

Räume für Musik

Raumakustische Zielsetzung und Planung

Gerhard Müller

Lehrstuhl für Baumechanik, Technische Universität München, 80333 München, Deutschland,
Müller-BBM GmbH, 82152 Planegg, Deutschland
Email: gerhard.mueller@bv.tum.de

Vorbemerkungen

Zu Beginn des Planungsprozesses von Musikräumen müssen die anzustrebenden raumakustischen Eigenschaften anhand der Konzepte und Vorstellungen der zukünftigen Nutzer und Betreiber festgelegt werden. Als Grundlage für die technische Umsetzung ist darauf aufbauend ein Lastenheft sinnvoll, in welchem die Ziele der raumakustischen Auslegung über objektive physikalische Parameter (Kriterien) eingegrenzt werden.

Die Bewertung von Musikräumen durch Zuhörer, Musiker und Betreiber erfolgt nie isoliert auf die, durch die raumakustische Planung beeinflussbare Akustik, sondern bezieht – für die einzelnen Gruppen unterschiedlich gewichtet – ganzheitlich verschiedenste Komponenten ein. Dies reicht über die Assoziationen, die mit verwendeten Oberflächenmaterialien in Verbindung stehen, die Qualität der technischen Ausstattung und der Gebäudelogistik bis hin zur erzielbaren Qualität der musikalischen Aufführung, die auch von den möglichen Zeitfenstern abhängt, die den Orchestern eingeräumt wird, den Raum akustisch kennen zu lernen. Die raumakustische Planung beschränkt sich daher auf den Teilaspekt der physikalisch beschreibbaren Schallübertragung zwischen den verschiedenen Quellen am Podium zu unterschiedlichen Empfangspositionen im Zuhörerbereich. Die physikalische Beschreibung muss dabei wesentliche Eigenschaften des Sendesignals und der menschlichen Wahrnehmung berücksichtigen.

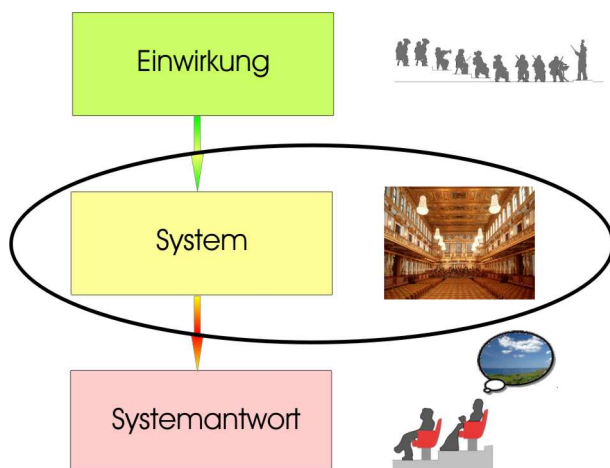


Abbildung 1: Abgrenzung der raumakustische Planung.

Einwirkung

Die einwirkenden Schallsignale sind hinsichtlich ihrer spektralen Zusammensetzung und ihrer Schallleistungen – in

Abhängigkeit der Instrumente – bekannt. In Räumen mit natürlicher Akustik führen sie zu den in Abb. 2 gezeigten Pegeln.

Einen wesentlichen Aspekt stellt neben der spektralen Zusammensetzung der Signale deren Zeitstruktur dar. Die kürzesten Notendauern bei Streicherläufen in Musikbeispielen verschiedener Stilepochen betragen ca. 70 ms [1]. Dieses Zeitintervall entspricht auch den Zeitschritten bei Sprache mit 5 Silben/s, die jeweils umrahmt von zwei Konsonanten ca. 15 unterscheidbare Elemente pro Sekunde ergeben [2].

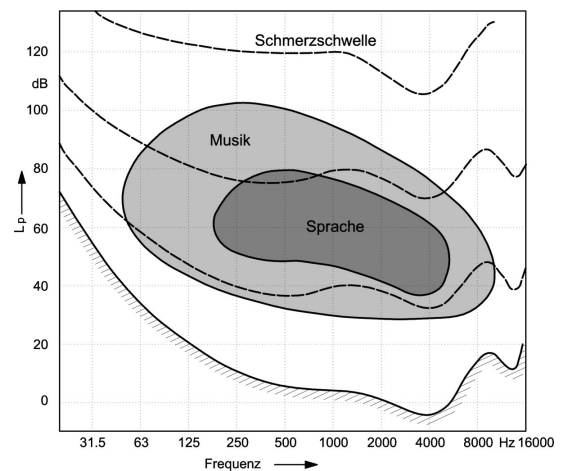


Abbildung 2: Zu erwartende Pegel bei Aufführungsräumen mit natürlicher Akustik [2].

Die o.g. Zeitskala entspricht auch der „Flimmergrenze“ von 20 Hz (entspricht ca. 50 ms), bei der – von hohen Frequenzen herkommend – der Klang in Einzelsignale zerfällt und – von tiefen Frequenzen aufsteigend – eine Klangverschmelzung eintritt [2].

System

Die Beschreibung der Systemantwort erfolgt sowohl über die Darstellung im Frequenzbereich –hieraus kann z.B. die Klangfarbe abgelesen werden– als auch über eine Zeitbereichsbetrachtung. Ein geeignetes Hilfsmittel, beides zu beschreiben, ist die Raumimpulsantwort, aus der über eine Faltung das Raumsignal aus einem ohne Raumrückwürfe aufgenommenen Musiksignal synthetisiert werden kann (Abb. 3). Die Raumimpulsantwort wird typischerweise über ihre einzelnen, in der zeitlichen Abfolge auftretenden Anteile charakterisiert: Dem Direktschall folgt im Zeitfenster der ersten 100...200 ms eine Folge von Reflexionen, die – an der Raumgeometrie gespiegelt – einzelnen Reflexionen zugeordnet werden können. Im Zeitfenster zwischen 100...200 ms bis über 1 s schließt sich der Nachhall an, der

durch eine Folge von unregelmäßig auftretenden Reflexionen entsteht.

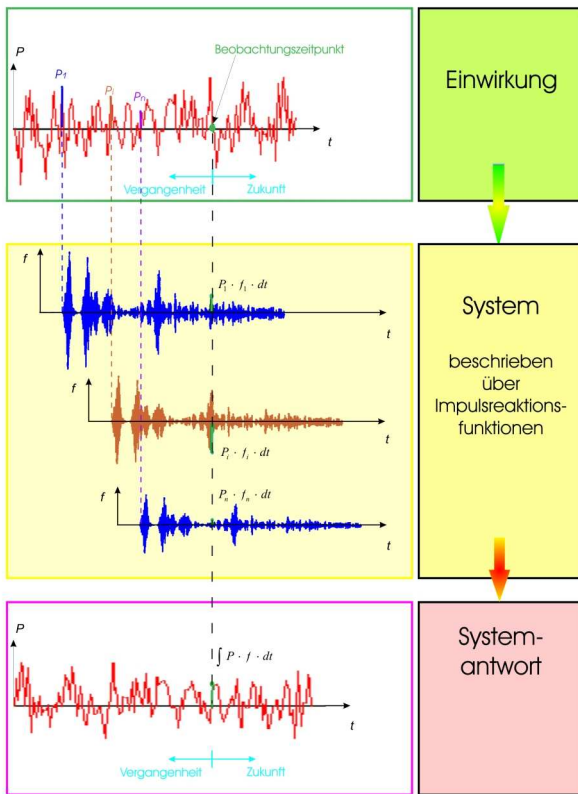


Abbildung 3: Übertragung- Zeitbereich.

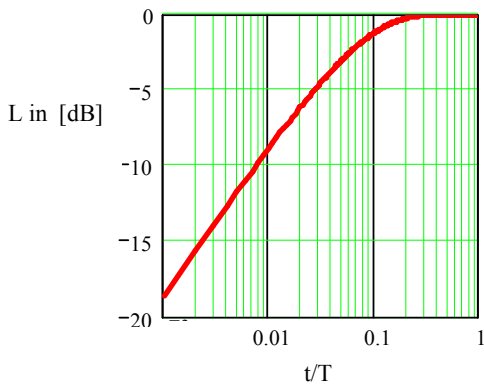


Abbildung 4: Einschwingvorgang - Diffusfeld

Die Abfolge und Richtung der Reflexionen bestimmt die Qualität des räumlichen Eindrucks sowie des stützenden Kontakts zwischen den Musikern. Eine Beschreibung im Frequenzbereich erhält man über die spektrale Analyse der Raumimpulsantwort. Sie kann auch über die Verfahren der statistischen Energieanalyse veranschaulicht werden. Über die Zusammenhänge:

- die Zahl der Moden pro Frequenzintervall ist proportional zum Raumvolumen,
- der modale Leistungseintrag ist umgekehrt proportional zur Zahl der Moden pro Frequenzintervall,
- die modale Energie ist proportional zur Nachhallzeit, multipliziert mit dem modalen Leistungseintrag,

ergibt sich der bekannte einfache Zusammenhang zwischen der – zum mittleren Schalldruckpegel proportionalen - mittleren Energiedichte im Raum und der äquivalenten Absorptionsfläche.

Dem über die Verfahren der statistischen Energieanalyse ermittelten diffusen Schallfeld überlagert sich der Direkt-schall. Der Hallradius gibt an, in welchem Abstand die beiden Energiedichten aus dem diffusen Feld und dem Direkt-schallfeld gleich groß sind.

Abb. 4 zeigt den relativen Pegel des Diffusfeldes bezogen auf den eingeschwungenen Zustand in Abhängigkeit der auf der Nachhallzeit T bezogenen Einwirkungs-dauer t. Wenn-gleich der der Einschwingvorgang kürzer dauert als das Abklingen, schwingen große Säle mit Nachhallzeiten um 2 s bei schnellen Passagen (Zeitskala z.B. 100 ms), nicht voll-ständig ein. Dies geht mit dem Gefühl von Musikern kon-form, dass sie schnelle Passagen lauter und langsame, getra-gene Passagen leiser spielen müssen.

Objektive Beschreibung raumakustischer Ei-genschaften

Folgende Bewertungen der raumakustischen Eigenschaften sind zu objektivieren:

- Ist der Störpegel ausreichend niedrig?
- Ist eine Übertragung mit ausreichender Lautstärke möglich?
- Ist der Raum in der Lage, die Zeitstruktur – trotz Rückwürfe- und die Klangfarbe der Musik zu über-tragen?
- Treten die für einen Raumeindruck und für den stützenden Kontakt erforderlichen Rückwürfe auf?

Bühne-Zuschauer Übertragungsindex Yamagushi 1972	$G = L(Seat) - L_W(Source)$
Stärkegrad Lehmann 1976	$\gamma(Seat) = \frac{\int_0^{\infty} p_{seat}^2(t) dt}{\int_0^{\Delta t} p_{source}^2(t) dt (4\pi r_{source}^2)}$
Stärkemaße Lehmann 1976	$G_x = 10 \log \frac{\int_0^{xms} p(t)^2 dt}{\int_0 p_{10m}(t)^2 dt}$

Tabelle 1: Kriterien – Lautstärke

Die Bewertungen erfolgen anhand der Impulsantwort im Zeit- und Frequenzbereich. Dazu wird die Impulsantwort nach verschiedenen Verfahren ausgewertet und über –vor-wiegend - Einzahlwerte (Kriterien) beschrieben. Im Folgen-den werden diese exemplarisch erläutert:

Kriterien für die Bestimmung der Lautstärke im Saal werden über einen Vergleich der auftreffenden Energie, bezogen auf die Schalleistung einer Quelle oder eines Pegels im Freifeld ausgewertet (Tabelle 1 gibt exemplarisch Kriterien an).

Kriterien zur Beschreibung der Zeitstruktur wurden aus den Erkenntnissen der Störung von Zuhörern durch Rückwürfe (z. B. [3], [4], [5]) erarbeitet. Hier zeigt es sich, dass die Zeit-

struktur der Wahrnehmung eine ähnliche „Skala“ aufweist wie die oben beschriebene Zeitstruktur schneller Sprach- und Musiksequenzen. Dies bedeutet, dass die menschliche Wahrnehmung über Zeitfenster im 50 -80 ms Intervall „integriert“, innerhalb derer starke Rückwürfe mit dem Direktschall verschmelzen. Starke Rückwürfe außerhalb dieses Intervalls können bei schnellen Sequenzen als störend wahrgenommen werden. Die Zeitstruktur der Impulsantwort („Feinstruktur“) kann z.B. über bezogene Energiegrößen, die durch Integration über unterschiedliche Zeitfenster gewonnen werden oder über bezogene Momente die aus der Impulsantwort gebildet werden, und somit deren Form beschreiben, erfasst werden. Entsprechende Kriterien sind exemplarisch in Tabelle 2 angegeben.

Liveness (Halligkeitsgrad) Maxfield et. al. 1947	$\lambda = \frac{\int_{t_i}^{t_i} p^2(t) dt}{\int_0^{t_i} p^2(t) dt}$
Deutlichkeit Thiele 1953	$D = \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$
Hallmaß Beranek 1958	$R = 10 \lg \frac{\int_0^{50ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$
initial time delay gap Beranek 1958	$t_i = t_{1.Re\ flexion} - t_{Direktschall}$
Schwerpunktzeit Kürer 1972	$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$
Klarheitsmaß Reichhardt et. al 1975	$C = 10 \lg \frac{\int_0^{80ms} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}$
Support measure Gade 1989	$ST1 = 10 \lg \frac{\int_0^{100ms} p^2(t) dt}{\int_0^{20ms} p^2(t) dt}$

Tabelle 2: Kriterien - Zeitstruktur für Erstreflexionen, Kontakt zwischen Musikern (Feinstruktur)

Die Zeitstruktur der Impulsantwort nach den Erstreflexionen wird geeignet über die Nachhallzeit beschrieben. Auch hier gibt es eine Reihe von Kriterien, die sich im Wesentlichen auf unterschiedliche Intervalle der Abklingkurve beziehen (Nachhallzeit, Anfangsnachhallzeit, Initial Reverberation Time, Early Decay time usw.) und teilweise auch zur Beschreibung der Feinstruktur im ersten Zeitintervall herangezogen werden. Die spektrale Auswertung der Nachhallzeit gibt auch Aufschluss über die zu erwartende „Klangfarbe“.

Die Kriterien für die Messung der Räumlichkeit werden heute i.d.R. über einen Vergleich zwischen an zwei Mikrofonen aufgenommenen Raumimpulsantworten (z.B. über Kreuzkorrelationen) ermittelt oder über eine, messtechnisch relativ leicht abbildbare, cos-Wichtung seitlich auftreffender Anteile. Tabelle 3 gibt exemplarisch hierzu Kriterien an.

Eine gute Zusammenstellung der o.g. Kriterien finden sich in [2], [5] und [6]. Die o.g. Kriterien, die z. Tl. über sehr ähnliche Auswertungen der Raumimpulsantwort gewonnen werden, sind miteinander hochkorreliert, so dass es für die raumakustische Planung i. d. R. genügt, die verschiedenen Charakteristika jeweils über ein bis zwei Kriterien zu beschreiben. Angaben zu Korrelationskoeffizienten findet man in [6].

Die Reduzierung auf wenige Kriterien für raumakustische Lastenhefte darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass die den Kriterien zugrunde liegenden Untersuchungen zum Teil unterschiedliche Elemente des komplexen Zusammenhangs zwischen Übertragung im Raum und subjektiv wahrgenommener raumakustischer Qualität behandeln, die in der Planung berücksichtigt werden müssen (so z.B. die Schallübertragung im Hinblick auf die Transparenz einerseits und den Kontakt zwischen den Musikern andererseits). Ferner sei angemerkt, dass eine Reihe von Kriterien mit ihrer Bezeichnung, die umgangssprachlich positiv besetzt ist, für den Laien Qualitäten raumakustischer Eigenschaften implizieren, was irreführend sein kann. Z.B. können zu hohe, genau wie zu niedrige Werte des Klarheitsmaßes als negativ bewertet werden.

Richtungsdiffusität (sgrad) Meyer, E. et. Al 1956	$\theta = 1 - \frac{\frac{1}{\bar{J}_R} \int J_R(\Omega) - \bar{J}_R d\Omega}{\frac{1}{\bar{J}_F} \int J_F(\Omega) - \bar{J}_F d\Omega}$
Interaurale Kreuzkorrelationsfunktion Damaska 1967	$\chi(\tau) = \frac{\int_0^{\infty} p_l(t) \cdot p_r(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_0^{\infty} p_l^2(t) dt \cdot \int_0^{\infty} p_r^2(t) dt}}$
Binauraler Deutlichkeitsgrad Danilenko 1968	$\partial_B = \frac{\int_0^{tg} p_l(t) \cdot p_r(t) dt}{\int_0^{\infty} p_l(t) \cdot p_r(t) dt}$
short time correlation coefficient Keet 1970	$\chi(0) = \frac{\int_0^{tg} p_l(t) \cdot p_r(t) dt}{\sqrt{\int_0^{tg} p_l^2(t) dt \cdot \int_0^{tg} p_r^2(t) dt}}$
binaurale Schwerpunktzeit Kürer 1972	$t_{sB} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p_l(t) \cdot p_r(t) dt}{\int_0^{\infty} p_l^2(t) dt \cdot p_r(t) dt}$
Seitenschallgrad Barron 1974	$LFC = \frac{\int_0^{80ms} p(t)^2 \cos \Theta dt}{\int_0^{80ms} p(t)^2 dt}$
Apparent Source Width Bradley, et al 1995	$LG_{80}^{\infty} = 10 \cdot \lg \frac{\int_0^{\infty} (p(t) \cos \Theta)^2 dt}{\int_0^{80ms} p_{10m}^2(t) dt}$

Tabelle 3: Kriterien - Zeitstruktur für die Räumlichkeit

Im Übergang von der Raumimpulsantwort auf Kriterien ist ein Informationsverlust verbunden. In der Analyse arbeitet man daher mit den Raumimpulsantworten.

Mit Hilfe der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen an mehreren Mikrofonen erhaltenen Impulsantworten ist es möglich, die Elemente der Antwort abschnittsweise in den jeweiligen

Zeitfenstern eindeutig Richtungen zuzuordnen und die auftretenden Impulse nach den Reflexionsfolgen auszuwerten. Abbildung 5 zeigt eine solche Auswertung. Über der x-Achse ist der horizontale, über der y-Achse der vertikale senkrechte Einfallswinkel und über die Färbung, die in einzelnen Zeitfenstern auftretende Energie dargestellt [7].

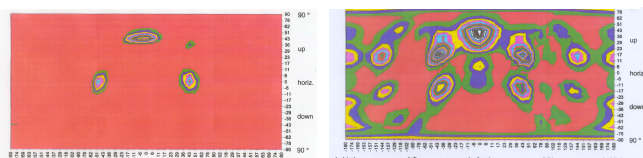
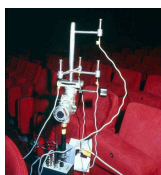


Abbildung 5: oben Mehrmikrofontechnik zur Auswertung der Impulsantwort für verschiedene Zeitfenster, exemplarische Auswertung, links für ein frühes (Lateral- und Deckenreflexion), rechts für ein späteres Zeitfenster

Kurzer historischer Rückblick

Wie wurden bei der Entstehung von Aufführungsstätten die o. g. Aspekte berücksichtigt werden? Diese Frage drängt sich vor allem aufgrund der vielfach hohen Reputation alter Aufführungsstätten auf.

Bei den Amphitheatern der Antike lagen aus heutiger Sicht keine Räume vor. Es wurde in der Planung -neben der Wahl einer leisen Umgebungen mit ausreichend niedrigem Störpegel- eine Optimierung der Ausbreitung des Direktschalls vorgenommen. Diese Optimierung erfolgte über eine Überhöhung der Zuschauertribünen, eine nützliche Bodenreflexion im Bereich der Orchestra und eine Optimierung dahingehend, dass der mittlere Abstand des Zuhörers von der Quelle ein Minimum erreicht [8]. Hieraus ergab sich die Kreisform. Allerdings wurden in der Regel die Optimierungen hinsichtlich der Zuschauerüberhöhung „falsch“ gewählt. Um einen gleichen Glanzwinkel über die gesamte Zuhörerschaft zu erreichen, hätte man die Steigung nach hinten erhöhen müssen (optimal nach der Form einer logarithmischen Spirale) [2].

Bei den großen Kathedralen der Romanik und der Gotik wurden Räume geschaffen, die aus heutiger Sicht aufgrund der langen Laufzeiten Raumdübel und ein Nachklingen aufweisen, die mit der Zeitskala der Wahrnehmung erheblich kollidieren. Somit ist eine Übertragung typischer Sprach- und zeitlich nicht stark gedehnter Musiksequenzen nur über räumlich kurze Abstände möglich, innerhalb derer der Direktschall das Diffusfeld erheblich überwiegt. Hierauf hat die Musikentwicklung reagiert, indem z.B. Choräle entstanden sind, die aufgrund ihrer langgedehnten Sequenzen den Laufzeiten Rechnung tragen. Ferner wurden für die Optimierung der Sprachübertragung Kanzeln vorgesehen, die zur Aufgabe hatten, die Anregung des Diffusfeldes so weit als möglich zu reduzieren. Die

Sprachübertragung wurde durch gedehnte Sequenzen („getragene“ Sprache), d.h. „Maßnahmen an der Quelle“ flankiert.

Nach der Reformation entstanden neue Kirchenräume, gleichsam als Versammlungsstätten für Sprachübertragung. Markanter Exponent ist die Thomaskirche in Leipzig, an der Johann Sebastian Bach gewirkt hat. Die in dieser Zeit entstandenen Kirchen hatten häufig raumakustische Eigenschaften, die kürzere Sequenzen ermöglichten, wie sie in der Bachschen Sakralmusik bei zu finden sind [9].

Die ersten klassischen Konzertsäle typischerweise für ca. 300 bis 400 Zuhörer und mit einer Nachhallzeit im mittleren Frequenzbereich von 1,3- 1,6 s, entstanden im 18. Jahrhundert. Erste Beispiele hierfür sind der Holywell Music Room in Oxford und der Redoutensaal in Wien, dessen akustische Eigenschaften Josef Haydn bei der Komposition seiner Symphonien [10] vor Augen hatte.

Im 19. Jahrhundert entstanden Konzertsäle, die – aufgrund der bautechnischen Möglichkeiten – als Rechtecksäle mit einer Spannweite von ca. 20 m und – aufgrund der lufthygienischen Anforderungen – mit einem Volumen von ca. 10 m³/Zuhörer ausgestattet waren. Diese Säle werden heute als ideal für Musik der Romantik angesehen. Sie bieten die folgenden wesentlichen Vorteile:

- Durch das Raumvolumen ergibt sich eine für romantische Musik angemessene Nachhallzeit von ca. 2 s.
- Die Deckenhöhe ist hinsichtlich verzögerter Reflexionen noch vertretbar.
- Durch die Innenraumdekoration wurden diffus reflektierte Oberflächen geschaffen.
- Durch die Rechteckform ergibt sich eine günstige Folge von Seitenreflexionen.

Subjektive Bewertung raumakustischer Eigenschaften aus heutiger Sicht

Zur subjektiven Bewertung von raumakustischen Eigenschaften gibt es eine Reihe von Untersuchungen. So hat bereits Kuhl [11] eine Beziehung zwischen den von Zuhörern für verschiedene Musikstücke optimal empfundenen Nachhallzeiten aufgestellt. Beranek hat in [6] ein umfangreiches „Ranking“ verschiedenster Säle, aufbauend auf Befragungen, durchgeführt. In [12] wurden zeitgenössische Künstler nach ihren Vorstellungen für ein raumakustisches Optimum gefragt. Die Auswertungen der verschiedenen Untersuchungen ergeben ein uneinheitliches Bild. Sie zeigen aber:

- dass die Nachhallzeiten subjektiv als eher angemessen empfunden werden, die den Nachhallzeiten der Räume entsprechen, für die Musikstücke komponiert wurden,
- dass Räume mit natürlicher Akustik ab einer bestimmte Größe ein schlechteres Ranking erhalten,

- dass zeitgenössische Komponisten unterschiedliche Vorstellungen von optimalen Räumen haben. Diese reichen von der „Umgebung zur Erzeugung von Stille“ bis zu einer raumakustisch vielfältig variablen „Experimentierumgebung“.

Die historisch und auch aktuell stets gegebene wechselseitige Beeinflussung von raumakustischen Eigenschaften, Komposition und Hörgewohnheiten soll am Beispiel des Teatro Regio Turin erläutert werden:

Das Teatro Regio in Turin als Beispiel für die Veränderungen raumakustischer Zielsetzungen

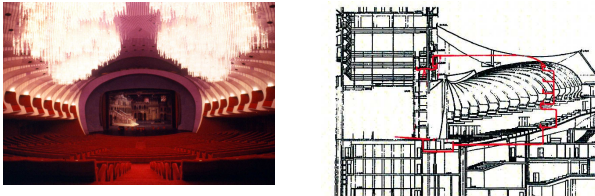


Abbildung 6: Teatro Regio Turin, Zuschauerraum und Schnitt im Vergleich zur Mailänder Scala (rot)

Das Teatro Regio in Turin des Architekten Mollino wurde 1973 fertig gestellt. Die raumakustische Zielsetzung bestand in der Kombination der Umsetzung moderner Erkenntnisse – Zeitstruktur der Wahrnehmung, Energieverteilung - verbunden mit einer starken Referenzierung an der Mailänder Scala [13], [14] mit hoher Klarheit, guter Sprachverständlichkeit und relativ trockenem Nachhall. Das architektonische Konzept unterschied sich dabei völlig gegenüber den klassischen Rangtheatern. Ein exzellenter Foyerbereich soll dem gesellschaftlichen Ereignis und der Kommunikation in den Pausen ausreichend Raum bieten, der Zuhörerraum eine größtmögliche Konzentration auf die Aufführung ermöglichen. In der akustischen Planung wurde größter Wert darauf gelegt, dass keinerlei lang verzögerte Reflexionen auftreten und dass durch eine gute Überhöhung eine exzellente und über den Zuhörerraum gleichmäßige Direktschallversorgung vorhanden ist. Ferner wurde durch eine entsprechende Neigung von Reflexionsflächen im Proszeniumsbereich die Lenkung der Energie möglichst zu den Zuhörern ermöglicht. Messungen zeigten, dass die vorab formulierte raumakustische Zielsetzung [13] sehr präzise umgesetzt wurde. Dennoch waren 20 Jahre nach Eröffnung Klagen hinsichtlich

- geringer Räumlichkeit,
- geringen Kontakts zwischen den Musikern,
- und der „trockenen“ Akustik

Anlass für eine grundlegende Untersuchung und Renovierung [14].

Gegenüber der Zeit, in der klassische, hufeisenförmige Rangtheater – wie die Mailänder Scala - gebaut wurden, hat sicherlich die Bedeutung der Sprachverständlichkeit in Opernhäuser abgenommen. Operaufführungen werden heute - im Vergleich zu früher - weniger aus Interesse am Inhalt einer Erzählung als am Musikgenuss besucht. Ferner haben sich heute Musikliebhaber an den - gegenüber der durch starken Direktschall betonten Schallübertragung im

Teatro Regio – stärker „umhüllenden“ räumlichen Klang hochwertiger Heim-Hifi-Anlagen gewöhnt.

Den Klagen Rechnung tragend wurde die Nachhallzeit durch Entfernen einer Reihe von absorbierenden Oberflächen (wie z.B. im gesamten unteren Wandbereich) im mittleren Frequenzbereich um mehr als 0,5 s erhöht. Sie trägt mit ca. 2 s im mittleren Frequenzbereich (unbesetzt eiserner Vorhang geschlossen) dem generell längerem Nachhall moderner Opernhäuser, wie dem Nationaltheater in München oder dem Teatro Carlo Felice in Genua Rechnung und liegt damit nach der Renovierung deutlich über der ursprünglich als Referenz herangezogenen Mailänder Scala mit ca. 1,3 s. Ferner wurden – wie in Abb. 7 gezeigt – zusätzliche geometrisch ausgegerichtete gekrümmte Reflexionsflächen eingebaut, mit dem Ziel, sowohl den Kontakt zwischen den Musikern als auch die Räumlichkeit im Saal zu verbessern.

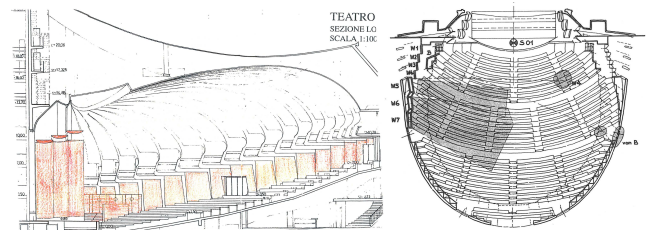


Abbildung 7: Teatro Regio Turin, links Maßnahmen, rechts Reflexionsverteilung ausgewählter Seitenflächen

Der Vergleich der Raumimpulsantworten vor/nach der Renovierung zeigt, dass für die Übertragung zwischen Bühne und Orchestergraben und innerhalb des Grabens die Kriterien Stärkemaß und Klarheitsmaß zunahm, was den zuvor beklagten unzureichenden Kontakt verbesserte. Das Klarheitsmaß der Impulsantworten zwischen Bühne und Zuschauerraum nahm deutlich ab, was mit den zusätzlichen Reflexionen und dem längeren Nachhall in Verbindung steht. Die Zuhörer sprechen von einer deutlich besseren Umhüllung mit Schall. Die Auswertung des interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten weist auf eine deutlich bessere Räumlichkeit hin. Der binaurale Qualitätsindex, liegt im rückwärtigen Zuschauerbereich in dem von Beranek [6] identifizierten optimalen Bereich guter Konzertsäle.

Anforderungen an moderne Konzertsäle

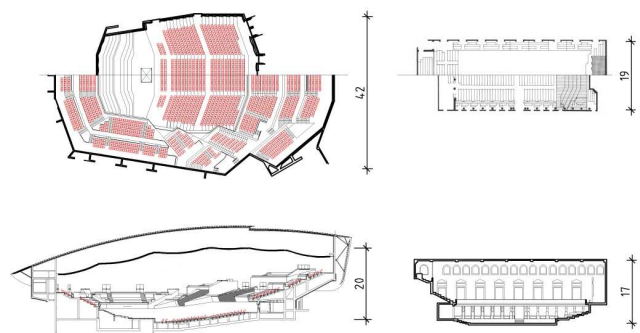


Abbildung 8: links Sala St. Cecilia (im Parco della Musica, Rom, Renzo Piano, Eröffnung 2002), rechts Wiener Musikvereinsaal, oben Grundriss, unten Schnitt.

Aus den öffentlichen Ausgaben für Theater und Musik die in den letzten Jahren in Deutschland mit weniger als 10 % im

baulichen Bereich lagen kann man ablesen, dass die wesentlichen Kosten vom Betrieb und nicht von der baulichen Infrastruktur verursacht werden [15]. Daraus folgt, dass moderne Konzertsäle, insbesondere in den Metropolen bzw. Einzugsbereichen mit mehr als einer Million Einwohner, einer möglichst großen Zahl von Zuhörern Platz bieten müssen. Abb. 8 zeigt den Vergleich des im Jahr 2002 eröffneten Saales Santa Cecilia in Rom (2800 Zuhörer) mit dem Musikvereinsaal in Wien (Eröffnung 1870, 1744 Zuhörer). Inwieweit können bei natürlicher Akustik die Saalabmessungen vergrößert werden?

Maßstabsvergrößerung von Sälen

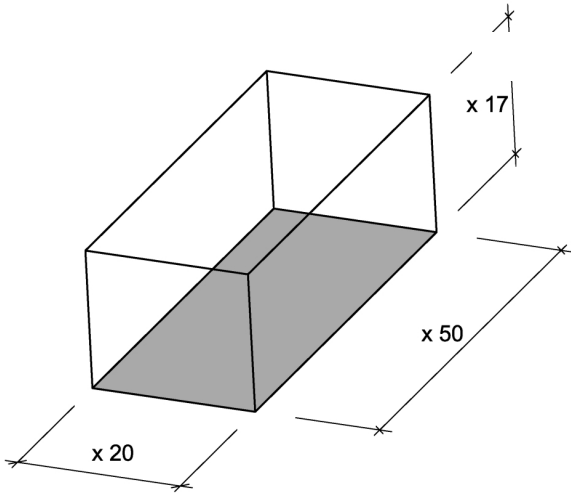


Abbildung 9: Schema Wiener Musikvereinsaal, Maßstabsvergrößerung, schraffierte Fläche absorbierend

Wird ein rechteckiger Saal durch eine reine Maßstabsvergrößerung bei Beibehaltung der Form und der Proportionen „gedehnt“, so „dehnt“ sich auch die Skala der Impulsantwort, was insbesondere im Hinblick auf die wichtigen ersten Reflexionen eine Schwierigkeit darstellt. Diese werden bei reiner Maßstabsvergrößerung zu einem größeren Zeitversatz gegenüber dem Direktschall hin „verschoben“, womit die bei kleineren Sälen günstigen, stützenden Erstreflexionen so verzögert auftreten können, dass sie als störend wahrgenommen werden.

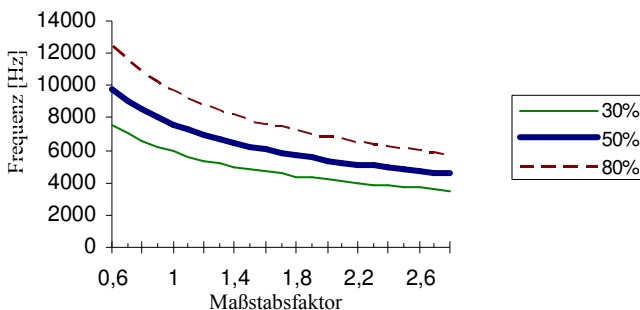


Abbildung 10: Frequenz [Hz] zugeordnet zur Halbierung der Nachhallzeit infolge Luftabsorption in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte in [%] (Maßstabsfaktor 1 entspricht etwa dem Wiener Musikvereinsaal, vgl. Abb.9))

Die Laufzeitverzögerungen, ab denen starke Reflexionen stören können, liegen im Bereich von größer als 50 -80 ms was „Umwegen“ zwischen Direktschall und Erstreflexion von größer als 17 - 27 m entspricht. Die Strecken werden in

den Grundabmessungen großer Säle deutlich überschritten. Die klassischen Rechtecksäle markieren etwa diese Grenze.

Strebt man des Weiteren minimale Energieverluste an, so wird durch eine Maßstabsvergrößerung auch die Nachhallzeit verlängert. Damit erhöht sich auch die Einschwingdauer des Raumes. Aus Gründen der Reflexionsfolge, des Einschwingvorgangs und des größeren Hallradius sind damit einer Maßstabsvergrößerung Grenzen gesetzt.

Ferner ist bei Maßstabsvergrößerung die frequenzabhängige Luftabsorption zu berücksichtigen. Diese hängt vom Verhältnis der Saalabmessung zur frequenzabhängigen Wellenlänge des Schalls ab. Die Maßstabsvergrößerung führt somit zu einer Veränderung der Klangfarbe, die durch die Planung in Grenzen kompensiert werden kann. Wie Abb. 10 zeigt, kann die Erhöhung der Absorption durch Befeuchtung der Luft in gewissem Maße kompensiert werden. Abb. 10 zeigt exemplarisch – für verschiedene relative Luftfeuchten - die Frequenz, bei der die Luftabsorption der sonstigen Raumabsorption entspricht.

Als weiteren mit der Maßstabsvergrößerung in Verbindung stehenden Gesichtspunkt ist die Reduktion des Schalldruckpegels zu beachten. Diese ist jedoch aufgrund des Gesetzes von Weber und Fechner vergleichsweise unkritisch.

Während die menschliche Wahrnehmung nicht in der Lage ist, sich an unterschiedliche Zeitstrukturen der Raumimpulsantwort über eine Veränderung der Integrationszeiten anzupassen, kann sie geringere Lautstärken der Übertragung in Maßen kompensieren.

Zielgrößen

Vor Bau eines Raumes für Musik sind raumakustische Ziele zu definieren. Man bedient sich dabei der o.g. Kriterien und wählt aus den korrelierten Größen einen Satz aus, der die verschiedenen Phänomene geeignet beschreibt. Typische Zielgrößen sind so der Grundgeräuschpegel, das Stärkemaß, die Nachhallzeit, das Klarheitsmaß und der interaurale Kreuzkorrelationskoeffizient (Abb. 11). Diese müssen zwingend aufgrund von Unwägbarkeiten in der Planung aber auch der Abhängigkeit von Quell- bzw. Empfangsposition mit Streubändern angegeben werden. Ferner wird typischerweise ein Band für den spektralen Verlauf der Nachhallzeit angegeben, um die gewünschte Klangfarbe zu beschreiben (Abb. 12).

Störpegel	Schalldruckpegel L [dB (A)]	ausgezeichnet Norm kritisch zu hoch 10 ← 20 30 L [dB(A)] 40 →
Schallübertragung	Stärkemaß G ₈₀ , G ₈ [dB]	für Spitzens. trainierte S. untrainierte S. -10 0 10 G [dB] 20 →
Nachhall	Nachhallzeit T [s]	Optimum 0 1 2 T [s] 3
Klarheit	Klarheitsmaß C ₈₀ [dB]	Optimum -10 -5 0 5 C [dB] 10
Räumlichkeit	interauraler Kreuzkorrelations- koeffizient κ _{max}	räumlich Graben Bühne gerichtet 0 0,5 κ _{max} 1

Abbildung 11: Beispiel für Bereiche von Zielgrößen (rot - Konzert, schwarz - Oper)

Beim Vergleich der durch die Kriterien gegebenen Einzahlwerte mit der subjektiven Bewertung von Räumen ist zu

beachten, dass die Einzahlwerte bei großen Sälen immer von Sende- und Empfangsposition abhängen und es sich damit die Frage stellt, welche Positionen als Referenz herangezogen werden.

Während eine Streuung der Werte für eine feste Empfangs- und unterschiedliche Sendepositionen (z.B. am Podium) problematisch sein kann, da dann die Schalle verschiedener Instrumentenpositionen unterschiedlich übertragen werden und die Balance gestört wird, ist eine Streuung der Werte für verschiedene Empfänger unkritisch; sie kann sogar dazu führen, dass die unterschiedlichen Vorlieben der Zuhörer über verschiedene Bereiche im Zuhörerraum besser berücksichtigt werden können.

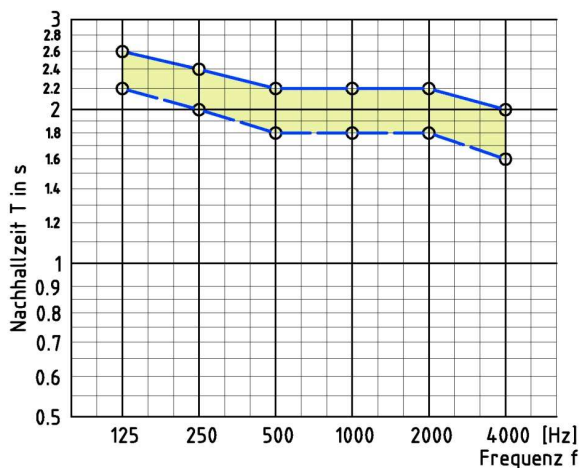


Abbildung 12: Beispiel für die Definition einer anzustrebenden Nachhallzeit für Konzertsnutzung

Planungssicherheit

Zur Überprüfung der Zielgrößen ist es für Konzertsäle mit komplizierten Geometrien und großen Volumina (größer als 2000 Zuhörer) nach wie vor wichtig, physikalische Modelle anzufertigen, die es ermöglichen mit dem Maßstab angepassten frequenztransformierten Signalen Raumimpulsantworten zu messen. Die Modelle werden optimal im Maßstab 1:10, häufig im Maßstab 1:20 gefertigt (Abb. 12) [16]. Insbesondere ermöglichen sie es, die Feinstruktur der Reflexionen im wichtigsten ersten Zeitintervall zu untersuchen.



Abbildung 13: Beispiel für ein physikalisches Modell, Sala St. Cecilia Rom

Parallel dazu werden in der Planung numerische Simulationen durchgeführt. Eine grundsätzliche Beschreibung und

Abgrenzung der Verfahren findet man in [5]. Es wurden zwischenzeitlich kombinierte Verfahren entwickelt, die Strahlenverfolgungsalgorithmen mit dem Spiegelquellenverfahren kombinieren [17].

Eine Bewertung der Ergebnisse von numerischen Simulationen aus Sicht der akustischen Planung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Numerischen Simulationen ermöglichen die Überprüfung der Gleichmäßigkeit der Schallübertragung.
- Sie ermöglichen, verzögerte Reflexionen zu erfassen.
- Die quantitative Bewertung von Kriterien konnte beim Vergleich numerischer Untersuchungen mit Messungen teilweise nicht bestätigt werden [18], das Verständnis für den Raum kann aber durch Bewertung der Simulationsergebnisse erheblich unterstützt werden (Abb. 14).

Insofern stellen numerischen Untersuchungen ein wichtiges Hilfsmittel für den Planer dar. Eine Überprüfung im Hinblick auf die genaue Einhaltung von entsprechenden Zielgrößen erscheint bei rein numerischen Untersuchungen als schwierig. Die raumakustischen Zielgrößen müssen daher mit entsprechenden Streubändern definiert werden.

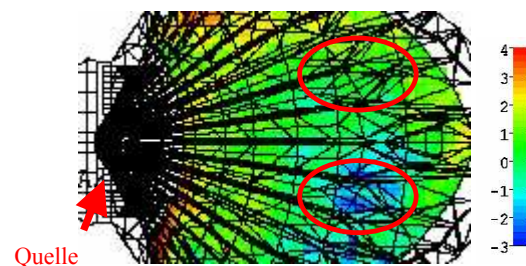


Abbildung 14: Beispiel für die Auswertung des Klarheitsmasses C_{80} aus einer numerischen Simulation für eine außermittig angeordnete Quelle in einem zur Längsachse symmetrischen Raum. In den beiden markierten Bereichen weicht das Klarheitsmaß um ca. 4 dB voneinander ab, was bei einem größeren Orchester zum Eindruck einer schlechten Balance zwischen den Instrumentengruppen führen würde.

Zielsetzungen und – konflikte bei der Planung großer Räume

Im Folgenden wird exemplarisch auf einige bei der Planung großer Musikräume regelmäßig auftretende Zielkonflikte eingegangen.

Zielkonflikt: Minimale Energieverluste und nützliche Reflexionen

Bei großen Musikräumen ergibt sich das Dilemma, dass auf der einen Seite sämtliche Oberflächen möglichst als reflektierend ausgeführt werden sollen, um Energieverluste weitgehend zu vermeiden und auf der anderen Seite die Abmessungen des Raumes zu verzögerten Reflexionen führen können. Aus diesem Grund werden Flächen, die verzögerte Reflexionen verursachen können, diffus ausgeführt um die Energierückwürfe aufzufächern. Durch die Auffächerung der

rückgeworfenen Energie (siehe Abb. 15) können somit starke Einzelreflexionen vermieden werden.

Um in der Feinstruktur der Impulsantwort nützliche, den Raumeindruck und den Kontakt zwischen den Musikern fördernde Reflexionen zu schaffen, müssen in großen Räumen zusätzliche reflektierende Flächen vorgesehen werden. Dies kann über abgehängte Reflektoren (z.B. über dem Podium) aber auch durch eingestellte Wandabschnitte „Vineyards“ erfolgen. Diese Flächen erzeugen Reflexionen, die innerhalb des ersten Zeitintervalls von 50 – 80 ms auftreten und somit nicht als verzögert wahrgenommen werden (Abb.16).

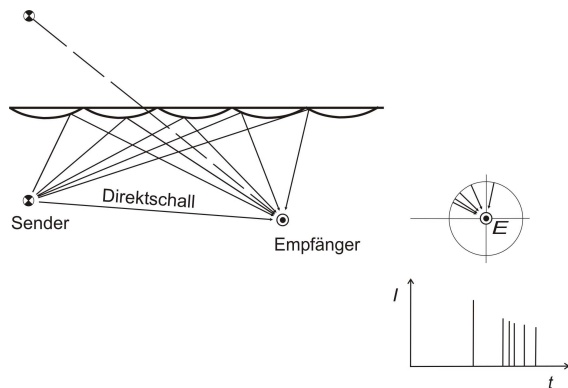
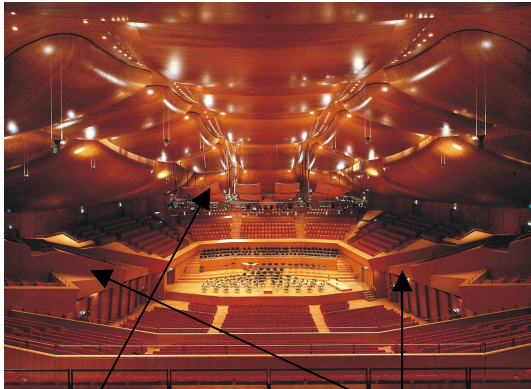


Abbildung 15: Auffächerung der reflektierten Energie durch diffuse Oberflächen, Richtungen des Schalleinfalls beim Empfänger, Impulsfolge über der Zeit.



Podiumsreflektoren Vineyards

Abbildung 16: Podiumsreflektoren und Vineyards, Sala St. Cecilia Rom. Der Parkettbereich weist seitliche Begrenzungen ähnlich eines Rechteckraums auf. Die diffus reflektierenden Deckenflächen sind erkennbar.

Zielkonflikt: Raumform und gleichmäßige Energieverteilung

Das Kriterium „gleichmäßige Energieverteilung“ kann insbesondere bei kreisförmigen oder elliptischen Räumen ein Problem bereiten. Abb. 17 zeigt die Brennpunktbildung, die bei kreisförmigen Grundrissen auftreten kann, sofern keine entsprechenden Maßnahmen getroffen werden.

Um derartige Brennpunkte zu vermeiden wurden am Auditorium di Lodi, einem Kongress- und Konzertsaal für 750 Zuhörer (Renzo Piano, Eröffnung 2002) folgende Maßnahmen vorgesehen:

- stark geneigte Flächen, welche die Energie gezielt von Brennpunkten weglenken (Abb. 18).
- diffus reflektierende Flächen, die eine Brennpunktbildung aus der Reflexionsfolge Wand-Decke vermeiden (Abb. 18).
- Zusätzlich wurden im Bereich des Podiums drehbare reflektierende Elemente zur Unterstützung des Kontakts und für Seitenwandreflexionen angeordnet.

Mit diesen Maßnahmen konnten Brennpunktbildung vermieden werden.

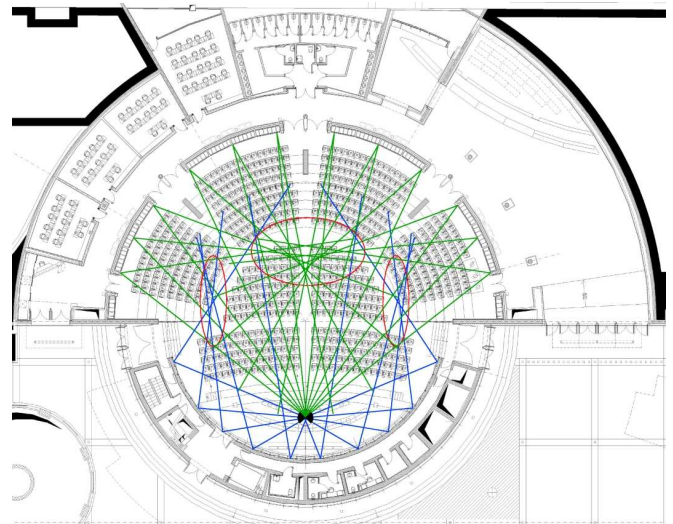


Abbildung 17: Kreisförmiger Grundriss mit Brennpunktbildung (markiert mit Ellipsen)



Abbildung 18: Auditorium di Lodi: Maßnahmen gegen die Brennpunktbildung links: geneigte Rückwand; rechts: diffus reflektierende Wände und Deckenelemente

Zielkonflikt: Unterschiedliche Nutzungen

Unterschiedliche Nutzungen erfordert daran angepasste raumakustische Voraussetzungen. Als Hilfsmittel zur Anpassung ist die variable Raumakustik zunehmend von Bedeutung.

Selbst Konzertsäle, die im ursprünglichen Planungskonzept ohne variable Akustik vorgesehen wurden, wie z. B. das Auditorium Santa Cecilia in Rom (Abb. 16), werden aufgrund interessanter Architektur, guter Größe oder hervorragender Infrastruktur für Kinovorführungen verwendet (Abb. 19).

Maßnahmen zur Anpassung der Raumakustik sind:

- variable Absorber (Vorhänge, Klappenelemente, Abb. 20)

- veränderbares Volumen (z. B. durch herabfahrbare Decke oder Hallkammern, Abb. 21)
- elektronische Raumakustik, Nachhallverlängerung durch Einspielen von zusätzlichen Signalen in die Impulsantwort [19] (Abb. 22).

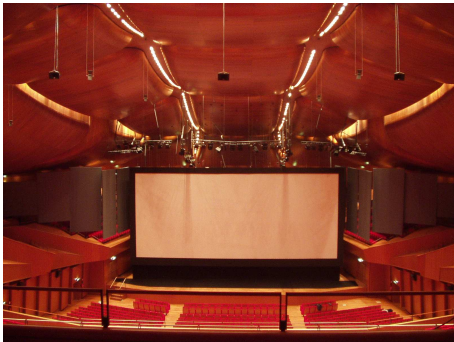


Abbildung 19: Sala St. Cecilia, Rom, Kinonutzung (Anpassung mit ca. 4000 m² Bühnenmolton)

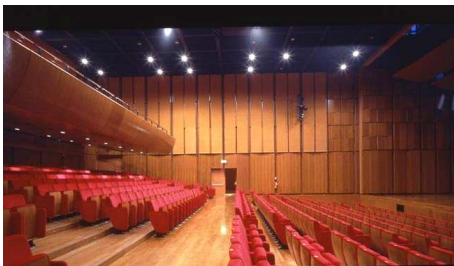


Abbildung 20: Sala Petrassi im Parco della Musica, Rom (Renzo Piano), Variable Absorption über Vorhänge

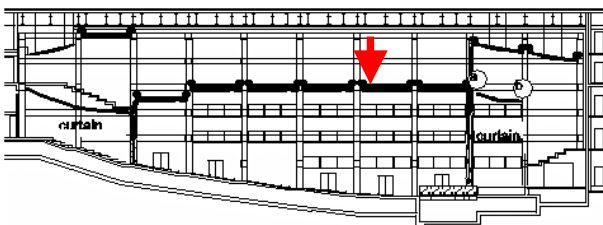


Abbildung 21: Auditorium Lingotto, Turin (Renzo Piano) Variable Raumakustik über eine bewegliche Decke (Verkürzung der Nachhallzeit und Schaffung von nützlichen Erstreflexionen innerhalb eines kürzeren Zeitintervalls für Sprachnutzung) [7]

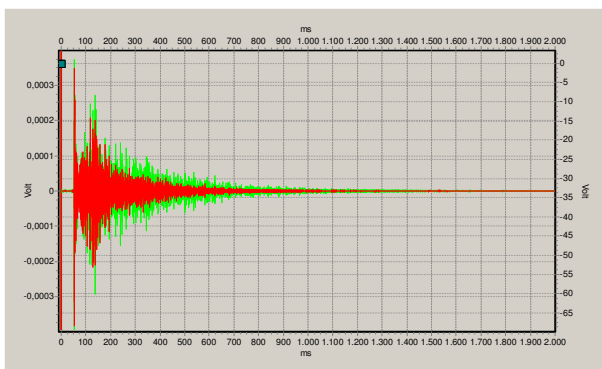


Abbildung 22: Veränderung der Impulsantwort durch elektronische Nachhallverlängerung (Die Nachhallzeit steigt hier von 1,45 auf 1,90 s)

Abschließende Bemerkungen

Unser Reichtum an Aufführungsstätten weltweit sowie die Kreativität und Phantasie von Komponisten, Architekten, Veranstaltern und Interpreten ermöglichen und schaffen immer neue Formate für das musikalische Erlebnis. Dies reicht vom virtuellen Konzertsaal im Freien (Abb. 23), dessen Raumwirkung ausschließlich über Lautsprecher simuliert wird, über hochattraktive, provisorische Bauten [20], die nach dem „Event“ wieder abgerissen werden, bis zu neuen architektonischen und aufführungstechnischen Ansätzen für Räume die über lange Zeiträume genutzt werden sollen. Musik und Räume für Musik befruchteten sich in der Vergangenheit stets wechselseitig. Dabei haben bauliche Entwicklungen neuen Musikrichtungen einen Anstoß gegeben. Bauliche Experimente waren schon immer „riskant“ aber auch lohnend, wie die Kritik an der heute uneingeschränkt anerkannten Boston Symphony Hall beleuchtet [6]: So beurteilte der Kritiker William Forster Apthorp diesen Saal nach den ersten Konzerten: „...and, to conclude with, we have not yet met the musician who did not call symphony hall a bad hall for music. Expert condemnations of the hall differ, as far as we have been able to discover, only in degrees of violence....“.

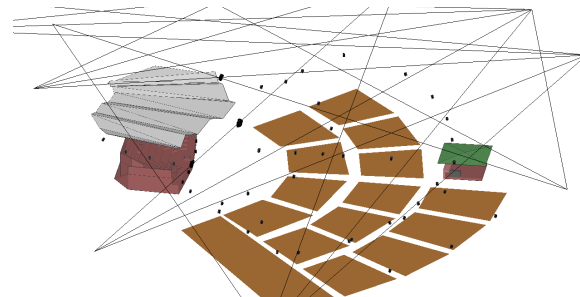


Abbildung 23: Über 60 Lautsprecher simulierter virtueller Konzertsaal im Freien.

Heute haben wir im Vergleich zum 19. Jahrhundert ungleich bessere Kenntnisse über die Musik-Raum-Zuhörer-Wechselwirkung. Es wäre schade, wenn man – um eine optimale Planungssicherheit zu erlangen – zukünftig diese Kenntnisse lediglich dafür einsetzen würde, Klangkopien anerkannt guter Säle zu bauen. Beispiele – wie das Teatro Regio – zeigen, dass der Zeitgeschmack einer Veränderung unterliegt und dass daher diese Vorgehensweise nicht zielführend wäre. Raumakustische Planung unterliegt - wie Komposition und Architektur - einer laufenden Entwicklung, die durch Probieren neuer Formen, durch Verwenden neuer Materialien und durch Gestalten neuer Formate der Aufführung befördert und befruchtet wird.

Der Autor dankt seinen Kollegen bei Müller-BBM, insbesondere den Herren G. Engel, H. Frisch, J. Kümmel, E. Mommertz, H. A. Müller, K. H. Müller, M. Prüfer und J. Reinhold für die Unterstützung bei der Vorbereitung des Vortrags.

Literaturverzeichnis

- [1] Reichardt, W. und Kussev, A., Z.: Elektrische Information und Energietechnik, Leipzig 3 (1972) 2
- [2] Cremer, L.; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1, Hirzel Stuttgart (1978)
- [3] Hass, H.: Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache, *Acustica* 1, 49-58 (1951)
- [4] Seraphim, H.-P.: Über die Wahrnehmbarkeit mehrerer Rückwürfe von Sprachschall, *Acustica* 11, 80-91 (1961)
- [5] Kuttruff, H. Mommertz, E.: Raumakustik: in Müller, Möser, Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Auflage, Springer (2003)
- [6] Beranek, L.: Concert Halls and Opera Houses, Second Edition, Springer-Verlag (2002)
- [7] Müller, G., Reinhold, J.: Nota sulla progettazione acustica della sala del Lingotto, 2. International Conference on Acoustics and Musical Research, 229-234, CIARM (1995)
- [8] Vitruvius: De architectura, libri decem, 5. Buch (84-27 v. Chr.)
- [9] Meyer, J.: Zur Raumakustik in Johann Sebastian Bach Kirchen, 21. Tonmeistertagung, Hannover 1064-1077 (2000)
- [10] Meyer, J.: Raumakustik und Orchesterklang in den Konzertsälen Josef Haydn's, *Acustica* 41 145 (1978)
- [11] Kuhl W., Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit großer Musikstudios, *Acustica* 4 618-634 (1954)
- [12] Braucht die neue Musik den Kammermusiksaal?, *Bauwelt* 8, 20-33 (2005)
- [13] Sacerdote G., Pisani, R.: *Acustica., Il nuovo Teatro Regio di Torino* 99-111
- [14] Müller, G., Müller, H.A.: The development of room acoustical demands on operas within the last 50 years, 16th International Congress on Acoustics, ICA-Seattle 337-338, (1998)
- [15] Statistische Ämter des Bundes und der Länder, Kulturfinanzbericht 2003
- [16] Brebeck, P., Bücklein, R. et al: Akustisch ähnliche Modelle als Hilfsmittel für die Raumakustik *Acustica* 18, 213-226 (1967)
- [17] Heinz, R.: Binaurale Raumsimulationen mit Hilfe eines kombinierten Verfahrens - getrennte Simulation der geometrischen und diffusen Schallanteile, *Acustica* 79, 207-220 (1993)
- [18] Interne Berichte Müller-BBM
- [19] Frisch, H.: Beschallungstechnik: in Müller, Möser, Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. Auflage, Springer (2003)
- [20] Prüfer, M.: Temporäre Musikaufführungsstätte für den „Europäischen Musikmonat“ in Basel, 22. Tonmeistertagung (2002)