Vom Klopfgeist zu einer hervorragenden Akustik (2) – Die neue Tonhalle Düsseldorf: Die akustische Quadratur des Kreises

Dipl.-Phys. Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz[1], Dipl.-Ing. Martijn Vercammen[2], Dipl.-Ing. Stéphane Mercier[3]

[1] *Peutz Consult GmbH, 40599Düsseldorf, Deutschland, Email: khl@peutz.de*
[2] *Peutz bv, NL-6584 AC Mook, Niederlande, Email: m.vercammen@mook.peutz.nl*
[3] *Peutz S.A.R.L., F-75010 Paris, Frankreich, Email: s.mercier@peutz.fr*

Einleitung

Eine umfassenden Sanierung der Tonhalle Düsseldorf im Jahre 2005 sollte auch die lange bekannten Probleme der Akustik des Kuppelsaales lösen. Auffälligstes Problem des kuppelförmigen Saales war ein starkes Kollektivecho, in dem sich die ersten Reflexionen von allen Flächenteilen der beinahe halbkugelförmigen zeitgleich aufaddierten.[1]

Optimierung der Geometrie im Maßstabsmodell

Da sich Fokussierungseigenschaften gekrümmter Flächen in Computersimulationen für tiefe Frequenzen nur unvollkommen nachbilden lassen, ergab sich die Notwendigkeit der Modellierung des Auditoriums der Tonhalle in einem raumakustischen Modell (Maßstab 1:12). Damit sich im Saal nach der Modernisierung keine Brennpunkte mehr formen, sondern oberhalb des Publikums ein 2-dimensionales Horizontalfeld gebildet wird, wurden umfangreiche Untersuchungen im Modell durchgeführt (182 Varianten aus 3 Basisgeometrien), um die optimale (das Echo am stärksten vermindernde) Form der Umlenkkörper zu bestimmen. Bei den Untersuchungen im Maßstabsmodell wurden an 14 festen Mikrofon- und 3 Quellpositionen mit Hilfe eines Maximalfolgenmesssystems zunächst die Impulsantworten der realen Situation des damals bestehenden Saalzustandes bestimmt und daraus die mit einer Zeitkonstante von 20 ms geglätteten ETCs in den fünf Oktavbändern 125 Hz bis 2 kHz berechnet. Diese wurden miteinander in Gestalt und den akustischen Parametern verglichen und bezüglich einer Echobildung beurteilt (150 Oktavplots/Variante u. Vergleich).

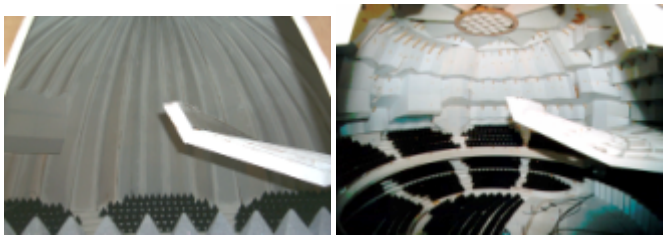

Abbildung 1: Innenansicht der alten und der Endgeometrie des raumakustischen Maßstabsmodells der Tonhalle

Untersuchungen an Diffusoren und Reflektoren

Grundlage zur Bestimmung der Geometrien der Umlenkkörper waren Untersuchungen in einem (für hohe Frequenzen) reflexionsarmen Raum. Um Geometrien zu bestimmen, welche den Schall bestmöglich aus der Spiegelrichtung heraus und minimal in Spiegelrichtung zurückwerfen, wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Diffusor- und Reflektorgeometrien auf ihre Rückstreucharakteristik hin untersucht. In einem speziellen Aufbau [2-3] wurden mit einem Maximalfolgenmeßsystem von den 1m x 1m großen Materialproben reflektierte Impulsantworten an 19, jeweils um 10° gedrehten Mikrophonpositionen radial im Halbkreis um die Probe gemessen, und zwar mit Einfallswinkeln lotrecht zur Testfläche sowie 10 und 20°. Aus den Messungen folgte, dass diffusierende Strukturen viel Energie innerhalb eines gewissen Winkels rund um die Spiegelrichtung zurückwerfen und prismatische Strukturen am geeignetsten sind (siehe Abbildung 2). Die Abmessungen der reflektierenden Flächen müssen mindestens ca. 3,5 m betragen, um bereits ab 200 Hz effektiv zu sein. Bei einem optimalen Winkel von 30° zur Kuppeltangenten ergibt sich daraus eine Konstruktionstiefe von ca. 1,75 m.

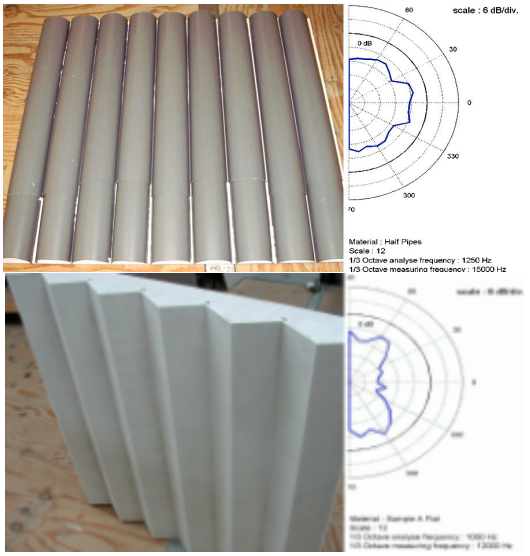

Abbildung 2: Zwei Prüflinge mit Rückwurfcharakteristiken: Halbzylinder (1250 Hz), 30°-Prismen (1 kHz)

Untersuchung schalltransparenter Materialien

Vorraussetzung für die Realisation des im Modell entwickelten Konzeptes der Umlenkkörper zur Echounterdrückung war die Umsetzung einer schalltransparenten Innenkuppel. Daher war es notwendig, ein geeignetes visuell geschlossenes Wandmaterial für die Innenkuppel zu bestimmen, welches über eine ausreichende akustische Transparenz verfügt, um die hinter der neuen Innenschale geplanten baulichen Umlenkkörper wirksam werden zu lassen. Um die Eignung bestimmter Materialien festzustellen, wurden im Peutz-Labor umfangreiche Messungen in einem reflexionsarmen Raum vorgenommen. Da eine

Schalltransparenz nahe 0 messtechnisch zu erfassen war, bedeutete dies, dass die Zeitantwort des Messaufbaus von jeder Messung einer Probe im Zeitbereich zu subtrahieren war, um die sehr geringe Reflexion des Metallgewebes (inkl. des Spannrahmens) bestimmen und von den Reflexionen des Aufbaus und Raumes separieren zu können [2-3].

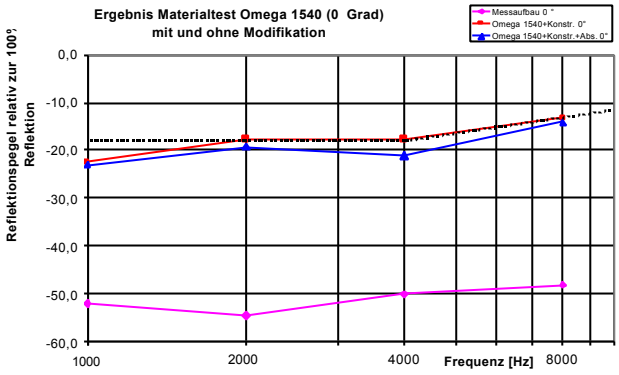

Abbildung 3: Messergebnis für das gewählte akustisch transparente Metallgewebe und Anordnung der Umlenkkörper hinter der neuen Innenkuppel.

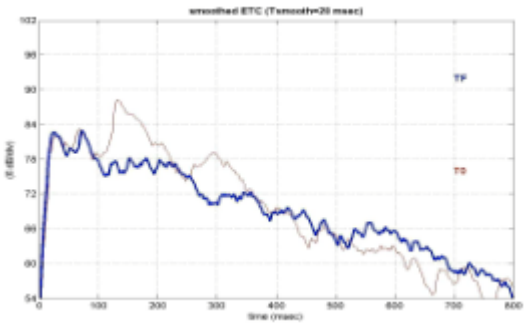

Abbildung 4: ETC-Vergleich des realen Saales vor dem Umbau mit Echo (blass) und nach dem Umbau (fett, typischer Maßpfad, 1 kHz-Okt.).

Erfolg des Lösungskonzeptes

Die im Modell entwickelte sehr komplexe Geometrie bildet die akustische Begrenzung des neuen Konzertsaales und wurde zwischen der Außen- und der früheren Innenkuppel so angeordnet, dass das akustisch effektive Volumen des Saales um ca. 10 % auf ca. 17.000 m^3 zunahm. Die gezielte Anordnung der Umlenkkörper hinter der akustisch transparenten Innenkuppel hat eine spektakuläre Veränderung der Reflexionsstruktur in beinahe allen betrachteten Messpfaden und Oktavbändern bewirkt. In Abbildung 1 ist die endgültige Reflektorkonfiguration im Modell und in Abbildung 4 die Verbesserung der ETC eines typischen Messpfades im Oktavband 1 kHz abgebildet. Ein ETC-Vergleich des realen Saales vor dem Umbau (blass) – nach dem Umbau (fett) zeigt die Unterdrückung des Echos.

Erhöhung der Nachhallzeit

Vor der Modernisierung war die Nachhallzeit der Tonhalle deutlich zu gering für symphonische Musik. Dies resultierte einerseits aus einem zu geringen spezifischen Volumen, andererseits lenkte die alte Kuppel die ersten Reflexionen direkt in das absorbierende Publikum. Die 2100 Sitze des Saales mussten erneuert werden, und da die Bestuhlung eines Konzertsaales generell einen großen Einfluss auf seine Nachhallzeit hat, fand eine Beratung der Absorption der Bestuhlung statt. In Laborversuchen und im Hallraum wurde die Absorption diverser Stuhlvarianten mit und ohne Besetzung untersucht, so dass bei annähernd beibehaltenen Abmessungen eine akustisch optimierte Bestuhlung gefunden und eingebaut werden konnte.

Mit der akustischen Ankoppelung eines großen Teils des Volumens, welches zuvor durch die Holzinnenschale vom Saal separiert wurde, gelang eine Erhöhung des spezifischen Volumens. Die Begrenzungsflächen der neuen das Echo unterdrückenden Zwischenkuppel wurden aus lackiertem Gipskarton (20 kg/m^2) gebaut, was die Absorption des Saales oberhalb 200 Hz deutlich verringert. .

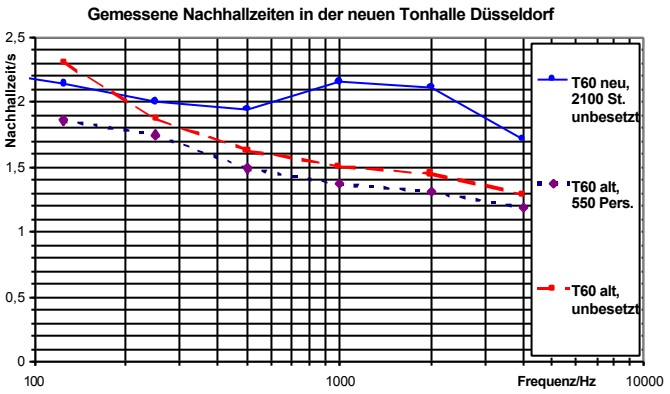

Abbildung 5: Nachhallzeiten der alten und neuen Tonhalle.

Zusammenfassung

Die akustische Modellmethode ist ein hervorragendes Werkzeug für die Beratung der Maßnahmen zur Verbesserung der Hörsamkeit in einem Kuppelsaal: die Echounterdrückung der Reflektorgeometrie im Saal konnte mit Hilfe des Maßstabsmodelles qualitativ präzise vorhergesagt werden. Durch die Modell- und begleitende Laboruntersuchungen gelang die Austreibung des Klopfgeistes und eine deutliche Verbesserung der Akustik in der neuen Tonhalle Düsseldorf.

Literatur

[1] M. Vercammen et al.: Vom Klopfgeist zu einer hervorragenden Akustik (1) – Die neue Tonhalle Düsseldorf: Die akustische Quadratur des Kreises, Fortschritte der Akustik, DAGA 2006

[2] AES-4id-2001: Characterization and measurement of surface scattering uniformity, Ausgabe 2001

[3] T. Cox, P. D'Antonio: Acoustic Absorbers and Diffusers, Spon Press, 2004