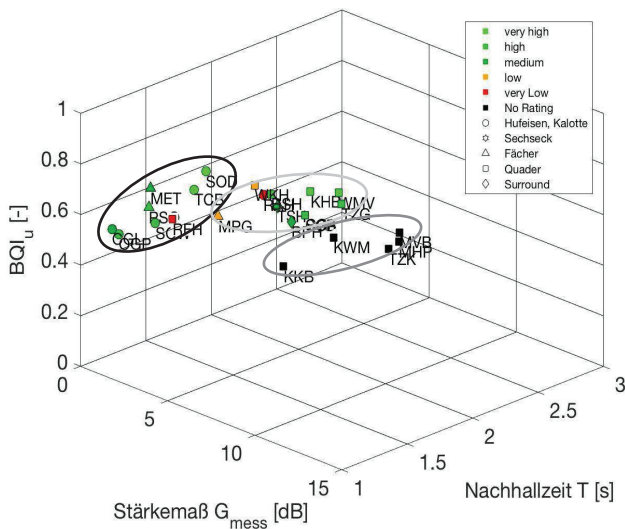
Tabelle 4: Konzertsäle, Korrelationskoeffizienten der Parameter

	V	$T_{mid, bes.}$	$G_{mid, mess}$	$G_{mid, theo}$	$BQI_{mid, u}$	$C_{80, mid, u}$
<b>V</b>	X					
<b><math>T_{mid, bes.}</math></b>	<b>0,12</b>	X				
<b><math>G_{mid, mess}</math></b>	<b>-0,81</b>	<b>-0,07</b>	X			
<b><math>G_{mid, theo}</math></b>	<b>-0,80</b>	<b>0,33</b>	<b>0,97</b>	X		
<b><math>BQI_{mid, u}</math></b>	<b>-0,53</b>	<b>-0,19</b>	<b>0,79</b>	<b>0,54</b>	X	
<b><math>C_{80, mid, u}</math></b>	<b>0,28</b>	<b>-0,60</b>	<b>-0,83</b>	<b>-0,38</b>	<b>-0,21</b>	X
<b>Rating</b>	<b>0,63</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,87</b>	<b>-0,74</b>	<b>-0,60</b>	<b>0,82</b>

Ähnliche Korrelationen ergeben sich auch für die hier betrachteten Datensätze der Kammermusik- und Opernsäle. Bei den Daten aller hier betrachteten Raumtypen ergibt sich eine sehr hohe Korrelation (*kursiv*) von gemessenen Werten des Stärkemaßes  $G_{mid, mess}$  mit den nach der für die Diffusfeldtheorie aus den Werten für Nachhallzeit und Volumen abgeleiteten Beziehung (1) berechneten theoretischen Werten des Stärkemaßes  $G_{mid, theo}$ . D. h., dies ist eine Bestätigung der zuvor anhand der Clusterbildung im T/V/G-Raum gefundenen Beobachtung, dass bei den meisten der hier betrachteten Räume/Datensätze ein Diffusfeld vorliegt; i.d.R. handelt es sich um sabinesche Räume mit kompaktem Volumen.

Nota Bene: Die Korrelation des Ratings (hier das aus [2]) mit Parametern ist *nicht* unabhängig von den verschiedenen Parametern, sondern korreliert hier am besten mit  $G_{mid, mess}$ . Unabhängige Parameter bei den hier betrachteten Raumdatensätzen und Raumtypen sind z. B.:  $T_{mid, bes.}$  und  $G_{mess, unbes.}$ , bzw.  $T_{mid, bes.}$  und  $BQI_{mid, unbes.}$ .

Es liegt nahe, diese 3+-dimensionale Darstellung von Daten-N-Tupeln auf den von den Parametern T/G/BQI aufgespannten Parameterraum anzuwenden, s. z. B. Abb. 5:

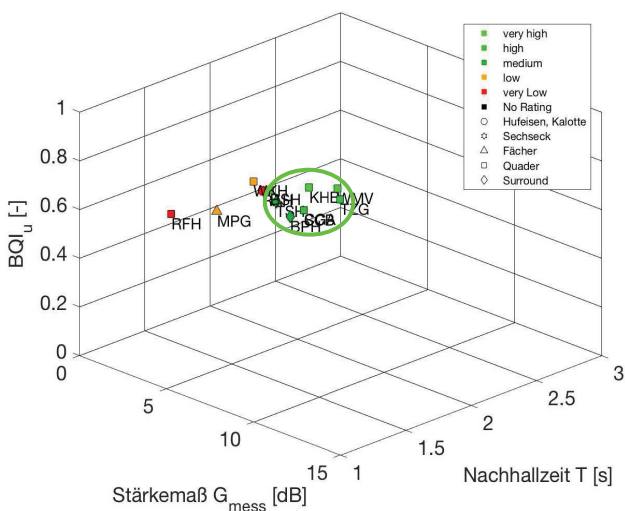


**Abbildung 5:** Parameterraum T/G/BQI + Form + Rating (Farbe): Alle Raumtypen, mit Separation der Typen in Clustern

Die visuelle Analyse zeigt deutlich die - in obiger Abbildung durch Ellipsen hervorgehobene - Separation der verschiedenen Raumtypen in Clustern in disjunkten Raumbereichen des Parameterraums T/G/BQI.

### Clusterbildung der Räume hohen Ratings

Innerhalb der Raumtypen-Cluster fallen Subgruppen auf, welche hohe Rating-Bewertungen gemäß [2] aufweisen: Räume mit Top-Rating gemäß [2] lassen sich in den Darstellungen von Abbildung 3 und Abbildung 6 als kleinere Sub-Cluster im mittleren Raumbereich der Raumtypen-cluster lokalisieren, siehe z. B. grüne Ellipse in Abb. 6 für den Raumtyp Konzertsäle. Deutlich außerhalb dieser Sub-Raumcluster liegende Räume weisen in den hier betrachteten Datensätzen auch keine hohen Qualitätsbewertungen im Rating [2] auf.



**Abbildung 6:** Raum T/G/BQI + Form + Rating: Konzertsäle. Hohe Ratings liegen in kleinen Raumbereichen der Cluster vor.

### Nutzen für die Beratung

Hieraus kann sich ein unmittelbarer Nutzen für die raumakustische Beurteilung und Beratung ergeben:

zum Beispiel lässt sich bereits zu Beginn einer Beratung mit wenigen Daten wie Raumvolumen und Nachhallzeit  $T_{mid}$  (welche sich aus der Absorption z. B. des Publikums ergibt) und dem sich daraus ergebenden Wert des Stärkemaßes  $G_{mid}$  mit Hilfe der Darstellung im Parameterraum T/V/G die relative Position eines neuen Raums in Relation zu den Raumtypenclustern visuell darstellen.

Mit Hilfe dieser Darstellung lässt sich einfach erläutern, wo im Parameterraum ein neuer Raum lokalisiert wäre, siehe z. B. die blaue Raute in Abb. 3, und mit den Beteiligten besprechen, dass z. B. ein Raum mit den Parameterdaten wie denen dieses Beispiels wahrscheinlich kein hervorragender Konzertsaal wäre - noch ein sehr guter Opernsaal.

### Fazit

Mittlerweile sind viele objektive Daten der raumakustischen Eigenschaften verschiedener Räume und Raumtypen verfügbar und darüber hinaus auch subjektive Qualitätsbeurteilungen in Form von (diskutablen) Ratings wie z. B. in [2]. Diese Daten liegen inklusive Rating in N-Tupeln pro Saal vor.

Die hier vorgestellte Methode 3+-dimensionaler Darstellung der vorliegenden raumakustischen Daten von Sälen in Kulturbauten in mehrdimensionalen Parameterräumen erlaubt einfache und aussagekräftige visuelle Analysen und kann somit das Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge in Bezug auf die Hörsamkeit erhöhen - mit direktem Nutzen für die Beratung:

- verschiedene Raumtypen separieren in Clustern in verschiedenen Raumbereichen des Parameterraums;
- innerhalb der Typencluster sind Subgruppen hoher Ratings in Sub-Raumbereichen identifizierbar;
- Abhängigkeiten der den Raum aufspannenden Parameter können visuell identifiziert werden;
- so sind z. B.  $G_{mid,mess}$  und  $G_{mid,theo}$  für die hier betrachteten Räume hoch korreliert (für  $d > 2 r_H$ );
- Es können Erkenntnisse über die zugrunde liegenden Zusammenhänge gewonnen werden, so z. B. dass die Majorität der hier untersuchten Räume (für  $d > 2 r_H$ ) ein vglw. diffuses Schallfeld aufweist;
- Zudem bietet sich die Möglichkeit eines Tests, wo im Parameterraum ein neuer Saal lokalisiert wäre, was Rückschlüsse auf das Rating ermöglicht.

### Literaturangaben

- [1] Luykx, M.P.M.; Vercammen, M.L.S.: Natural speech intelligibility in theatres in relation to its acoustics, ISRA, Melbourne, 2010
- [2] Beranek. L.: Concert and Opera Houses, 2nd Edition, New York, 2004
- [3] Lorenz-K., K.-H.: Werte binauraler Parameter in Europäischen Konzertsälen, DAGA, Nürnberg, 2015
- [4] Lorenz-K., K.-H., Vercammen, M.L.S.: Acoustical Survey of 25 European Concert Halls, NAG-DAGA, Rotterdam, 2009