

Heiko Kremer  
 Klaus-Hendrik Lorenz  
 Gijsbert Marcel van Uffelen

# Die Modernisierung der Royal Albert Hall

## Modellmessungen und Berechnungen für die akustische und raumklimatische Beratung

Das Auditorium der Royal Albert Hall, London wird seit 1995 renoviert und dem heutigen Stand moderner Veranstaltungsstätten angepaßt. Die akustische Beratung umfaßte u. a. die Untersuchung an einem raumakustischen Modell im Maßstab 1:12. Die daraus entwickelten Maßnahmen wurden durch Simulationsrechnungen und Abnahmemessungen überprüft. Die bauphysikalische Beratung umfaßte Untersuchungen zur Be- und Entlüftung sowie zum Luftkomfort über eine Modellierung der Raumluftrömungsverhältnisse mit CFD. Es waren Aussagen zu geeigneten Luftgeschwindigkeiten, Lufttemperaturen, Kohlendioxidgehalt der Luft und deren Verteilungen zu treffen. Die in den Modellrechnungen benötigten Randbedingungen sind dabei in einem weiteren separaten Rechenmodell auf Basis der Finite-Elemente-Methode bestimmt worden. Eine Validierung der hierbei gewonnenen Rechenergebnisse ist anhand von Praxismessungen vor Ort zu Beginn des Projektes durchgeführt worden.

### Refurbishing of the Royal Albert Hall – Analytical and model test exploration for acoustics and building physics.

*The auditorium of the Royal Albert Hall is being refurbished and reconstructed since 1998 in order to match the standards of nowadays event locations. The measures of the reconstruction were supervised intensively in acoustics and building physics. The task included e.g. a broad examination within a room acoustical model. Using this model of the auditorium (scale 1:12) analysis were made, which acoustical measures had to be taken to optimize the use of the auditorium as a concert hall and state-of-the-art event-location. The measures found during the model experiments were proved by calculations in a computer model simulation and by validation measurements on location.*

*The building physical advice included inquiries dealing with the ventilation and climatic comfort and were done by modeling the air streams in a CFD simulation. Hereby statements had to be done concerning appropriate air velocities, air temperatures, CO<sub>2</sub> concentration in the air and their distributions. The boundary conditions needed in the simulation calculations were determined in a separate computer model based upon Finite Element Methods.*

*A validation of the simulation results of the existing hall before renovation was performed by practical measurements on location.*

### 1 Einleitung

Das Auditorium der von 1867 bis 1871 erbauten Royal Albert Hall wird seit 1995 renoviert und dem heutigen Stand moderner Veranstaltungsstätten angepaßt. Das berühmte Londoner Konzerthaus wurde unter der Schirmherrschaft von Prinz Albert – Queen Victoria's Mann – nach dem

Vorbild der Semperoper Dresden von dem Ingenieur und Architekt Captain Francis Fowke (1823-1865) und dem Ingenieur Lieutenant-Colonel Henry Y. Darracott Scott (1822-1883) geplant und errichtet. Die Arbeiten standen seitens des Auftraggebers unter der Aufsicht von Sir Henry Cole, dem Königlichen Beamten und Industriedesigner, der die Organisation der I. Londoner Weltausstellung von 1851 „Sensations of Industry and Culture“ innehatte und Prinz Albert's Berater sowie Museumsdirektor des Department of Science and Art at South Kensington Museum (heute: Victoria and Albert Museum) wurde.

Die hier beschriebene Aufgabenstellung umfaßte u. a. eine ausführliche Untersuchung an einem raumakustischen Modell des Auditoriums. Mit Hilfe dieses Modells im Maßstab 1:12 wurde untersucht, welche akustisch wirksamen Maßnahmen zu treffen waren, um eine optimierte Nutzungsmöglichkeit des Auditoriums als Konzertsaal sowie als zeitgemäße Event-Location zu gewährleisten. Die in den Modellmessungen entwickelten Maßnahmen wurden durch Simulationsrechnungen mit einem computergenerierten Rechenmodell und durch Abnahmemessungen vor Ort überprüft.

Die bauphysikalische Beratung umfaßte Untersuchungen zur Be- und Entlüftung sowie zum Luftkomfort über eine Modellierung der Raumluftrömungsverhältnisse mit Hilfe eines CFD-Rechenmodells. Hierbei waren u. a. Aussagen zu geeigneten Luftgeschwindigkeiten, Lufttemperaturen, Kohlendioxidgehalt der Luft und deren Verteilungen zu treffen. Die in den Modellrechnungen benötigten Randbedingungen sind dabei in einem weite-



Bild 1. Royal Albert Hall, London  
 Fig. 1. The Royal Albert Hall, London

[Foto: A. Brady]



ren separaten Rechenmodell auf Basis der Finite-Elemente-Methode bestimmt worden. Eine Validierung der hierbei gewonnenen Rechenergebnisse ist anhand von Praxismessungen vor Ort zu Beginn des Projektes durchgeführt worden.

## 2 Raumakustische Beratung

Ausgangspunkt für die raumakustische Beratung der Erneuerung der Royal Albert Hall war die Definition des Charakters der dort überwiegend stattfindenden Veranstaltungen. Diese umfassen symphonische Musik („Proms“-Konzerte), Events mit verstärkter Musik, Orgelmusik, Chormusik etc. Die akustische Problematik in diesem historischen Bau ist bedingt durch seine geometrische Formgebung und schiere Größe: ca. 80.000 m<sup>3</sup> Volumen, 7.000 m<sup>2</sup> Fläche, 65 m Länge, 55 m Breite, 40 m Höhe (Bild 2).



Bild 2. Innenansicht der Royal Albert Hall während der Modernisierung

Fig. 2. Inner view of the Royal Albert Hall during refurbishment

Durch die Größe des Raumes sind Schallstärkemaß und Direktschall im Saal verhältnismäßig gering, frühe Reflexionen und Nachhallenergie bewegen sich auf niedrigem Niveau. Durch eine absorbierende Verkleidung der Seitenwände (die alle im Prinzip aus Publikumsflächen bestehen) entstehen wenige der für einen Räumlichkeits-eindruck wichtigen lateralen Reflexionen.

Das Pflichtenheft an die Modernisierung beinhaltete vor allem die Forderung, daß sich die berühmten akustischen Eigenschaften des Auditoriums durch die Renovierungsarbeiten an keiner Saalposition verschlechtern durften; darüber hinaus sollten jedoch Stärkemaß und Gleichmäßigkeit der Schallverteilung im Raum so weit wie möglich erhöht werden. Die als störend wahrgenommenen Echos sollten dagegen so weit möglich unterdrückt werden.

All dies mußte erreicht werden, ohne die Akustik variabel auszuführen, mit einer verbesserten Sichtbarkeit der historischen Dachkrümmungen, einem verbesserten Handling für die Veranstaltungstechnik und unter der Maßgabe, daß während der acht Jahre andauernden Umbauphase keine Veranstaltung ausfallen durfte. Die gesamte Modernisierungsmaßnahme wurde also parallel zum laufenden Veranstaltungsbetrieb geplant und durchgeführt.



Bild 3. Innenansicht des Maßstabsmodells der Royal Albert Hall

Fig. 3. Inner view of the scale model of the Royal Albert Hall

Hauptproblem jedoch waren die durch die geometrische Form eines Ellipsoiden mit elliptischer Grundfläche verursachten starken Echos und die Unregelmäßigkeit der Raumimpulsantworten besonders in den Brennpunkten in der Nähe des Saalbodens. Aus der Tatsache, daß sich die Fokussierungseigenschaften gekrümmter Flächen in Computersimulationen nur unvollkommen nachbilden lassen, ergab sich die Notwendigkeit der Modellierung des Auditoriums in einem raumakustischen Modell im Maßstab 1:12 (Bild 3).

Der Lösungsansatz für das Echoproblem war die Separation des Auditoriums in zwei gekoppelte Teilvolumina. Diese Separation dient zur Verbesserung der frühen Reflexionen und Verringerung des späten Nachhalls und wurde durch eine neue Positionierung der seit 1969 im Saal hängenden Reflektoren („Mushrooms“) realisiert. Diese schirmen gemeinsam mit dem Podiumsreflektor die Echopfade ab und reduzieren das akustisch wirksame Volumen des Auditoriums. Variationsparameter für die Separation sind der Anteil der durch Reflektoren abgeschirmten Fläche, die Verteilung der Reflektoren und die Größe der einzelnen Elemente.

Als Alternative wurde das Modell eines sogenannten „Velarium“, d. h. eines konvexen Segels, das den Deckenbereich des Saales vollständig abschließt, im Maßstabsmodell getestet, siehe Bild 4. Darüber hinaus wurde unter-



Bild 4. Das Maßstabsmodell mit der Dachvariante „Velarium“

Fig. 4. The scale model with ceiling variant „Velarium“



sucht, wie zusätzliche frühe Reflexionen durch eine entsprechend entworfene elektroakustische Anlage über Lautsprecher im Podiumsreflektor in den Saal eingebracht werden könnten.

An 18 Mikrofon- und 2 Quellpositionen wurden bei der Untersuchung sowohl in der realen Situation des damals bestehenden Saalzustandes als auch in allen 65 Modellvarianten die Impulsantworten bestimmt und daraus die mit einer Zeitkonstante von  $\tau = 20$  ms geglätteten energy-time-curves (ETC) berechnet. Diese wurden miteinander in ihrer Gestalt und den daraus abgeleiteten akustischen Parametern verglichen. Nachdem innerhalb gewisser Grenzen eine sehr gute Übereinstimmung des Modells mit der Wirklichkeit festgestellt wurde, konnten davon ausgehend durch Umbauten im Modell die Veränderungen der akustischen Eigenschaften durch beliebige bauliche Maßnahmen vor ihrer Realisation überprüft und bewertet werden. Außerdem gelang es näherungsweise, die verschiedenen historischen Zustände des Baues zu modellieren und deren akustische Eigenschaften zu messen, so etwa die gänzlich reflektierende Kuppel (1871), den Zustand mit absorbierendem Kuppelzentrum (1949), sowie Varianten mit z. B. 100 % oder 60 % der Anzahl „Mushrooms“, die zu Beginn des Projektes vorhanden waren, siehe Bild 5.

Die oben beschriebenen Experimente führten zu einer deutlich verbesserten Reflektorkonfiguration. Das modifizierte Neuarrangement der Reflektoren ist zum Zentrum hin verdichtet. Obwohl die Deckenfläche nun nur noch zu 27 % durch die Reflektoren abgedeckt ist (gegenüber 31 % bei der früheren Einteilung), konnte durch die Modellversuche eine in ihrer Wirksamkeit optimierte Positionierung der nach der Umgestaltung noch 94 Reflektoren gefunden werden, siehe Bild 6.

Weiterhin wurde der Einfluß verschiedener Geometrien des Podiums und des Podiumsreflektors auf die Echopfade und die akustische Performance im Modell untersucht. Diese Maßnahmen führten zu einem weiter optimierten Design mit größtmöglicher Echofreiheit auf allen Zuschauerplätzen. Eine weitere Aufgabe der akustischen Beratung der Modernisierung der Albert Hall lag in der Optimierung der Nachhallzeit im leeren und besetzten Zustand. Wichtig war dabei eine ausreichende, dem Volumen und dem optischen Raumeindruck entsprechende, hohe Nachhallzeit, die merklich, aber nicht zu sehr mit dem Besetzungsgrad variiert.

Da alle ca. 5.000 Sitze erneuert werden mußten, und die Bestuhlung eines Konzertsaales generell einen nicht zu unterschätzenden Einfluß auf die Nachhallzeit hat, fand eine Beratung der Neubestuhlung im gesamten Auditorium statt. In Laborversuchen im Hallraum wurden die Absorptionseigenschaften verschiedener Bestuhlungsvarianten mit und ohne Publikum ermittelt, so daß bei annähernd beibehaltenem Aussehen absorptionsoptimierte Bestuhlungsvarianten gefunden und im Auditorium eingebaut werden konnten. Um die Modifikationen der Nachhallzeit, welche in Maßstabsmodellen eher tendenziell zu erfassen sind, auch rechnerisch zu überprüfen, wurde ein bestehendes, mit dem Simulationsprogramm Odeon erstelltes Computersimulationsmodell des Auditoriums weiterentwickelt (Bild 7).

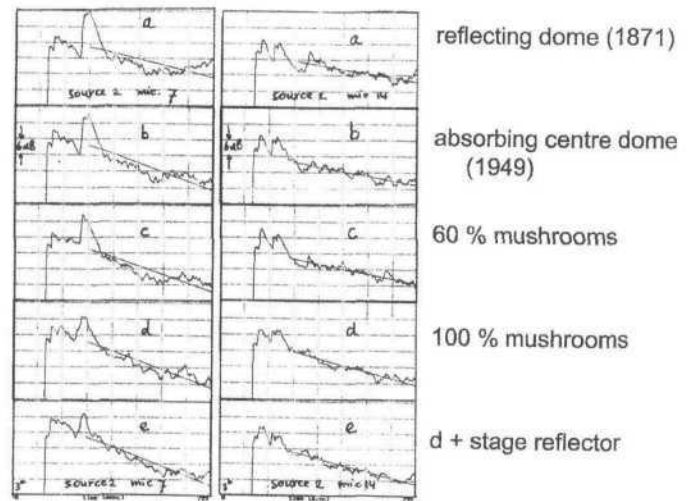


Bild 5. Impulsantworten, an gleicher Position in verschiedenen Modellvarianten gemessen

Fig. 5. Impulse responses, measured at the same position in different model variants

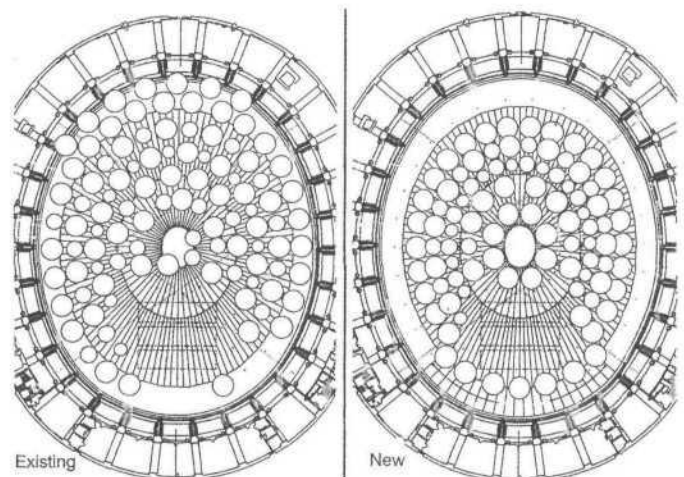


Bild 6. Vergleich der alten und der verbesserten Reflektorkonfiguration

Fig. 6. Comparison of old and improved reflector configuration

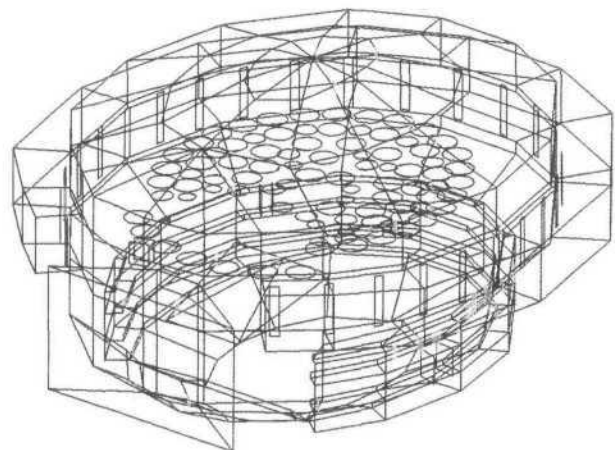


Bild 7. Computersimulationsmodell des Auditoriums

Fig. 7. Computer simulation model of the auditorium



In diesem konnten dann die Auswirkungen etwa der Positionierung der und Absorption auf den „Mushrooms“ und der neuen Bestuhlung sowie andere Änderungen der verwendeten Materialien und die Hinzufügung von Lufteinblasgittern auf die Nachhallzeit des Saales berechnet werden.

Durch die Gesamtheit der Maßnahmen konnte die Nachhallzeit des Auditoriums nicht nur auf gleichem Niveau gehalten, sondern sogar vor allem in höheren Frequenzen etwas angehoben werden, wie die regelmäßig vor Ort ausgeführten Kontrollmessungen dokumentieren (Bild 8).

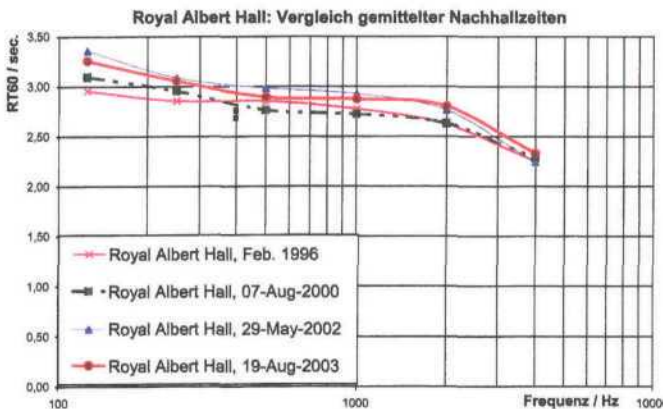


Bild 8. Vergleich der gemessenen Nachhallzeiten vor, während und nach der Renovierung  
 Fig. 8. Comparison of the measured reverberation times before, during and after refurbishment

Darüber hinaus wurden die verschiedenen Stadien der Beratung und Ausführung der Modernisierung durch wiederholte Messungen der Impulsantworten des Auditoriums begleitet. Dabei wurde auch eine Validierung der Untersuchungsergebnisse durch Abnahmemessungen vor Ort durchgeführt.

Abschließend läßt sich feststellen, daß das akustische Maßstabsmodell, ergänzt durch den Einsatz eines Computersimulationsmodells für Detailfragen wie die Nachhallzeit, ein hervorragendes Werkzeug für die Beratung der Maßnahmen zur Verbesserung der Hörsamkeit in der Royal Albert Hall war. Begleitende Labor-, Kontroll- und Abnahmemessungen sicherten die korrekte Ausführung dieser Maßnahmen und somit auch den Erfolg der Beratung: Erste Hörtests sind seit Juni 2002 sehr positiv ausgefallen. Wichtiger noch: Ausübende und Besucher der „Proms“-Konzerte sind seither mit dem Klang zufrieden. Die Akustik der Albert Hall hat sich also durch die Reduktion der Anzahl der „Mushroom“-Reflektoren, welche die vollständig renovierten Deckenbereiche viel besser sichtbar machte, keinesfalls verschlechtert – im Gegenteil. Neben den erwähnten Maßnahmen trug dazu sicherlich auch eine Begrenzung der Geräuschentwicklung der Be- und Entlüftung bei, welche ein weiteres Ziel der Beratung war.

### 3 Bauphysikalische Beratung: Strömungssimulationen

Eine weitere Fragestellung bei der Renovierung der Royal Albert Hall war neben einer geringen Geräuschentwick-

lung die Funktionsfähigkeit des Lüftungssystems für das 5.000 Personen fassende Auditorium. Als Grundlage für die Dimensionierung eines neuen Verdrängungsventilationssystems wurden dreidimensionale Strömungssimulationen (CFD) durchgeführt.

Das Lüftungssystem basiert auf dem Verdrängungsprinzip mit Quellluftzufuhr, wobei gekühlte Zuluft im unteren Bereich des Auditoriums mit geringer Strömungsgeschwindigkeit durch einen umlaufenden Gitterrostring zugeführt wird, wodurch Strömungsgeräusche minimiert werden. Im Dachbereich der Galerie, die sich rings um das Auditorium erstreckt, befinden sich Abluftöffnungen, die früher in der mehr als 120jährigen Geschichte des Gebäudes verwendet wurden. Eine Fragestellung bei der Strömungssimulation war, inwieweit eine Wiederherstellung der Funktion der Abluftöffnungen sinnvoll sein könnte und ob sie mit dem Quellluftsystem kompatibel ist. Es wurden Strömungssimulationen für diverse Nutzungsszenarien durchgeführt, z. B. für Winter- und Sommerfälle, jeweils sowohl mit der bisherigen Be- und Entlüftungsanlage als auch mit der geplanten neuen Verdrängungsventilation und alternativ mit zusätzlicher natürlicher Entlüftung.

Computational Fluid Dynamics (CFD) ist eine Berechnungsmethode, mit der es möglich ist, Luftbewegungen in einem Raum mit willkürlicher Geometrie zu simulieren. Das im vorliegenden Fall verwendete CFD-Programmpaket Phoenics basiert auf der Finite-Volumen-Methode. Zunächst wird die Geometrie des zu untersuchenden Raumes virtuell am Rechner mit einem dreidimensionalen Modell abgebildet. Das Rechenvolumen wird in eine endliche Anzahl kleiner Volumenelemente unterteilt, innerhalb derer die strömungstechnisch interessierenden Strömungsgrößen als konstant betrachtet werden. Diese können z. B. aus dem statischen Druck, den drei Geschwindigkeitskomponenten, der Enthalpie, aus welcher die Temperatur berechnet werden kann, und weiteren Variablen, z. B. des Turbulenzmodells bestehen. Darüber hinaus können auch andere Größen wie z. B. die CO<sub>2</sub>-Konzentration oder die Rauchkonzentration berechnet werden. Die Relationen zwischen den Strömungsgrößen in den Volumenelementen und den daran angrenzenden Volumenelementen werden für jedes Volumenelement festgelegt. Nach Festlegung der Randbedingungen und Wärme- oder Impulsquellen kann dann das Strömungsproblem iterativ gelöst werden.

Vor Beginn der Umbauarbeiten der Royal Albert Hall wurden mehrere Referenzmessungen im Auditorium zu Lufttemperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vorgenommen, um die bestehenden Verhältnisse zu dokumentieren und die Simulation kalibrieren zu können. Besonders wurde hierbei das Ausmaß der Luftinfiltration über die Außenhaut und die Decke des Auditoriums berücksichtigt. Infiltration tritt auf, wenn Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenseite eines Gebäudes vorliegen (Schornsteinwirkung) sowie durch die Windeinflüsse: Außenluft dringt über die Öffnungen in den Begrenzungsflächen ein und verläßt den Saal durch den „Oculus“, eine Öffnung, die sich mittig im Deckengewölbe befindet, siehe Bild 9. Zur Erfassung des heutigen Zustandes wurden während einer Vorstellung NTC-Geschwindigkeitssensoren und Thermokoppler im „Oculus“ plziert.



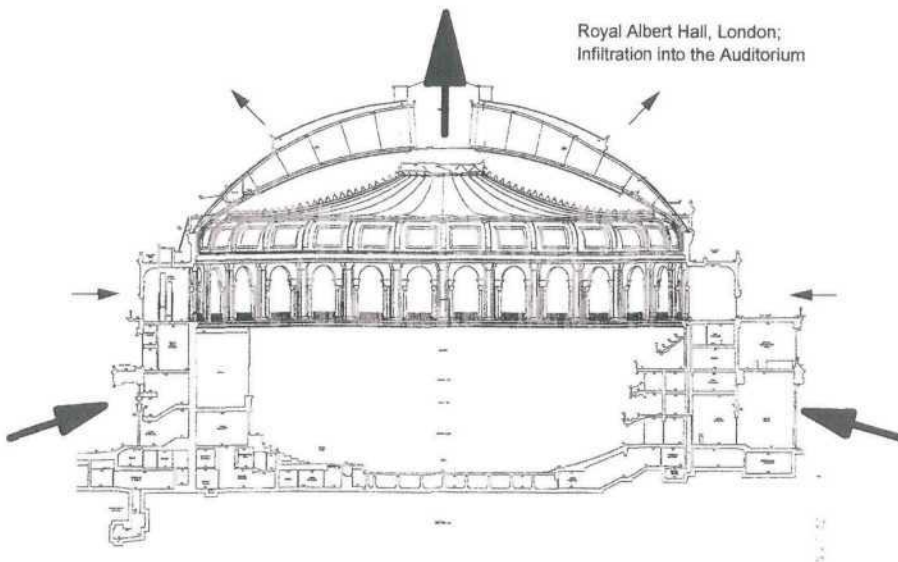


Bild 9. Infiltration in das Auditorium  
Fig. 9. Infiltration into the Auditorium

Gleichzeitig wurden an diversen Meßpunkten innerhalb des Saals die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen. Da sich die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen linear zur Infiltration verhalten, bietet sich hierdurch eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit, siehe Bild 10.

Darüber hinaus wurden auch Windkanalmessungen mit einem maßstäblichen Windkanalmodell des gesamten Gebäudes vorgenommen, um die Winddruckverteilung auf die Außenwände und das Dach zu bestimmen, siehe Bild 11.

Auf der Basis der dabei gemessenen dimensionslosen Formfaktoren für den Winddruck, der Winddruckkoeffizienten und der Windstatistik für die Innenstadt von London konnten die Windeinflüsse als weiterer Eingangsparameter für die Strömungssimulationen quantifiziert werden.

Beispielhaft werden hier die Simulationen für die untersuchten Sommerfälle dargestellt. Es wurden Strömungssimulationen für folgende Nutzungsszenarien betrachtet:

- A. Bestand (vor Umbau) bei Windstille,
- B. Bestand (vor Umbau) mit zusätzlicher Verdrängungsventilation,
- C. wie B, unter Berücksichtigung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit als äußere Randbedingung,
- D. wie B, mit zusätzlichen Abluftöffnungen im Dach der Galerie des Auditoriums,
- E. wie D, unter Berücksichtigung der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit als äußere Randbedingung

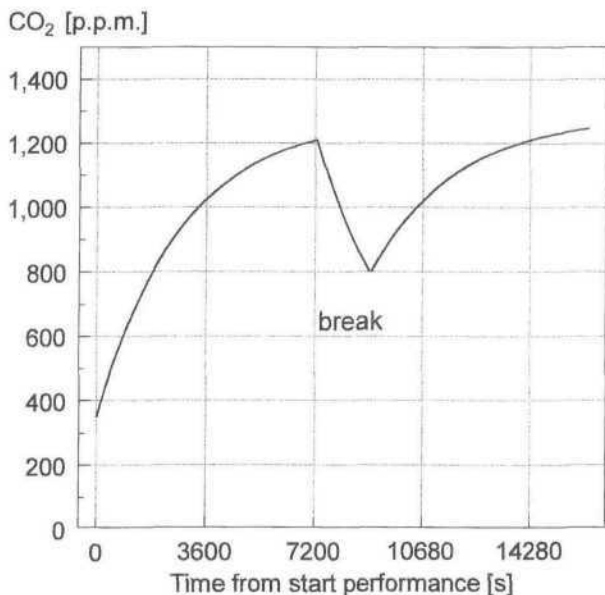


Bild 10. Mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration während einer Veranstaltung unter der Annahme einer gleichmäßigen Mischung mit Luft und einer Zulufrate von 36 m<sup>3</sup>/s

Fig. 10. Mean concentration of CO<sub>2</sub> during performance assuming perfect mixing and 36m<sup>3</sup>/s air supply

Dabei diente die Simulation der heute bestehenden Situation (Variante A) vor allem der Überprüfung und Kalibrierung des Simulationsmodells und der Randbedingungen. Die verschiedenen betrachteten Varianten lieferten bezogen auf die Komfortkriterien Temperatur, Strömungsgeschwindigkeiten und Luftqualität im Auditorium während des Verlaufs eines voll besetzten Konzertes folgende Ergebnisse:

Für Variante A, die Bestandssituation vor der Renovierung, ergab sich während eines voll besetzten Konzertes eine stetige Steigerung der Temperaturen im Auditorium. Gegen Ende der Veranstaltung lag die maximale Lufttemperatur bei ca. 31 °C und damit ca. 6 K oberhalb der in



Bild 11. Modell für Windkanaluntersuchung  
Fig. 11. Scale model in windtunnel



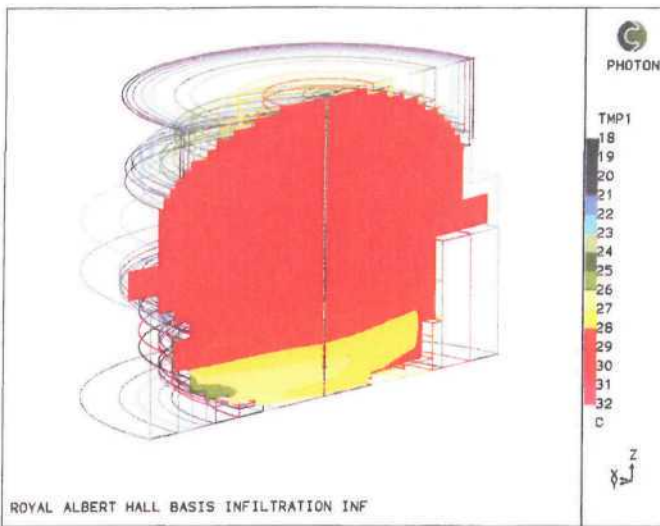


Bild 12. Temperaturverteilung im Auditorium (Sommerfall, Bestandssituation, einschließlich Infiltration)  
 Fig. 12. Temperatur distribution in Auditorium (summer outside conditions, current situation, including infiltration)

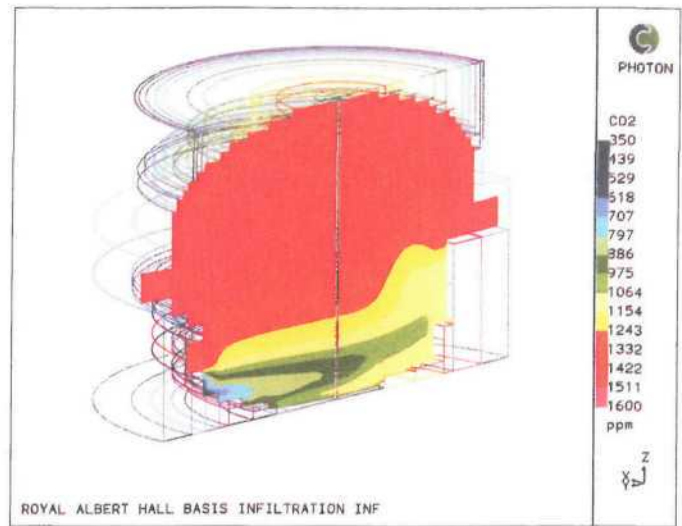


Bild 13. CO<sub>2</sub>-Konzentration im Auditorium (Sommerfall, Bestandssituation, einschließlich Infiltration)  
 Fig. 13. CO<sub>2</sub> levels in Auditorium (summer outside conditions, current situation, including infiltration)

der Simulation berücksichtigten Außentemperatur von 25 °C am Abend, siehe Bild 12. Dieses Ergebnis korrespondierte gut mit Messergebnissen von Temperaturen oberhalb 30°C bei ähnlicher Witterungslage.

In der Bestandssituation traten bei der Simulation hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bis zu 1600 ppm auf, siehe Bild 13, was weit oberhalb der Komfortgrenze von 1000 ppm liegt (der sogenannte Pettenkofer-Maßstab gemäß ASHRAE STANDARD 62 (E.87)). Dies weist auf eine niedrige Luftqualität hin.

Bei zusätzlicher Berücksichtigung des Verdrängungsventilationssystems (Variante B) fiel die berechnete Maximale Lufttemperatur im Auditorium um etwa 3 K ab. Die berechneten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen betragen noch bis zu ca. 1400 ppm.

Insgesamt wurden auch diese Ergebnisse als nicht ausreichend beurteilt, weshalb weitere Variantenberechnungen mit zusätzlichen Ventilationsöffnungen im Dach der Galerie durchgeführt wurden. Bei Windstille (Variante 4) veränderten sich die Ergebnisse dabei kaum. Dies resultiert daraus, daß die Temperaturunterschiede innen/außen bei warmen Sommerabenden so gering sind, daß sich kein deutlicher Schornsteineffekt ausbildet. Darüber hinaus befinden sich die Ventilationsöffnungen auf dem Dach der Galerie auf der halben Gebäudehöhe der Royal Albert Hall, so daß sich ein Schornsteineffekt ohnehin nur begrenzt ausbilden kann.

Bei Bedingungen in Central London mit Windgeschwindigkeiten von 2 m/s, die in mehr als 80 % der Zeit überschritten werden, traten bei Variante E deutlich geringere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf, im Mittel um 1000 ppm. Die maximale Lufttemperatur im Auditorium betrug dann gegen Veranstaltungsende ca. 26 °C.

Angesichts der vor der Renovierung vorhandenen Situation stellt die Kombination von Verdrängungsventilation mit Quellluftauslässen und zusätzlicher Öffnung der Abluftöffnungen über der Galerie eine deutliche Verbesserung dar. Daher wurde diese Maßnahmenkombination zur Realisierung weiter verfolgt.

#### Projektdaten

<i>Architekt</i>	Sir Henry Cole, Captain Francis Fowke (1871), Building Design Partnership (1996–1997)
<i>Projektmanager</i>	Building Design Partnership in London
<i>Auftraggeber</i>	Royal Albert Hall
<i>Zuschauerplätze</i>	ca. 5.000
<i>Bausumme</i>	ca. £ 58 Mio.
<i>Vorbereitung und Ausführung</i>	1995–2003

#### Literatur

- [1] Scott, H.Y.D.: On the construction of the Albert Hall. Professional Papers of the Royal Engineers. Vol. N XXI, 1873.
- [2] Bagenal, H.: Concert Music in the Albert Hall. Journal of the Royal Institute of British Architects, August 1941.
- [3] Shearer, K.: The Acoustics of the Royal Albert Hall. British Kinematography sound and television. February 1970.
- [4] Cremer, L. et al.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Bd. I. 2., völlig Neubearb. Aufl. Stuttgart: Hirzel Verlag 1978.
- [5] Beranek, L.L.: Music, Acoustic & Architecture, New York: Wiley and Sons, 1962.
- [6] Metkemeijer, R. A.: The Royal Albert Hall, past, present and future. Institute of Acoustics, London 1997.
- [7] Beranek, L.L.: Concert and Opera Halls – How they sound. Acoustical Society of America, 1996.
- [8] Metkemeijer, R.A.: The Acoustics of the Auditorium of the Royal Albert Hall before and after Redevelopment. Institute of Acoustics, London 2002.

#### Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Heiko Kremer, Peutz Consult GmbH, Kolberger Straße 19, 40599 Düsseldorf  
 Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz und  
 Dipl.-Phys. Gijsbert Marcel van Uffelen, Peutz bv Lindenlaan 41, NL-6584 AC Mook