

## **RAUMAKUSTIK UND BESCHALLUNGSKONZEPTE IN DER ST. HEDWIG-KATHEDRALE BERLIN**

Mathias Krumbiegel<sup>1</sup>, Andreas Türk<sup>1</sup>, Thomas Schnitzler<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Graner Ingenieure GmbH, 04105 Leipzig, E-Mail: krumbiegel@graner-leipzig.de*

<sup>2</sup> *PROAID Ingenieure, 41066 Mönchengladbach, E-Mail: thomas.schnitzler@pro-aid.de*

### **Einleitung**

In dem vorliegenden Beitrag wird die aktuelle Planung für die Akustik und Beschallung in der St.-Hedwig-Kathedrale Berlin, einem Zentralbau mit rundem Grundriss und einer großen Kuppel vorgestellt. Neben der ohnehin schon – in akustischer Hinsicht - problematischen Raumform mit typischen Effekten wie Schallfokussierungen und potentiellen Echos, weist die Kirche einen ausgesprochen langen Nachhall auf. Außerdem ist die Platzierung des Altars exakt im Mittelpunkt mit konzentrisch darum angeordneten Sitzreihen vorgesehen. In der Summe sind das schlechte Voraussetzungen für die Planung einer Lautsprecheranlage, die eine gleichmäßige Pegelverteilung und ausreichende Sprachverständlichkeit im Auditorium gewährleisten soll. Als Lösungen wurden aufwändige Beschallungskonzepte mit Beam Steering Lautsprechern entwickelt.

### **Sanierung der St. Hedwig-Kathedrale**

Die Kathedrale St. Hedwig wird momentan saniert und erhält im Inneren ein grundlegend neues Aussehen (Planung: Sichau & Walter Architekten, Fulda). Die Fertigstellung ist für Ende 2024 geplant. Der im 18. Jahrhundert errichtete Bau wurde dem Pantheon in Rom nachempfunden und hat einen exakt kreisförmigen Grundriss. Auf einem umlaufenden Säulenring ruht eine halbkugelförmige Kuppel mit einem Durchmesser von 31 m, deren Scheitelpunkt sich ebenfalls in 31 m Höhe befindet. Eine bei dem Wiederaufbau der im 2. Weltkrieg zerstörten Kathedrale geschaffene große Öffnung zur Unterkirche wurde wieder geschlossen, so dass der Altar jetzt genau in der Raummitte angeordnet werden kann. Die Sitzreihen werden kreisförmig um den Altar herum angeordnet, wodurch eine beeindruckende, fast völlig zentralsymmetrische Innenarchitektur entsteht. Die Kuppel wurde bei dem Wiederaufbau zwischen 1955 und 1963 in einer Betonkonstruktion errichtet und mit einer teilweise schallabsorbierenden Innenschale verkleidet. Die inzwischen neu eingebaute Innenschale besteht ausschließlich aus schallhartem Material, so dass sich die ursprünglich schon lange Nachhallzeit noch einmal deutlich verlängert.



*Abbildung 1: bereits fertig gestellte Kuppel, Aufsicht Grundriss und Schnitt (Bilder: Sichau & Walter)*

### **Grundlegendes zur Raumakustik und Beschallung**

#### **Raumakustik**

In sakralen Zentralbauten mit hohen Kuppeln ergeben sich aufgrund der Größe und den üblicherweise schallharten Oberflächen zwangsläufig lange Nachhallzeiten. Konkrete Vorgaben oder normative Anforderungen für Nachhallzeiten oder andere raumakustische Parameter gibt es nicht. Die Beurteilung der Raumakustik in einem Kirchenraum erfolgt i.Allg. anhand von Vergleichen mit anderen, meist älteren Kirchen. Deren Akustik ist weniger aus einem bewussten Planungsprozess heraus entstanden, sondern ergibt sich aus der Bauweise, den verwendeten Materialien und der Ausstattung. Daraus haben sich gewisse Erwartungshaltungen entwickelt, was man als eine „gute“ oder angemessene Akustik in Kirchen empfindet. Für große Kirchen erwartet man eine sakrale, getragene und volle Akustik, die mit einem langen Nachhall einhergeht. Der Einsatz von Schallabsorbieren zur Reduzierung der Nachhallzeit ist deshalb in Sakralbauten unüblich und wird allenfalls in Kirchenneubauten - aber auch da nur sehr zurückhaltend - praktiziert.

Bestimmte akustische Eigenheiten sind in runden Kuppelbauten kaum vermeidbar und treten hier deutlicher als in üblichen Kirchenbauten mit Längsschiffen auf. So sind oft Echos oder Schallfokussierungen zu beobachten, die an bestimmten Positionen, meistens in der Raummitte bei impulsartigen Schallereignissen – wie z.B. einzelner Händeklatschen - auffällig sind. In der musikalischen Aufführungspraxis (mit kontinuierlich fortlaufenden Schallereignissen), bei Liturgien und Predigten sind diese Echos i.Allg. nicht hörbar.

So gut ein voller Klang prinzipiell für musikalische Darbietungen geeignet ist, so können sich doch zu lange Nachhallzeiten nachteilig auf die Klarheit der Darbietung – besonders bei sehr schnellen und strukturreichen Stücken – auswirken. Für bestimmte Repertoires kann eine hallige Kirche deshalb weniger geeignet sein. Besonders in großen und runden Kirchenräumen wird auch oft die mangelnde gegenseitige Hörbarkeit zwischen den Musikern oder Chormitgliedern und die zu geringe Raumantwort kritisiert. Ursache dafür ist das Fehlen früher und energiereicher Schallrückwürfe, da aufgrund der Raumgeometrie keine Reflexionsflächen in der Nähe existieren.

Natürliche Sprache ist in halligen Räumen ab gewissen Abständen sowieso schlecht zu verstehen. Generell muss deshalb bei Gottesdiensten und anderen Veranstaltungen eine Lautsprecheranlage eingesetzt werden.

Letztendlich ist die Akustik in Kirchen maßgeblich durch die vorhandene Größe und Raumform gegeben. Eine gezielte Beeinflussung der Akustik ist nur eingeschränkt möglich. Raumakustische Maßnahmen, die in Konzertsälen oder anderen Aufführungsstätten üblich sind, wie z.B. der Einsatz von Schallreflektoren, Deckensegeln, Absorberflächen und Diffusoren verbieten sich i.Allg. bei der Sanierung von Kirchen.

## **Beschallung**

Im Gegensatz zur Raumakustik gibt es für die einzubauenden Beschallungsanlagen einige klare Anforderungen für bestimmte akustische Parameter. Das betrifft im Wesentlichen die Sprachverständlichkeit und Pegelverteilung im Auditorium sowie die Mindestlautstärke. Die Sprachverständlichkeit wird durch den Speech Transmission Index (STI) charakterisiert, der sowohl akustisch simuliert als auch gemessen werden kann und nicht unter einem Wert von 0,45 bis 0,5 (auf einer Skala von 0 bis 1) liegen darf. Pegelunterschiede sollten im Hörbereich nicht größer als 4 bis 5 dB(A) sein, die Lautstärke muss mindestens 70 bis 75 dB(A) betragen. Letzteres ist vielmehr ein Problem der Rückkopplungssicherheit der Anlage in Verbindung mit der Mikrofonierung als der möglichen Lautstärke der Lautsprecher.

Die erste Schwierigkeit für die Planung der Beschallungsanlage in der St. Hedwig-Kathedrale stellt die Lage des Altars in der Mitte mit den kreisförmig angeordneten Sitzreihen dar. Das klassische Konzept für die Kirchenbeschallung mit einer dezentrale Anordnung relativ vieler Lautsprecher an den Säulen des Längsschiffs, die nur in eine Vorzugsrichtung strahlen, ist in einer runden Kirche nicht anwendbar. Aus akustischer Sicht wäre

es bei dem vorliegenden Grundriss naheliegend, die Lautsprecher um den Altar herum anzuordnen und radial in alle Richtungen nach außen abstrahlen zu lassen. Selbsterklärend ist das aus architektonischen Gründen nicht gewünscht. Es kommt also nur die Anordnung von Lautsprechern im äußeren Randbereich des Raumes in Frage. Damit ist es nicht möglich, für alle Zuhörer die Abstrahlrichtungen mit den Blickrichtungen zu dem Altar oder Ambo in Übereinstimmung zu bringen. Das kognitive System stellt sich darauf aber relativ schnell ein. Auf jeden müssen die Lautsprecher bei einer Anordnung am Rand in der Lage sein, über größere Entfernungen hinweg die ausgedehnte Fläche zu beschallen.

Eine weitere Schwierigkeit stellt der lange Nachhall in der Kathedrale dar. Zwischen der Nachhallzeit und der Performance einer Beschallungsanlage besteht ein enger Zusammenhang. In sehr halligen Räumen wird der beim Hörer aus den Lautsprechern ankommende Direktschall durch die vielen Raumreflexionen überlagert und dadurch „verwischt“. Die Sprachverständlichkeit nimmt in Folge ab. Deshalb ist die Beschallungsanlage so zu konzipieren, dass der Direktschall der Lautsprecher im Wesentlichen nur auf die Publikumsebene trifft. Alle Schallstrahlen, die auf Wände oder in der Kuppel auftreffen, erzeugen zeitlich verzögerte Reflexionen und verhallen den Raum. Eine starke Bündelung der Abstrahlung der Lautsprecher ist damit unabdingbar. Zudem sollte die Anzahl der Lautsprecher so gering wie möglich gehalten werden (Prinzip der „Quellenminimierung“), da mehrere Lautsprecher auch mehr ungewollte Flächen anstrahlen sowie zusätzliche Laufzeitdifferenzen erzeugen, die durch die unterschiedlichen Abstände des Hörers zu den verschiedenen Lautsprechern bedingt sind.

Das Mittel der Wahl in sehr halligen Räumen in Verbindung mit der Notwendigkeit, größere Entfernungen zu überbrücken, ist der Einsatz von Tonsäulen mit der „Beam Steering Technologie“, wobei die Einzellautsprecher in den Tonsäulen unterschiedlich angesteuert werden, so dass eine gezielte Bündelung in vertikaler Richtung und eine optimierte Neigung der Abstrahlung ermöglicht wird. In horizontaler Richtung strahlen die Tonsäulen dagegen breit ab, so dass eine scheibenförmige Abstrahlcharakteristik entsteht (s. Abbildung 2). Deshalb ist der Anordnung der Tonsäulen immer in einer Höhe erforderlich, die nicht zu sehr über der Hörebene liegt, so dass der Schall mehr oder weniger über die Publikumsfläche streift.

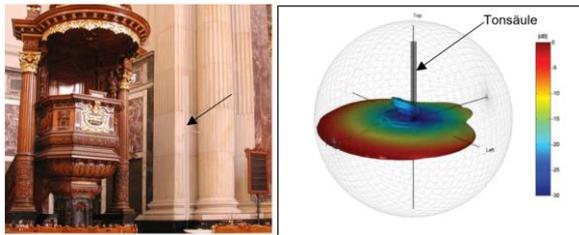


Abbildung 2: Einbaubeispiel im Berliner Dom und beispielhafte Abstrahlcharakteristik von Tonsäulen mit Beam Steering Technologie (Bilder: Duran Audio)

Eine aktuelle Weiterentwicklung sind Matrixlautsprecher mit einer Anordnung vieler Einzellausprecher in einem Rechteck (statt der linearer Anordnung bei Tonsäulen). In Verbindung mit Beam Steering ist eine Bündelung und Ausrichtung der Schallstrahlen in vertikaler *und* horizontaler Richtung möglich. Damit können Publikumsflächen gezielter und selektiver als mit Tonsäulen angestrahlt und somit ungewollte Reflexionen an anderen Raumbegrenzungsflächen besser vermieden werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass man den Lautsprecher höher als Tonsäulen mit ihrer „scheibenförmigen“ Abstrahlung positionieren kann, so dass die gesamte Publikumsfläche mit einem Lautsprecher versorgt wird, ohne im hinteren Bereich die bei streifendem Schall zwangsläufig auftretenden Pegelverluste hinnehmen zu müssen. Das Prinzip der Quellenminimierung kann somit konsequenter umgesetzt werden.

Matrixlautsprecher gibt es schon seit einiger Zeit, hatten aber bisher ein Nischendasein. Erst kürzlich wurde ein wirklich leistungsfähiges System zur Marktreife gebracht, das ein effektives Beam Steering ermöglicht.

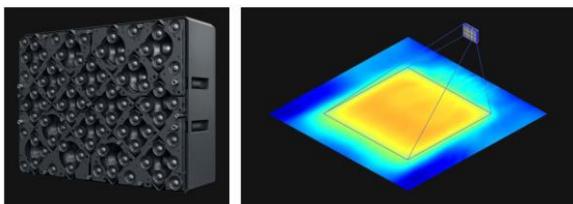


Abbildung 3: Matrixlautsprecher mit Beam Steering Technologie und beispielhafte Abstrahlcharakteristik (Bilder: Holoplot GmbH)

Beide Beschallungssysteme lassen sich nur mit rechnergestützten Simulationen planen und nicht – wie bei konventionellen Lautsprechern teilweise praktiziert – nach „Gefühl“ einbauen. Trotz aufwändiger Simulationen sind in kritischen Räumen Probebeschallung sinnvoll. Zum einen sind Schwächen oder gar Fehler in Simulationsmodellen nicht immer offensichtlich, zum anderen können

wichtige Punkte wie die Rückkopplungssicherheit einer Beschallungsanlage kaum oder gar nicht in Simulationen erfasst werden. Letztendlich kann die subjektive Akzeptanz bestimmter Aspekte wie die fehlende Übereinstimmung der optischen Sichtachsen mit der Abstrahlrichtung der Lautsprecher oder die oft für den Redner irritierende Zeitdifferenz zwischen dem gesprochenen Wort und dem Eintreffen des identischen Signals vom relativ weit entfernten Lautsprecher nur am konkreten Probeaufbau getestet werden.

## Planung der Raumakustik und Beschallungsanlage

### Raumakustik

Bei der Gestaltung des Innenraumes der Kathedrale hat die Architektur das absolute Primat. Raumgeometrie und Oberflächengestaltung sind weitestgehend vorgegeben. Bauliche Maßnahmen, die zum Zweck der Beeinflussung der Raumakustik dienen, haben sich dem unterzuordnen.

Während des Wiederaufbaues der Kathedrale (1955 – 1963) wurde unter der Betonkuppel eine Verkleidung angebracht, die in größeren Teilbereichen mit schallabsorbierendem, perforiertem Lochblech ausgebildet war. Über die damaligen Beweggründe kann man nur spekulieren. Möglicherweise scheute man sich vor einer extremen und problematischen Akustik, wie sie in einigen damals errichteten, puristischen Kirchenneubauten mit völlig glatten und unstrukturierten Sichtbeton-Oberflächen entstand (ein prominentes Beispiel dafür ist die 1954 gebaute Kirche St. Rochus in Düsseldorf).

Zu Beginn des Planungsprozesses wurde relativ schnell die Entscheidung getroffen, die neue Innenschale der Kuppel schallhart auszubilden, um der Kathedrale auch in akustischer Hinsicht einen sakraleren Charakter zu geben, der zudem besser zur neu geschaffenen, klaren Architektur passt. Daneben spielten aber auch andere Kriterien wie die Feinstruktur der Oberflächen, die Verarbeitbarkeit auf der Baustelle und die erhöhte Verschmutzungsgefahr der letztendlich porösen Absorberoberflächen eine Rolle.

Die nach dem Umbau zu erwartenden Nachhallzeiten wurden mit dem Programm CATT-Acoustic simuliert. Diese erhöhen sich im unbesetzten Zustand der Kathedrale um ca. 2 bis 3 Sekunden gegenüber dem Zustand vor der Sanierung. Mit steigender Besucherzahl sinken die Nachhallzeiten deutlich (Abbildung 4).

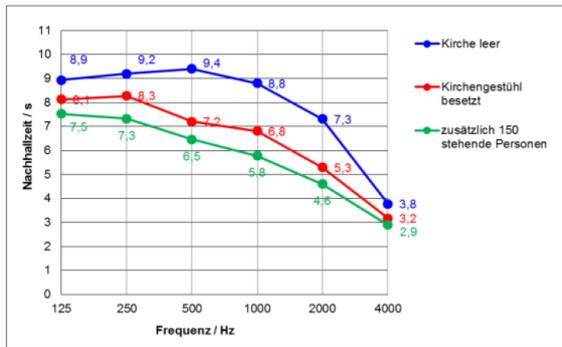


Abbildung 4: simulierte Nachhallzeiten bei verschiedenen Besetzungsgraden

Andere raumakustische Parameter wie z.B. die Klarheit  $C_{80}$ , Schwerpunktzeit  $T_S$  oder der Seitenschallgrad LF wurden ebenfalls ermittelt. Die Relevanz dieser Ergebnisse ist allerdings begrenzt, da man aufgrund der architektonischen Randbedingungen eigentlich nur Ergebnisse konstatieren kann, ohne sinnvolle Beeinflussungsmöglichkeiten zu haben. Ohnehin gibt es keine allgemein gültigen Bewertungsmaßstäbe oder Zielvorgaben.

### Beschallungsanlage

Im Vergleich zur Raumakustik ist der Planungsaufwand für die Beschallungsanlage in der Kathedrale bei weitem größer. So sind die Freiheitsgrade möglicher Lösungen auch höher, obwohl bestimmte von der Architektur vorgegebene Randbedingungen zu beachten waren. Die Beschallungsanlage sollte so unauffällig wie möglich in die Architektur integriert werden. Völlig ausgeschlossen war von Beginn an eine Anordnung der Lautsprecher frei im Raum. Eine Positionierung ist nur am Rand zulässig.

Im Gegensatz zur Raumakustik gibt es eindeutige Anforderungskriterien für die akustischen Eigenschaften der Beschallungsanlage, insbesondere der Sprachverständlichkeit (STI) und der Schallpegelverteilung im Auditorium (s. Ausführungen im vorangegangenen Kapitel).

Um diese Anforderungen in dem (zumindest für Beschallungsanlagen) akustisch schwierigen Raum zu erfüllen, war aus den Erfahrungen mit ähnlichen Planungen sofort klar, dass nur der Einsatz von Tonsäulen mit Beam Steering Technologie in Frage kommt. Die bereits weiter oben beschriebenen Matrixlautsprecher waren damals noch nicht auf dem Markt verfügbar.

Die Feinarbeit lag in der konkreter Auswahl der Tonsäulen, Festlegung der Anzahl und Positionen sowie der elektronischen Optimierung der Abstrahlcharakteristiken (Beam Steering). Das Ergebnis vieler Variantenuntersuchungen und Simulationen (die

ebenfalls mit dem Programm CATT-Acoustic ausgeführt wurden) ist in Abbildung 5 dargestellt. Es sind 6 Tonsäulen unterschiedlicher Leistung im Randbereich angeordnet. Die Hauptabstrahlrichtungen der Lautsprecher von rechts nach links stimmen zumindest für einen Teil der Kirchenbesucher mit der optischen Achse zu den Liturgie Teilnehmern am Altar oder Ambo überein. Die beiden hinteren Lautsprecher werden mit einer zeitlichen Verzögerung (delay) angesteuert und sollen – besonders bei Vollbesetzung der Kirche – dem Pegelabfall durch die Dämpfung des flach über das Publikum streifenden Schalls entgegen wirken. Die vordersten, leistungsschwächeren Tonsäulen ganz rechts beschallen die Plätze um den Ambo herum. Die Sprachverständlichkeiten (STI) sowie die Pegel sind im Auditorium sehr gleichmäßig verteilt. Der Mittelwert der STI-Werte übersteigt im unbesetzten Zustand den Anforderungswert von 0,5 (s. Abbildung 5), so dass in Anbetracht der sehr hohen Nachhallzeiten eine gute Sprachverständlichkeit erreicht wird. Mit steigender Besucherzahl und damit sinkender Nachhallzeit verbessert sich die Sprachverständlichkeit noch einmal deutlich.

Um die Simulationsergebnisse zu validieren und die Rückkopplungssicherheit der Anlage bei der Nutzung von Mikrofonen verschiedenster Art an unterschiedlichen Positionen zu überprüfen, wurde eine Probebeschallung durchgeführt, bei der die Lautsprecher exakt wie in der Planung (gleiche Lautsprecher, Positionen, gleiche Beam Steering Einstellungen, gleiche Delays) in der Kathedrale aufgebaut wurden. Akustische Messungen der STI-Werte und der Pegel ergaben eine sehr gute Übereinstimmung mit den theoretischen Simulationsergebnissen. Noch wichtiger als die reinen Messungen waren durchgeführte Sprachtests mit der Anlage, um einen subjektiven Eindruck zu bekommen. Die Performance der Anlage wurde von den Anwesenden als positiv bewertet.

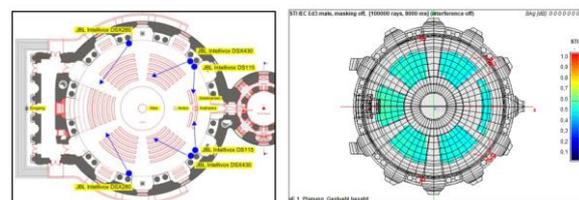


Abbildung 5: Beschallungskonzept für die Tonsäulen und simulierte Sprachverständlichkeit STI

Ursprünglich war geplant, die Tonsäulen bündig in entsprechenden Aussparungen in den Säulen aus Mauerwerk (die den umlaufenden Kuppelring tragen) zu integrieren. Eine entsprechende Kaschierung mit einem akustisch transparenten Material hätte die Lautsprecher fast unsichtbar erscheinen lassen. Aus Gründen des Denkmalschutzes waren bauliche

Eingriffe in den Säulen jedoch nicht zulässig. Die alternative Aufstellung der Lautsprecher vor oder neben den Säulen wurde aus architektonischen Gründen als problematisch angesehen.

In der Folge wurde noch einmal nach völlig neuen Ansätzen zur Beschallung gesucht. Inzwischen sind die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen, neuartigen Matrixlautsprecher mit Beam Steering Technologie von einer deutschen Firma zur Marktreife entwickelt worden, so dass ein Einsatz in der Kathedrale prinzipiell möglich wurde. Der wesentliche Vorteil liegt in einer Bündelung des Schallstrahles in vertikaler und horizontaler Richtung. Da es sich mehr oder weniger um ein Pilotprojekt handelt, das so in eine Kirche noch nie umgesetzt wurde, gab es intensive Vorabgespräche, Diskussionen und Variantenuntersuchungen. Alle erforderlichen Lautsprecherkonfigurationen und akustischen Simulationen konnten nur vom Hersteller durchgeführt werden, weil die entsprechende Software noch nicht allgemein zugänglich ist. Die Planung ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig abgeschlossen, eine sowohl architektonisch akzeptable als auch akustisch sinnvolle Variante mit nur einem einzelnen Matrixlautsprecher bildet sich aber heraus (s. Abbildung 6). Durch eine akustisch transparente Verkleidung soll der Lautsprecher in oder vor der Wand optisch weitgehend unauffällig gestaltet werden.

Bei einer Testbeschallung konnte gezeigt werden, dass eine gute Sprachverständlichkeit (mittlere STI-Werte über 0,5), ausreichende Rückkopplungssicherheit und gleichmäßige Pegelverteilung erzielt wird. Nur in Teilbereichen gibt es noch Optimierungsbedarf, so ist z.B. für die Bestuhlung in der Nähe des Ambos eine Lösung für eine unterstützende Beschallung zu finden. Aufgrund des vorläufigen Zwischenstandes der Planung werden hier noch keine detaillierteren Ergebnisse dargestellt.



Abbildung 6: geplante Anordnung des Matrixlautsprechers und Probebeschallung (mit geringfügig anderer Position des Lautsprechers als in der Planung)

## Zusammenfassung

Die St. Hedwig-Kathedrale in Berlin mit ihrem kreisrunden Grundriss und einer beeindruckenden Kuppel wird zum laufenden Zeitpunkt grundlegend saniert. Die bisherige Verkleidung der Kuppel aus schall-

absorbierendem Material wurde durch eine völlig schallharte Innenschale ersetzt. Dadurch erhöhen sich die Nachhallzeiten signifikant. Diese Entscheidung wurde bewusst getroffen, um eine sakrale, dem Raum angemessene Akustik zu schaffen. Der lange Nachhall, die runde Raumform und ein konsequent auf die Raummitte ausgerichtetes liturgisches Konzept mit dem zentral abgeordneten Altar stellen eine große Herausforderung für die Planung einer Beschallungsanlage dar. Es wurden 2 Beschallungskonzepte entwickelt, die auf dem Einsatz von Lautsprechern mit der Beam Steering Technologie beruhen. Im ersten Konzept sind mehrere am Rand des Raumes verteilte Tonsäulen vorgesehen, während in einem weiteren, völlig neuartigen Ansatz ein einzelner Matrixlautsprecher an einer erhöhten Position an einer Seitenwand eingesetzt werden soll. Beide Systeme sind hinsichtlich der erzielbaren Sprachverständlichkeiten sehr leistungsfähig. Der Entscheidungsprozess, welches der beiden Konzepte zum Einsatz kommt, findet momentan statt und ist noch nicht abgeschlossen.

## Literatur

- Ballou, G. (ed.), Handbook for Sound Engineers, 2nd Edition, Focal Press, 1998
- DIN EN 60268-16:2012-05 Elektroakustische Geräte, Teil 16: Objektive Bewertung der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex
- Fasold, W., Veres, E.: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, Verlag für Bauwesen, 1998
- Meyer, Jürgen: Kirchenakustik, Verlag Erwin Bochinsky, 2003
- Weinzierl, S. (Hrsg.): Handbuch der Audiotechnik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008

