

## ■ Fabelhafter Klang aus der Galerie

**Aufwändige Simulationen und Messungen im Labor halfen, den Klang der Staatsoper Unter den Linden in Berlin zu optimieren.**

Die Renovierung der Staatsoper Unter den Linden in Berlin ist abgeschlossen: Am Tag der Deutschen Einheit wurde das generalsanierte Haus mit Robert Schumanns „Szenen aus Goethes Faust“ wiedereröffnet. Neben der Notwendigkeit, die Bausubstanz des Gebäudes aus dem Jahr 1742 zu erhalten, war es Ziel der Sanierung, die Akustik des Opernsaals zu verbessern.

Damit Musik in einem Konzertsaal gut klingt, ist es wichtig, die frühen Reflexionen gegenüber dem Direktschall zu verstärken, ohne dabei die Lautstärke zu stark zu erhöhen. Zudem sollte der Nachhall, der sich aus mehrfach reflektierten Schallwellen zusammensetzt, deutlich wahrnehmbar sein (Abb. 1). Typischerweise gibt es dafür in Konzertsälen reflektierende und streuende Elemente – im Großen Saal der Elbphilharmonie in Hamburg sind das beispielsweise die Klangreflektor über der Bühne oder die besondere Struktur der Wandpaneele.

Solche Maßnahmen kamen aber für die Staatsoper Unter den Linden nicht infrage, weil das Raumvolumen mit rund  $6500 \text{ m}^3$  sehr gering ist. Dennoch gelang es bei der Sanierung, dem Klang durch eine längere Nachhallzeit mehr Wärme zu verleihen. Die Nachhallzeit de-



Peutz Consult GmbH

In der sanierten Staatsoper Unter den Linden ist die Nachhallgalerie über dem dritten Rang mit einer akustisch optimierten Netzstruktur vom Opernsaal abgetrennt.

finiert die Dauer, in der nach dem Ausschalten der Schallquelle der Schallpegel auf 60 dB gefallen ist. Für die Staatsoper beträgt sie nun 1,6 Sekunden und ist damit ideal für Opernhäuser.

Doch das Abebben des Klangs zu verlängern, war nicht das einzige Ziel. Gleichzeitig galt es, die Lautstärke in dem relativ kleinen Saal zu reduzieren. Schon zu Beginn der Arbeiten zeigte sich, dass es dazu nötig sein würde, das Raumvolumen erheblich zu vergrößern. Aufgrund des Denkmalschutzes kam nur eine Erweiterung in der Höhe infrage. Der zusätzliche Raum fand sich im so genannten Bänderaum. Bei der Staatsoper befanden sich dort Zugstangen, die das Giebeldach und seine Kuppeln stabilisierten. Heute reicht die Innendecke des Saals etwa fünf Meter in den Bänderaum hinein, und ein liegendes Fachwerk garantiert die Stabilität des Dachs. Damit beträgt das Volumen des Saals fast  $3000 \text{ m}^3$  mehr als vor der Sanierung.

Um einen besseren Klang zu erreichen, mussten die Akustiker beim Umbau die Ausbreitung des Schalls im Raum beachten. Dazu haben sie diese im Computer in einem dreidimensionalen Modell des Saals simuliert. Die Programme beruhen auf Methoden

der Strahlenphysik, die schon im 17. Jahrhundert bekannt waren. Man behandelt dabei Schall wie Lichtstrahlen, die an einer Fläche reflektiert werden, sodass Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel ist. Allerdings verhält sich Schall komplizierter als Licht, weil die Wellenlängen im hörbaren Bereich einige Zentimeter bis mehrere Meter betragen und damit in der Größenordnung der Objekte liegen. Die Strahlenphysik liefert aber nur vernünftige Aussagen, wenn die Wellenlänge deutlich kleiner ist als die betrachteten Objekte.

Die zahlreichen Holzkanten, Plaster, Brüstungen, Sitze und nicht zuletzt die Zuhörer im Opernsaal sind viel zu klein, als dass daran beispielsweise die Töne aus einem Kontrabass reflektieren könnten. Vielmehr kommt es zur Beugung der Schallenergie infolge des Wellencharakters des Schalls, was sich nur mit statistischen Verfahren berechnen lässt. Dazu simuliert man tausendfach die Reflexion eines einzelnen Strahls und variiert dabei den Ausgangswinkel nach statistischen Gesetzen. Im Mittel ergibt sich dann ein realistisches Bild, wie sich das Schallfeld im Raum ausbreitet und seine Energie verteilt.

Das reicht aus, um die Nachhallzeit und den gesamten Schallpegel

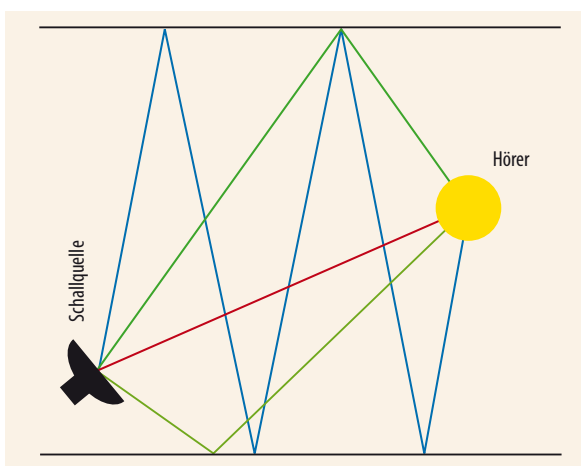


Abb. 1 Der Direktschall (rot) erreicht den Hörer vor den frühen Reflexionen von den Wänden (grün). Zuletzt gelangt der Nachhall nach mehreren Reflexionen zum Hörer (blau).

zu bestimmen. Allerdings kann man so nicht erkennen, wie viel Energie in den frühen Reflexionen steckt. Sie erreichen die Ohren der Zuhörer kurz nach dem Direktschall und sind für den Klangeindruck besonders wichtig. Um hier verlässliche Vorhersagen zu machen, bauten die Akustiker detailgetreue Modelle des Opernsaals im Maßstab 1:10 nach (Abb. 2): einmal vor der Renovierung und einmal mit den geplanten Änderungen. Weil im Modell der Wellencharakter des Schalls erhalten bleibt, lassen sich die frühen Reflexionen besser untersuchen als mit den Simulationen.

### Mit Ultraschall optimieren

Allerdings stimmen die Schallfelder in dem verkleinerten Modell nur dann mit dem Original überein, wenn die Schallfrequenzen um denselben Faktor vervielfacht werden. Dieser Ultraschall ist aber nur mit besonderen Mikrofonen nachzuweisen. Außerdem erfährt er in Luft eine andere Dämpfung als die hörbaren Frequenzen. Um dies auszugleichen, füllen Akustiker die Modelle mit Helium oder kompensieren den Effekt rechnerisch, indem sie die Messergebnisse mit den bekannten Dämpfungseigenschaften der Luft korrigieren. Mit Hilfe des Modells war es möglich, die Form der Hinterwand zum



Peutz Consult GmbH

**Abb. 2** Um die Auswirkung der zahlreichen kleinen Strukturen des Opernsaals auf den Klang zu untersuchen, entstand ein detailgetreues Modell im Maßstab 1:10.

Regieraum, der Proszeniumswände und -decken sowie der Nachhallgalerie und des Konzertzimmers zu optimieren.<sup>#)</sup>

Optisch spektakulär ist die Abtrennung zwischen Nachhallgalerie und Saal: Die bionische Netzstruktur erinnert an die Form mikroskopischer Kieselalgen. Ihre großen Poren lassen den Schall ungehindert passieren, sodass die Nachhallgalerie akustisch vollständig an den Saal gekoppelt ist und keine Schallenergie in ihr verschwinden kann. Dazu wurde die vorgesehene Netzstruktur vorab auf Schalldurchlässigkeit optimiert. Auch die Einrichtung des Saals, z. B. Wandbespannungen, Samtverkleidungen, Türen und die Einlassgitter der Lüftungsanlage wurden hin-

sichtlich Schallabsorption, -leistung und -dämmung verbessert.

Die Messungen im fertig sanierten Opernsaal und die ersten Ausführungen bestätigen, dass sich die Mühe gelohnt hat. Der Saal ist nicht lauter geworden, und die Nachhallzeit erreicht den angestrebten Wert von 1,6 Sekunden. Musiker und Zuhörer bestätigen, dass sich der neue Klang der Staatsoper warm und räumlich anfühlt, ohne dass Details verloren gehen.

\*

Ich danke Martijn Vercammen, Projektberater von Peutz Consult GmbH in Berlin und Düsseldorf, für seine Erläuterungen.

**Bernd Müller**

<sup>#)</sup> Als Proszenium bezeichnet man den vordersten Bereich der Bühne, der die Grenze zum Zuschauerraum bildet.