

Raumakustik im Musical-Theater in Basel

Autor(en): **Tretzer, Karl / Rosa, Ercolino**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **115 (1997)**

Heft 4

PDF erstellt am: **24.07.2024**

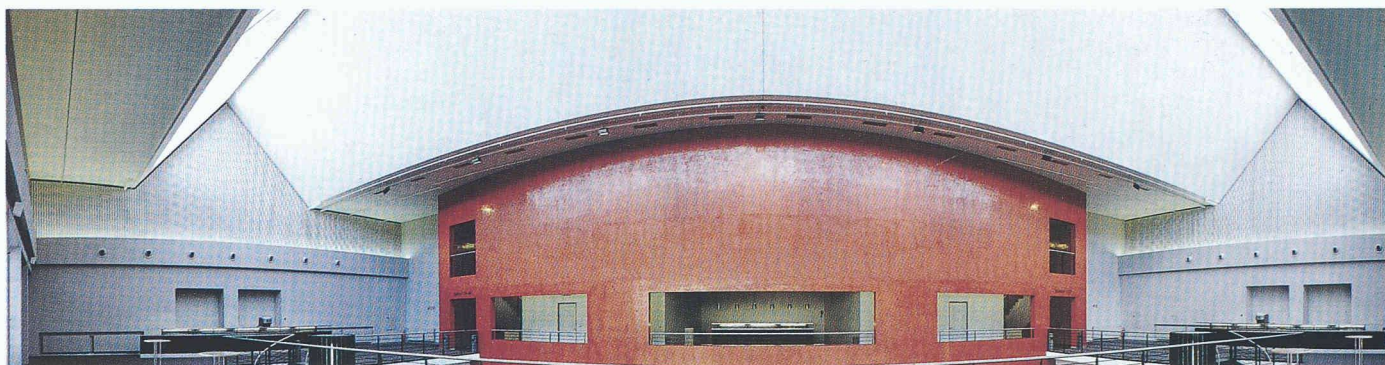
Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79192>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



Karl Trefzer, Ercolino Rosa, Basel

Raumakustik im Musical-Theater in Basel

Die Computersimulation der Raumakustik und das Erstellen eines Modells zum Erhalt und zur Auswertung von Raum-Impulsantworten bezüglich Raumform und Sekundärstruktur ermöglichten die Realisierung der gestellten Forderungen. Das Einhalten von in der Raumakustik allgemein anerkannten quantifizierbaren Kriterien wie Nachhallzeit, Deutlichkeitsgrad, Klarheitsmass usw. zeitigt positive Kritiken.

In der Zeit von Mitte April 1994 bis Mitte Oktober 1995 wurde in der ehemaligen Halle 107 der Schweizer Mustermesse in Basel das neue Musical-Theater Basel errichtet. Das Erreichen einer optimalen Raumakustik beim Bau grossvolumiger Räume im Bereich der Kommunikation (Sprache und Musik) erfordert im allgemeinen ein dreiphasiges Verfahren mit Planungs-, Bau- und akustischer Anpassungsphase. Die zur Verfügung gestandene Zeit von knapp eineinhalb Jahren liess imperativ nur die ersten zwei Phasen zu. Mit Beendigung der Bauarbeiten mussten auch die geforderten quantifizierbaren Kriterien eingehalten sein.

Raumakustische Anforderungen

Bereits vor der Planung lag das für das Musical-Theater vorgesehene und von A.L. Webber geschaffene Musical «The phantom of the opera» fest. Vor diesem

Hintergrund waren die Forderungen an die Raumakustik sowohl vom Bauherrn als auch von der zukünftigen Nutzerin auf die Monofunktionalität des Raums ausgerichtet und damit nicht mehrdeutig. Sie lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Gute Hörbarkeit von Musik und gesprochenem Wort im gesamten Raum.
- Möglichst kurze Nachhallzeiten über das gesamte Frequenzgebiet im Publikumsbereich. Diese Forderung erscheint im ersten Moment konträr zu den Anforderungen an die Nachhallzeit für Musikdarbietungen. Sie wird aber unter dem Aspekt einer künstlichen Generierbarkeit von längeren Nachhallzeiten nach Bedarf durch eine elektroakustische Verstärkeranlage verständlich.
- Mindestens eine befriedigende bis gute Verständlichkeit des gesprochenen Wortes für den Eventualfall einer Zwischennutzung.
- Schaffung von Sitzgelegenheiten für 1600 Personen.

Diese Anforderungen implizieren grundsätzlich sowohl subjektive als auch objektive quantifizierbare Kriterien, wobei auch heute noch ihre Zusammenhänge nicht ganz geklärt sind. So resultieren z.B. besondere Schwierigkeiten daraus, dass bei der akustischen Urteilsbildung unbewusst optische Wahrnehmungen mitspielen. Im Grenzfall kann sogar die architektonisch-ästhetische Wirkung eines Raums den akustischen Eindruck zweitrangig machen.

Quantifizierbarkeit raumakustischer Anforderungen

Durch die Zielsetzung entfiel die Notwendigkeit einer Anpassungsmöglichkeit der Raumakustik an verschiedene Darbietungen mittels variierbarer Kriterien wie etwa im Stadttheater Basel. So wurde z.B. eine Volumenverminderung des Zuschauerraumes, d.h. eine Nachhallzeitverkürzung durch Absenken der Decke, für das Schauspiel nicht notwendig, was die Quantifizierung der Anforderungen erheblich erleichterte. Aus der Beschränkung von Zeit und Mitteln ergaben sich architektonische (siehe Kasten) sowie die folgenden raumakustischen Kriterien.

Nachhallzeit T

Eines der wichtigsten raumakustischen Kriterien ist heute nach wie vor die frequenzabhängige Nachhallzeit [1]. Für Musiktheater bewegt sich der international als optimal angesehene Bereich für Volumina von rund 12 000 m³ im Bereich der Werte nach Bild 1, die für die Planung des Musical-Theaters in Basel die Grundlage bildeten.

Volumenkennzahl

Der Zusammenhang zwischen Nachhallzeit, Raumvolumen und äquivalenter Absorptionsfläche macht für eine angestrebte Nachhallzeit generell ein Mindestvolumen für einen Zuschauerraum erforderlich. Umgekehrt begrenzt die Einstellung eines genügend hohen Schallpegels das Volumen eines Zuschauerraums nach oben. Für Musiktheater (Oper, Operette) werden Volumenkennzahlen von 5 bis 8 m³ pro Platz als optimal betrachtet. Als Maximalvolumen werden allgemein bis 15 000 m³ empfohlen [3]. Der Wert von 9,7 m³ pro Person in der Staatsoper Dresden (Bild 2) liegt z.B. bereits oberhalb der

Grenze des optimalen Bereichs. Dies ist im weitesten Sinn ein Grund für die etwas tiefen Deutlichkeitsgrade und Klarheitsmass (D: Mittelwert 43%, C_{80} : Mittelwert -1,3 dB).

Der Einbau des Musical-Theaters samt Infrastruktur in die vorgegebene Halle 107 gebot die Einhaltung bestimmter Grenzen in Länge und Breite. Mit der determinierten Platzzahl und den entsprechenden Bauvorschriften (Höhe) ergab sich fast zwangsläufig ein Volumen von 12 000 m³ für den Zuschauerraum und damit eine Volumen Kennzahl von 7,5 m³ pro Person.

Deutlichkeitsgrad D und Klarheitsmass C_{80}

Als raumakustisches Kriterium neueren Datums gelten der Deutlichkeitsgrad sowie u.a. das Klarheitsmass. Erschlossen wurden sie erst mit der modernen elektronischen Messtechnik und Datenverarbeitung [1, 2, 3, 6]. Mit Sicherheit gilt, dass die Verständlichkeit um so besser ist, je grösser der Energieanteil des Direktschalls und der ersten nützlichen Reflexion gegenüber der restlichen, ebenfalls durch Reflexionen am Beobachtungspunkt eintreffenden Energie ist. Die Zeitspanne für Direktschall und erste Reflexionen, welche wie gesagt die Verständlichkeit erhöhen, beträgt 50 ms. Mit andern Worten heisst das, dass der Umweg von nützlichen reflektierten Schallstrahlen weniger als 17 m im Vergleich zum Direktschall betragen muss. Dies bestimmt die Raumform sowie die Anordnung von Sekundärstrukturen (Absorptions- bzw. Reflexionsflächen). Den Zusammenhang zwischen dem Deutlichkeitsgrad D und der Sprachverständlichkeit zeigt Bild 3 auf. Was die Deutlichkeit bei der Sprache, bedeutet die Durchsichtigkeit bei der Musik. Sie beinhaltet sowohl die Unterscheidbarkeit einzelner Instrumentengruppen eines Orchesters als auch die Möglichkeit des Erkennens und Verfolgens schneller Passagen.

Das Kriterium für die Durchsichtigkeit ist das Klarheitsmass C_{80} . Zu seiner Bildung wird die bis 80 ms nach dem Direktschall eintreffende Energie, welche die Durchsichtigkeit erhöht, zur nachfolgend beim Beobachtungsort eintreffenden ins Verhältnis gesetzt. Als optimal werden heute C_{80} -Werte von -2 bis +4 dB betrachtet [3, 4].

Echofreiheit nach dem «Tannenbaum-Kriterium»

Der Betrag der meisten raumakustischen Kriterien lässt sich am besten aus der Raum-Impulsantwort herauslesen, wie dies Bild 5 zeigt. Wird das Bild um die Zeitachse gespiegelt, so kann man im Direktschall mit den frühen Reflexionen und dem

Volumen	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Hz
12 000 m ³	1,9-2,7	1,6-2,3	1,3-1,9	1,3-1,9	1,3-1,9	1,3-1,9	1,1-1,9	0,8-1,9	s

1
Frequenz- und volumenabhängige Toleranzbereiche für die Sollwerte der Nachhallzeit (in Sekunden) bei Musiktheatern [3]

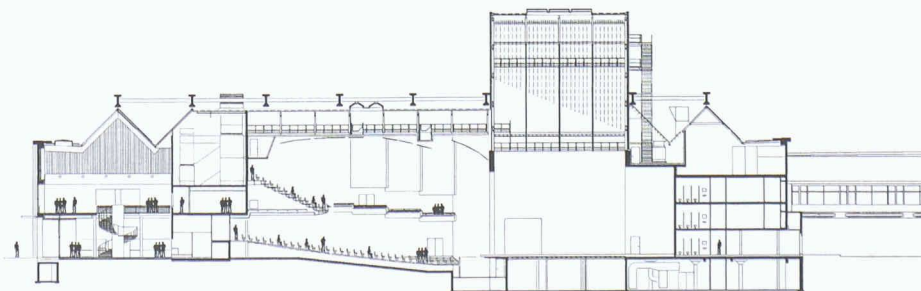
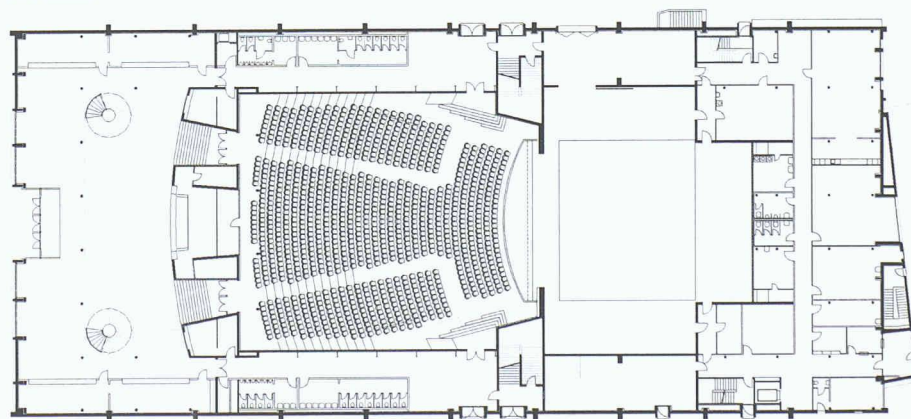
Theater Quelle	Volumen m ³	Anzahl	Volumen-Plätze m ³ /Person	T ₁₂₅ kennzahl s	T _{500-1'000} s	
Stadttheater Basel	7 700	1 020	7,5	2,3	1,6	[7]
Stadttheater St.Gallen	4 400	770	5,7	1,4	1,3	[8]
Bayr. Staatsoper München	13 000	1 750	7,4	2,2	1,7	[3]
Staatsoper Dresden	12 500	1 290	9,7	2,6	1,9	[3]

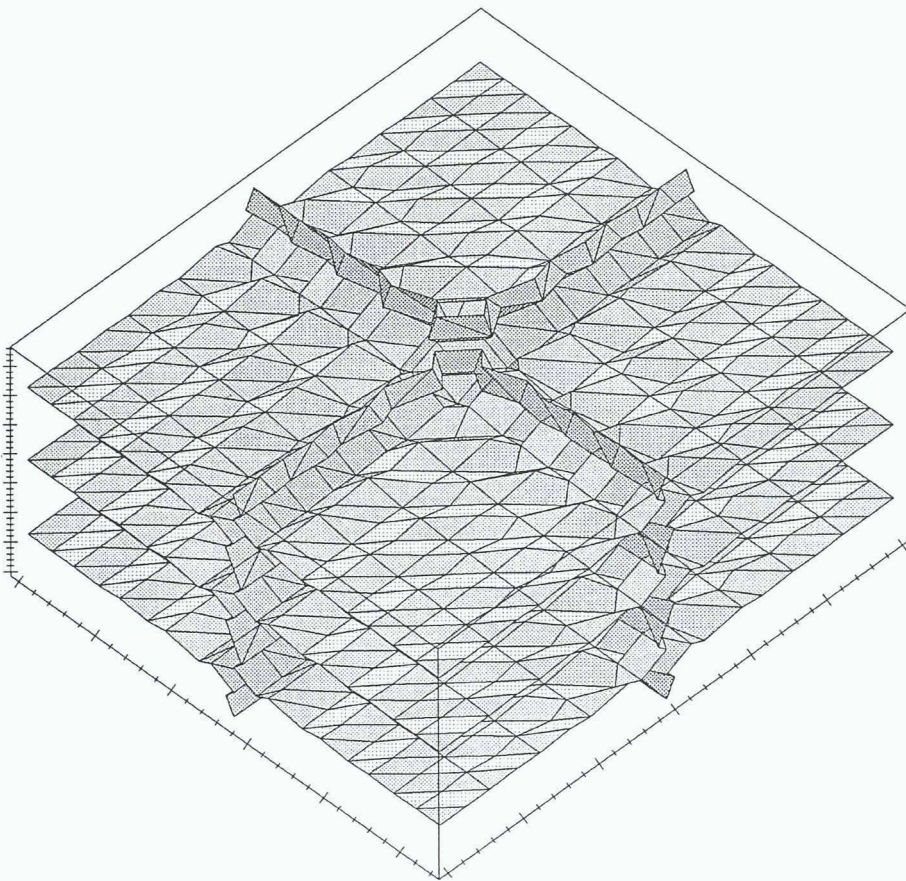
2
Beispiele von Volumen Kennzahlen und Nachhallzeiten im tiefen und für Sprache und Musik wichtigen Frequenzbereich von Musiktheatern. Zustand unbesetzt

Deutlichkeitsgrad, D %	20	30	40	50	60	80
Sprachverständlichkeit %	60	82	87	91	93	95

3
Zusammenhang von Deutlichkeitsgrad und Sprechverständlichkeit nach Kuttruff [2]

4
Grundriss und Längsschnitt des Musical-Theaters Basel

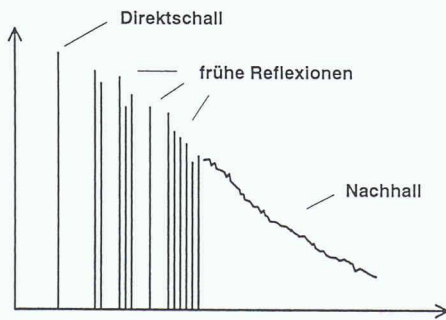




Raumakustische Massnahmen

Die Beibehaltung der Seiten- und Stirnwände der ehemaligen Halle 107 legten die Errichtung eines nahezu quaderförmigen Zuschauerraums nahe (Bild 4). Als prinzipielle Abweichung von der rhombischen Symmetrie des quaderförmigen Raums wirken der Balkon, der dem Bühnenportal entgegengesetzte Regieraum mit geneigter Vorderfront, das mit angenähert logarithmischer Spirale ansteigende Parkett, das zu den als Reflektoren angeordneten, geneigten Deckenflächen aus schwach pyramidalen Flächenteilen nicht planparallel verläuft, sowie die Reflektoren über den seitlichen Balkonen. Diese Momente sollen vor allem die Ausbildung und damit deren Anregung von besonders störenden Tiefton-Eigenfrequenzen im Bereich von 20 bis 100 Hz, u.a. durch das Tram, verhindern. Eine für den Raum errechnete Schwingungsform (Mode) mit der Frequenz von 35 Hz zeigt Bild 6.

6
Eine für den Raum wahrscheinliche Mode mit der Frequenz von 35 Hz. Im realisierten Raum manifestiert sie sich nicht



Nachhall einen liegenden «Tannenbaum» erkennen [6]. Je gleichmässiger er bei einem Beginn des Nachhalls um etwa 100 ms ausgebildet ist, um so treffender resultieren die gewählten quantifizierbaren raumakustischen Kriterien. Die Echofreiheit nach dem «Tannenbaum-Kriterium» ist in höchstem Mass für die Raumform sowie für die Anordnung und die Ausdehnung von Sekundärstrukturen bestimmend.

5
Schematisierte Raumimpulsantwort, x-Achse: Zeit, y-Achse: Schallpegel [4]

Die Raumform, die wesentlichen Sekundärstrukturelemente und der Verwendungszweck determinierten die Anordnung der äquivalenten Absorptionsflächen. Die Bühnenräume (Hinter- und Seitenbühnen, Bühnenturm) bilden einen mit dem Zuschauerraum akustisch über das Bühnenportal angekoppelten Raum. Der ausserordentlich grosse Bestand an Kulissen aller Art hebt den Kopplungsfaktor im gesamten interessierenden Frequenzgebiet von 125 bis 4000 Hz gegen 1 an. Damit übernimmt das Bühnenportal eine Breitbandabsorption mit einem Absorptionskoeffizienten von nahezu 1,0.

Das Publikum bzw. die gepolsterten Klappstühle und der Teppich haben die Mittel- und Hochtonabsorption zu übernehmen. Der auf einem Rost gelagerte Holzboden im Parkett und auf dem Balkon, die als Plattenschwinger aus Holz vor verschieferten dimensionierten und gedämpften Hohlräumen gestalteten Wände sowie die als Helmholtzresonatoren ausgebildeten Balkonbrüstungen sind für die Tieftonabsorption verantwortlich.

7
Für den Zuschauerraum des Musical-Theaters Basel berechnete Werte der Nachhallzeit

Methode	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
Sabine	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,3	s
dBray	1,8	1,7	1,5	1,5	1,4	1,1	s

Die Deckenflächen mit ihren entsprechenden Neigungen, die Proszeniumseitenwände, die Wände und die über den Seitenbalkonen angeordneten Reflektoren sind zur adäquaten Verteilung der ersten Reflexionen im gesamten Zuschauerraum vorgesehen. Die Nachhallzeit zur Dimensionierung der genannten Absorptionsmassnahmen wurde jeweils iterativ, einerseits nach Sabine und andererseits nach einem Ray-Tracing-Verfahren berechnet. Für den realisierten Zuschauerraum sollten sich damit die in Bild 7 zusammengestellten Werte ergeben (Zustand unbe-

8
Im unbesetzten Zustand des Musical-Theaters gemessene Nachhallzeiten

Methode	125	250	500	1000	2000	4000	Hz
Impulsanregung, Auswertung nach der Schrödermethode	1,7	1,6	1,5	1,6	1,6	1,6	s

setzt) die vor der Premiere gemessenen Werte sind aus Bild 8 ersichtlich.

Bild 9 zeigt in einer Grafik den optimalen Bereich sowie die gemessene Nachhallzeit.

Das sich aus dem Gesamtkonzept ergebende Raumvolumen des Zuschauerraumes beträgt $12\,000\text{ m}^3$. Mit 1600 Plätzen ergibt sich damit eine Volumenkenzahl von $7,5\text{ m}^3$ pro Person (Bild 2).

Für die Bildung eines ausgeglichenen «Tannenbaum-Kriteriums» in der Raum-Impulsantwort zur Optimierung der Deckenform, der Anordnung und der Form der Reflektoren über den Seitenbalkonen wurde der Zuschauerraum in einem Modell im Massstab 1:50 nachgebildet. Ursprüngliche Ideen von einer «Techno-Decke» während der Planungsphase (die Tragkonstruktion der Gebäudedecke zeigend) sowie von stark konkaven Reflektoren über den Seitenbalkonen mussten damit verworfen werden. Bild 10 zeigt die Raum-Impulsantwort verschiedener Modellformen und des realisierten Raumes.

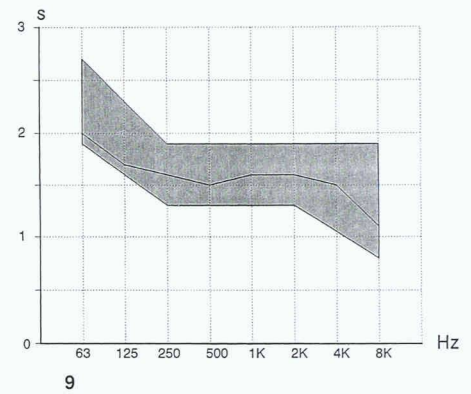
In Bild 10a (Modell mit «Techno-Decke») ist z.B. ein unerwünschtes Echo nach etwa 5,5 ms nach dem Direktschall, d.h. in Realität nach 275 ms eindeutig er-

kennbar. In Bild 10b (Modell mit konkaven seitlichen Reflektoren) ergeben sich von etwa 2,5 bis 5,5 ms nach dem Direktschall, d.h. in Realität nach 125 bis 275 ms, unerwünschte Echos. In der Zeit von 0 bis 2 ms (0 bis 100 ms) sind nahezu keine nützlichen ersten Reflexionen vorhanden («ungleichmässiger Tannenbaum»). Zur Anregung des Modellraums diente ein extrem kurzzeitiger elektrischer Funke. Das Schallereignis wurde mit einem Mikrofon aufgenommen und mit einem leistungsfähigen Zweikanal-Echtzeitfrequenz-Analysator ausgewertet.

Die Computersimulation liess für den fertig geplanten Zuschauerraum einen mittleren Deutlichkeitsgrad von 68% sowie ein mittleres Klarheitsmass von 3,8 dB erwarten.

Aus der Raum-Impulsantwort des realisierten Zuschauerraumes ergaben sich, verteilt über 18 Messorte, neben den oben erwähnten Nachhallzeiten ein mittlerer Deutlichkeitsgrad von 62% sowie ein mittleres Klarheitsmass von 4,4 dB.

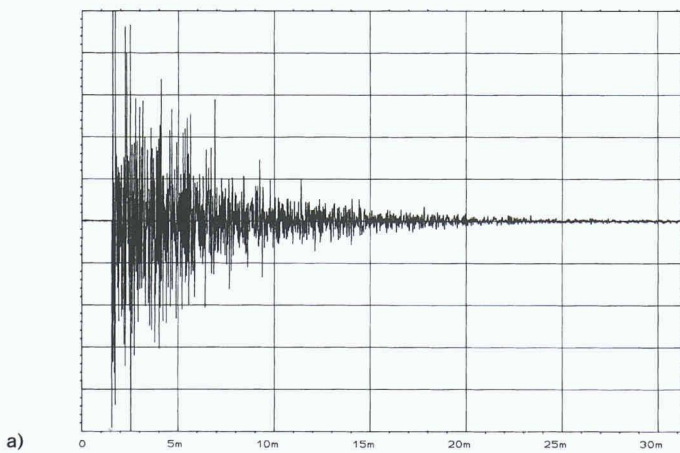
Interessant ist die Abnahme des Schalldruckpegels von der Bühne bis zur hintersten Sitzreihe im Parkett von nur 7 dB. Eine Differenz von 10 dB wird als Halbierung bzw. als Verdoppelung der Laut-



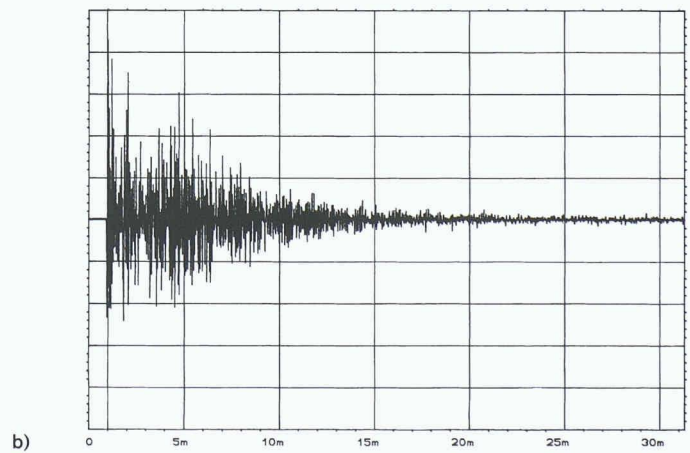
9
Bereich der optimalen Nachhallzeit für Musiktheater mit den gemessenen Werten für das Musical-Theater Basel

10

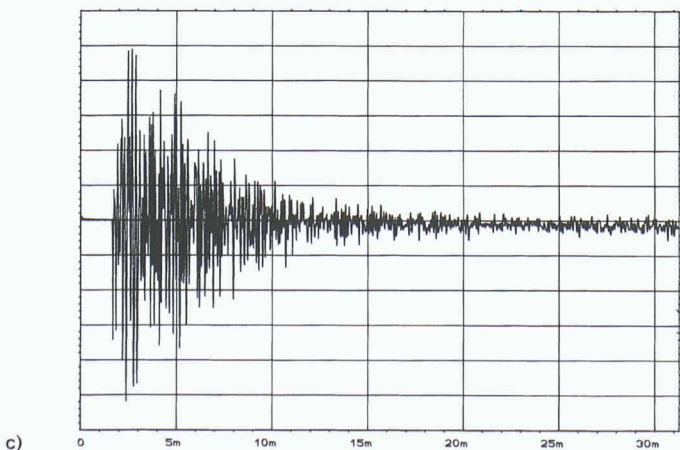
a: Raum-Impulsantwort des Modells mit «Techno-Decke», b: Raum-Impulsantwort des Modells mit konkaven seitlichen Reflektoren, c: Raum-Impulsantwort des Modells mit der realisierten Decke und den seitlichen Reflektoren, d: Raum-Impulsantwort im ortsrealisierten Zuschauerraum. Anregung mit Pistolenknall auf der Bühne



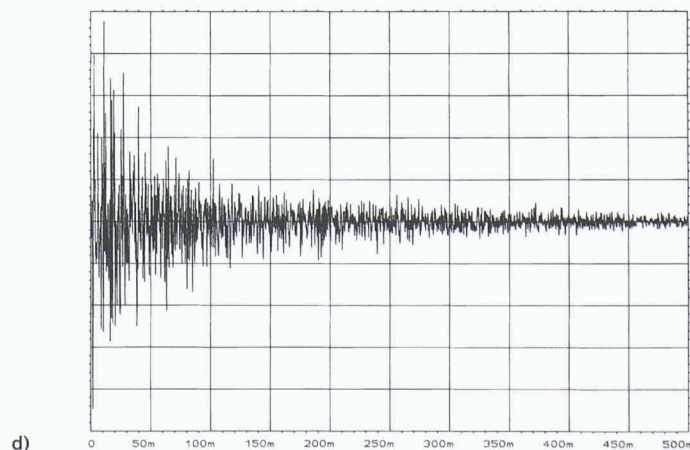
a)



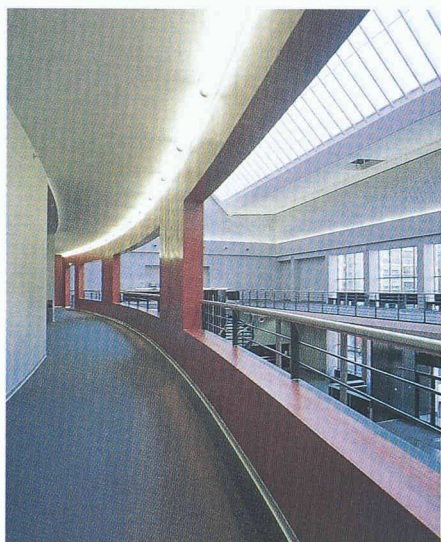
b)



c)



d)



11

Innenansicht, Blick von oben ins Foyer

stärke empfunden. Für den Zuschauer bedeutet diese Pegelabnahme aber keine akustische Qualitätsverschlechterung, da er zusätzlich über eine elektroakustische Verstärkeranlage beschallt wird. Immerhin entspricht dieses Verhalten eindeutig nicht dem konventionell theoretischen Verhalten des akustischen Grossraums, sondern genau demjenigen von Konzertsälen [5]. Der Pegel folgt der Gesetzmässigkeit:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4 \cdot e^{-0,04 r/T}}{A} \right)$$

mit: L_p : Schalldruckpegel

L_w : Schalleistungspegel

Q : Richtfaktor

r : Abstand

Schallquelle - Empfänger

T : Nachhallzeit

A : äquivalente Absorptionsfläche

Die maximale Abweichung von dieser Gesetzmässigkeit bei einem Abstand von 35 m von der Schallquelle beträgt auf der Bühne 1,5 dB.

Literatur

[1]

Cremer, L., Müller, H.A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, 2. völlig neu bearb. Aufl., Stuttgart, 1976

[2]

Kuttruff, H.: Room Acoustics, Third Edit., London, 1991

[3]

Fasold, W., Sonntag, E., Winkler, H.: Bau- und Raumakustik, 1. Aufl., Köln-Braunsfeld, 1987

[4]

Eggenschwiler, K.: Eidgenössische Materialprüfanstalt, Dübendorf, Vorlesungsunterlagen Raumakustik, 1995

[5]

Barron, M.: Loudness in Concert Halls, Acoustica, 82 Suppl., 21-29, 1/1996

[6]

Fasold, W., Kraak, W., Schirmer, W.: Taschenbuch Akustik, 1. Aufl., Berlin, 1984

[7]

Lauber, A.: Eidgenössische Materialprüfanstalt, Dübendorf, Prüfbericht 30460, 1975

[8]

Privatmitteilung T. Imhof; Imhof Akustik AG, Trogen

Fazit

Die quantifizierbaren Kriterien der raumakustischen Anforderungen konnten mit der Eröffnung des Musical-Theaters eingehalten werden. Neben den eindeutigen Ausgangsbedingungen sorgte dabei die Computersimulation der Raumakustik für eine zusätzliche Sicherheit. Die Erstellung eines Modells zur Erzeugung von Raum-Impulsantworten für die Optimierung von Raumformen und Sekundärstrukturen sowie ein ausgewogenes Zusammenwirken von Architekt und Akustiker bildeten dazu die Grundlagen.

Adresse der Verfasser:

Karl Trefzer, Dr. phil. II/SIA/ASIC, Ercolino Rosa, dipl. Masch. Ing. ETH/SIA/ASIC, Trefzer+Rosa, Akustik und Schwingungstechnik, St. Alban-Ring 206, 4020 Basel

Planungsvorgabe

Die Grundfrage lautete: «Wie kann man eine aus den 50er Jahren stammende, 90×40 m grosse, 18 m hohe Ausstellungshalle ohne ausreichende Isolation, mit einer unzureichenden Warmluftheizung, einem nie ganz wasserdichten und wenig tragfähigen Shed-Dach in ein modernes Musical-Theater mit 1600 Plätzen umbauen?»

Das Gebäude umfasst neu vier Bauteile: Das Foyer mit den Besuchergarderoben und den Verpflegungsmöglichkeiten, den Zuschauerraum mit 1200 Plätzen im Parkett und 400 weiteren im ersten Rang, die Bühne mit dem 30 m hohen Bühnenturm und das dreigeschossige Servicegebäude mit Garderoben, Büros, sanitären Einrichtungen und der Kantine für die 200köpfige Truppe. Es gelang, Zuschauerraum und Bühne so in der bestehenden Hallenstruktur unterzubringen, dass nur der 30 m hohe Bühnenturm über die statische Struktur der alten Halle hinausragt. Die neu gebauten Teile sind von aussen in der Dachlandschaft dank ihrer Trapezblechverkleidung ablesbar. Die gesetzlich vorgeschriebenen Notausgänge wurden mit Sichtbetonkuben in die Seitenfassaden eingelassen, und die neue transparente Foyerfassade passt sich der vorhandenen Struktur an.

Funktionelle Ausführung

Termin - Kosten - Architektur - Qualität, in dieser Reihenfolge wurden die Planungsgrundsätze von der Bauherrschaft festgelegt. Das Gebäude wurde für eine Lebensdauer von nur zehn Jahren konzipiert und musste dementsprechend kostengünstig realisiert werden. So blieben viele Räume unausgebaut, was heisst: Kein Bodenbelag, rohe Kalksandstein- oder Betonwände, einflammige Beleuchtungskörper. Im ganzen Hinterhaus wurden die Decken nach dem Ausschalen weiss gespritzt; die Farbe bildet die definitive Deckenoberfläche. Die Fluchttreppenhäuser wurden ganz roh belassen, die Treppenläufe bestehen aus vorgefertigten Betonelementen. Für die den Zuschauern zugänglichen Räume wurde ein höherer Aufwand betrieben; die Fotos gewähren einen gewissen Einblick.

Planungsbeginn war im Mai 1994, mit dem Bau wurde im Oktober begonnen und bereits neun Monate später dem Bauherrn fertig übergeben. Der knapp kalkulierte Kostenvorschlag wurde sogar unterschritten. Burckhardt+Partner AG, Basel