

Untersuchungen zur Wahrnehmbarkeit örtlicher Schwankungen von Räumlichkeitsparametern bei Musikdarbietungen

M. Blau, TU Dresden, Institut f. Akustik u. Sprachkommunikation

1 Einführung

Räumlichkeitsaspekten wird ein großer Stellenwert bei der Beurteilung der akustischen Qualität von Konzertsälen beigemessen. Zur Beschreibung der zugeordneten subjektiven Eindrücke hat der Oberbegriff "Raumeindruck" (spatial impression) die breiteste Zustimmung gefunden. Er umschreibt die Empfindung, beim Zuhören in einem Raum mit den Aufführenden zu sein. Diese Empfindung beinhaltet sehr komplexe Emotionen, wie z.B. das Entstehen eines "Gemeinschaftserlebnisses" oder des "Versinkens in der Musik", welche die Musikrezeption bereichern.

Die Raumakustik sollte deshalb solche Emotionen befördern. Die derzeit vorherrschende Lehrmeinung besagt, daß für das Entstehen von "Raumeindruck" hauptsächlich zwei akustische Komponenten verantwortlich sind: zum einen die scheinbare Verbreiterung der Schallquelle durch frühe seitliche Reflexionen (apparent source width, ASW) und zum anderen das "Eingehülltsein" (listener envelopment, LEV), siehe z.B. Diskussion in "Applied Acoustics" Nr. 62 (2001).

Wendet man sich der ersten Komponente (der scheinbaren Verbreiterung der Schallquelle) zu, so sind hauptsächlich vier objektive (d.h. in Räumen oder Modellen physikalisch meßbare) Kriterien zu nennen, die mit diesem Eindruck korrelieren. Davon sind 1.) das Stärkemaß bei tiefen Frequenzen, G_{low} , 2.) der frühe Anteil des Seitenschallgrades, LF_{E4} , und der des 3.) interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten, $IACC_{E3}$, in Anhängen zur ISO 3382 enthalten, während 4.) der frühe Anteil des Raumeindrucksmaßes RL [1] erst in letzter Zeit wieder Beachtung fand [2]. Die Indizes der genannten objektiven Kriterien weisen neben dem Zusatz "E" für "early" (d.h. die ersten 80ms nach dem Eintreffen des Direktschalls) Anweisungen für die Behandlung der spektralen Komponenten auf: "low" bedeutet das Mittel der 250Hz- und 500Hz-Oktavbänder, "E3" das Mittel der Oktavbänder von 500Hz bis 2kHz, "E4" das Mittel der Oktavbänder von 120Hz bis 1kHz. RL ist ursprünglich nicht in Oktavbändern definiert, sondern wird aus breitbandigen Impulsantworten (begrenzt durch einen Tiefpaß erster Ordnung mit 6kHz Grenzfrequenz) gewonnen.

In vielen Studien ist die Korrelation der genannten Kriterien mit ASW bzw. "Räumlichkeit" nachgewiesen worden. Kürzlich wurden jedoch erhebliche Zweifel am Sinn dieser Kriterien geäußert, denn bei Messungen in Sälen in Amsterdam und Rotterdam ergaben sich Fluktuationen über sehr kleine örtliche Intervalle in der Größenordnung einer Sitzbreite. Der LF_{E4} schwankte dabei um etwa 0.1 (typischer Wertebereich 0.1...0.3), der $IACC_{E3}$ ebenfalls um etwa 0.1 (typischer Wertebereich 0.2...0.7) [3]. Die Autoren jener Studie riefen deshalb zu Untersuchungen der perceptiven Relevanz der beobachteten Fluktuationen auf. Die vorliegende Arbeit ist ein Versuch, sich mit dieser Thematik auseinanderzusetzen. Dabei stand zunächst die Frage "Was hört man in Schallfeldern, die die beobachteten örtlichen Fluktuationen der objektiven Kriterien aufweisen?" im Mittelpunkt. Dieser Frage sollte mit Hörversuchen in einem virtuellen Schallfeld nachgegangen werden.

2 Hörversuche: Methode

Die Hörversuche wurden in einem schallreflexionsarmen Raum (untere Grenzfrequenz 60Hz) durchgeführt, die Schallfelder (je-

weils Direktschall und 8 frühe Reflexionen) wurden mit kreisförmig um die Versuchsperson angeordneten Lautsprechern (Radius 3m) erzeugt.

Die die Schallfelder charakterisierenden Impulsantworten wurden an jeweils 5cm entfernten Meßpunkten in der Kopfebene mit einem Kunstkopf (Neumann KU-80) gemessen. Aus den Impulsantworten wurden für jeden Meßpunkt die Kriterien $IACC_{E3}$ und RL_E bestimmt. Zusätzlich wurde der $IACC_E$ aus der breitbandigen Impulsantwort (die analog zum RL_E mit einem Tiefpaßfilter erster Ordnung mit 6kHz Grenzfrequenz begrenzt wurde) bestimmt. Dieser Schritt ist zum einen durch Hörversuche motiviert, bei denen ein Beitrag *aller* Frequenzbänder zur Räumlichkeit nachgewiesen wurde [1]. Zum anderen ist bekannt, daß die beobachteten örtlichen Schwankungen der objektiven Kriterien auf Interferenzeffekte zurückzuführen sind, welche mit der Mittelung über einen zunehmend größeren Frequenzbereich an Wirkung verlieren. Dieser "breitbandige IACC" wird im folgenden $IACC_{Ebb}$ genannt.

Die mit den generierten Schallfeldern erreichten maximalen örtlichen Fluktuationen des $IACC_E$ (sowohl für die breitbandige als auch die Oktavmittel-Variante) betragen 0.03 pro 10cm und lagen damit in etwa in der Größenordnung der oben zitierten Messungen in Amsterdam und Rotterdam. Die entsprechenden maximalen Schwankungen des RL_E betragen 1dB pro 10cm.

Die Versuchspersonen (geschulte Hörer: Toningenieure, Akustiker, Musiker) hatten die Aufgabe, von zwei dargebotenen Schallfeldern, zwischen denen sie nach eigenem Ermessen hin- und herschalten konnten (Umschaltzeit je 10ms), sich 1.) für das mit der größeren scheinbaren Quellbreite zu entscheiden und 2.) den Grad des Unterschieds auf einer fünfstufigen Skala (1 - kein, 3 - geringer, 5 - deutlicher Unterschied) anzugeben. Die angegebenen Unterschiedsgrade wurden für die nachfolgende statistische Auswertung in ihrem Betrag um jeweils 0.5 gemindert, um positive und negative Urteilsskala nach ihrer erzwungenen Trennung im ersten Schritt wieder näher zusammenzuführen (siehe [4] für eine detaillierte Beschreibung der Methode). Sämtliche Paarvergleiche wurden dann für eine 10cm nach links und eine 10 cm nach rechts verschobene Position wiederholt.

Als Testmotiv wurden die Takte 560/561 aus dem 1. Satz von Bruckners Symphonie No. 4 in Es-Dur der CD "Anechoic Orchestral Recordings" (DENON) verwendet, die jeweils 4mal wiederholt wurden. Die Versuche wurden in abgedunkelter Umgebung durchgeführt.

3 Hörversuche: Ergebnisse

Zunächst wurde der Frage nachgegangen, ob bei den jeweils um 10cm verschobenen Hörpositionen dieselben Urteile gefällt werden. Dazu wurden die Urteile einer Varianzanalyse unterzogen. In Abb. 1 sind Schätzer für die Differenzen der Erwartungswerte der an den verschiedenen Positionen gefällten Urteile für jeden der insgesamt 12 Paarvergleiche dargestellt. Für eine statistische Sicherheit von 95% ergeben sich signifikante, von Null verschiedene Differenzen für die Paarvergleiche 1, 2, 3 und 12. Insbesondere der Paarvergleich 2 fällt durch relativ hohe mittlere Differenzen auf.

Danach wurde versucht, eine Korrelation zwischen den Urteilen und den gemessenen objektiven Kriterien herzustellen. Da-

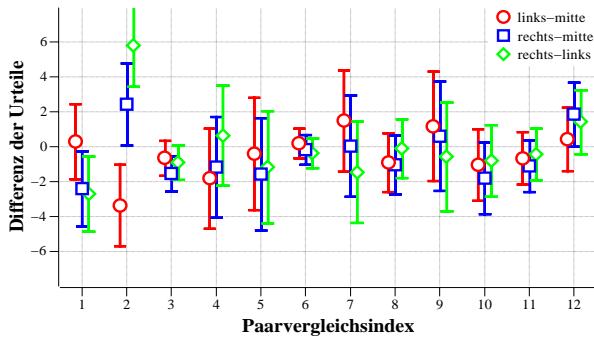


Abb. 1. Varianzanalyse: Schätzer für Differenzen der Erwartungswerte der an verschiedenen Positionen gefällten Urteile. Kreise zeigen Mittelwerte, Fehlerbalken 95%-Vertrauensbereiche.

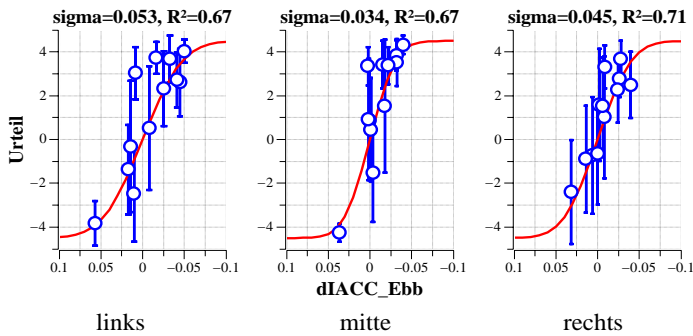


Abb. 2. Urteile als Funktion der für den jeweiligen Paarvergleich geltenden Differenz des objektiven Kriteriums $IACC_{Ebb}$. Kreise: Mittelwerte, Fehlerbalken: 95%-Vertrauensbereiche. Die durchgezogene Kurve entspricht dem Regressionsmodell $|\text{mittleresUrteil}| = (9/\sqrt{\pi}) \int_0^{dIACC_{Ebb}} e^{(\xi/\sigma)^2} d\xi$.

zu wurden die Urteile aller Paarvergleiche den Differenzen der objektiven Kriterien gegenübergestellt. Es ergeben sich die in Abb. 2 gezeigten typischen Verläufe: die subjektiven Urteile folgen dem Trend der objektiven Kriterien, weisen jedoch für große Differenzen der objektiven Kriterien eine Sättigung auf. Deshalb bot es sich an, als Modell ein modifiziertes GAUSSSches Fehlerintegral zu verwenden, wobei die Maximalwerte durch die um 0.5 verminderten Skalenendwerte (d.h. jeweils 4.5) gegeben waren und die Steilheit des Anstieges im Mittenbereich durch einen Parameter σ kontrolliert werden konnte:

$$|\text{mittleresUrteil}| = \frac{9}{\sqrt{\pi}} \int_0^{dKriterium} e^{(\xi/\sigma)^2} d\xi. \quad (1)$$

Wie aus Abb. 2 zu ersehen ist, ergibt sich eine befriedigende Korrelation (Bestimmtheitsmaß $R^2 \approx 0.7$) zwischen mittleren Urteilen und Differenzen des objektiven Kriteriums $IACC_{Ebb}$. Der Regressionsparameter σ , der angibt, wie empfindlich die Hörer auf Differenzen der objektiven Kriterien reagieren, liegt zwischen 0.03 und 0.05. Für die Mittenposition, für die die höchste Positionierungsgenauigkeit unterstellt werden kann, ist σ am kleinsten, d.h. hier werden Schwankungen des objektiven Kriteriums am deutlichsten wahrgenommen.

Leider konnten derart befriedigende Korrelationen für die anderen objektiven Kriterien nicht gefunden werden: $IACC_{E3}$ erreicht für die Verschiebung nach rechts nur ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.14$, und RL_E kann für keine der Positionen ein Bestimmtheitsmaß von besser als $R^2 = 0.4$ erzielen.

Schließlich wurde für den Paarvergleich mit den subjektiv am deutlichsten bewerteten Unterschieden (Vergleich 2) noch ein-

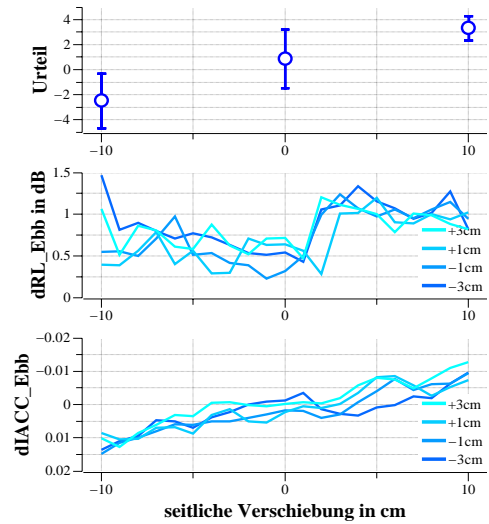


Abb. 3. Paarvergleich 2: Urteile (Kreise: Mittelwerte, Fehlerbalken: 95%-Vertrauensbereiche, oben), Differenzen des RL_E (mitte) und des $IACC_{Ebb}$ (unten), jeweils als Funktion der seitlichen Verschiebung. Die Verschiebung senkrecht zur Seite ist in der Helligkeit der Kurven codiert: je heller, umso weiter in Richtung Quelle (positive Verschiebung).

mal die objektiven Kriterien mit einer feineren örtlichen Auflösung (seitlich 1cm, in Richtung Quelle 2cm) bestimmt. In Abb. 3 sind die Ergebnisse für $IACC_{Ebb}$ und RL_E zusammen mit den subjektiven Urteilen dargestellt. Die im Vergleich zu RL_E wesentlich höhere Korrelation von $IACC_{Ebb}$ mit den subjektiven Urteilen wird hier eindrucksvoll illustriert.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

In Hörversuchen im synthetischen Schallfeld wurden Schallfelder gefunden, bei denen das subjektive Kriterium "scheinbare Quellbreite" signifikant anders beurteilt wurde, wenn die Abhörposition um 10 bzw. 20 Zentimeter seitlich verschoben war. Von den untersuchten objektiven Kriterien wies nur der aus der breitbandigen binauralen Impulsantwort bestimmte $IACC_{Ebb}$ eine befriedigende Korrelation mit den subjektiven Urteilen auf. Diese Ergebnisse sollten zum einen durch weitere Versuche mit höherer Positionierungsgenauigkeit und höheren Schwankungen der objektiven Kriterien untermauert werden. Zum anderen sollten Wahrnehmbarkeitsschwellen für Unterschiede der objektiven Kriterien in Abhängigkeit von örtlichen Schwankungen letzterer bestimmt werden, um die Eignung der Kriterien beurteilen und gegebenenfalls Meßvorschriften für die raumakustische Projektion ableiten zu können.

Literatur

- [1] U. Trautmann. Meßtechnische Erfassung der auditiven Räumlichkeit. In: W. Kraak und G. Schommartz, Herausgeber, *Angewandte Akustik Bd. 3*, S. 149–173. Verlag Technik, Berlin, 1989.
- [2] A. Then und M. Blau. Vergleich ausgewählter objektiver raumakustischer Parameter hinsichtlich ihrer Korrelation mit dem subjektiven Kriterium "Scheinbare Breite der Quelle" bei Musikdarbietungen. In *Fortschritte der Akustik - DAGA 2001*, Oldenburg, 2001. DEGA e.V.
- [3] D. de Vries, Hulsebos. E.M., und J. Baan. Spatial fluctuations in measures for spaciousness. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110:947–954, 2001.
- [4] R. Höhne und G. Schroth. Zur Wahrnehmbarkeit von Deutlichkeits- und Durchsichtigkeitsunterschieden in Zuhörersälen. *Acustica*, 81:309–319, 1995.