

# Akustik der Staatsoper Unter den Linden - Entwurf

M.L.S.Vercammen, M.R.Lautenbach

Peutz Consult GmbH, Carmerstr.5, 10623 Berlin, E-Mail:mv@peutz.de

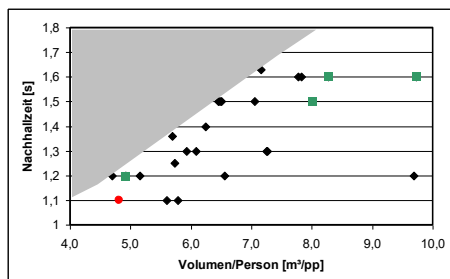
## Einleitung

Die Staatsoper Unter den Linden in Berlin wurde als erste freistehende Hofoper Europa's 1742 erbaut. In ihrer Geschichte wurde die Oper mehrfach zerstört, wieder aufgebaut (1842, 1942, 1945) sowie wiederholt umgebaut und erweitert (u.a. in 1788, 1910, 1928 und 1986). In den Zeitraum 2010-2017 wurde das Gebäude eingreifend denkmalgerecht saniert und die Technik komplett erneuert. Auch wurde ein neues Probenzentrum mit 7 große Probesälen, inkl. einen Chorprobensaal und Orchesterprobensaal realisiert. Das historische Opernhaus hat einen Zuschauersaal für ca. 1350 Personen und einen kleinen Saal mit flachem Boden: der Apollosaal.

Ausgangspunkt dieses Umbaus ist die wesentliche Verbesserung der Akustik unter Beibehalt der architektonischen Gestaltung. Dieser Beitrag beschreibt den Entwurf der akustischen Maßnahmen für den Zuschauersaal. In einem zweiten Artikel werden die Ergebnisse für den Zuschauersaal beschrieben.

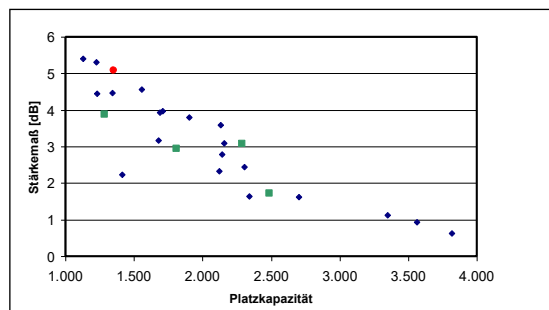
## Zielsetzung für die Akustik des Zuschauersaals

Der Zuschauersaal der Staatsoper ist mit 1350 Personen und 6500 m<sup>3</sup> nicht sehr groß, und das war auch vor dem Krieg nicht anders [1]. In den Abbildungen 1 und 2 wird der Zuschauersaal mit anderen „großen“ Opernsälen der Welt [2] verglichen. Es zeigt, dass der Zuschauersaal eine relativ kurze Nachhallzeit hat, bei einem niedrigen Wert des spezifischen Volumens. Aus den Sabin'schen Formel geht direkt hervor, dass mit einer gewissen Absorption pro Zuschauer, auch ein gewisses Volumen pro Person benötigt wird, um eine gewisse Nachhallzeit zu erreichen. Die Grafik zeigt eine klare maximale Nachhallzeit, zu dem grau markierten Bereich gibt es keine Daten. Inklusive aller anderen Absorptionen, neben der Absorption der Zuschauer selbst, beträgt die effektive minimale Absorption per Zuschauer ca. 0,7 m<sup>2</sup>.



**Abbildung 1:** Gemessene Nachhallzeit (1kHz, besetzt) in Abhängigkeit von spezifischem Volumen für 32 Opernhäuser (u.a.[2]). Die grünen Rechtecke sind Säle, die als sehr gut beurteilt werden. Der Zuschauersaal der Staatsoper Berlin ist rot markiert.

Die Lautstärke ist vor allem abhängig von der Publikumskapazität und wird in Abbildung 2 gezeigt. Dabei wurde der Stärkemaß  $G$  aus Volumen und Nachhallzeit berechnet. Grund dafür ist, dass einerseits die Messdaten des Stärkemaßes nur beschränkt vorhanden sind und andererseits auch nicht sehr genau, u.A. auf Grund der schwierigen Kalibration der Quelle. Auf Grund von durchgeführten Messungen in mehreren Opernhäusern wurde ein Verlust von 2 dB für Energie, die im Bühnenhaus verschwindet, berücksichtigt:  $G = 31 - 2 - 10 \log(V / 24T)$  [dB].



**Abbildung 2:** Stärkemaß (1kHz, besetzt) in Abhängigkeit von Zuschaueranzahl für 32 Opernhäuser (u.a.[2]). Die grünen Rechtecke sind Säle, die als sehr gut beurteilt werden. Der Zuschauersaal der Staatsoper Berlin ist rot markiert.

Die Messung zeigt, dass der Zuschauersaal relativ laut ist, was mit dem subjektiven Eindruck der Autoren übereinstimmt. Andererseits ist auch zu sehen, dass viele Opernsäle relativ (zu) leise sind. Aus wirtschaftlichen Gründen wird der Bedarf bestehen, einen großen Saal zu bauen, aber die Grenze für eine gute Akustik liegt irgendwo bei 2000-2200 Zuschauer. Die wichtigste akustische Zielsetzung bei der Sanierung des Zuschauersaals war, dass die Lautheit nicht weiter zunehmen durfte. Für die Nachhallzeit wurde am Anfang der Entwurfsphase von uns ein Ziel von ca. 1,6 s. in besetztem Zustand mit Eisernen Vorhang (EV) geschlossen definiert. Um diese Nachhallzeit erreichen zu können, wird ein minimales spezifisches Volumen von ca. 7 m<sup>3</sup> pro Person benötigt (Abb. 1). Damit wird ein Stärkemaß von 5 dB berechnet, was den Bestandszustand entspricht (Abb.2). Später in der Entwurfsphase wurde dieser Zielwert von 1,6 s. zwischen den Auftraggeber und Nutzer als zentrales Projektziel vereinbart. Mit ca. 1350 Zuschauer und 7 m<sup>3</sup> pro Person werden ca. 9500 m<sup>3</sup> benötigt, 3000 m<sup>3</sup> mehr als im Bestand.

## Gekoppelte Räume

Aus Denkmalschutz sollten Außenmauern, Dachhöhe und Innenraumgestaltung beibehalten werden, was einen vergrößerten Grundriss unmöglich macht. Ein Absenken des Bodens würde zu großen Problemen im Unterbühnenbereich führen. Die einzige Möglichkeit besteht darin, den Bänderaum oberhalb des Zuschauersaals zu nutzen. In diesem

Raum können die 3000 m<sup>3</sup> realisiert werden, wobei ein Horizontaltragwerk die Horizontalkräfte aus dem Satteldach übernimmt. Aus akustischer Sicht gab es die Fragestellung, ob dieser Raum auch schwach an den Zuschauersaal gekoppelt werden könnte. Anhand der Theorie von gekoppelte diffuse Schallfelder [3] wurde ein Rechenmodell aufgestellt. Aus [3] kann abgeleitet werden, dass bei 2 gekoppelten Räumen, wobei Raum 1 angeregt wird, der Schallpegel in dem angekoppelten Raum 2 in steady state ein niedriger Schallpegel hat:

$$L_{p_1} - L_{p_2} = 10 \lg \left( 1 + \frac{A_2}{S} \right)$$

Wobei A<sub>2</sub> die Absorption im angekoppelten Raum und S die Koppelfläche ist. Wenn die Schallquelle im Raum 1 ausgeschaltet wird, wird das initiale Abklingen noch nicht durch den angekoppelten Raum beeinflusst. Erst wenn der Schallpegel niedriger ist als der oben erwähnte Pegelunterschied wird der Hauptraum aus den angekoppelten Raum gefüttert: es entsteht eine durchhängende Ausklingkurve. Das ist noch stärker vorhanden bei fluktuierenden Schallpegel, wie bei Musik. Um subjektiv einen Vorteil von den angekoppeltem Raum zu erhalten, ist es deshalb wichtig, dass der Raum ausreichend angekoppelt ist.

Abbildung 3 zeigt die auf dieser Weise berechneten Ausklingkurven für zwei unterschiedliche Kopplungsflächen. Auf Grund dieser Berechnungen wurde entschieden, diese Kopplungsfläche zu maximieren, der angekoppelte Raum sollte Teil vom Gesamtvolumen sein.

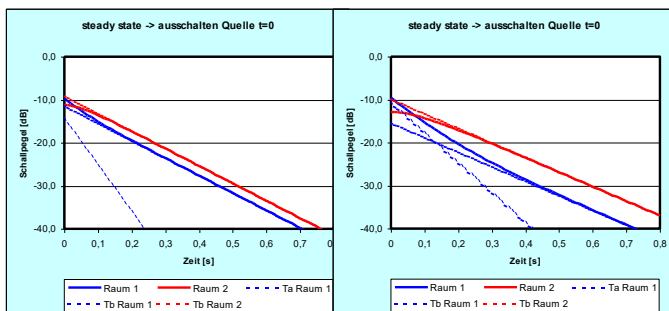


Abbildung 3: Ausklingen von steady state signal, Raum 1: 6500 m<sup>3</sup>, Raum 2: 3000 m<sup>3</sup>, Kopplungsfläche S: 400 m<sup>2</sup> (links) und 150 m<sup>2</sup> (Rechts)

### Berechnungen mit Strahlenverfolgung

Aus Denkmalschutzgründen sollte die vorhandene Decke erhalten bleiben, konnte aber trotzdem angehoben werden. Oberhalb des Umgangs des 3.Ranges konnte der Raum bis zur Außenkubatur, wie ein Pilz wölbt sich der Raum bis zur Außenkubatur, wodurch eine Galerie entsteht, die „Nachhallgalerie“. Von diesem Raum (und natürlich die vielen Zwischenvarianten) wurde ein 3D-Strahlenmodell erstellt und u.a. Nachhallzeit und Stärkemaß berechnet (CATT v8). Im ersten Schritt wurde die Bestandsituation berechnet und in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Bestandsmessungen gebracht.

Abbildung 4 zeigt das 3D-Model im Bestand und am Ende der Entwurfsplanung in dem Längsschnitt vom Saal. Ein Volumen von ca. 9300 m<sup>3</sup> wurde ermöglicht. Mit dem Eisernen Vorhang zu wird eine mittlere Nachhallzeit von ca. 1,6 s. berechnet. Mit der angekoppelten Bühne hängt es stark von

den Bühnenbild ab. Bei der im Bestand gemessenen Situation gab es ein akustisch ungünstiges Bühnenbild.

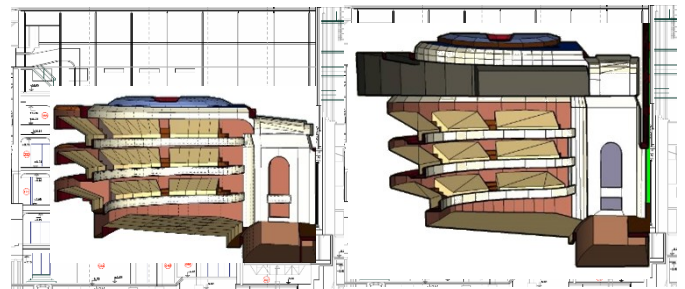


Abbildung 4: Akustisches Rechenmodell überlagert über den Längsschnitt des Saal, links: Bestand vor 2010, rechts: neue Situation.

Mit diesem Bühnenbild wird eine etwas niedrigere Nachhallzeit mit offenem Eisernen Vorhang berechnet.

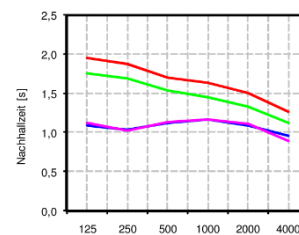


Abbildung 5: Gemessene und berechnete Nachhallzeit in besetzter Situation. Violett: Bestand gemessen, EV zu (gemessen mit Publikumssimulation), Blau: berechnet Bestand mit EV zu, Rot: berechnet neu mit EV zu, Grün: berechnet neu mit offenen EV und schallabsorbierendem Bühnenbild.

### Untersuchungen am Maßstabsmodell

Einzelne Reflexionen an schallstreuende Flächen können bei einer statistischen Verarbeitung der Reflexionsrichtung in einem Strahlenmodell nicht genau prognostiziert werden. Diese und andere Beschränkungen, wie Beugung, können anhand von Messungen in einem Maßstabsmodell behoben werden. Mit einem Maßstabsmodell wird auch der Wellencharakter von Schall in der Prognose mit berücksichtigt. Das Maßstabsmodell wurde in 1:10 angefertigt. Details ab 10 cm Größe wurden berücksichtigt, teilweise auch kleiner. Demzufolge ist das Modell für Aussagen bis zum Oktavband 2000 Hz geeignet. Die reflektierenden Flächen sind aus lackiertem Holz und das Publikum aus Schaumstoff-Pyramiden. Damit wird der völlig besetzte Saal simuliert, Siehe Abbildung 6.



Abbildung 6: Bild im Maßstabsmodell mit der erhöhten Decke und Nachhallgalerie. Im Vordergrund eine rundum strahlende Hochfrequenzquelle und ein Mikrofon mit Vorverstärker.

Auch bei den Maßstabsmodellmessungen wurde zuerst die Bestandssituation erfasst und dann die neue Situation. Die Frequenzen im Modell sind im Maßstabsverhältnis vergrößert. Punktquelle und Mikrofone sind diesem Frequenzbereich angepasst. Im Gegensatz zur Frequenz verhält sich die Schallabsorption in der Luft nicht linear zum Maßstab; dieser ist durch geeignete Kompensationsalgorithmen kompensiert worden. Um eine maximale zeitliche Konstanz zu gewährleisten, wurde das Maßstabsmodell klimatisiert. Messungen der Impulsantworten wurden mittels eines Maximalfolgen-Meßprogrammes durchgeführt. Diese können in Energie-Zeit-Kurven (ETC, Energy Time Curve) umgerechnet werden. Aus diesen Daten sind auch die Energieparameter wie z. B. das Klarheitsmaß berechnet worden. Die Nachhallzeit wurde im Modell nur global betrachtet, weil der Einfluss der Schallabsorption der Materialien in diesen um den Maßstabsfaktor erhöhten Frequenzen nicht ausreichend genau ist. Nichtsdestotrotz zeigt auch das physikalische Modell ein Ansteigen der Nachhallzeit von 1,1 nach 1,6 s., in besetztem Zustand und mit EV zu.

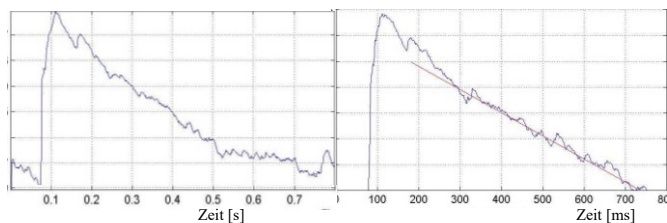


Abbildung 7: Gemessene und geglättete (20 ms) Impulsantwort von Vorbühne (Q1) nach Mitte 3. Rang (M10). Links: Bestandssituation, Rechts: Maßstabsmodell.

Abbildung 7 zeigt ein Vergleich der Messung im Bestand und im Maßstabsmodell (6dB/div). Obwohl nicht identisch, ist die Charakteristik weitgehend gleich. Im weiteren Verlauf wurden viele Optimierungen durchgeführt. Zwei werden hier besprochen.

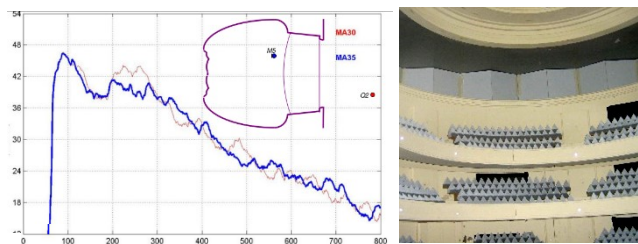


Abbildung 8: Gemessene und geglättete (20 ms) Impulsantwort von Bühne (Q2) nach vorne Parkett (M5) (Links) Rot: ohne Maßnahmen, Blau: mit zick-zack Diffusoren in Nachhallgalerie (Rechts).

Im ersten Schritt ist die Nachhallgalerie der elliptischen Form des Saals gefolgt. Abbildung 8 zeigt, dass es dabei für eine Quelle auf der Bühne im vorderen Parkettbereich zu Echoerscheinungen führen kann. Durch eine schallstreuende Hinterwand an der Nachhallgalerie wurde dieses Problem behoben. Auch sichtbar ist eine Lücke in der Impulsantwort für diese Quelle-Mikrofon-Kombination. Da fehlen frühe Reflexionen aus dem Bühnenbereich, dies lässt sich dann auch mit Bühnenbildern lösen.

Der Architekt Langhans, der im Jahr 1843 den Zuschauersaal nach dem Brand umgebaut hat, hat 1810 einen Artikel über den Einfluss von Fokussierung durch elliptische Raum-

formen auf die Akustik im Theater publiziert [4]. Auch in der 1955-er Gestaltung sind Teile der Saalwand als elliptische Zylinder gekrümmt. Berechnungen auf Grund von Kirchhoffs Integral [5,6] zeigen Fokussierungsbereiche mit Erhöhungen im Vergleich zum Direktschall (Abb. 9) von ca. 7 dB.

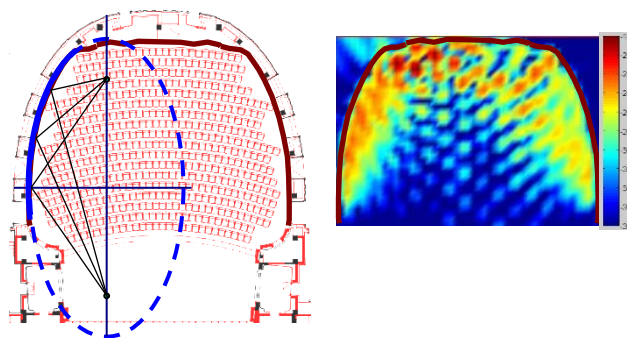


Abbildung 9: Grundriss vom Parkettbereich (Links) mit Segment eines elliptischen Zylinders (Blau) und der Quelle und Empfängerpositionen, wobei Fokussierung auftreten kann. Rechts: Berechnung der ersten Wandreflexion (125 Hz) [5,6].

Ein Vergleich mit der Bestandssituation war kaum möglich: In der Bestandssituation waren diese Wände zum größten Teil schallabsorbierend und sollten reflektierend werden um die 1,6 s. erreichen zu können. Eine mögliche Maßnahme, um diese Fokussierung zu vermeiden, wäre die Wände schalldiffusierend auszuführen: technisch umsetzbar, aber ein Konflikt mit dem Denkmalschutz. Im Maßstabsmodell wurde dieses Thema untersucht. Mit flexiblen Spiegel auf den Wänden wurde der geometrische Fokussierungspunkt gesucht, auf diese Stelle wurde die Impulsantwort gemessen.

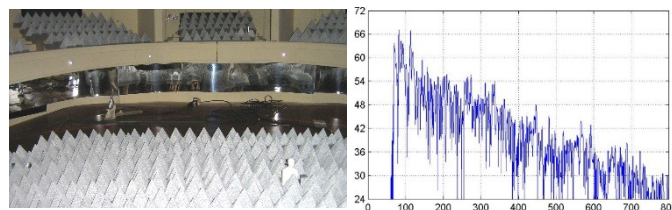


Abbildung 10: links: Bild vom Maßstabsmodell mit Spiegel an den Wänden, auf der Suche nach dem geometrischen Fokussierungspunkt. Rechts: Impulsantwort im Fokussierungspunkt

Abbildung 10 zeigt, dass die erste Reflexion zwar höher ist als der Direktschall aber dass diese, auch wegen kurzer Verzögerungszeit nicht zu einer Echoerscheinung führen wird. Zu erwarten ist eher, dass diese Reflexion einen erhöhten Räumlichkeitseindruck erzeugt und auf Grund dieser Messergebnisse wurde die Wand nicht geändert.

Übrige Themen, die während der Entwurfsphase im Maßstabsmodell untersucht und optimiert wurden, sind u.a. Regiefenster, Erhöhung der Proszeniumdecke, Vertiefung des Orchestergrabens, Diffusoren im Orchestergraben, Orchesterreflektoren und Reflektoren in den Proszeniumseitenlogen.

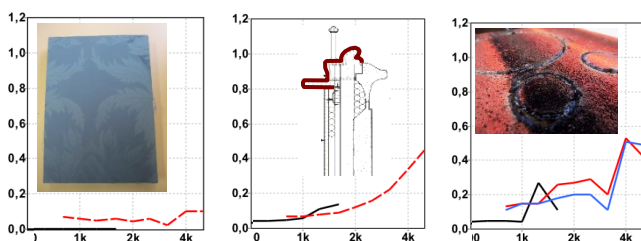
Wenn der Saal für Konzerte genutzt wird, spielt das Orchester auf der Vorbühne und dem vorderen Teil der Bühne hinter der Portalöffnung. Ein neues Konzertzimmer aus Bühnenbildern ermöglicht eine richtige Bühnenakustik. In 2017 wurde ein solches Konzertzimmer anhand von Berechnungen und Maßstabsmodellmessungen gemeinsam mit der Oper



entwickelt. Wichtiger Punkt war es, einerseits ausreichend nützliche Reflexionen zu schaffen und andererseits den Raum in Richtung Bühnenum zu öffnen, so dass die Lautheit ausreichend eingeschränkt wird.

## Bewältigung der Schallabsorption

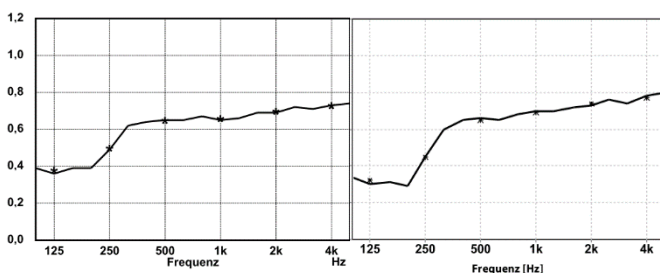
Die Verlängerung der Nachhallzeit kann nicht nur aus der Vergrößerung des Saals realisiert werden: diese Volumenzunahme führt auch zur Zunahme der Flächen und damit zur Erhöhung der Absorption. Das bedeutet, dass an den anderen Flächen die Schallabsorption reduziert werden muss. Die Einfüllungen der Holzwände wurden durch  $40 \text{ kg/m}^2$  Platten mit neuer, originalgetreu hergestellten und auf den Platten verklebten Wandverkleidung ersetzt. Auch bei anderen Verkleidungen, wie den Samt auf der Brüstung und die Schabracke (Wandteil oberhalb der Bühnenöffnung) wurden im Akustiklabor die Absorptionskoeffizienten gemessen und die Verkleidungen optimiert. Im Bestand waren in den



**Abbildung 11:** Nach Optimierung gemessene Schallabsorption (Kundschen Rohr) der Wandverkleidung (links), Samt-Brüstung (Mitte) und Schabracke (Rechts: Velours auf Holz)

Rangbrüstungen und Deckenbalken Helmholzresonatoren vorhanden (siehe auch [7]), diese wurden gedichtet.

Die wichtigste schallabsorbierende Fläche ist aber die Bestuhlung. Die Bestandbestuhlung hatte einen relativ gering absorbierenden Stuhl. Als akustisches Ziel wurde definiert, die Schallabsorption der Stühle nicht zu erhöhen. Gleichzeitig sollte aber auch der Sitzkomfort deutlich besser werden, wobei die Rückenlehne ca. 10 cm erhöht werden sollte. Die Komfortverbesserung wurde durch eine ergonomische Formung der Rückenlehne und eine sehr dünne Polsterung realisiert. Die zusätzliche Absorption wurde durch den Einbau



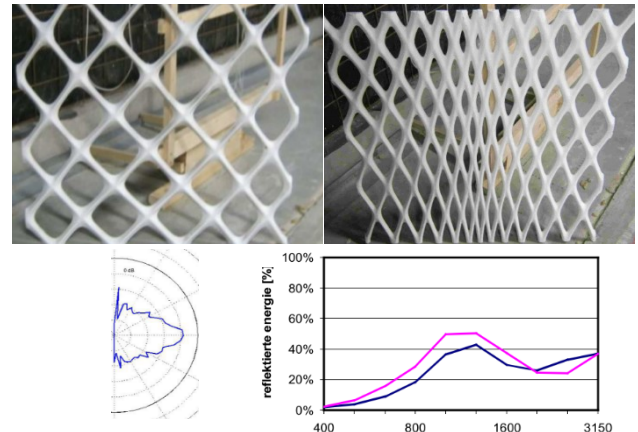
**Abbildung 12:** Im Hallraum von Peutz gemessene Schallabsorptionkoeffizient in besetzter Situation mit 16 Stühlen. Links: Bestand (2009), Rechts: Neu (2016).

einer luftdichten Schicht im Sitz kompensiert. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse im Labor.

## Transparenz der Netzstruktur

Architekt H. G. Merz hat die angehobene Decke mit dem ursprünglichen Saal durch eine schalloffene Netzstruktur ver-

bunden und somit einen modernen Verweis zu der ursprünglichen Architektur mit den verwendeten Gittern und Rautenmotiven von Architekt Knobelsdorff erstellt (Siehe 2. Artikel). Die neu geplante Netzstruktur sollte die dahinterliegende Nachhallgalerie akustisch nicht abschließen, sondern schalldurchlässig sein. Es wurden zwei akustische Muster 1:2 gebaut, wovon im schalltoten Raum die winkelabhängige Reflexion nach [8] gemessen wurde (Abb.13). Auf Grund dieser Messergebnisse wurde der obere, fast horizontale und mehr geschlossene Bereich der Netzstruktur, komplett verschlossen.



**Abbildung 13:** Messungen an Netzstruktur Maßstab 1:2. Oben die beiden Muster, Links unter: winkelabhängige Reflexion nach [8] bei 1kHz (6dB/div). Rechts: Anteil der eintreffenden Energie die insgesamt über alle Reflexionswinkel, reflektiert wurde (Blau: linker Muster, Violett: rechter Muster).

In Momenten der Stille ist die musikalische Spannung am höchsten und darf nicht durch Geräusche der Bühnemaschinerie oder Lüftung gestört werden. Viel Aufwand wurde in bauakustischen Maßnahmen an Türe, Rauchklappen, Luftverteilung, Einblasgitter, etc. gesteckt.

Ergebnisse der raumakustischen Messungen werden in den 2. Artikel erläutert.

## Literatur

- [1] M.L.S.Vercammen, H.-P.Tennhardt, Die akustische Geschichte der Staatsoper Unter den Linden, Daga 2010
- [2] Hidaka, L.Beranek, Objective and subjective evaluations of twenty-three opera houses in Europe, Japan and the Americas, J.Acoust.Soc.Am.107(1), Jan.2000
- [3] H.Kuttruff, Room acoustics, Elsevier 1973, 4<sup>th</sup> edition 1999
- [4] Langhans, C., Über Theater oder Bemerkungen über Katakustik in Beziehung auf Theater, 1810.
- [5] M.L.S.Vercammen, Sound Reflections from Concave Spherical Surfaces. Part I: Wave Field Approximation, Acta Acustica 96 (2010)
- [6] M.L.S.Vercammen, Durch gekrümmte Flächen modifizierte Schallfelder, Daga 2008
- [7] W.Reichardt, Die Akustik des Zuschauerraumes der Staatsoper Berlin, Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, 1956
- [8] AES-4id-2001, AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems – Characterization and measurement of surface scattering uniformity, 2001