

Die neue Tonhalle Düsseldorf – eine raum- und elektroakustische Quadratur des Kreises

Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz, Martijn Vercammen, Kaling Khouw

Aufgrund notwendig gewordener Brandschutz- und Asbestsanierungen musste die Tonhalle Düsseldorf 2005 modernisiert werden. Dabei ergab sich die einmalige Chance, diese Sanierung zu einer tiefgreifenden Verbesserung der bedenkliehen Akustik zu nutzen. Der „Klopfgest“ der Tonhalle – ein extrem starkes Brennpunktecho bedingt durch den kuppelförmigen Bau – war eines der gravierenden akustischen Probleme dieses Saales. Gerade diese halbkugelförmige Kuppel von 38 m Durchmesser und 24 m Höhe galt es jedoch aus Denkmalschutzgründen zu erhalten. Wie jedoch können die existentiellen akustischen Probleme einer halbkugelförmigen Kuppel gelöst werden, ohne in die Kuppelstruktur einzugreifen? Gemeinsam mit dem Architekturbüro Hentrich-Petschnigg & Partner KG (HPP), Düsseldorf wurde ein innova-

tives Lösungskonzept erarbeitet und realisiert: akustisch wirksame Schallumlenkkörper hinter einer neuen, akustisch transparenten Innenkuppel.

Echo-Problematik

Die Kuppel der Tonhalle mit ihrer Form einer Halbkugel ähnelte in ihrer Wirkung einem Hohlspiegel: Durch die konkave Krümmung bildeten sich Brennpunkte für den Schall (siehe Abb. 1).

In den Brennpunkten trafen alle ersten Reflexionen gleichzeitig ein und addierten sich auf, wodurch ein sehr starkes Kollektivecho entstand, welches 80 ms nach und bis zu 20 dB stärker als der Direktschall eintraf. Zu jedem Sendepunkt auf der Bühne gab es einen Spiegelpunkt im Zuschauerbereich auf Ohrhöhe, an welchem das Kollektivecho, der so genannte „Klopfgest“ auftrat. Um diese

Echo-Effekte zu eliminieren, wurde der Lösungsansatz einer visuell geschlossenen, akustisch jedoch transparenten Innenkuppel entwickelt. Durch eine geeignete geometrische Struktur hinter der Innenkuppel wurde die halbkugelförmige Kuppel akustisch aufgebrochen, um somit die Echobildung zu verhindern. Es war also nötig, eine geometrische Struktur zu konstruieren, welche den Schall gerichtet aus den Spiegelpunkten hinausreflektiert, und ein akustisch völlig transparentes Material zu finden, das an die Stelle der bisherigen Holzinnekkuppel treten konnte.

Maßstabsmodelluntersuchung

Um die Fokussierungseigenschaften im gesamten Frequenzbereich genau untersuchen zu können, wurde die Tonhalle als akustisches Modell im Labor der Peutz-Gruppe im Maßstab 1:12 nachgebildet.

Da sich schnell herausstellte, dass Diffusoren allein ein solches Echoproblem nicht beheben können, da diese den Schall nicht vollständig aus den Brennpunkten herauslenken, mussten spezielle geometrische Umlenkkörper entwickelt werden. Im reflexionsarmen Raum wurden verschiedene Geometrien auf ihre Schallumlenkung untersucht. Dabei stellten sich für den Fall der Tonhalle prismatische Reflektoren als Optimum heraus. In Modellversuchen wurde der ideale Winkel ermittelt, da sich durch die komplexe dreidimensionale Gesamtstruktur wieder Reflexionen bilden könnten, die in die Spiegelpunkte hinein reflektieren.

Um auch im tieffrequenten Bereich bei Frequenzen von 200 Hz optimale Umlenkung zu erzielen, mussten die Elemente eine Größe von minimal 3,5 m aufweisen. Anhand des Maßstabmodells wurden die Ergebnisse auf ihre Wirkungsweise und Umsetzbarkeit untersucht. In vielen verschiedenen Modellvarianten wurde eine Idealanordnung der prismatischen Reflektoren in 20 Grad bis 30 Grad-Winkeln zur Kuppeltangente (im Vertikalschnitt) und eine sägezahnartige

Auffächerung in 10 Grad-Winkeln im Horizontalschnitt erarbeitet. Diese Umlenkkörper wurden beim Umbau in Form von doppelten, lackierten Gipsplatten mit einem Flächengewicht von 20 kg/m² realisiert.

Material der neuen Innenkuppel

Um den Anforderungen des Denkmalschutzes nachzukommen, musste die Optik der Kuppel in der Tonhalle erhalten bleiben. Damit jedoch das Konzept umgesetzt werden konnte, musste ein Material gefunden werden, welches optisch geschlossen, akustisch jedoch nicht-reflektierend und nichtabsorbierend ist, also akustisch eine maximale Transparenz aufweist, damit die sich dahinter befindende Umlenkstruktur nicht an Wirksamkeit verliert. Unter den gegebenen Umständen und Anforderungen wurden die in Frage kommenden Materialien auf die Klasse der Metallgewebe eingeeignet.

Mit Hilfe einer speziellen Messtechnik, welche durch Subtraktion der Reflexionen des Raumes und des Messaufbaus auch die geringsten Reflexionen der Metallgewebemuster detektiert, wurden die Metallgewebe auf ihre Schalltransparenz und die durch das Gewebemuster verursachten Reflexionen getestet. So gelang es, ein geeignetes Metallgewebe zu finden und so zu optimieren, dass es die erforderliche sehr hohe Schalltransparenz aufweist.

Verbesserung der Podiumsakustik

Ein weiteres Defizit der Tonhalle bestand vor der Modernisierung in der mangelhaften Akustik auf dem Podium: Ziel war es, verbesserte Bedingungen für das Zusammenspielen der Musiker zu schaffen. Dazu wurde auch das Reflexionsverhalten von Podiumsreflektor und Podienrückwand im Maßstabmodell untersucht. Ergebnis war eine Neugestaltung der Podiumumgebung: Die Rückwand wurde erhöht, das Reflexionsverhalten des Reflektors für mehr frühe Reflexionen auf dem Podium optimiert und umfangreiche Veränderungen aller Flächen, welche in direkter Umgebung des Orchesters lagen, vorgenommen. Alle Maßnahmen zusammen verbesserten die Hörbarkeit der Musiker untereinander deutlich.

Realisation

Innerhalb kürzester Zeit wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Architekturbüro HPP die neue Kuppel der Tonhalle realisiert. Die geometrisch aufgefalteten GK-Umlenkkörper bilden eine neue Kuppelschale zwischen der Außenkuppel

und der neuen Innenkuppel aus Metallgewebe. Innerhalb von nur sechs Monaten wurde der Saal komplett modernisiert, zum Teil im Drei-Schicht-Betrieb mit bis zu 100 Bauarbeitern gleichzeitig. Durch ständige begleitende Messungen, Ausführungskontrollen und Untersuchungen wurde die korrekte Ausführung aller Maßnahmen gesichert.

Akustisches Resultat war eine spektakuläre Veränderung in der Reflexionsstruktur der Tonhalle: Überall, wo in den Messungen vor der Modernisierung die berühmten Klopfgest-Echos zu finden waren, war nach der Modernisierung nichts mehr davon übrig. Ergebnis ist die Eliminierung des „Klopfgestes“ durch die neue Zwischenkuppel, die nicht wie die alte Kuppel wie ein Hohlspiegel funktioniert, sondern den neu entstandenen Kuppelraum als Resonanzkörper nutzt.

Nachhallzeitoptimierung

In einem besetzten Konzertsaal soll die Nachhallzeit für sinfonische Musik optimalerweise bei ca. 2,1 s liegen. Vor der Modernisierung der Tonhalle lag die Nachhallzeit mit 1,3 s deutlich unter diesem optimalen Wert. Durch die optisch geschlossene, akustisch jedoch transparente neue Kuppel vergrößerte sich das Gesamtvolumen des Saales von ca. 15.000 m³ auf ca. 17.000 m³, also etwa um 10%. Diese Vergrößerung trug zur gewünschten Nachhallzeiterhöhung in der Tonhalle bei, ebenso wie eine tiefgreifende Absorptionsminimierung der Bestuhlung. Darüber hinaus sorgen die neuen, schallharten Schallumlenkkörper einerseits durch ihr minimal absorbierendes Material und Finish, andererseits dadurch, dass sie die ersten Reflexionen nicht mehr ins absorbierende Publikum zurückwerfen ebenfalls für eine Erhöhung der Nachhallzeit. Der neue Saal kommt mit einer Nachhallzeit von 2,1 s im unbesetzten und 1,9 s im besetzten Zustand dem Ideal nach den baulichen Modernisierungsmaßnahmen 2005 bereits sehr nahe (siehe Abb. 8). Die Differenz resultiert aus der zusätzlichen Absorption des Publikums im besetzten Zustand: Bei einem Volumen von 17.000 m³ und einer Maximalbesetzung inkl. Orchester und Chor von ca. 2000 Personen wird jedoch das für das Nachhallzeitideal notwendige Design-Ziel von 10 m³ pro Person nicht erreicht. Daher wurde schon frühzeitig der Einbau einer zusätzlichen elektroakustischen Anlage zur Nachhallverlängerung geplant, mit dem Ziel, den Einfluss des Publikums auf die Nachhallzeit zu kompensieren. Mit den baulichen Maßnahmen zur Erhöhung der Nach-

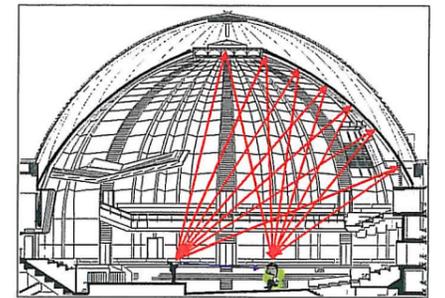


Abb. 1: Brennpunktproblematik der Tonhalle Düsseldorf vor der Modernisierung

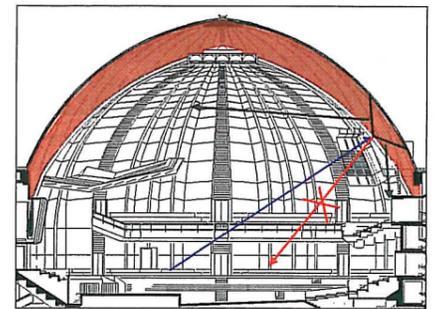


Abb. 2: Lösungsansatz zur Echounterdrückung: eine speziell aufgefächerte Zwischenkuppel lenkt den Schall aus den Brennpunkten heraus.



Abb. 3: Die Tonhalle im Maßstabmodell 1:12



Abb. 4: 3D-Modell mit Umlenkkörpern



Klaus-Hendrik Lorenz-Kierakiewitz arbeitet als raumakustischer Berater bei der Peutz Consult GmbH, Düsseldorf und hat neben der Beratung der Sanierung der Rheingoper und Mitarbeit an der Sanierung der Royal Albert Hall mit Dipl.-Ing. Martijn Vercammen maßgeblich die akustische Beratung der Sanierung der Tonhalle Düsseldorf durchgeführt.



Martijn Vercammen ist Direktor der Peutz Gruppe, seit 1995 Mitglied im niederländischen Normenausschuss (NEN) für Bauakustik, Leiter des nach ISO 17025 akkreditierten Akustiklabors der Peutz-Gruppe, seit 2004 Präsident der niederländischen Akustik-Gesellschaft NAG und Präsident der kommenden Akustik-Konferenz der NAG und DAGA 2009.



Kaling Khouw studiert Dipl. Ing. (FH) Ton- und Bildtechnik an der FH und Robert-Schumann Hochschule Düsseldorf und erstellte im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Peutz Consult GmbH ihre Diplomarbeit über die Nachhallanlage der Tonhalle.



Abb. 5: Optisch geschlossenes Metallgewebe und Umlenkkörper dahinter

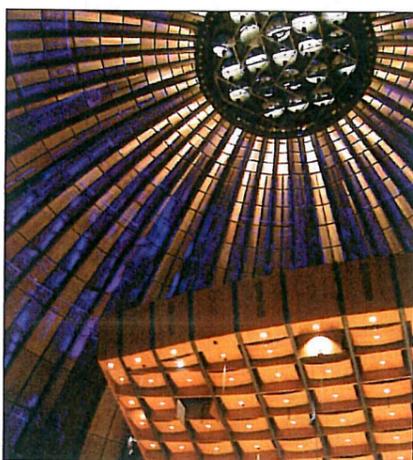


Abb. 6: Neuer Podiumsreflektor der Tonhalle

Totalsanierung mit einem derart engen Zeitrahmen.

Ein weiteres Ziel der Installation war es eine Möglichkeit zu schaffen, über das hier baulich Machbare hinaus frühe laterale Reflexionen hinzuzufügen.

Elektroakustische Nachhallssysteme

Elektroakustische Nachhallssysteme unterscheidet man nach der Methode ihrer Nachhallzeitverlängerung. Es existieren

Kohärenz

Als Kohärenz wird eine lineare Abhängigkeit zweier Signale in Frequenz, Laufzeit und Phase bezeichnet. Zwei Signale, welche in Frequenz, Laufzeit und Phase unabhängig voneinander sind, nennt man auch inkohärent.

zwei Grundfunktionsprinzipien, denen alle Varianten von Nachhallssystemen zugeordnet werden können: In-line-Systeme und Non-In-line-Systeme. So genannte Hybrid-Systeme kombinieren beide Prinzipien. Dabei handelt es sich stets um mehrkanalige Systeme. Jeder Kanal besteht aus Mikrofon, Verstärkern, einem oder mehreren Lautsprechern. In ihrer jeweiligen Realisation unterscheiden sich die Nachhallssysteme durch ihre Anzahl an inkohärenten Kanälen. Je mehr inkohärente Kanäle vorliegen, desto mehr kann die Nachhallenergie erhöht und die Nachhallzeit verlängert werden.

1. In-line-Systeme

In-line-Systeme sind im Prinzip aufgebaut wie Beschallungs-Systeme, wobei die Quellsignale möglichst direkt abgenommen werden. Der Direktschallanteil sollte deutlich höher als der Diffusschallanteil sein. Um dies zu erreichen, werden wenige, stark richtende Mikrofone in der Nähe der Quellen verwendet. Wie bei allen PA-Systemen müssen hörbare akustische Rückkopplungen zuverlässig vermieden werden. Zur Nachhallzeitverlängerung verwenden In-line-Systeme daher Hallgeneratoren, wobei jeder Hersteller seine eigenen Algorithmen verwendet, in Kombination mit Matrizen, welche hier deshalb als In-line-Komponenten bezeichnet werden. Eine Matrix schafft Querverbindungen zwischen inkohärenten Kanälen, was die Anzahl der inkohärenten Kanäle reduziert. In-line-Systeme sind zum Beispiel ACS, SIAP, LARES.

2. Non-In-line-Systeme

Im Gegensatz zu In-line-Systemen werden die Quellsignale beim Non-In-line-System nicht direkt abgenommen, sondern die ungerichteten Mikrofone im Nachhallfeld positioniert, um das bereits durch den Raum selbst verhaltene Signal aufzunehmen und über die ebenfalls im Hallfeld verteilten Lautsprecher wiedergegeben. Bei diesem Funktionsprinzip wird die Nachhallzeiterhöhung durch kontrollierte akustische Rückkopplung erreicht. Die Wiedergabe des abgenom-

menen Hallsignals erfolgt dabei mit sehr geringer Schleifenverstärkung pro Kanal. Diese führt zu einer sehr geringen Erhöhung des Hallpegels durch jeden Kanal. Die maximale Verstärkung ist dabei abhängig von Nachhallzeit, Raum und Bandbreite des Systems; die maximale Nachhallzeitverlängerung von der Anzahl inkohärenter Kanäle.

a) AR (Assisted Resonance, GB 1960 [1])

Das AR-System ist die erste Nachhallanlage, welche in einem Konzertsaal eingebaut wurde: 1964 in der Royal Festival Hall in London. Es besaß sehr viele unabhängige Kanäle, jeder Kanal bandbegrenzt auf ein anderes Terzband.

b) MCR (Multichannel Amplification of Reverberation, NL 1967 [2,3])

Das MCR-System kann als Nachfolger des AR-Systems angesehen werden. Im Gegensatz zum AR-System sind alle Kanäle jedoch breitbandig und werden nur, falls nötig, auf den Raum und die Lautsprecher angepasst. Auch hier wird mit vielen inkohärenten Kanälen (50–100) und sehr geringer Schleifenverstärkung, max. –20 dB entsprechend ca. 1% pro Kanal, gearbeitet. Das MCR System war z.B. im Hörspielstudio des WDR Köln und in der Salle Maurice Ravel in Lyon eingebaut.

c) CARMEN (Contrôle Actif de la Réverbération par Mur virtuel à Effet Naturel, FR 1991)

Das System CARMEN verwendet so genannte „aktive Zellen“: In Wandpanelen sind je ein Mikrofon, Lautsprecher und die dazugehörigen Verstärkereinheiten eines Kanals eingebaut, dadurch liegen Mikrofon und Lautsprecher eines Kanals dicht beieinander. Da der Lautsprecher das vom Mikrofon aufgenommene Signal etwas stärker wieder in den Raum gibt, als es die Wand erreicht, wird die Nachhallzeitverlängerung quasi durch „negative Absorption“ erreicht.

3. Hybrid-Systeme

a) VRAS (Variable Room Acoustics System, NZ 1998)

VRAS bezeichnet sich selbst als ein Non-In-line-System mit In-line-Komponenten. Die Basis ist die eines MCR-Systems: Mikrofone und Lautsprecher werden im Nachhallfeld positioniert. In-line-Komponenten dieses Systems sind eine Matrix und Hallgeneratoren als Inserts vor den Kreuzungspunkten der Matrix. Mit den Hallgeneratoren kann die Nachhallzeit unabhängig von der Schleifenverstärkung

geregelt werden, was die Stabilität des Systems erhöhen soll.

b) XLNT-MCR (NL 2002)

Hierbei handelt es sich um das MCR-Prinzip mit Mikrofonen und Lautsprechern im Nachhallfeld, jedoch werden zusätzliche Mikrofone und Lautsprecher auch Direktfeld positioniert (In-line-Komponenten). Diese können zur Hinzufügung früher Reflexionen auf dem Podium oder im Parkett genutzt werden. Ein XLNT-MCR-System ist unter anderem im Kursaal Casino in Ostende (B) eingebaut.

Eine Nachhallanlage und dann ist alles gut? Grenzen von Nachhallanlagen

Wie alle konstruierten Systeme haben auch Nachhallanlage prinzipbedingte und allgemeine Grenzen. Elektroakustische Grenzen bestehen im Risiko unerwünschter Rückkopplungen und in der Verstärkung von Störgeräuschen. Eine Vermeidung von Interaktionen mit Funkstrecken, Hörgeräten oder PA-Anlagen erfordert eine sorgfältige Auslegung und Einregelung der Anlage. Die Über-Alles-Performance ist direkt abhängig von der Qualität aller verwendeten Komponenten. Einer der wesentlichen allgemeinen Faktoren ist die Notwendigkeit, die Bedienenden einer solchen Anlage sorgfältig in der Bedienung zu schulen, denn, erfordert eine öffentliche Probe eine Probe- oder Konzerteinstellung? Ist ein Orchesterkonzert mit Chor in Chor- oder Konzerteinstellung zu betreiben? Die Variabilität kann bei unqualifizierter Verwendung zu ungünstigen Fehlbedienungen führen. Weiter stellt sich die Frage nach der Langzeitkonstanz solcher Anlagen. Ein gut gebauter Konzertsaal bleibt Jahrzehnte beispielbar – doch wie lange werden Einzelkomponenten und originale Ersatzteile bedingt durch die sich immer weiter verkürzenden Produktionszyklen verfügbar sein? Elektroakustische Nachhallanlagen sind durch ihre vielen elektronischen Bauteile zudem wartungsintensiv. Die zentrale Fragestellung in diesem Zusammenhang ist, ob bei einem Ausfall der Anlage alle Veranstaltungen dennoch ohne größere Abstriche stattfinden können: Dies ist nur dann möglich, wenn keine zu

große Nachhallzeit-Differenz der Zustände mit und ohne Anlage besteht und der Saal auch ohne Anlage nicht zu große akustische Defekte aufweist.

Die Nachhallanlage in der Tonhalle

Nach der weitgehenden Realisation der baulichen Umbaumaßnahmen in der Tonhalle bewahrheitete sich, dass die akustischen Maßnahmen zur Nachhallzeitoptimierung bereits derart effektiv waren, dass durch die Nachhallanlage lediglich die durch das Publikum hinzukommende zusätzliche Absorption zu kompensieren war, so dass der Saal auch besetzt den optimalen Wert der Nachhallzeit (2,1 s) für sinfonische Musik er-

dürfen nicht lokalisiert werden können

- System darf die Klangfarbe nicht verfärbt, insbesondere nicht im Nachhallvorgang
- System muss über die gesamte Fläche und bei allen Pegeln zuverlässig und stabil arbeiten; Möglichkeit zusätzlicher lateraler Reflexionen

Um jedes Risiko der Lokalisation oder Klangfarbenveränderung zu vermeiden und eine gleichmäßige Verteilung zu erreichen, verfügt der Systementwurf über mehr Kanäle als für die reine Nachhallzeitverlängerung notwendig. Die geeignete Positionierung aller Mikrofone und

Lautsprecher bereitete dabei einiges Kopfzerbrechen, damit alle Wandler minimal einen Hallradius voneinander, vom Publikum und allen Lärmquellen entfernt bleiben.

Durch die Nachhallenergieerhöhung wird nämlich auch der Störschallpegel im Raum angehoben, und zwar umso mehr, je mehr die Quellen im Nahbereich der Mikrofone der Nachhallanlage sind, weshalb sehr darauf geachtet wurde, dass dies hier nicht der Fall ist.

Auf die Ausschreibung des Systems hin meldeten sich verschiedene Anbieter und gaben, wie verlangt Referenzinstallationen in Europa an. Die Installationen dreier Anbieter wurden messtechnisch auf die Verlängerung der Nachhallzeit, der Erhöhung der Nachhallenergie, Natürlichkeit der Klangfarbe und Störschallpegelerhöhung untersucht, welche auftritt, wenn die Anlage im Leerlauf-Betrieb ist. Bei diesen Messungen der Referenzinstallationen erwies sich die XLNT-MCR-Anlage als am besten geeignet, um in die Tonhalle Düsseldorf eingebaut zu werden, insbesondere da die

Natürlichkeit der Nachhallzeitverlängerung vollständig gegeben war. Bei dem extrem zeitkritischen Umbau der Tonhalle ergab sich eine sehr kurz bemessene Zeitschiene von drei Wochen für den kompletten Einbau der Nachhallanlage und drei Tagen für die Einmessung. Während dieser Zeit wurden 69 omnidirektionale Mikrofone (AKG CK 3290) und 96 Lautsprecher installiert (Renkus-Heinz, Serie TRX, für die Tonhalle modifiziert).

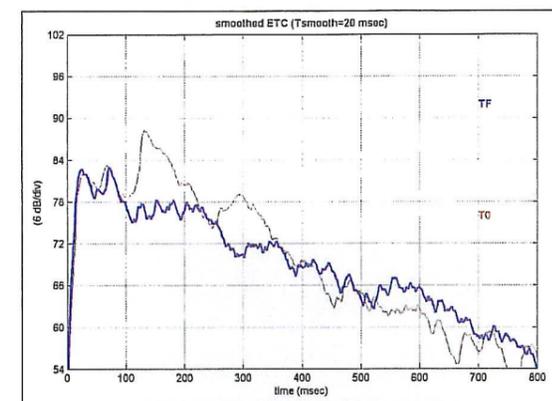


Abb. 7: Durch den Umbau bewirkte Echoeliminierung (dünn: vorher, dick: nachher)

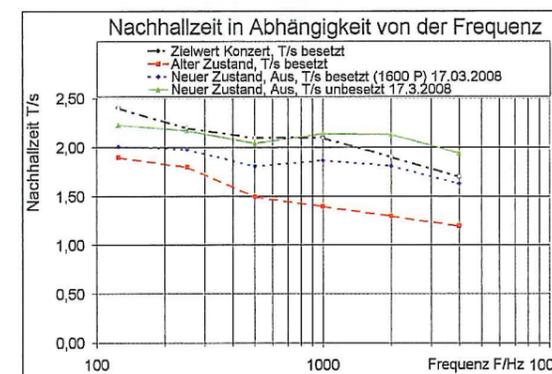


Abb. 8: Optimale und gemessene Nachhallzeiten

reichen kann.

Bereits in der Ausschreibung des Systems wurden die Anforderungen an das System großzügig formuliert:

- Nachhallzeitverlängerung auf 2,1 s
- Erhöhung der Nachhallenergie
- System darf keine Zeitvariabilität aufweisen
- System darf nicht von der natürlichen Raumakustik verschieden wahrgenommen werden
- System oder einzelne Lautsprecher

Messungen und Auswertung

Alle Einstellungen der Nachhallanlage („Konzert“, „Probe“, „Chor“, „Aus“) in der Tonhalle wurden messtechnisch begleitet. Um Nachhallzeiterhöhung und Impulsantworten mit der Anlage in Betriebssituation messtechnisch überprüfen zu können, musste bei den Messungen der Zustand mit Publikum simuliert werden. Dazu wurden ca. 900m² spezieller Publikumssimulationsstoff über die Sitze gebreitet, um eine Besetzung von ca. 1600–1800 Personen zu simulieren [4]. Um den Hintergrundschallpegel im Saal von 24 dB(A) auf 20,5 dB(A) zu senken, wurde das Verstärkerrack aus dem Orgelsack verlegt, weshalb die Anlage 2007 neu eingemessen und wieder messtechnisch überprüft werden musste.

In der Auswertung der Nachhallzeitmessungen ist der Unterschied mit und ohne Nachhallanlage gut erkennbar. Ein Vergleich der Impulsantworten in ETC-Darstellung mit und ohne Anlage macht den Unterschied von ΔL (Hall) und ΔT (Pegel) sichtbar. Ebenso zu erkennen: Es gibt keine neuen Echos.

Fazit

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Nachhallanlage in der Tonhalle Düsseldorf ihre Aufgaben in Hinblick auf natürliche Elimination der Publikumsabsorption, der Erhöhung der

Nachhallenergie und Verlängerung der Nachhallzeit erfüllt. Der Saal hat bereits ohne Nachhallanlage eine gute Akustik, mit der Nachhallanlage jedoch kann etwas zusätzlich geboten werden. Mit der Gesamtheit von baulichen Maß-

nahmen zur Verbesserung der Akustik und Nachhallanlage kann die Tonhalle nach der Modernisierung insgesamt eine ausgezeichnete Akustik vorweisen.

Literaturangaben

[1] P.H. Parkin, K. Morgan: „Assisted Resonance“ in the Royal Festival Hall, London: 1965–1969, *J. Acoust. Soc. of Am.*, Vol. 48, April 1970

[2] N.V. Franssen: *Sur l'Amplification des Champs Acoustiques*, *Acoustica*, Vol. 20 Heft 6, 1968

[3] S.D. de Koning: *The MCR system-multiple-channel amplification of reverberation*, *Phillips Technical Review*, Vol. 41, 1, 1983/84

[4] K.-H. Lorenz, F. Breuer: *Simulation des Publikums durch spezielle Polyester-Textilien bei der raumakustischen Messung von Konzertsälen in der Praxis*, *DAGA 2003*

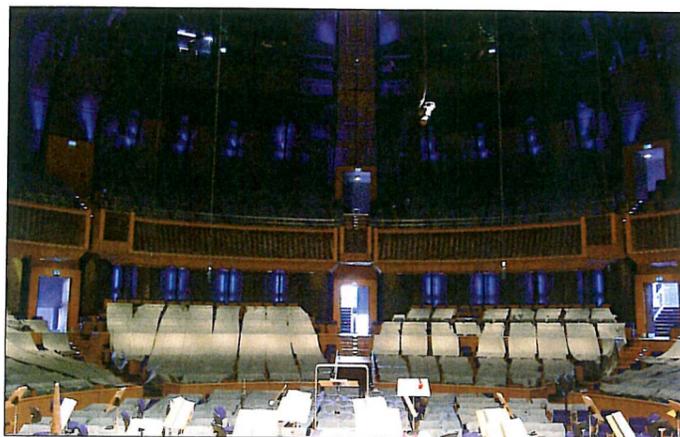


Abb. 9: Messung am 15. April 2006 in der Tonhalle Düsseldorf mit Publikums-Simulation

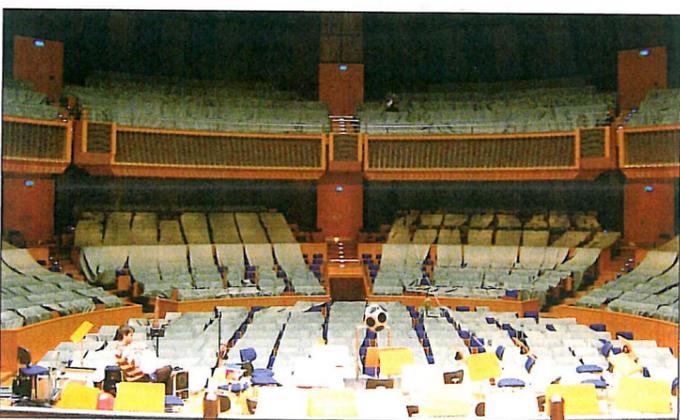


Abb. 10: Messung am 17. März 2008 in der Tonhalle Düsseldorf mit Publikums-Simulation

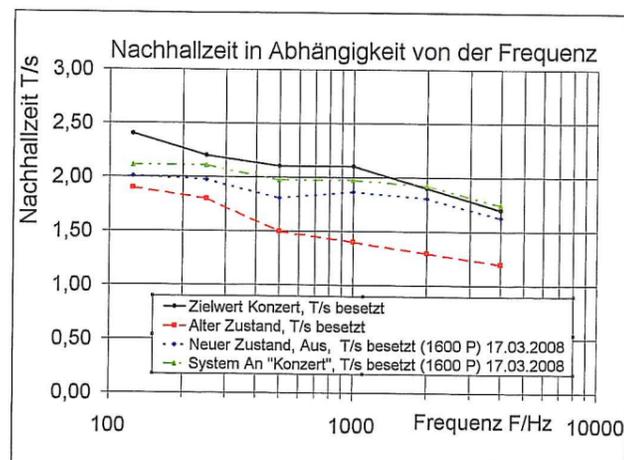


Abb. 11: Nachhallzeiten der „Konzert“-Einstellung

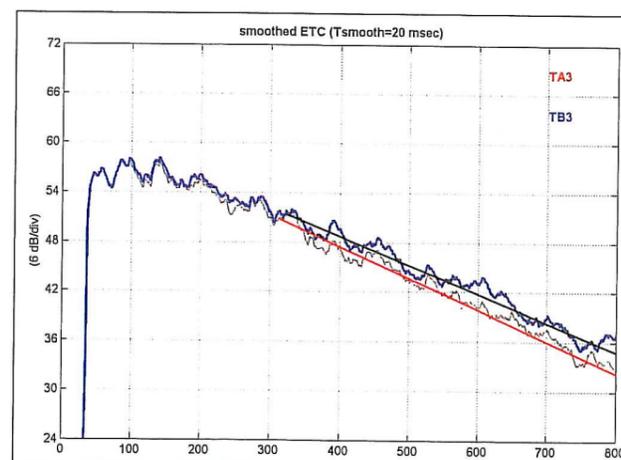


Abb. 12: ETC-Vergleich: Nachhallanlage in „Konzert“-Einstellung (TB3, obere Linie) und Nachhallanlage „Aus“ (TA3, untere Linie)