

PEUTZ

PEUTZ PEUTZ
PEUTZ PEUTZ
PEUTZ PEUTZ
PEUTZ PEUTZ
PEUTZ PEUTZ
PEUTZ PEUTZ



STAATSOPER UNTER DEN LINDEN
DIE AKUSTIK IM OPERNSAAL

AKUSTIK IN DER VERGANGENHEIT

2017 werden aufwendige Sanierungsarbeiten an dem historischen Operngebäude der Staatsoper Unter den Linden in Berlin abgeschlossen. Bei dem Entwurf der Sanierungsmaßnahmen wurde ein zeitgemäßer Spielbetrieb mit dem Schwerpunkt einer besseren Akustik in den Vordergrund gestellt. Diese Broschüre beinhaltet eine kurze Zusammenfassung der akustischen Geschichte des Bauwerks, der Zielsetzung, der Entwicklung des Akustikentwurfs und der realisierten akustischen Veränderungen des Saals.

Die Staatsoper Unter den Linden wurde 1742 als freistehendes Logentheater durch Friedrich den II. erbaut. Mehrfach wurde die Hofoper zerstört, wiederaufgebaut (1843, 1942, 1955) sowie wiederholt umgebaut und erweitert (u.a. 1788, 1910, 1928 und 1986).

Jeder große Umbau zog die Diskussion mit sich, ob es sinnvoller sei, eine größere Oper an einem anderen Ort zu errichten. Der Standort blieb und die Größe des Zuschauersaals wurde über all die Jahre nicht verändert. Damit ist auch die ursprünglich angelegte akustische Situation während all dieser früheren Umbauten nicht wesentlich verändert worden.

Weltweit haben sich nicht nur die Operngenres – von der italienischen Opera über die französische Grand Opéra zu dem spätromantischen Repertoire – weiter entwickelt, sondern auch die Operngebäude wurden den sich ändernden Anforderungen angepasst. Die Orchester vergrößerten sich, die Inszenierung gewann an Bedeutung und die Anzahl der Besucher nahm zu. Mit dieser Entwicklungen änderte sich auch der Bedarf am Raumklang.

Wenn die Lindenoper vor der Sanierung mit anderen wichtigen Opernhäusern der Welt verglichen wurde, war sie mit ca. 6.500 m³ eine der kleinsten. Für eine wesentliche Verbesserung des Raumklangs war eine wesentliche Vergrößerung des akustisch effektiven Raumvolumens erforderlich. Die Rahmenbedingungen waren aber klar: Eine denkmalgerechte Sanierung, ohne die Abmessungen des Saals und die der Außenkubatur zu verändern – eine große Herausforderung.

Eduard Gaertner: Blick auf das Opernhaus und die Straße Unter den Linden, 1845

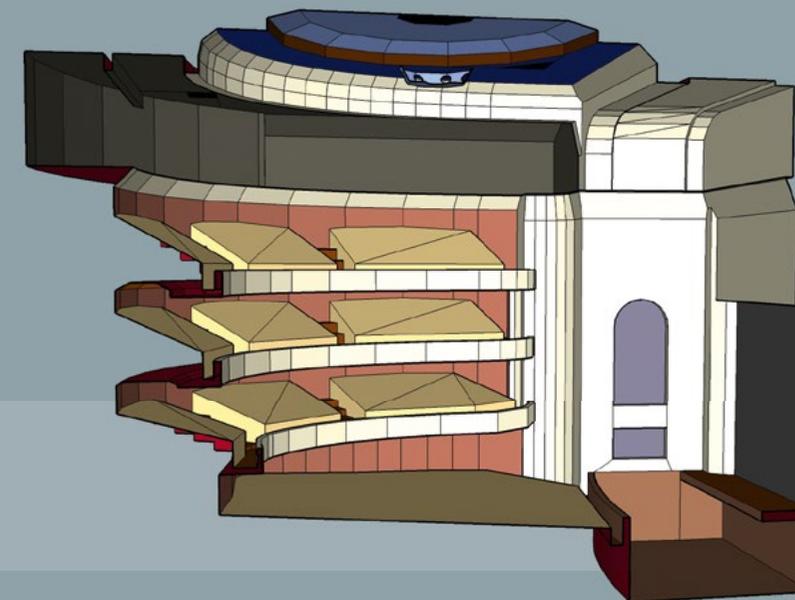


AKUSTIK IN ZAHLEN

Schallreflexionen im Raum, die durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall verteilt über die Zeit eintreffen, verschmieren den Klang. Diese Mischung verbindet den Klang der einzelnen Instrumente, verbindet die Töne und schafft die für klassische Musik benötigte Klangwärme.

Der Raumklang kann weitgehend objektiv in Zahlwerten dargestellt werden: Die Lautstärke oder das Stärkemaß beschreibt, wie laut der Saal klingt. Wand- und Deckenoberflächen, der Fußboden, die Bestuhlung, sogar das Publikum sowie das Orchester sind mit akustischen, schallschluckenden Eigenschaften versehen. Diese beeinflussen sowohl die Lautstärke als auch die Nachhallzeit, welche die Zeit beschreibt, in der der Schallpegel auf 60 dB herunterkommt, nachdem die Schallquelle nach Ausschalten versiegt ist.

Akustisches Modell vom Zuschauersaal

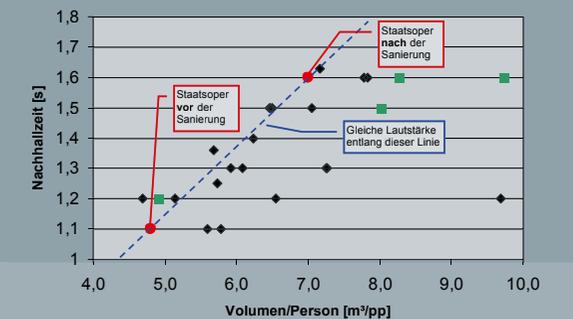


Die Nachhallzeit ist eng verbunden mit dem Begriff Klangmischung und hängt von dem Volumen des Saales, aber auch von der anwesenden Personenanzahl und den verwendeten schallabsorbierenden Materialien ab.

Vor der Sanierung bis 2010 war die Nachhallzeit für eine Opernnutzung sehr kurz: ca. 1,1 s – eher ausgerichtet für die Nutzung eines Sprechtheaters. Durch das beschränkte Volumen war die Lautstärke im Saal an der Obergrenze. Ziel war es, ohne Erhöhung der Lautstärke, die Nachhallzeit auf 1,6 s zu verlängern. Dies ist ein optimaler Wert, um eine Klangmischung zu erreichen, ohne die Verständlichkeit des Gesangs zu sehr zu beeinträchtigen. Ausschließlich eine Verringerung der Schallabsorption im Raum – wenn dies überhaupt technisch realisierbar wäre – würde zwar die Nachhallzeit verlängern aber gleichzeitig die Lautstärke erhöhen.

Die einzige Lösung bestand in der Vergrößerung des Raumvolumens. Diese würde eine deutliche Verbesserung des Raumklangs ermöglichen, grafisch dargestellt in der Abbildung.

Nachhallzeit und Volumen pro Person für verschiedene Opernsäle der Welt



AKUSTIK UND GEOMETRIE

Die Bauhöhe wurde im 17. Jahrhundert von Friedrich II festgelegt und erst 1910 mit dem ersten Bau eines Bühnenhauses durchbrochen. Das Saaldach durfte aufgrund des Denkmalschutzes nicht erhöht werden. Allerdings war das benötigte Volumen im Haus schon vorhanden! Es gab einen großen Binderraum zwischen der Decke des Zuschauersaales und dem Dach.

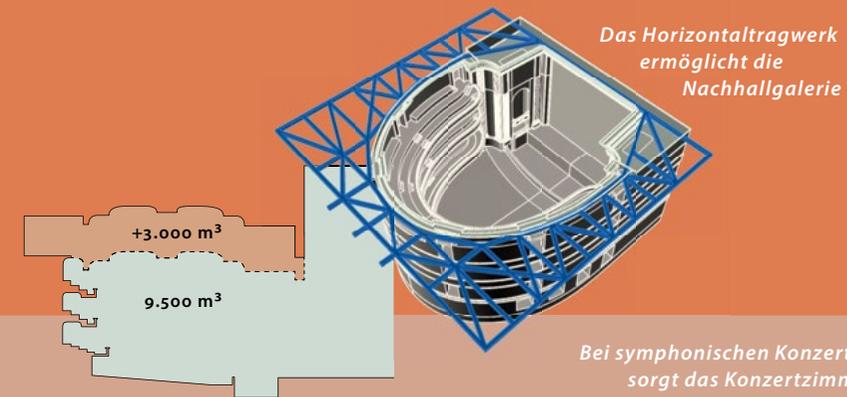
Nachhallgalerie mit schalloffener Netzstruktur

Anhand energetischer und 3D-geometrischer Modelle wurden mögliche Lösungen simuliert. Berechnungen zeigten, dass eine Erhöhung der Saaldecke zu einer erheblichen Verbesserung der akustischen Bedingungen führen wird. Die Simulationen zeigten jedoch auch, dass dieser vorhandene Zwischenraum kein separater Raum sein konnte, sondern maximal an den Saal angekoppelt werden musste, um akustisch wirklich effektiv zu sein.

Eine bautechnisch große Herausforderung bildeten die Horizontalkräfte aus dem schrägen Satteldach. Die vorhandenen Binder sorgten dafür, dass die Mauer durch das Dach nicht nach außen gedrückt wurde. Für die neue Raumsituation mussten diese Kräfte abgefangen werden: hierfür war ein großes Horizontaltragwerk die Lösung.

Der neue Zuschauersaal erstreckt sich jetzt oberhalb der Gänge vom 3.OG. Hierdurch entsteht eine Nachhallgalerie. Im neuen Publikumsaal befinden sich in oberen Bereich nun Reflexionsflächen, welche den Klang aufnehmen, reflektieren und wieder an die Zuschauer weiterleiten.

Unter Einhaltung der denkmalgerechten Sanierung, wurde die 1955 gestaltete Decke aufgeschnitten, ausgelagert und nach dem Umbau der Tragkonstruktion 5 m höher als ursprünglich eingebaut, wieder angebracht. Das Volumen konnte um fast 3.000 m³ vergrößert werden. Architekt H. G. Merz hat die angehobene Decke mit dem ursprünglichen Saal durch eine schalloffene Netzstruktur verbunden und somit einen modernen Verweis zu der ursprünglichen Architektur mit den verwendeten Gittern und Rautenmotiven von Architekt Knobelsdorff erstellt.



Volumenvergrößerung des Opernsaales

Bei symphonischen Konzerten sorgt das Konzertzimmer für einen optimalen Orchesterklang

Neben der Errichtung der Nachhallgalerie wurde der Orchestergraben verbessert. Eine Vertiefung und Vergrößerung der Fläche in Kombination mit schalldiffusierenden Wandelementen sorgt für eine bessere Akustik im Orchestergraben und eine bessere Mischung des Orchesterklangs, bevor der Klang sich im Saal ausbreitet. Zusätzlich sorgen schallreflektierende Wände in den Seitenlogen zur Verbesserung der Rückkopplung des Schalls zu den Musikern.

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, wo Musiker sich selbst und andere Musiker gut hören können, ohne dass der Klang im Bühnenturm verschwindet. Zusammen mit der größeren Portalöffnung und den Reflektoren oberhalb der Vorbühne wird ein neuer akustisch einheitlicher Klangraum realisiert, in dem symphonische Musik optimal klingt.

Auch alle umliegenden Räume der DSO waren Bestand der Sanierung und sind für akustisch optimale Bedingungen geplant worden. Nach dem sorgfältigen Umbau ist der Apollosaal nun in voller Pracht wiederhergestellt. Die Probesäle, vor allem Orchesterprobesaal und Chorprobesaal, bieten für die Künstler die akustisch perfekte Vorbereitung für die Vorstellung.



AKUSTIK IM MAßSTAB 1:10

Als eines der zentralen Projektziele stand bei jeder Entwurfsentscheidung die Verbesserung der akustischen Auswirkung auf den Zuschauersaal im Fokus.

Die raumakustischen Berechnungen mithilfe von Computersimulationen basieren in der Regel auf Strahlenverfolgung. Dazu werden Schallwellen als (Licht-)Strahlen dargestellt. Anhand dieser Simulationen wurden Entwurfsvarianten hinsichtlich Lautstärke und Nachhall untersucht.

Für Untersuchungen der frühen Reflexionen, vor allem bei gekrümmten Flächen, ist es wichtig, dass der Wellencharakter von Schallwellen erhalten bleibt. Das ist anhand von akustischen Messungen innerhalb eines Maßstabsmodell möglich. Es wurde ein Modell im Maßstab 1:10 erstellt. Entsprechend des Maßstabs verschieben sich hierbei die Messfrequenzen auch mit einem Faktor von 10.

Akustisches Maßstabsmodell 1:10



Der Einsatz spezieller Lautsprecher verbunden mit einer besonderen Mikrofontechnik ermöglicht es jedoch, dass auch bei diesen hohen Frequenzen aussagekräftige Messergebnisse erzielt werden können. Anhand der Messergebnisse wurde aufgezeigt, dass das Projektziel durch die Anhebung der Decke erreicht werden konnte.

Da das Maßstabsmodell bereits während des Entwurfsprozesses genutzt wurde, konnten wichtige Entwurfsänderungen sowie geplante Änderungen der Prosziumdecke, der Wände der Regieräumen und die Form der Nachhallgalerie überprüft und optimiert werden.

Auch die akustische Optimierung des Konzertsimmers wurde anhand von Computersimulationen und Maßstabsmodellmessungen durchgeführt.

AKUSTIK IM BAUPROZESS

Die neu geplante Netzstruktur sollte die dahinterliegende Nachhallgalerie akustisch nicht abschließen, sondern vielmehr schalldurchlässig sein. Es wurden akustische Muster dieser Netzstruktur gebaut und messtechnisch im firmeneigenen Akustiklabor von Peutz überprüft und so lange optimiert, bis eine ausreichend schalldurchlässige Struktur erreicht war.

Eine Liste von Bauteilen mit akustischen Risiken wurde erstellt, um die Überwachung der einzelnen Bauelemente gewähren zu können. So sind an zahlreichen Stellen die akustisch relevanten Bauteile stetig kontrolliert und – wo nötig – nachgebessert worden.

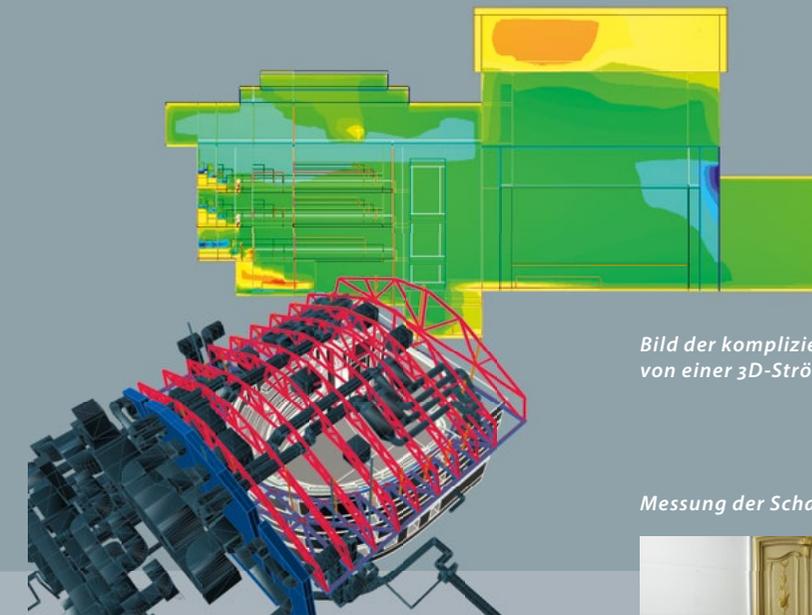


Bild der komplizierten Lüftungsanlagen und Längsschnitt von einer 3D-Strömungssimulation im Zuschauersaal

Im Akustiklabor wurde die Schallabsorption der Bestuhlung gemessen und in mehreren Schritten angepasst.

Weitere Messungen und Optimierungen im Labor sind unter anderem an der Schallabsorption der Wandbespannungen, der Schalleistung der Lufteinlässe sowie der der Schalldämmung der Zugangstüren durchgeführt worden.

In Momenten der Stille ist die musikalische Spannung am Höchsten und darf nicht durch Geräusche der Bühnenmaschinerie oder Lüftung gestört werden. Die Lüftung sorgt für ein komfortables Klima, soll aber unhörbar sein. Anhand von thermischen Strömungssimulationen wurden Optimierungen an Lüftungskanälen und Lüftungsanlagen vorgenommen. Dabei forderten die engen Platzverhältnisse findige Lösungswege.

Messung der Schalldämmung der Zugangstüren und der Bestuhlung im Akustiklabor



DAS ERGEBNIS

Nach Fertigstellung des Saales wurden raumakustische Messungen durchgeführt. Während dieser Messungen wurden die akustischen Bedingungen, die mit Publikum im Saal herrschen, durch spezielle Vorhänge über der Bestuhlung simuliert. Die Messergebnisse zeigen, dass die formulierten Projektziele alle erfüllt werden: die Impulsantworten zeigen ein regelmäßiges Ausklingen von einer Vielzahl an Reflexionen, die dazu führen, dass der Zielwert der Nachhallzeit von 1,6 s erreicht wird.

Dank der Volumenvergrößerung des Saals, hat die Lautstärke nicht zugenommen. Bei den ersten Proben wurde in allen Publikumsbereichen ein warmer, reicher und räumlicher Klang wahrgenommen, wobei alle Instrumentengruppen gut hörbar sind. Die Musik ist im pianissimo Passus noch präsent und klingt in den fortissimo Stellen eindrucksvoll, ohne zu laut zu werden. Somit trägt nun auch die Akustik umso mehr dazu bei, die Opernvorstellung zu einem gelungenen Gesamtkunstwerk werden zu lassen.

I am delighted with the acoustical work of Peutz. They have managed to achieve a sound quality that is as good for symphonic music with the orchestra on stage, as for opera with the orchestra in the pit and singers on stage.

Daniel Barenboim, Generalmusikdirektor



Peutz Consult GmbH

Projektberater:
Martijn Vercammen
Raumakustische
Untersuchungen:
Margriet Lautenbach



Kolberger Straße 19
40599 Düsseldorf
Tel: +49 211 999 58 26 o
dus@peutz.de
www.peutz.de

Martener Straße 525
44379 Dortmund
Tel: +49 231 725 499 10
dortmund@peutz.de
www.peutz.de

Carmerstraße 5
10623 Berlin
Tel: +49 30 310 172 16
berlin@peutz.de
www.peutz.de