

Vergleichende raumakustische Messungen und Dokumentation Berliner Auditorien unter Berücksichtigung der räumlichen Schallfeldverteilung

Peter S. Krämer
GEBRA mbH Agricolastr. 26, D-10555 Berlin /
TU Berlin, Lg. Kommunikationswissenschaft, Einsteinufer 17, D-10587 Berlin

Abstract

In dem hier vorgestellten Forschungsprojekt sollte der Einfluss der räumlichen Schallfeldverteilung auf die raumakustischen Kriterien insbesondere der Sprachverständlichkeit und der Deutlichkeit untersucht werden.

So ist z.B. aus früheren Messungen bekannt, dass das Kriterium STI (Speech Transmission Index) in der Regel zu hohe Werte im Vergleich zur tatsächlich subjektiv empfundenen Sprachverständlichkeit liefert, vor allem dann, wenn die Diffusität des Nachhalls nicht ausreichend ist.

Daher wurde eine Auswahl repräsentativer Berliner Auditorien getroffen und dort umfangreiche Messungen durchgeführt u.a. mit einem Kunstkopf-Mikrofon zur nachträglichen subjektiven Bewertung und mit einem 4-kanaligem Tetraeder-Mikrofon zur objektiven Erfassung der räumlichen Schallfeldanteile.

Das Projekt wurde im Rahmen der „Berlin Forschung“ des Berliner Senates gefördert. Eine Auflage des Zuwendungsgebers war die Erstellung einer umfangreichen Dokumentation der Auditorien in architektonischer und akustischer Hinsicht. Diese Dokumentation wurde im HTML-Format auf CD-ROM erstellt und soll demnächst veröffentlicht werden.

Stand der Forschung

Durch die erfassten objektiven Kriterien, die aus den physikalischen Schallfeldeigenschaften abgeleitet werden können und durch die Möglichkeit zur nachträglichen subjektiven Bewertung mittels kopfbezogener Stereophonie (Kunstkopf / Kopfhörer) ist eine Beurteilung der akustischen Gesamtqualität möglich. Nach neueren Untersuchungen von Sotiropoulou et al. (1995) wird die subjektive Beurteilung der akustischen Gesamtqualität durch vier Faktoren bestimmt: Volumen, Nähe, Tonqualität (Klangfarbe) und Klarheit.

Die klassischen Kriterien beschreiben die Hörsamkeit des Raumes jedoch nicht immer zufriedenstellend. Meist ist festzustellen, dass bei extremen Messwerten der Raum mit Sicherheit schlecht klingt. Umgekehrt sind gute Messwerte nicht immer der Garant dafür, dass nicht doch klangliche Fehler auftreten können. Ein Grund hierfür liegt darin, dass die meisten der bisher eingehend untersuchten objektiven Kriterien lediglich die Zeitstruktur des Schallfeldes wiedergeben (Lehmann '76, Wilkens '75), oder die Untersuchungen in künstlichen Schallfeldern durchgeführt wurde, die nicht immer den realen Bedingungen entsprechen (Damaske 1969).

Räumliche Kriterien wie das Raumeindrucksmaß, der Seitenschallgrad und der Interaurale Kreuzkorrelationsgrad IACC beschränken sich auf die Beschreibung des Raumeindrucks und die empfundene Ausdehnung der Schallquelle. Diese Maße liefern aber keine Aussagen über die Abhängigkeit von *räumlichen* Einflüssen bei den wichtigsten Beurteilungskriterien Deutlichkeit für Sprache und Klarheit für Musik.

Der klangliche Einfluß wurde z.B. von Hoffmeier (1996) mit Hilfe von Logatom-Tests untersucht und ergibt deutliche Abhängigkeiten der Sprachverständlichkeit vom spektralen Ver-

lauf der Deutlichkeit C50 und der Schwerpunktszeit, wobei letztere am besten mit der subjektiven Sprachverständlichkeit korreliert und die kleinsten Vertrauensbereiche aufweist, auch im Vergleich zum STI.

Methodischer Ansatz

Kürer (1972) beschreibt explizit die Abhängigkeit der Silbenverständlichkeit V von anderen objektiven Kriterien: $V = 0,96 \cdot V_{\text{Speaker}} \cdot V_{\text{S/N}} \cdot V_{\text{R}}$. Hierbei ist V_{R} der Einflussfaktor des „Raumes“, der in Abhängigkeit von den Zeitkriterien Deutlichkeit C50 und Schwerpunktszeit t_s angegeben wurde. In den Untersuchungen von Hoffmeier (1997) wird der Faktor $V_{\text{R}} = -6 \cdot 10^{-6} (t_s)^2 - 0,0012 t_s + 1,0488$ mit t_s in ms angegeben.

Neu zu definieren und zu untersuchen ist ein Raumeinflussfaktor der von räumlichen (V_{rK}) und zeitlichen Kriterien (V_{zK}) abhängt:

$$V_{\text{R}} = V_{\text{rK}} \cdot V_{\text{zK}}$$

Voruntersuchungen/Messverfahren

Zur Erfassung der räumlichen Impulsantworten wurde ein 4-kanaliges Tetraeder-Mikrofon eingesetzt. Bei diesem sind 4 Kugelmikrofone an den Eckpunkten eines gleichseitigen Tetraeders mit einer Seitenlänge von 17 cm aufgebaut. Damit ist es möglich aus den paarweisen Laufzeitunterschieden des Direktschalls und der ersten Reflexionen die virtuellen Spiegelschallquellen bzw. Einfallrichtungen derselben zu bestimmen (Yamasaki '89; Seikiguchi '92; Mommertz '96; Heitfeld '97). Parallel dazu wurde eine Aufzeichnung der Impulsantworten mittels Kunstkopf durchgeführt. Sämtliche Impulsantworten wurden mit Maximalfolgen bei 44 kHz Abtastrate und 16 Bit Auflösung gemessen und im Windows-„wav“-Format gespeichert.

Die subjektiven Sprachverständlichkeitstests wurden mit Logatomen durchgeführt, da sie bei insgesamt guter Sprachverständlichkeit eine besserer Skalierung in diesem Bereich ermöglichen als andere Methoden (Sotscheck, 1997). Die Logatome waren in fließende Sprache eingebettet. Die Abstrahlung wurde über einen Speziallautsprecher mit Sprecherrichtcharakteristik (IEMB) nach vorheriger minimalphasiger Entzerrung des Frequenzganges vorgenommen. Durch Voruntersuchungen wurde ein optimaler noch verzerrungsfreier Sendepiegel von 76 dB im Abstand von 2 m ermittelt, was für Räume mit geringem Störpegel ausreichend war.

Um die subjektiven Tests nicht im Originalraum durchführen zu müssen wurde in weiteren Voruntersuchungen geprüft, ob die Sprachverständlichkeitstests auch nachträglich mit Versuchspersonen über Kopfhörer und den über Kunstkopf aufgezeichneten Logatomen durchgeführt werden können. Dazu wurden Vergleichstests im Hörsaal H107 der TU mit 35 Studenten durchgeführt und gleichzeitig die Logatome mit zwei Kunstköpfen KU 81 und KU100 aufgezeichnet. Der Hörsaal hat eine Nachhallzeit von 1s bei 1kHz mit starkem Anstieg bei Frequenzen darunter. Die Wiedergabe erfolgte über einen STAX Lambda Pro Kopfhörer mit Diffus- bzw. Freifeldentzerrung. Die nachträglichen SV-Test wurden mit 12 VP durchge-

führt. Im Ergebnis zeigten die nachträglichen Test vergleichbare Ergebnisse wie im Originalraum, Abweichungen waren nicht signifikant bzw. auf anderweitige systematische Fehler zurückzuführen.

Messungen

Bei der Auswahl wurden Säle mit 200 bis rund 2500 Plätzen berücksichtigt und nur solche, die i.d.R. rein akustisch, d.h. ohne elektrische Verstärkung arbeiten. Des Weiteren wurde versucht, die historische und kulturelle Bedeutung der Säle zu berücksichtigen.

Die Messungen wurden in folgenden Berliner Sälen durchgeführt (Platzzahl): Kleistsaal der Urania (320), Akademie der Künste (507), Haus der Kulturen der Welt (400), HdK Großer Saal (1340), SFB-Sendesaal (1116), Deutsches Theater (622), Theater des Westens (1401), Philharmonie (2452), Neuköllner Oper (290), Deutsche Staatsoper (1396), Maxim Gorki Theater (441), Kongresshalle am Alexanderplatz (1000).

In den Häusern Komische Oper, Konzerthaus, Berliner Ensemble, Volksbühne, Theater am Halleschen Ufer und Deutsche Oper konnten wegen Terminüberschneidungen, Reparaturen oder Abstimmungsproblemen seitens der Häuser zum damaligen Zeitpunkt keine Messungen durchgeführt werden.

Auswertung und Dokumentation

Nach Aufzeichnung der Maximalfolgen wurden diese mittels Hadamard-Transformation in Impulsantworten umgerechnet. Die Auswertungen wurden in Matlab programmiert und die Kriterien als Matlab-Dateien sowie Bilder als JPEG Grafikdateien gespeichert. Die Programmierung der Dokumentation erfolgte hauptsächlich in HTML und JavaScript.

In der Dokumentation hat jeder Saal eine eigene Auswahlseite mit Grundriss und Sitzplan. Im Sitzplan sind die gemessenen Sender- und Empfangsplätze markiert und können per Mausklick aktiviert werden. In Menüs daneben können die gewünschten Parameter EDT, T20, T30, dL, t_s , D, C5, C50, C80, H, STI, IACC selektiert werden.

Des Weiteren können für jeden Saal Fotoansichten abgerufen werden und die wichtigsten architektonischen Daten wie Volumen, Abmessungen, Platzzahl, Jahr der Fertigstellung, Architekt usw. Die Veröffentlichung wird nach abschließenden redaktionellen Änderungen voraussichtlich über die Freie Universität Berlin erfolgen.

Änderung des Konzepts

Aufgrund der ursprünglich nicht vorgesehenen umfangreichen Programmierarbeiten für die Messhardware, Auswertung und Dokumentation musste das Konzept der Projektes geändert werden. Um eine spätere Auswertung hinsichtlich der räumlichen Abhängigkeit von Kriterien zu ermöglichen wurde der Schwerpunkt auf die Fertigstellung der Dokumentation gelegt. Der Zeitaufwand für die subjektiven Messungen hätte den Rahmen des Projektes weit gesprengt.

Ausblick

Die Untersuchungen zur Sprachverständlichkeit werden am IEMB und an der TU Berlin im Lehrgebiet Kommunikationswissenschaft weitergeführt werden. Weitere Untersuchungen und Entwicklungen zur Tetraeder-Meßsonde insbesondere zur raumakustischen Auswertung sind bei der GEBRA mbH und an der TU Berlin im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten

geplant. Die vorhandenen Messdaten geben eine gute Grundlage für weiterführende Untersuchungen mit Impulsantworten aus Originalräumen.

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem außerordentlichen Einsatz der Mitarbeiter im Projekt Frau Kerstin Brunke und Herrn Thomas Behr. Ebenso gilt Dank Herrn Prof. M. Krause, TU Berlin, der das Projekt zusammen mit dem Autor betreute. Nicht zuletzt kamen wichtige Hinweise zur Durchführung des Vorhabens von Seiten der wissenschaftlichen Beiräte Prof. Vorländer, RWTH Aachen, Dr. Volker Hohmann, Uni Oldenburg und Herrn Tennhardt, IEMB e.V. Berlin. Herrn Becker-Schweitzer sei gedankt für die Unterstützung bei der Software zur Auswertung der 4-Kanalsonde.

Die Geräte wurden teilweise durch das Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken (IEMB) e.V. und die GEBRA Gesellschaft für Bau- und Raumakustik mbH bereit gestellt.

Literaturverzeichnis

- Damaske, P. und Mellert, V. (1969): *"Ein Verfahren zur richtungsgetreuen Schallabbildung des oberen Halbraumes über zwei Lautsprecher"*. Acustica 22.
- Heitfeld, Rolf (1997): „Untersuchungen zur Ortsauflösung von 4-Mikrofonsonden unter besonderer Berücksichtigung des Verfahrens der paarweise Kreuzkorrelation zur Laufzeitanalyse“, Studienarbeit, TU Berlin, Institut für technische Akustik, 1997
- Hoffmeier, Jörn (1996): „Untersuchungen zum Einfluß von Raumklangfärbungen auf die Deutlichkeit von Sprache“, Diplomarbeit, TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik, 1996
- Kürer, R. (1972): „Untersuchungen zur Auswertung von Impulsmessungen in der Raumakustik“, Dissertation TU Berlin, 1972
- Niese, H. (1956): „Vorschlag für die Definition und Messung der Deutlichkeit nach subjektiven Grundlagen“ in Hochfrequenztechnik und Elektroakustik, Bd. 65, 1956, Heft 1
- Lehmann, P. (1976): *"Über die Ermittlung raumakustischer Kriterien und deren Zusammenhang mit subjektiver Beurteilung der Hörsamkeit"*. Dissertation, TU Berlin.
- Mommertz, E. ; Müller, G. ; Dörle, M.: Messung der Schalleinfallrichtungen in Räumen mit Hilfe einer Korrelationsanalyse. DAGA 96, S. 174 - 175
- Sekiguchi, K.; Kimura, S.; Hanyuu, T.: Analysis Of Sound Field On Spatial Information Using a Four-Channel Microphone System Based on Regular Tetrahedron Peak Point Method. Applied Acoustics 37 (1992), S. 305-323
- Sotiropoulou, A.G., Hawkes, R.J., Fleming, D.B. (1995): *„Concert Hall Acoustic Evaluation by ordinary Concert-Goers: I+II.“* Acustica, Vol. 81/1995, S.1/10
- Sotscheck, J.: „Verfahren zur Sprachqualitätsbeurteilung bei der elektronischen Signalverarbeitung“, Studentexte zur Sprachkommunikation, Elektronische Sprachsignalverarbeitung, Konferenz der TU Berlin, der TU Dresden und der HU Berlin, ISSN 0940-6832, Heft 8, S. 74 ff, 1997
- Wilkins, H.(1975): *"Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen"*. Dissertation, TU Berlin.
- Yamasaki, Y ; Itow, T.: Measurement Of Spatial Information In Sound Fields By Closely Located Four Point Microphone Method. J. Acoust. Soc. Jpn, 10,2 (1989) S. 101-110