

Optimierung der Tieftonwiedergabe in Tonstudios und Abhörräumen

Anselm Goertz, Markus Wolff*¹, Lutz Naumann

Audio & Acoustics Consulting Aachen, e-mail: anselm.goertz@t-online.de

*¹ KLEIN+HUMMEL GmbH, e-mail: m.wolff@klein-hummel.de

Einleitung

Für eine hochwertige und neutrale Musikwiedergabe in Tonstudios stellt der tieffrequente Bereich eine besonderer Problemstelle dar. Raumakustische Maßnahmen in diesem Frequenzbereich können mit Hilfe spezieller Resonanzabsorber getroffen werden, die jedoch meist sehr aufwendig, teuer und voluminös sind. Bei sorgfältiger Berechnung und Ausführung solcher Absorber lassen sich die Eigenfrequenzen des Raumes teilweise bedämpfen und das unschöne Dröhnen des Raumes entsprechend reduzieren. Zur weiteren Optimierung der Wiedergabe von Signalen mit tieffrequenten Anteilen kann zusätzlich eine spezielle Lautsprecher- bzw. Subwoofer Anordnung eingesetzt werden, die über einen Controller angesteuert den Einfluss der Eigenfrequenzen des Raumes drastisch zu reduzieren vermag.

Bassentzerrung

Der gezielte Einsatz hoch auflösender Filter basierend auf räumlich gemittelten Messung erlaubt in gewissen Grenzen eine Anpassung von Abhörlautsprechern an den Hörraum. Problematisch bleibt jedoch bei diesem Verfahren der Bassbereich, wo die Modenverteilung insbesondere bei kleinen und mittleren Hörräumen zu einer räumlich sehr ungleichmässigen und stark frequenzabhängigen Pegelverteilung führt. Für einen einzelnen Hörplatz lassen sich zwar die durch die Modenverteilung hervorgerufenen Frequenzgangschwankungen mittels spezieller FIR-Filter ohne Hinzufügen zusätzlicher Phasenprobleme beheben, das durch die stehenden Wellen verursachte, teils recht lange Nachschwingen des Raumes bleibt jedoch auch hierbei bestehen.

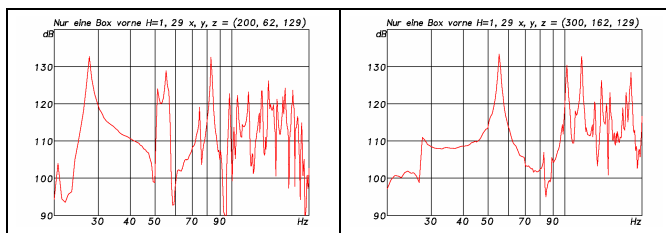


Abbildung 1 Messung der Übertragungsfunktion an zwei verschiedenen Messpunkten im Frequenzbereich von 20 Hz bis 200 Hz

Abbildung 1 zeigt exemplarisch die an zwei Stellen in einem Musterraum gemessenen Übertragungsfunktionen eines Subwoofers. Die extreme Welligkeit und der stark unterschiedliche Verlauf beider Kurven lassen die Problematik deutlich werden. Der Musterraum in Quaderform mit Abmessungen von 621x337x247cm³ (Länge x Breite x Höhe) wurde mit Absicht völlig leer belassen und mit keinerlei akustischen Maßnahmen behandelt, so dass die Effekte besonders deutlich hervortreten. Für akustisch bereits optimierte Hörräume trifft im Bassbereich ähnliches jedoch in abgeschwächter Form zu. Alle weiteren Betrachtungen sollen nun auf den Frequenzbereich bis 200 Hz beschränkt werden. Ein einzelner Lautsprecher bzw. Subwoofer agiert hier als Punktquelle, die eine kugelförmige Wellenfront abstrahlt. Durch die physikalischen Randbedingungen entsteht eine Schalldruckverteilung, bei der sich die Druckmaxima immer auf den schallharten Wandflächen befinden. D.h., es entstehen für diejenigen Frequenzen Resonanzen oder auch stehende Wellen bei stationärer Anregung, deren ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge zwischen die Begrenzungsflächen passt. In Abbildung 1 links sind so z.B. die tiefste Eigenfrequenz des Raumes mit $\lambda/2$ entsprechend der Raumlänge bei 27,5 Hz und die erste Querresonanz mit $\lambda/2$ entsprechend der Raumbreite bei 52 Hz zu erkennen. In Abbildung 1 rechts ist ein deutliches Maximum vor allem bei der zweiten Längsresonanz bei 55 Hz zu finden.

Lautsprecheranordnung

Die Lautsprecheranordnung für die Messungen in Abbildung 1 entsprach dem linken Bild in Abbildung 2 mit einem Subwoofer mittig auf der Stirnfläche des Raumes angeordnet. Im weiteren sollen nun drei

verschiedene Lautsprecheranordnungen nach Abbildung 2 betrachtet werden. Die Messpunkte wurden entlang der Raumlänge bzw. Raumbreite in Ohrhöhe von 1,29m gelegt.

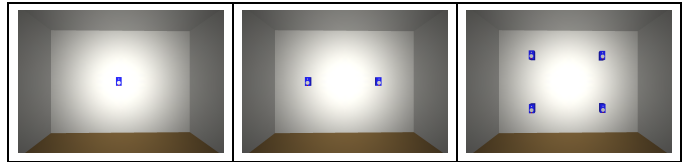


Abbildung 2 Lautsprecheranordnung mit einem, zwei und vier Subwoofern auf der Stirnfläche des Hörraumes.

Die Messungen aus Abbildung 3 zeigen für die Raumbreite und Höhe, dass der Kurvenverlauf weitgehend von der Position unabhängig ist, bis zu einer Frequenz deren halbe Wellenlänge dem Abstand der Lautsprecher zueinander entspricht. Handelt es sich nur um einen Lautsprecher, so ist der Abstand zur Spiegelquelle an der nächsten Begrenzungsfläche zu betrachten. Für den Musterraum mit 3,37m Breite und 2,47m Höhe bedeutet das für eine mittig angeordnete Box, ein in der Raumbreite von der Position unabhängiger Verlauf bis zu einer Frequenz von ca. 50 Hz und in der Höhe bis zu einer Frequenz von ca. 69 Hz. Verdoppelt man die Anzahl der Lautsprecher in der Breite und in der Höhe und ordnet diese äquidistant verteilt über die Breite und über die Höhe der Stirnfläche des Raumes an, so verdoppeln sich auch die oberen Grenzfrequenzen auf 100 Hz und 128 Hz. Je eine Messreihe entlang der Raumbreite und Höhe mit dann insgesamt vier Lautsprechern zeigen die Messungen in Abbildung 3. Die Kurven verlaufen erwartungsgemäß bis zur berechneten Grenzfrequenz weitgehend gleichmäßig. Für den Frequenzbereich bis ca. 100 Hz kann man so von einer ebenen Welle ausgehen, die in Längsrichtung durch den Raum läuft. Die noch zu erkennenden Maxima in diesen Kurven sind diejenigen, die von den Raummoden in Längsrichtung erzeugt werden. Rechnerisch lassen sich die fünf untersten Resonanzfrequenzen für die Längsrichtung zu 27,5 55,0 82,5 110 und 137,5 Hz bestimmen, die so auch deutlich in den Messungen zu erkennen sind. Eine weitere Grafik in Abbildung 3 zeigt für die Konstellationen mit vier Lautsprechern den Verlauf der Übertragungsfunktionen bei einer Bewegung der Messpunkte entlang der Längsachse des Raumes. Völlig unabhängig von der Anzahl und Anordnung der Lautsprecher schwanken die Kurven extrem stark. Die Schalldruckverteilung in einer Raumebene, die mit Hilfe des Cara Simulationsprogramms berechnet wurde, verdeutlicht beide Zusammenhänge. Sowohl mit einer Quelle als auch mit zwei Quellen ist die Eigenfrequenz des Raumes in Längsrichtung gut zu erkennen. Mit zwei Quellen wird jedoch die Eigenfrequenz in der Breite des Raumes unwirksam, da sich der Schall als ebene Welle ausbreitet.

Es kann somit festgehalten werden, dass Schwankungen im Frequenzgang durch Eigenfrequenzen des Raumes in der Höhe und in der Breite eliminiert werden können, wenn die Quellen so auf der Stirnseite des Raumes angeordnet werden, dass eine ebene Welle abgestrahlt wird. Diese Voraussetzung kann durch einen ausgedehnten Flächenstrahler oder durch einzelne Quellen erfüllt werden, soweit deren Abstand nicht größer als eine halbe Wellenlänge der höchsten betrachteten Frequenz ist. Was bleibt, ist die Problematik der Eigenfrequenzen in Längsrichtung, die sich unvermindert stark auswirken und vor allem in der Mitte des Raumes, wo typischerweise der Hörplatz ist, zu starken Schwankungen im Bassbereich führen. Die Auswirkungen der Längsmoden sind dabei völlig unabhängig von der Art und Menge der Quellen auf der Stirnseite des Raumes.

Das Diagramm in Abbildung 3 links unten veranschaulicht für eine Messreihe entlang der Längsachse des Raumes diesen drastischen Effekt. Eine ausgeglichene Basswiedergabe in der Raummitte oder sogar auf mehreren Hörerplätzen, z.B. in einem Surround Vorführraum, ist damit nahezu unmöglich. Es kommt hinzu, dass die Schwankungen sich in einer Größenordnung von 20 dB und mehr abspielen und es

damit je nach Position im Raum zu völligen Auslöschungen oder drastischen Überhöhungen kommen kann.

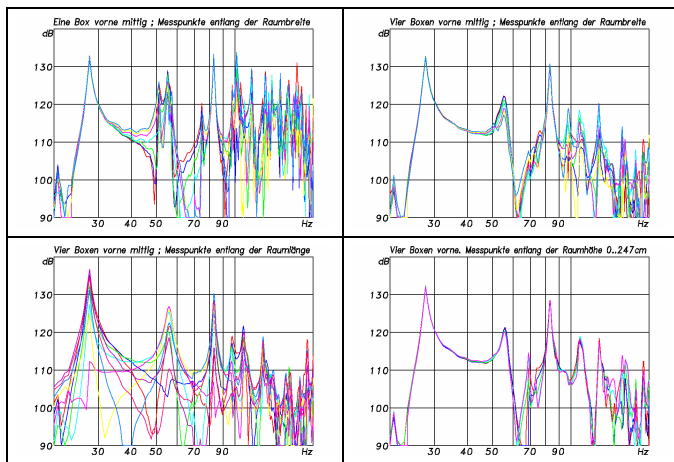


Abbildung 3 oben und rechts unten: Messpunkte entlang der Raumbreite und Höhe mit 1 und 4 Lautsprechern auf der Stirnseite des Hörraumes (Lautsprecheranordnung in beiden Fällen nach Abbildung 2) links unten: Messpunkte entlang der Raumlänge mit vier Lautsprechern auf der Stirnseite des Hörraumes

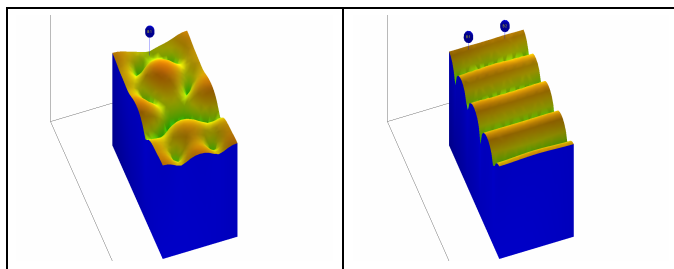


Abbildung 4 Schalldruckverteilung in einer Raumebene links mit einer Quelle und rechts mit zwei Quellen

Lautsprecher als aktive Absorber

Mit raumakustischen Maßnahmen ist das Problem der noch verbleibenden Längsmoden in einem Raum durch einen großflächigen Absorber, eine Art akustischen Sumpf, an der Rückseite des Raumes zu lösen. Voraussetzung dafür wäre eine breitbandige Wirkung für den Frequenzbereich von 20 Hz an beginnend bis über 100 Hz. Ein solcher Absorber ist, wenn überhaupt realisierbar, sehr groß und teuer. Poröse Absorber sind in diesem Frequenzbereich wegen der erforderlichen Ausdehnung nicht praktikabel, so dass eine Reihe von Resonanzabsorbern einzusetzen wäre. Die Wirkung der Absorber beruht darauf, die Reflexion der Schallwellen an der Rückwand soweit möglich zu vermindern. Genau dieser Effekt lässt sich auch in aktiver Form mit weiteren Lautsprechern erreichen. Auf der Rückseite des Raumes wird eine identische Anordnung von Subwoofern angebracht, wie sie sich auch auf der Stirnseite befindet. Die Ansteuerung dieser Lautsprecher erfolgt mit einem der Laufzeit in Längsrichtung entsprechendem Delay und mit umgekehrter Polarität. Die von der Vorderseite kommende Schallwelle wird so im Moment des Auftreffens auf die Rückwand des Raumes durch die hier arbeitenden Lautsprecher kompensiert. Voraussetzung dafür ist die Schallausbreitung als ebene Welle mit den bekannten Randbedingungen.

Abbildung 5 zeigt zwei Messreihen entlang der Raumlänge im bekannten Musterraum. Die linke Grafik entstand mit je einem Subwoofer mittig auf der Stirnfläche und Rückseite des Raumes. Für die rechts abgebildeten Messungen wurden je vier Subwoofer auf der Stirnfläche und Rückseite platziert. Sehr gut ist hier zu erkennen, wie die Auswirkung der Eigenfrequenzen in Längsrichtung zurück geht und sich bis 50 Hz bzw. 80 Hz ein für alle Plätze recht gleichmäßiger Verlauf einstellt. Mittelt man die Ergebnisse über alle 21 Messpunkte so stellt sich ein Verlauf nach Abbildung 6 ein.

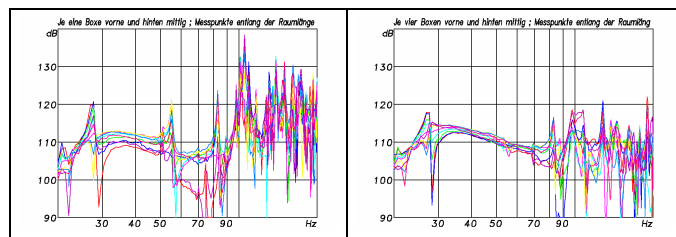


Abbildung 5 Messungen entlang der Längsachse des Raumes mit jeweils einem Lautsprecher auf der Vorder- und Rückseite des Raumes (links) und mit jeweils vier Lautsprechern (rechts)

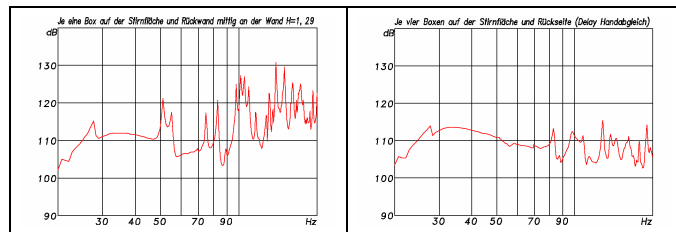


Abbildung 6 Gemittelte Kurve über alle 21 Messpunkte mit je einer Box (linke Grafik) und mit je vier Boxen (rechte Grafik) auf der Stirnseite und Rückwand des Hörraumes.

Basierend auf einer Mittelung über alle Messpunkte nach Abbildung 6 oder über eine Auswahl von Messpunkten im wichtigsten Raumbereich kann anschließend noch eine Entzerrung über den Controller der Lautsprecher erfolgen.

Fazit

Durch raumakustische Maßnahmen und eine messtechnische Optimierung im Abhörraum kann in Tonstudios eine sehr hochwertige und neutrale Wiedergabe über Abhörlautsprecher erzielt werden. Prinzip bedingte Schwächen zeigt diese Methode jedoch im Bassbereich, wo insbesondere bei kleinen und mittleren Räumen extreme Schwankungen mit starker Ortsabhängigkeit auftreten, die nur in Maßen durch ein elektrisches Filter kompensiert werden können. Ursache sind die Eigenfrequenzen des Raumes, die mit akustischen Maßnahmen nur unter großem Aufwand in ihrem Einfluss limitiert werden können. Durch den Einsatz mehrerer Subwoofer, angeordnet als Bassarray auf der Vorderseite des Raumes, können diese Eigenfrequenzen durch die Abstrahlung einer großflächigen ebenen Wellenfront in der Raumhöhe und Breite eliminiert werden. Die Anordnung der Subwoofer hat dabei so zu erfolgen, dass der Abstand in der jeweiligen Richtung nicht größer als die halbe Wellenlänge der höchsten angestrebten Frequenzen ist, für die das Verfahren funktionieren soll. Wo diese obere Grenzfrequenz liegt, hängt weitgehend von der Raumgröße ab. Je größer der Raum ist, desto niedriger kann die Grenzfrequenz gelegt werden und umso weiter können die Lautsprecher auseinander rücken. Als erster Anhaltspunkt hat sich eine Anzahl von vier Subwoofern als 2x2 Array in diversen Versuchen bewährt. Für sehr breite Räume sollten sechs Subwoofer in einem 2x3 Array angeordnet werden.

Was bleibt sind noch die Eigenfrequenzen des Hörraumes in der Längsrichtung, die meist den stärksten und schädlichsten Einfluss auf die Basswiedergabe haben. Als Gegenmaßnahme können großzügige akustische Absorber oder bzw. ein zweites identisches Bassarray an der Rückseite des Raumes eingesetzt werden. Die Ansteuerung dieser Lautsprecher erfolgt mit einem der Laufzeit in Längsrichtung entsprechendem Delay und mit umgekehrter Polarität. Das hintere Array arbeitet damit als eine Art aktiver akustischer Sumpf und eliminiert so den Einfluss der Eigenfrequenzen in Längsrichtung. Voraussetzung ist auch hier eine weitgehend ebene Wellenfront und die daraus resultierenden Bedingungen für den Abstand der Lautsprecher in den Arrays zueinander. Von größter Wichtigkeit sind für den Einsatz des zweiten Bass Arrays ein sehr präziser Pegel- und Delayabgleich sowie die Platzierung der Lautsprecher so nahe wie möglich an der Frontseite und Rückseite des Raumes. Optimale Resultate können in Kombination mit einer hoch auflösenden FIR Raumentzerrung erzielt werden, bei der die Filter dann auch im Bassbereich sinnvoll für einen großen räumlichen Bereich eingesetzt werden können.