

## Zur Raumakustik repräsentativer Säle von Schloss Benrath

Tanja Graef<sup>1</sup>, Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz<sup>2</sup>, Benjamin Pfändner<sup>2</sup>, Alexandra Wagner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> RWTH Aachen, E-Mail: tanja.graef@rwth-aachen.de

<sup>2</sup> Peutz Consult GmbH, 40599 Düsseldorf, E-Mail: khl@peutz.de

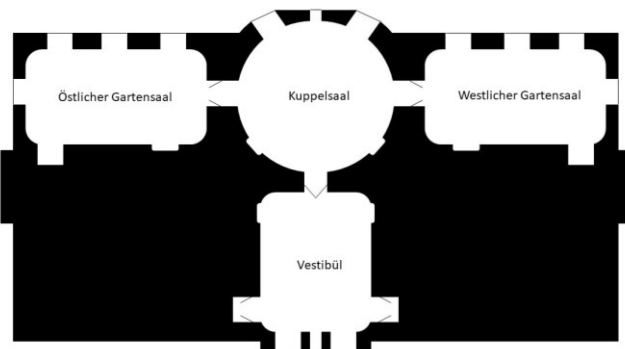
<sup>3</sup> Ruhr-Universität Bochum, E-Mail: alexandra.wagner-q4a@ruhr-uni-bochum.de

### Einleitung

Schloss Benrath in Düsseldorf ist ein von Nicolas de Pigage in der Mitte des 18. Jahrhunderts für Kurfürst Carl Theodor von der Pfalz erbautes Lust- und Jagdschloss. Im Innern des Schlosses gibt es verschiedene repräsentative Säle, unter anderem für die Aufführung von Musik. Da die Räume in nahezu unverändertem Originalzustand erhalten sind, eignen sie sich gut für raumakustische Bestandsmessungen mit anschließendem Vergleich mit anderen Räumen gleicher Bauzeit und heute empfohlenen Optimalwerten akustischer Parameter.

### Beschreibung der untersuchten Säle

Im Rahmen der raumakustischen Bestandsmessungen wurden die repräsentativen Säle des Erdgeschosses des Haupthauses (Corps de Logis) von Schloss Benrath untersucht. Dabei handelt es sich um die in Abbildung 1-3 abgebildeten vier Säle: Vestibül, Kuppelsaal, sowie westlicher und östlicher Gartensaal.



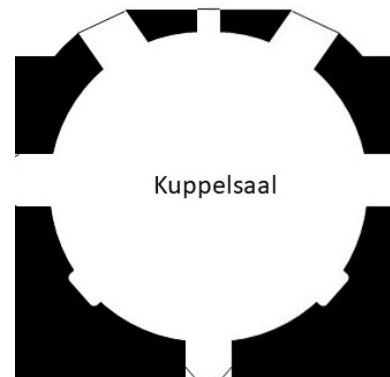
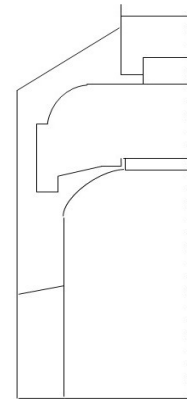
**Abbildung 1:** Schloss Benrath: Grundriss Erdgeschoss des Corps de Logis mit den untersuchten Sälen

Beim Vestibül und den beiden Gartensälen handelt es sich jeweils um quaderförmige Räume.

Das Vestibül hat einen Marmorfußboden und ist von Wänden aus verputztem Mauerwerk umgeben. Die beiden Gartensäle, die architektonisch im Wesentlichen gleich sind, haben einen Parkettfußboden und sind Holzvertäfelt.

Der zentrale Kuppelsaal hat einen kreisförmigen Grundriss mit vielen großen Rücksprünge und Struktur-Details. Nach oben schließt der Kuppelsaal mit einer zweifachen Gipsputz-Kuppelkonstruktion jeweils mit zentraler Öffnung ab. Oberhalb der zweiten Kuppel gibt es in der Dachlaterne eine umlaufende Empore (siehe Abbildung 2 und 3). Diese

Empore bietet Platz für bis zu 8 Musikern, die vom Boden des Kuppelsaals aus nicht sichtbar sind.



**Abbildung 2:** Kuppelsaal: Prinzipskizze Schnitt mit Laterne und Grundriss



**Abbildung 3:** Fotos der untersuchten Säle. Links oben: westlicher Gartensaal, rechts oben: Vestibül, links unten: zentraler Kuppelsaal und rechts unten: Empore in Laterne über der (oberen) Kuppel des Kuppelsaals

## Raumakustische Messungen

Um die Raumakustik der einzelnen Säle und auch die Wirkung im Ganzen zu beurteilen, wurden detaillierte raumakustische Messungen durchgeführt. Dabei handelte es sich in allen Räumen im unbesetzten Zustand um Messungen der Nachhallzeiten nach dem Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen und um Messungen der Schallpegelabnahme mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle.

Im östlichen Gartensaal und im Kuppelsaal wurde außerdem mit Besetzungssimulation [1] gemessen.

Zudem wurden im östlichen Gartensaal und im Kuppelsaal Raumimpulsantworten mit omnidirektionaler Quelle und dem Maximalfolgenmesssystem MLSSA10WIRev9 im unbesetzten Zustand und mit Besetzungssimulation gemessen. Im Kuppelsaal wurden dabei Impulsantworten mit Senderpositionen am Boden des Kuppelsaals und in der Laterne gemessen.

Die Messungen wurden konform der Angaben in DIN EN ISO 3382-1:2009 durchgeführt und ausgewertet.

## Auswertung der Messungen

Die Ergebnisse der oben beschriebenen Messungen wurden mit verschiedenen Auswertungsprogrammen ausgewertet.

Mittels des Programms Spectralyzer v. 3.6.2 der Peutz bv wurde jeweils die Nachhallzeit als  $T_{30}$  pro Oktavband, Abklingvorgang und Position ermittelt. Anschließend wurden aus den Abklingvorgängen mittels arithmetischer Mittelungen die Raummittelwerte gebildet.

Die Schallpegelabnahme mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle wurde mit Spectralyzer 3.6.2 und zusätzlich mit einer Tabellenkalkulation ausgewertet, um das Stärkemaß  $G$  für das Oktavband mit Mittenfrequenz 1 kHz zu ermitteln.

Die Raumimpulsantworten wurden mittels eines Matlab-Skripts der Firma Peutz Consult GmbH ausgewertet [2].

## Vergleich verschiedener Auswertungsprogramme

Zur Validierung der Auswertungsergebnisse der Raumimpulsantworten wurden die Raumimpulsantworten ausgewählter Messpfade neben der Auswertung mit dem Matlab-Skript auch mit dem Aurora-Plugin für Adobe Audition von A. Farina [3] und den MLSSA-Algorithmen ausgewertet [4].

Verglichen wurden die Ergebnisse für die Werte des Klarheitsmaßes  $C_{80}$  und der Early Decay Time EDT an 11 Messpfaden. Ergebnis dieses Vergleichs ist, dass die Messergebnisse der verschiedenen Auswertarten an den meisten Positionen nahezu identisch sind bzw. nur leicht abweichen. Die Werte des Matlab-Skripts und der MLSSA-Algorithmen sind dabei zumeist sehr ähnlich. Im Vergleich zum Aurora-Plugin gibt es aber gewisse Unterschiede, insbesondere bei der EDT von bis zu ca. 32%. Diese Unterschiede liegen somit z. T. über der Just Noticeable Difference (JND). Dies ist ggf. auf eine gewisse Nicht-Linearität der Abklingkurve und eine große Abhängigkeit der Resultate von Auswertefenster und Analysealgorithmus zurückzuführen.

## Messergebnisse

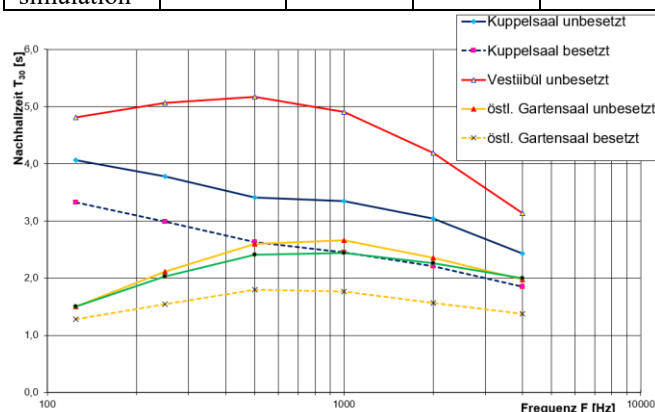
### A) Nachhallzeiten

Tabelle 1 (Einzahlwert = arithmetisches Mittel der Oktavbänder mit Mittelfrequenzen von 125 bis 4.000 Hz) und Abbildung 4 (frequenzabhängig) zeigen die gemessenen Raummittelwerte der Nachhallzeiten.

Die Nachhallzeiten des westlichen und östlichen Gartensaals sind fast identisch, was zeigt, dass beide Säle nicht nur architektonisch, sondern auch akustisch global nahezu gleich sind.

**Tabelle 1:** Gemessene Nachhallzeiten  $T_{30}$  [s], Raummittelwerte

Variante	Kuppelsaal	Gartensaal ost	Gartensaal west	Vestibül
Unbesetzt	3,3 s	2,5 s	2,4 s	4,8 s
Besetzungssimulation	2,4 s	1,7 s	-	-



**Abbildung 4:** Frequenzabhängige Raummittelwerte der Nachhallzeiten  $T_{30}$  der einzelnen Räume

### B) Stärkemaße

Tabelle 2 zeigt die gemessenen und theoretisch gemäß der Diffusfeldtheorie nach Kuttruff und Barron berechneten Werte des Stärkemaßes  $G_{\text{mess},10\text{m}}$  und  $G_{\text{theo}}$  pro Raum und Messvariante für das Oktavband mit Mittenfrequenz 1 kHz.

**Tabelle 2:** Gemessene und theoretisch berechnete Werte des Stärkemaßes  $G$  [dB] für das 1 kHz-Oktavband in den einzelnen Sälen

$G$ [dB] (1 kHz)	Raumzustand	Kuppelsaal	Gartensaal ost	Gartensaal west	Vestibül
$G_{\text{mess},10\text{m}}$	Unbesetzt	+21,0	+22,2	+21,9	+23,1
$G_{\text{theo}}$	Unbesetzt	+21,2	+23,2	+22,9	+24,1
$G_{\text{mess},10\text{m}}$	Besetzung simuliert	+17,4	+20,2	-	-
$G_{\text{theo}}$	Besetzung simuliert	+20,1	+21,4	-	-

Es wird deutlich, dass in allen Räumen und Zuständen die Differenz zwischen  $G_{\text{mess},10\text{m}}$  und  $G_{\text{theo}} \leq 1$  dB ist, mit Ausnahme des Kuppelsaals im Zustand mit simulierter Besetzung. Dies bedeutet, dass es sich in allen Zuständen außer jenem um Räume mit nahezu diffusem Schallfeld handelt. Nur im besetzten Kuppelsaal liegt dies nicht vor. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Absorption am Boden (im Projektionsbereich der Kuppel) das Schallfeld weniger gleichmäßig macht.

### C) Raumimpulsantworten

Die Auswertung der Raumimpulsantworten und der daraus ermittelten Parameter lieferte folgende Ergebnisse:

Zunächst wurde das Klarheitsmaß  $C_{80}$  für den Frequenzbereich der Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen 125 bis 4.000 Hz positionsabhängig ermittelt. Hierbei ist insbesondere die Abnahme des Klarheitsmaßes im Kuppelsaal für die Quellpositionen in der Empore über der Kuppelkonstruktion im Vergleich zu den Quellpositionen auf dem Boden um etwa 3 dB zu erwähnen. Die Raummittelwerte der Klarheitsmaße lagen (unbesetzt) im Gartensaal bei +0,5 dB, im Kuppelsaal für die Quellpositionen am Boden bei etwa -3,3 dB, und für die Quellpositionen auf der Empore bei ca. -6,2 dB.

Die Auswertung der EDT für den Frequenzbereich der Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen 125 bis 4.000 Hz ergab, dass die Raummittelwerte im östlichen Gartensaal leicht unterhalb der Werte der Nachhallzeit  $T_{30}$  und im Kuppelsaal in einem vergleichbaren Bereich wie die Werte der Nachhallzeit  $T_{30}$  liegen.

Die Beurteilung der Reflexionsstruktur auf Grundlage der gemessenen Raumimpulsantworten zeigte, dass im Gartensaal und im Kuppelsaal keine deutlich störenden echoartigen Effekte zu erkennen sind. In typischen Breitband-ETCs, wie beispielsweise im Kuppelsaal ohne Besetzungssimulation in Abbildung 5, sind geringfügige Pegelsprünge erkennbar. Zwar gibt es insbesondere im Kuppelsaal, aber auch im Gartensaal, in den tiefen Frequenzen flatterechoartige Reflexionsmuster zwischen den raumbegrenzenden Flächen, allerdings sind diese nicht in mehr als (den untersten) zwei Oktavbändern erkennbar. Ein Beispiel für eine solche Reflexionsstruktur aus dem Kuppelsaal ist für das Oktavband 125 Hz in Abbildung 6 dargestellt. Da diese Pegelsprünge allerdings deutlich unterhalb 4 dB gegenüber der Enveloppe betragen, sind sie als akzeptabel und nicht störend einzustufen.

Bezogen auf die Raumgeometrie entsprechen diese Resultate für den Gartensaal der Erwartung, da es sich hier um einen quaderförmigen Saal mit gewissen streuenden Details handelt.

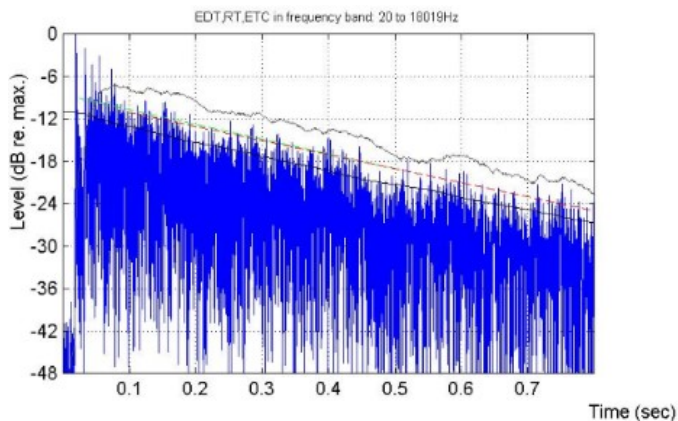


Abbildung 5: Beispiel einer typischen Breitband-ETC im Kuppelsaal mit geringfügigen Pegelsprüngen

Dass auch im Kuppelsaal mit kreisförmigem Grundriss und konkaver Kuppelkonstruktion keine starken echoartigen Effekte auftreten, spricht dafür, dass die Rücksprünge (Türen und Kamine) vom Grundriss, wie sie in Abbildung 2 dargestellt sind, und die Tatsache, dass es sich nicht um eine kreisförmige, sondern toroidale Kuppelkonstruktion handelt, solche weitgehend zumindest mittel- und hochfrequent verhindern.

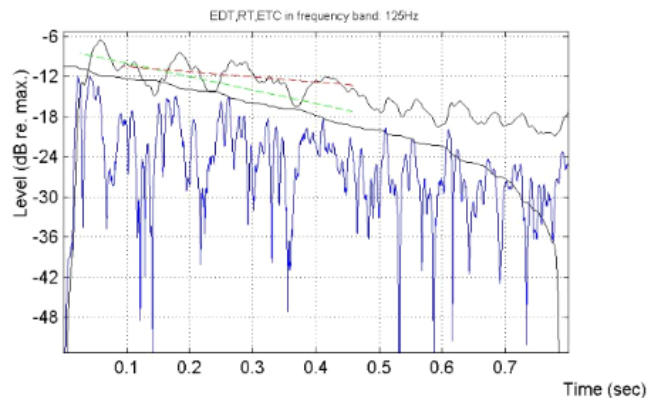


Abbildung 6: Beispiel für eine tieffrequente (Oktavband 125 Hz) flatterechoartige Reflexionsstruktur im Kuppelsaal

### Bewertung der Messergebnisse

Zur Beurteilung der Messergebnisse wurde zunächst eine Literaturanalyse mit besonderem Fokus auf die Raumakustik von Kammermusik- und Fürstensälen des 18. Jahrhunderts durchgeführt. Besonders aussagekräftig sind hier [5] und [6].

Ein Vergleich der in diesen Quellen aufgeführten Parameterwerte mit den für die einzelnen Säle hier gemessenen Werten führt zu der Bewertung, dass die repräsentativen Säle von Schloss Benrath:

- a) in hohem Maße typisch für die Zeit, und
- b) (auch) nach heutigen Maßstäben gut bis sehr gut geeignet sind für Kammermusik-Aufführungen.

Das Vestibül – welches wohl eher als Empfangsraum denn als typischer Aufführungssaal von Musik diene – fällt mit verhältnismäßig hohen Werten von Nachhallzeit und Stärkemaß heraus. Allerdings führt dies zu einer eindrucksvollen Wirkung des Raumes bei Empfangen, was den Machtanspruch des Hausherrn untermalt.

Kuppelsaal und Gartensäle sind für die Aufführung damaliger Kammermusik gut bis sehr gut geeignet: In allen drei Sälen liegt die Nachhallzeit im oberen Bereich der empfohlenen Werte der genannten Literatur. Das relativ hohe Stärkemaß führt dazu, dass auch kleine(re) Besetzungen eindrucksvoll wirken. Die Auswertung der Impulsantworten hat in diesen Räumen keine störenden echoartigen Effekte bzw. Impulsantwortstrukturen ergeben.

Im Kuppelsaal kommt es bei einer Positionierung der Musiker auf der Empore über dem Scheitelloch der Kuppelkonstruktion zu einem ganz besonderen akustischen Effekt: Die Abnahme des Klarheitsmaßes führt dazu, dass die Musik den Charakter bekommt, aus größerer Entfernung gespielt zu werden, zugleich sind die Musiker dabei von unten nicht zu sehen.



## In-Situ-Auralisation

Um den Klang im Kuppelsaal und insbesondere den Unterschied zwischen einer Aufstellung von Musikern am Boden des Kuppelsaals und in der Laterne erfahrbar zu machen, wurde zusätzlich zu den Messungen eine In-Situ-Auralisation durchgeführt und über Ton- und Bildaufzeichnungen dokumentiert. Diese Aufnahmen wurden im Vortrag im Vergleich in Ausschnitten vorgeführt.

Dabei wurde zeitgenössische Musik der Bauzeit des Schlosses verwendet, komponiert von C. P. Stamitz, einem Orchestermittglied des Hausherrn: und zwar das Flötenkonzert Op. 29. Abbildung 7 zeigt ein Foto der dabei verwendeten Positionierung von Musikern in der Laterne über der Kuppel.



Abbildung 7: In-Situ-Auralisation in der Laterne des Kuppelsaals

## Zusammenfassung

Zur Bewertung der Hörsamkeit von Kuppelsaal, westlichem und östlichem Gartensaal sowie Vestibül von Schloss Benrath in Düsseldorf wurden detaillierte raumakustische Messungen des historischen Bestandes durchgeführt.

Bei diesen Messungen wurden im Kuppelsaal und im östlichen Gartensaal im unbesetzten und besetzten Zustand sowie im westlichen Gartensaal und dem Vestibül im unbesetzten Zustand die Nachhallzeit und die Schallpegelabnahme mit zunehmendem Abstand zur Quelle bestimmt. Zusätzlich wurden im Kuppelsaal und im östlichen Gartensaal Raumimpulsantworten im unbesetzten Zustand und mit Besetzungssimulation gemessen.

Anhand von Literaturquellen, die sich mit heutigen Optimalwerten und vergleichbaren Musiksälen derselben Epoche beschäftigt und den darin enthaltenen Anhaltswerten wurden die Messergebnisse beurteilt.

Die Auswertung und Bewertung der Messergebnisse ergaben, dass das Vestibül der Raum mit der höchsten Nachhallzeit und dem höchsten Stärkemaß ist. Für die Nutzung als Empfangshalle im 18. Jahrhundert ist dies durchaus positiv, da ein Empfang darin dadurch besonders eindrucksvoll wirkte.

Die beiden Gartensäle sind gemäß den Messergebnissen nicht nur architektonisch, sondern auch akustisch nahezu identisch. Mit ihrer Nachhallzeit, hohen Werten des Klarheitsmaßes und nur geringen Ausprägung echoartiger Effekte eignen sich die Räume gut für die Aufführung von Kammermusik. Auch hier fallen die Werte des Stärkemaßes

verhältnismäßig hoch aus. Dies widerspricht allerdings nicht der Nutzung für Kammermusik, sondern bereits Aufführungen mit kleinen Besetzungen wirken darin beeindruckend.

Für die Quellpositionen auf dem Boden des Kuppelsaals ist die Raumakustik in Bezug auf Klarheitsmaß, EDT und Nachhallzeit vergleichbar mit anderen Fürstensälen der Epoche. Für alle Quellpositionen im Kuppelsaal wurde festgestellt, dass trotz der potenziell problematischen konkaven Primärstruktur der Deckenkuppel keine stark beeinträchtigenden echoartigen Effekte oder Fokussierungserscheinungen in der Hörebene auftreten. Dies zeigt, dass die Sekundärstruktur gut wirksam ist.

Der Kuppelsaal hat darüber hinaus als architektonische Besonderheit eine Musikerempore, die sich vom Boden des Kuppelsaals aus nicht sichtbar über dem Scheitelloch der Kuppel in einer Laterne befindet. Es wurden sowohl Quellpositionen auf dem Boden des Kuppelsaals als auch in dieser Laterne untersucht.

Bei den Quellpositionen in der Laterne führt eine Verringerung des Klarheitsmaßes zu dem Eindruck eines Fernorchesters. Die Werte des Klarheitsmaßes sind dennoch nicht so gering, dass Musikaufführungen beeinträchtigt würden.

Gartensäle und Kuppelsaal sind aus raumakustischer Sicht stark vergleichbar mit ähnlichen Sälen in der Literatur und auch aus heutiger Sicht angemessen und effektiv geplant worden. In allen Räumen führt ein hohes Stärkemaß dazu, dass bereits kleine Ensembles sehr beeindruckend wirken.

Mit der vom Kuppelsaal aus nicht sichtbaren Position der Musiker auf der Empore ergibt sich der Eindruck, dass die Musik wie aus „himmlischen Gefilden“ herrührt und klingt.

## Literatur

- [1] Lorenz, K. - H.; Breuer, F.: Simulation des Publikums durch spezielle Polyester-Textilien bei der raumakustischen Messung von Konzertsälen in der Praxis, DAGA-Fortschritte der Akustik, Aachen 2003
- [2] Lorenz-Kierakiewitz, K. - H.; Vercammen, M.: Acoustical Survey of 25 European Concert Halls, NAG-DAGA, Rotterdam 2009
- [3] Farina, A.: Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000
- [4] Rife, D.; Vanderkooy, J.: Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences, JAES Volume 37 Issue 6 pp. 419-444; June 1989
- [5] Meyer, J.: Raumakustik und Orchesterklang – Zur Aufführungspraxis der Sinfonien Joseph Haydns, in: Marietta Morawska-Büngeler (Hg.), Musik und Raum, Mainz, 1989
- [6] Weinzierl, S.: Beethovens Konzerträume – Raumakustik und symphonische Aufführungspraxis an der Schwelle zum modernen Konzertwesen, FFaM, 2002