

Beuth Hochschule für Technik

Fachbereich VIII: Maschinenbau, Veranstaltungstechnik,
Verfahrenstechnik

Studiengang: Veranstaltungstechnik & Management (B.Eng)

Exposé der Bachelorarbeit zum Thema

Empirische Untersuchung des Zusammenspiels von Raumakustik und Beschallungsanlagen
mit Methoden der virtuellen Akustik

Betreuung

Prof. Dr. rer. nat. Alexander Lindau

Gutachter*in

-

Student:

Anton Martin Alfred Kempe

Matrikelnummer: 867835

14.03.2021

INHALT

1. Forschungsfrage.....	3
2. Zielsetzung	3
3. Stand der Forschung, theoretische Grundlage.....	4
4. Methodik.....	6
5. Literaturverzeichnis	9

1. Forschungsfrage

Die Erfahrung (auch des Autors) zeigt, dass die Qualität einer Beschallungsanlage nicht immer entscheidend ist, um gute Ergebnisse zu liefern (subjektiv empfundene Zufriedenheit mit dem Klangereignis). Diese Beobachtung kommt besonders dann zum Tragen, wenn man sich in einer „raumakustisch schlechten“¹ Umgebung befindet. Besonders interessant wird die weitergehende Beobachtung, dass in „raumakustisch guten“¹ Umgebungen die Qualität (und der Preis) einer Beschallungsanlage weitaus weniger Einfluss auf das Ergebnis zu haben scheint.

Es soll untersucht werden, welcher Faktor - Raumakustik oder die Wahl des Beschallungssystems - die größere Auswirkung auf die empfundene Qualität hat und ob gegenseitige Abhängigkeiten bestehen. Gesucht werden physikalische Eigenschaften des Raumes und Leistungsparameter von Lautsprechern, die dabei die dominierenden Effekte bilden und wie diese Eigenschaften und Parameter miteinander interagieren. Mithilfe dieser identifizierten Eigenschaften und Parameter ist die Definition von „gut“ und „schlecht“ bzgl. der Raumakustik und des Beschallungssystems vorzunehmen. Diese Definitionen sind zentraler Bestandteil dieser Arbeit und machen die folgenden Experimente und Analysen erst möglich. Die Faktoren Raumakustik und Beschallungssystem bilden in der späteren Analyse unabhängige Variablen (UVs), die in jeweils zwei oder mehr Qualitätsstufen gegliedert werden können. Die sich ergebenden Wirkkombinationen werden einer Versuchsgruppe zur Bewertung gestellt. Die zu bewertenden abhängigen Variablen (AVs) werden in Punkt 4 näher erläutert. Mittelwertsplots zu den abhängigen Variablen und eine spätere mehrfaktorielle Varianzanalyse des Experiments visualisieren das Zusammenspiel zwischen Raumakustik und Beschallungsanlage und lassen Schlüsse bezüglich gegenseitiger Abhängigkeiten und Interaktionen zu. Eine genauere Beschreibung des Versuchsdesigns findet sich in Punkt 4.

Im Hinblick auf die Relevanz des Forschungsthemas kommt unweigerlich der finanzielle Aspekt in den Vordergrund. Wenn finanzielle Mittel primär in die Bereiche fließen, die für das gewünschte Ergebnis maßgeblich verantwortlich sind, können voraussichtlich Kosten gespart werden. Budgetentscheidungen können demnach leichter getroffen werden.

2. Zielsetzung

Diese Arbeit hat das Ziel, zu bewerten welcher Faktor (Lautsprecher oder Raumakustik) den größeren Einfluss auf das Ergebnis hat und wie man mit geringstem Aufwand den größten Verbesserungseffekt erzielen kann. Außerdem kann eine Aussage zur Frage gemacht werden, ob teuer gleichzeitig auch besser bedeutet, oder ob es auch mit begrenzten Mitteln möglich ist, gute Qualität zu erzielen. Häufig werden Veranstaltungsstätten in Räumlichkeiten geplant und untergebracht, die architektonisch nicht für diesen Zweck vorgesehen sind oder waren. Besonders wenn die Räumlichkeiten mehr nach optischen statt nach akustischen Prioritäten

¹ In Anlehnung an den Stand der Technik, sowie geltende Industrienormen. Die Kategorisierung der Raumakustik nach gut und schlecht ist dabei selbst Teil dieser Arbeit.

ausgesucht werden (Industrial-chic), stehen Künstler, Akteure und Tontechniker häufig vor großen Herausforderungen. In vielen Fällen wird pragmatisch und naheliegend entschieden, viel Geld in eine hochqualitative Beschallungsanlage zu investieren, da die Architektur kaum oder nur schwerlich raumakustisch wirksam verändert werden kann, ohne den optischen Reiz des Raumes zu gefährden. Ist das Ergebnis jedoch nicht zur Zufriedenheit der Besucher, muss nachträglich die Akustik behandelt werden, was erneut hohe Kosten hervorruft. Mithilfe dieser Arbeit soll es künftig möglich sein, Kaufentscheidungen so zu treffen, dass das gewünschte Ergebnis kostensparend erreicht werden kann.

3. Stand der Forschung, theoretische Grundlage

Die Literatur zu den Themengebieten Raumakustik und Elektroakustik (Lautsprecher) ist äußerst umfangreich und beide Gebiete wurden und werden bereits ausgiebig erforscht. Diese Erkenntnisse bilden zum großen Teil die Grundlage dieser Arbeit.

Raumakustik:

Die sich gegenseitig bedingenden Eigenschaften von Räumen wie Nachhallzeit, Hallradius/kritische Distanz bilden stets die Grundlage für weitergehende Berechnungen (Ahnert & Steffen, 1999, S. 17-24). Je nach Anwendungszweck eines Raumes (bspw. Übertragung von Sprache oder Musik) können verschiedene aussagekräftige Werte ermittelt werden.

Für die Sprachverständlichkeit bedeutsame Werte bei der Übertragung akustischer Signale in Räumen ist der *Definition Measure* C_{50} (Ahnert & Steffen, 1999, S. 24-26). Außerdem der *Articulation Loss of spoken Consonants* - Al_{cons} , der eine Aussage zulässt, wie gut Konsonanten übertragen werden können (Ahnert & Steffen, 1999, S. 26-28). Eine Aussage zur Qualität der akustischen Signalübertragung, die den Einfluss von Störgeräuschen berücksichtigt, ist der *Modulation Reduction Factor* $m(F)$. Dieser Faktor bildet die Grundlage zu weiteren Berechnungen wie *STI/STIPA*, der die Übertragungsqualität besonders für die Frequenzbereiche bewertet, die für Sprachverständlichkeit am bedeutendsten sind (Ahnert & Steffen, 1999, S. 26-34). Die Werte C_{50} und Al_{cons} gelten zum heutigen Stand der Technik gegenüber *STI/STIPA* als veraltet und werden in dieser Arbeit daher nicht berücksichtigt.

Für die Übertragung musikalischer Signale gelten andere Kriterien und damit andere Bewertungen. In einer stark reflexionsarmen Umgebung ist die Sprachverständlichkeit besonders gut. Würde man in gleicher Umgebung ein Musiksignal bspw. Chormusik wiedergeben, würde es sich aufgrund unserer Hörgewohnheiten sehr unnatürlich anhören. Dem Signal würde der natürliche Raumeindruck (*Spatial Impression*) fehlen. Dieser Raumeindruck gliedert sich unter anderem in seine zwei Komponenten Nachhall H (*Reverberation*) und Räumlichkeit R (*Spaciousness*) (Ahnert & Steffen, 1999, S. 34-37). Für die Wiedergabe von Musik gelten also – je nach Musikstil – andere Richtwerte und Bewertungskriterien als für die Übertragung von Sprache. Außerdem bietet der *Clarity Measure* C_{80} als Berechnung aus den oben genannten Grundgrößen eine Aussage über die empfundene Klarheit von Musik (Ahnert & Steffen, 1999, S. 25-26). Nach jüngsten

Erkenntnissen hat außerdem die Klangfarbe des Nachhalls bzw. der Räumlichkeit (*timbre-related qualities*) eine größere Bedeutung zur Bewertung der raumakustischen Qualität, als bisher angenommen (Weinzierl, Lepa, & Ackermann, 2018, S. 1254). So haben Irregularitäten im Ausklang des Schallereignisses (bspw. starke Echos, Flatterechos) und starke Nichtlinearitäten im Frequenzgang des Nachhalls (bspw. starke Über-/Unterbetonungen im Bass-Bereich, im Bereich der tieferen Mitten oder auch der hohen Frequenzbereiche) eine große Auswirkung auf die empfundene Qualität der Raumakustik (Weinzierl, Lepa, & Ackermann, 2018, S. 1254).

Anwendung finden die oben angeführten Kriterien zum Teil in Industrienormen wie der DIN 18041 – Hörsamkeit in Räumen (DIN 18041:2016-03, 2016). In dieser Norm werden unter anderem für verschiedene Anwendungszwecke (Konzert, Sport, Tagung, Speiseräume, etc.) Anforderungen im Wesentlichen an die Nachhallzeit von Versammlungsräumen und Veranstaltungsstätten festgelegt. In der DIN EN ISO 3382-1 – Akustik (DIN EN ISO 3382-1:2009-10, 2009) ist festgelegt, wie die raumakustischen Eigenschaften von Aufführungsräumen zu bestimmen und zu messen sind.

Mit Blick auf die Relevanz zur Forschungsfrage werden in dieser Arbeit vier raumakustisch wesentliche Kerneigenschaften herausgearbeitet. Zur Bewertung der raumakustischen Qualität werden die Faktoren Nachhallzeit, Hallradius, Klangfarbe des Nachhalls und Sprachverständlichkeit herangezogen.

Beschallungsanlagen:

Um die Qualität von Lautsprechern zu bewerten, stehen verschiedene Kenngrößen zur Verfügung.

Für die Klangqualität und damit für das Forschungsthema besonders wichtige Parameter sind der Freifeldfrequenzgang und der Diffusfeldfrequenzgang (*frequency response*) eines Lautsprechers. Grundlage dieser Werte bilden die Freifeldsensitivität (*free-field sensitivity*) und Diffusfeldsensitivität (*diffuse-field sensitivity*) als Funktionen über der Frequenz (Ahnert & Steffen, 1999, S. 83). Das Freifeld meint dabei die Abwesenheit von Reflexionen. Das Diffusfeld ist der Ort, an dem das Diffusschallfeld das Direktschallfeld überlagert. Im Frequenzgang eines Lautsprechers kann man erkennen, wie ausgewogen (linear) der Lautsprecher die verschiedenen Frequenzen wiedergeben kann (die mögliche Bandbreite des Lautsprechers gibt dabei das Spektrum vor). Verzerrungen durch Intermodulationseffekte können in Lautsprechern bspw. durch die gleichzeitige Wiedergabe und damit durch Überlagerungen von Frequenzen auftreten, die dem ursprünglichen Signal neue Anteile hinzufügen. Kenngrößen dieser Effekte sind der Klirrfaktor (Verhältnis des Oberschwingungsanteils zum Gesamtsignal) und der THD (Total Harmonic Distortion: Verhältnis des Oberschwingungsanteils zum Grundschwingungsanteil). Die Richtwirkung (*Directional Characteristics*) von Lautsprechern ist wohl die bedeutendste Eigenschaft. Verlässt man die Hauptachse der Schallausbreitungsrichtung zeigt sich eine starke Veränderung des Frequenzgangs. Die Richtwirkung von Lautsprechern ist also frequenzabhängig (Ahnert & Steffen, 1999, S. 88). Dabei unterscheidet man drei wichtige Kenngrößen. Das winkelabhängige Verhältnis zwischen einem Schalldruck (gemessen in einem bestimmten Winkel ϑ zur

Nullachse) und dem Schalldruck auf der Nullachse, die *angular directivity ratio* Γ und den dazugehörigen *angular directivity gain* $D(\vartheta)$ als logarithmische Beschreibung (Ahnert & Steffen, 1999, S. 88-89). Die nächste Größe, die *directivity deviation ratio* $\Gamma^*(\vartheta)$ bezieht unter Berücksichtigung des *front-to-random factor* γ (Bündelungsfaktor) den Einfluss von Nachhall – erzeugt durch den Lautsprecher (in Räumen) – mit ein. Nimmt man diese Größe ins Quadrat, erhält man den wohl am häufigsten zur Beschreibung der Richtwirkung benutzten Wert, den *Directivity Factor* $Q(\vartheta)$. Logarithmisch beschrieben erhält man den *Directivity Index* DI (winkelabhängig) (Ahnert & Steffen, 1999, S. 89-90).

Die Industrienorm DIN EN 60268-5 – elektroakustische Geräte (DIN EN 60268-5:2003-12, 2003) legt (unter anderem) fest wie die oben angeführten Werte ermittelt und anzugeben sind.

Mit Blick auf die Relevanz zur Forschungsfrage werden in dieser Arbeit vier wesentliche Parameter herausgearbeitet. Zur Bewertung der Qualität von Beschallungsanlagen werden die Parameter Frei-/Diffusfeldfrequenzgang, Klirrfaktor/THD, Richtwirkung und der Signal-Rausch-Abstand herangezogen.

4. Methodik

In der eingangs beschriebenen Forschungsfrage sollen die zwei Faktoren Raumakustik und Beschallungsanlage nach ihrem Einfluss auf die wahrgenommene Qualität beispielsweise einer Livemusikdarbietung untersucht werden.

Die Annahme, dass gute Lautsprecher in einer guten akustischen Umgebung die besten Ergebnisse und umgekehrt schlechte Lautsprecher in schlechter akustischer Umgebung die schlechtesten Ergebnisse liefern sollten, ist naheliegend. Wie verhält es sich jedoch in schlechter Akustik mit guten Lautsprechern und in guter Akustik mit schlechten Lautsprechern? Hypothetisch wird angenommen, dass gute Lautsprecher in schlechter Umgebung einen weitaus größeren Einfluss auf das Ergebnis haben können als schlechte. Doch wird dadurch das Ergebnis auch gut? Weiterhin wird angenommen, dass schlechte Lautsprecher von einer guten Umgebung deutlich stärker profitieren (vor Allem wenn man den Kostenfaktor einbezieht) und das Ergebnis insgesamt gut ausfallen kann.

Zur Klärung der beschriebenen Hypothesen soll folgende Methodik angewendet werden:

Es werden die wesentlichen Charakteristika von Räumen und Beschallungsanlagen, wie sie unter Punkt 3 angeführt sind, betrachtet und deren Auswirkungen erläutert. Im Bezug zur Forschungsfrage und in Anlehnung an den geltenden Stand der Technik, sowie deutscher und internationaler Industrienormen, werden die Eigenschaften und Parameter hinsichtlich ihres Einflusses skaliert, um im späteren Experiment die Räume und Lautsprecher entsprechend auswählen zu können (Definitionen von „gut“, „mittel“ und „schlecht“).

Mithilfe der Software EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers)² können virtuelle dreidimensionale Räume erzeugt und virtuell mit Lautsprechern ausgestattet werden.

Die Simulationen folgen dabei den Modellannahmen der geometrischen und statistischen Akustik. Die Simulation von Welleneffekten, wie z.B. stehende Wellen ist jedoch nicht möglich. Der wesentliche Vorteil der Simulation liegt allerdings darin, dass mehrere Versuchsaufbauten möglich sind, um ausreichende Experimente durchführen zu können. Die Software erlaubt die Generierung von monauralen und binauralen Impulsantworten³ der verschiedenen Wirkkombinationen. Mit diesen Impulsantworten können die verschiedenen Übertragungswege beispielsweise anhand eines ausgewählten Musikstücks mittels Faltung via Kopfhörer hörbar gemacht werden und schließlich zur qualitativen Bewertung durch die Versuchsteilnehmer genutzt werden.

Versuchsdesign:

Als Versuchsaufbau werden die vorher definierten Qualitätsstufen gut, mittel und schlecht auf Raum und Lautsprecher angewandt und jeweils drei Räume und drei Beschallungssysteme in den verschiedenen Qualitätsstufen gewählt. Wir erhalten also zwei Faktoren (UV = unabhängige Variablen) mit jeweils 3 Stufen. Bedenkt man, dass Besucher einer Veranstaltungsstätte ihre Möglichkeit der freien Platzwahl ausnutzen, sollen zwei verschiedene Hörpositionen gewählt werden. Einerseits an dem unter Tontechnikern so beliebten „Sweet-Spot“⁴ und andererseits in einem hinteren und seitlichen Bereich der Konzerthalle. Die Hörposition bildet eine zweistufige UV. In Punkt 3 ist beschrieben, dass an die Übertragung von Sprache und Musik verschiedene raumakustische Ansprüche gestellt werden (mit großer Schnittmenge). Sinnvollerweise erweitern wir daher das Versuchsdesign um eine weitere zweistufige UV. Als Stimuli werden also ein Sprachbeispiel und ein Musikbeispiel genutzt. Insgesamt werden also

3 (Räume) x 3 (Beschallungsanlagen) x 2 (Hörpositionen) x 2 (Stimuli) = 36 Hörbeispiele

erzeugt, die zur Bewertung genutzt werden.

Die Bewertungsstufen für die Versuchsteilnehmer bilden die AVs (abhängige Variablen). Denkbar wäre eine einfache Beurteilung der empfundenen Qualität nach „gefällt“ und „gefällt nicht“. Um aussagekräftigere Ergebnisse zu bekommen, können in Anlehnung an die aktuelle Forschung aber auch weitere Kriterien gewählt werden. Davon ausgehend, dass sich der durchschnittliche Besucher mit den akustischen und technischen Aspekten einer solchen Veranstaltung kaum bzw. gar nicht beschäftigt, müssen die Bewertungskriterien für Laien nachvollziehbar und bewertbar sein. Nach Weinzierl, Lepa und Ackermann sind Kriterien wie Nachhall (trocken – hallig) und Räumlichkeit (klein – groß) in der Literatur omnipräsent. Weiterhin werden in anderen Studien die Eigenschaften Klarheit (verwaschen – transparent/klar) und Intimität (entfernt/losgelöst – intim) als wichtige raumakustische

² Produkt der Firma AFMG Technologies GmbH

³ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Impulsantwort>, 2021)

⁴ An der Spitze eines gleichschenkligen Dreiecks, dessen Ecken von den zwei Lautsprechern (Links/Rechts) und der Hörposition gebildet werden.

Kriterien angeführt (Lokki, Pätynen, Kuusinen, & Tervo, 2012, S. 3148-3161). In ihrer Studie beschreiben Weinzierl, Lepa und Ackermann außerdem, dass klangfärbenden Eigenschaften des Raumes eine größere Bedeutung zukommt als bisher angenommen wurde. Daher sollten zwei weitere Kriterien wie Brillianz (nicht brilliant – sehr brilliant) und Klangfärbung (bspw. dröhnt nicht – stark dröhnend) bewertet werden. Diese für Laien gut verständlichen und auch beschreibbaren Begrifflichkeiten, stammen aus der Publikation „The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI)“ (Weinzierl, Lepa, & Ackermann, 2018). In dieser Publikation werden 9 Oberbegriffe und insgesamt 29 Unterstufen zur Bewertung der raumakustischen Qualität definiert, was den Rahmen dieser Arbeit allerdings erheblich sprengen würde. Der Autor wird sich daher (auch weil die Testpersonen größtenteils Laien in diesem Gebiet sind) auf sieben Kategorien mit jeweils nur einer zu bewertenden Stufe beschränken:

Qualität:	gefällt – gefällt nicht
Nachhall:	trocken – hallig
Räumlichkeit:	klein – groß
Klarheit:	verwaschen – transparent
Intimität:	entfernt – intim
Brillanz:	nicht brilliant – sehr brilliant
Klangfärbung:	dröhnt nicht – stark dröhnend

Zur Bewertung der Kategorien steht den Versuchsteilnehmer eine 7-stufige Skala (bspw. Kategorie Qualität: „gefällt gar nicht“, bis „gefällt sehr gut“, in 7 Abstufungen) zur Verfügung.

Die Zahl der Teilnehmer wird auf mindestens 10 bis maximal 30 Personen festgelegt. Die Bearbeitungsdauer wird pro Person mit 30-45 Minuten kalkuliert.

Zur Analyse und Auswertung werden einerseits Mittelwertsplots je AV angewandt. Außerdem und zur statistischen Überprüfung der Stärke der einzelnen Effekte wird je AV eine mehrfaktorielle (3x3x2x2) Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Beide Analyse-Methoden sollen die Testergebnisse visualisieren und über eine geschickt gewählte Sortierung Schlüsse zur eigentlichen Fragestellung, bzgl. einer Interaktion und Abhängigkeit zwischen Raumakustik und Beschallungssystem, zulassen.

Der besondere Faktor Preis und Kosten soll abschließend mit eingearbeitet werden.

5. Literaturverzeichnis

- Ahnert, W., & Steffen, F. (1999). *Sound Reinforcement Engineering, Fundamentals and Practice*. London, United Kingdom: E & FN Spon.
- Davis, G., & Jones, R. (1989). *Sound Reinforcement Handbook (2. Ausg.)*. (Y. C. America, Hrsg.) Milwaukee, USA: HAL Leonard Corporation.
- DIN 18041:2016-03. (03 2016). *Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung*.
- DIN EN 60268-5:2003-12. (12 2003). *Elektroakustische Geräte - Teil 5*.
- DIN EN ISO 3382-1:2009-10. (10 2009). *Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik - Teil 1: Aufführungsräume (ISO 3382-1:2009)*.
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Impulsantwort>. (14. 02 2021).
- <https://ease.afmg.eu/>. (14. 02 2021).
- Lokki, T., Pätynen, J., Kuusinen, A., & Tervo, S. (2012). Disentangling preference ratings of concert hall acoustics using subjective sensory profiles. *The Journal of the Acoustical Society of America* 132(5), S. 3148-3161.
- Weinzierl, S., Lepa, S., & Ackermann, D. (2018). A measuring instrument for the auditory perception of rooms: The Room Acoustical Quality Inventory (RAQI). *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, 1245, S. 1245-1257.