

Psychoakustische Untersuchungen zu synthetischem diffusen Nachhall

Psychoacoustic Investigations on synthetically created diffuse Reverberation

Christoph Pörschmann¹, Alexandra Zebisch²

¹ FH Köln – Institut für Nachrichtentechnik, christoph.poerschmann@fh-koeln.de

² TU Berlin

Kurzfassung

Mit Hilfe auditiver virtueller Umgebungen ist es möglich, eine Person in einen beliebigen Raum zu versetzen. Neben dem Direktschall und den frühen Reflexionen muss der diffuse Nachhall berücksichtigt werden. Während es zahlreiche Verfahren gibt, die frühen Reflexionen basierend auf den Regeln der geometrischen Akustik zu berechnen, ist eine genaue Bestimmung des diffusen Nachhalls sehr aufwändig. Weiterhin ist jede geometrische Berechnung der Schallausbreitung fehlerbehaftet, die Ungenauigkeiten nehmen dabei mit höherer Ordnung der Reflexionen zu, so dass für den diffusen Nachhall eine solche Berechnung oft nicht mehr sinnvoll ist. Alternativ können statistische Methoden eingesetzt werden, um Nachhall zu modellieren. Für ein komplett diffuses Schallfeld fällt die Einhüllende der Raumimpulsantwort exponentiell ab und kann durch eine frequenzabhängige Nachhallzeit beschrieben werden. Die Feinstruktur kann als über alle Einfallrichtungen und Einfallzeitpunkte gleichverteilt angenommen werden.

Das Ziel der hier vorgestellten Studie ist es, den Zeitpunkt anhand von Hörversuchen zu ermitteln, ab dem das Schallfeld als diffus betrachtet werden kann. Für Nachhallanteile, die nach diesem, auch als Mixing Time bezeichneten Zeitpunkt beim Empfänger eintreffen, kann ein Ersetzen einer gemessenen Raumimpulsantwort durch eine synthetisch generierte Raumimpulsantwort nicht mehr wahrgenommen werden.

Zur perzeptiven Bestimmung der Mixing Time wurden binaurale Raumimpulsantworten (BRIRs) verschiedener Räume aufgenommen. Der Nachhallanteil dieser Raumimpulsantworten wurde schrittweise durch einen synthetisch erzeugten Anteil ersetzt und mit repräsentativen Stimuli gefaltet. In dem Hörversuch wurde ein 3-AFC (3-Alternative-Forced-Choice) Test durchgeführt, um die Grenzwerte für die perzeptive Mixing Time für verschiedene Räume zu ermitteln.

Gleichzeitig wurde getestet, ob der vorgestellte Algorithmus zur Erzeugung eines binauralen diffusen Nachhalls geeignet ist, die späten Nachhallanteile ohne eine perzeptive Unterscheidbarkeit von einer gemessenen binauralen Raumimpulsantwort zu modellieren.

1. Einleitung

Bei der messtechnischen Analyse von Raumimpulsantworten können einzelne frühe Rückwürfe direkt analysiert und deren Einfluss bewertet werden [1][2]. Weiterhin sind in den späten Reflexionen und dem diffusen Nachhall Informationen enthalten, die charakteristisch für die Wahrnehmung des Raumes sind. Im Bereich des diffusen Nachhalls reduziert sich die Analyse auf die (frequenzabhängige) Nachhallzeit als den wichtigsten und oft entscheidenden Parameter für die akustische Auslegung von Räumen [3].

Zur Beschreibung von Räumen existieren zahlreiche messbare raumakustische Merkmale, die sich bei der Planung und Bewertung von Räumen bewährt haben [4] und teilweise gute Rückschlüsse auf die perzeptive Qualität des Raumes erlauben. Sie lassen sich wiederum weitgehend in Zeit- und Energiekriterien einteilen. Innerhalb der Zeitkriterien (z.B. Nachhallzeit, Early Decay Time, Schwerpunktszeit) wird die Dauer bestimmter Ausklingprozesse betrachtet. Bei Energiekriterien werden energetische Anteile innerhalb des Nachhalls (z.B. Klarheitsmaß) oder energetische Anteile für verschiedene Einfallsrichtungen (Seitenschallgrad, Umhüllung, Diffusität) beobachtet [4]. Diese raumakustischen Merkmale können wiederum genutzt werden, um eine für die Auralisierung sinnvolle Parametrierung des Nachhalls vorzunehmen.

Der späte Anteil einer Raumimpulsantwort kann ab einem bestimmten Zeitpunkt als komplett diffus bezeichnet werden. Das heißt, dass sowohl die zeitliche Abfolge als auch die räumliche Eintreffrichtung als gleichverteilt angenommen werden können. Für diese späten Nachhallanteile ist einzig die frequenzabhängige Nachhallzeit als raumakustischer Parameter entscheidend. Dieser Zeitpunkt wird in der Literatur häufig als „Mixing Time“ beschrieben [5].

Für viele Anwendungen stellt sich die Frage bis zu welchem Zeitpunkt eine Auswertung einzelner Rückwürfe erforderlich bzw. sinnvoll ist. Die Mixing Time hat zum einen für die Analyse der relevanten Raumeigenschaften große Bedeutung und stellt zum anderen eine Basis für eine authentische Auralisierung von vermessenen Räumen dar.

Auch für die Raumsimulation ist der Übergang von diskreten frühen Reflexionen zu dem diffusen Nachhall von besonderer Bedeutung, bei dem die Rückwürfe von den Wänden sowohl zeitlich als auch räumlich als statistisch gleichverteilt betrachtet werden können. Aus der Mixing Time ergibt sich damit ein Abbruchkriterium, ab dem eine exakte Simulation jedes einzelnen Schallstrahls nicht mehr erforderlich ist.

Im Rahmen der hier dargestellten psychoakustischen Experimente werden zwei relevante Fragestellungen in diesem Themenfeld untersucht. Zum einen soll geklärt werden, ob der im Folgenden vorgestellte Algorithmus zur Erzeugung eines diffusen binauralen Nachhalls geeignet ist, die später als die Mixing Time eintreffenden Nachhallanteile zu modellieren. Zum anderen soll geprüft werden, ob die in der Literatur beschriebenen Parameter zur Modellierung der Mixing Time auch für vergleichsweise kleine Räume mit in der raumakustischen Praxis komplexen geometrischen Eigenschaften anwendbar sind.

2. Stand der Forschung

In aktueller Literatur wird bei Untersuchungen zur „Mixing Time“ zwischen einer physikalischen Mixing Time als dem Zeitpunkt, ab dem das Schallfeld völlig diffus ist und einer perzeptiven Mixing Time unterschieden [5]. Bei Letzterer wird als Kriterium angenommen, dass ein Hörer die später eintreffenden Nachhallanteile nicht mehr von einem diffusen Schallfeld unterscheiden kann.

In der Literatur findet man eine große Bandbreite von Untersuchungen zu diffusem Nachhall. Dabei variieren die Werte für den Einsatzzeitpunkt des diffusen Nachhalls je nach Raum und je nach Untersuchung beträchtlich. Ein guter Überblick über die Untersuchungen findet sich in [5][6]. Viele in den Studien zugrunde gelegte Annahmen sind modellhafter Natur und basieren auf den physikalischen Eigenschaften eines Raumes wie der Reflexionsdichte, der mittleren freien Weglänge und der Nachhallzeit.

Häufig wird ausgehend von einer mittleren Reflexionsdichte eine bestimmte Anzahl von Reflexionen pro Sekunde ermittelt, die vom Gehör aufgrund seines begrenzten, zeitlichen Auflösungsvermögens als gleichförmiges Rauschen wahrgenommen wird. Für einen Quaderraum ergibt sich die Reflexionsdichte zu [3]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{4\pi c^3 t^2}{V} \quad (1)$$

c: Schallausbreitungsgeschwindigkeit
V: Raumvolumen

Im Folgenden werden einige relevante Untersuchungen kurz dargestellt. Schreiber ermittelte eine maximale Reflexionsdichte, bei der eine Person ein Dirac-Rauschen großer Bandbreite als gleichförmiges Rauschen empfindet [7]. In psychoakustischen Untersuchungen ermittelte er einen Wert von 2800 Reflexionen pro Sekunde. In den Untersuchungen stellte Schreiber allerdings auch fest, dass einige Probanden auch Reflexionsdichten von über 3000 pro Sekunde noch von einem gleichförmigen Rauschen unterscheiden können.

Nach Polack ist der Bereich des diffusen Nachhalls erreicht, wenn zehn Reflexionen innerhalb eines Zeitraumes von 24 ms eintreffen, was dem zeitlichen Auflösungsvermögen des Gehörs entspricht [8]. Dies führt ebenfalls zu vergleichbaren Reflexionsdichten wie die Untersuchungen von Schreiber.

Rubak und Johansen ermittelten anhand von Hörversuchen, dass eine Reflexionsdichte von 4400 Reflexionen pro Sekunde ausreicht, um einen künstlichen Nachhall von guter Qualität zu generieren [9]. Im Gegensatz dazu halten Abel und Huang fast das Fünffache davon für notwendig, damit eine Unterscheidung von gaußverteilterm Rauschen nicht möglich ist [10]. Ihre Ergebnisse stammen aus den Untersuchungen des Echodichteprofils.

Reichardt und Lehmann bestimmten die Mixing Time anhand von Reflektogrammen von mittelgroßen Konzertsälen und ermittelten Werte im Bereich von 100 ms – 150 ms, ab der der Nachhall als statistisch betrachtet werden kann [11].

Aus den psychoakustisch bestimmten erforderlichen Reflexionsdichten kann man die Mixing Time durch das Einsetzen in Gleichung 1 ermitteln:

$$t_{mix} = \sqrt{\frac{dn}{dt} \cdot \frac{V}{4\pi c^3}} \quad (2)$$

Es ergibt sich somit rechnerisch eine Proportionalität zwischen der Mixing Time und \sqrt{V} . Der Skalierungsfaktor kann über die geforderte Reflexionsdichte bestimmt werden und liegt je nach Studie im Bereich von $1/\sqrt{2}$ bis 2.

Nach Rubak und Johansen kann die Mixing Time auch mithilfe der mittleren freien Weglänge l_m bestimmt werden [9]. Dabei wird die Mixing Time als Laufzeit definiert, die ein Teilchen benötigt, um die vierfache mittlere freie Weglänge zurückzulegen. In dieser Zeit treten dementsprechend vier Wandreflexionen auf.

Die mittlere freie Weglänge kann aus Gleichung 1 berechnet werden. Es ergibt sich [3]:

$$l_m = 4 \frac{V}{S} \quad (3)$$

V: Raumvolumen
S: Oberfläche

In [12] wurde ein Verfahren beschrieben, bei dem der diffuse Nachhall einer gemessenen Raumimpulsantwort durch einen synthetischen Nachhall ersetzt wurde. Die psychoakustischen Hörversuche ergaben, dass mit einer Zunahme der Mixing Time von 40 ms nach 160 ms auch eine zunehmende Natürlichkeit einhergeht.

In psychoakustischen Untersuchungen wurde an der TU Berlin die Relation zwischen physikalischer und perceptiver Mixing Time untersucht [5][6]. Dabei wurde getestet, zu welchen Überblendzeitpunkten eine dynamische Anpassung der Raumimpulsantworten an die Kopfdrehung in einer virtuellen Umgebung nicht mehr erforderlich ist und der späte Nachhall unverändert bleiben kann. Die Unterscheidbarkeit von einem gemessenen Nachhall zu einem komplett diffusen Nachhall wurde hierbei in den Hintergrund gestellt. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigten, dass als bester modellbasierter Prädiktor der Mittelwerte der perceptiven Mixing Time basierend auf dem Verhältnis V/S gewählt werden kann. Allerdings zeigten die Untersuchungen auch, dass gerade für kleinere Räume ein zusätzlicher Offset hinzugefügt werden muss. Dieser Prädiktor stimmt mit den Ergebnissen von Rubak und Johansen überein [9]. Als weiterer recht guter Prädiktor ergab sich \sqrt{V} (ebenfalls mit einem Offset). Für die Bestimmung der Mixing Time, die den Übergang zu einem völlig diffusen Nachhall darstellt, müssen allerdings unter Umständen höhere Werte als in [5][6] bestimmt angenommen werden, insbesondere dann, wenn man davon ausgeht, dass einige der Probanden im Rahmen des Experiments nur kleine Kopfbewegungen durchgeführt haben.

3. Methodik

3.1. Räume

Zur Durchführung der psychoakustischen Untersuchungen wurden vier unterschiedlich genutzte Räume im Ingenieurwissenschaftlichen Zentrum (IWZ) der Fachhochschule Köln vermessen. Die Raumvolumina der ausgewählten Räume variierten zwischen 35 m³ und 2275 m³. Es wurden bewusst Räume ausgewählt, die unterschiedlich genutzt werden und dadurch stark verschiedene raumakustische Eigenschaften aufweisen.

- **Flur:**

Beim diesem Raum handelt es sich um einen kleinen Korridor. Am Anfang und Ende des Flurs befindet sich jeweils eine verglaste Durchgangstür. Der Raum ist nicht komplett rechteckig, sondern an einer Seite abgeschrägt und somit in der Grundfläche 5-eckig. Die Decke, die Wände und der Fußboden können als näherungsweise schallhart betrachtet werden. Während der Messungen befanden sich im Raum nur die Schallquelle sowie das Mikrophon.

- **Treppenhaus:**

Das Treppenhaus im Hallenbereich des IWZ ist L-förmig und in zwei bauliche Bereiche in insgesamt drei Ebenen aufgeteilt. Im einen Teil des Raumes befindet sich eine Treppe, die alle drei Ebenen miteinander verbindet. Die Begrenzungsflächen in diesem Raum sind näherungsweise schallhart. In der unteren und in der mittleren Ebene befinden sich jeweils zwei verglaste Durchgangstüren. Zum Zeitpunkt der Messungen war das Treppenhaus ebenfalls leer. Vermessen wurden Empfängerorte in zwei unterschiedlichen baulichen Bereichen, die Quellposition wurde so gewählt, dass bei beiden für die Messungen direkter Sichtkontakt zwischen Quelle und Empfänger bestand.
- **Seminarraum:**

Der Seminarraum (ZW 8-3) ist mit Tischen und Stühlen (ca. 60 Sitzplätze) ausgestattet und verfügt über einen PVC-Fußboden. Die Wände sind näherungsweise schallhart, wobei sich an einer Seitenwand eine Fensterfront befindet. Als Deckenmaterial wurde ein Absorptionsmaterial (OWA Harmony) verbaut. Als Quellposition wurde die typische Sprecherposition in dem Seminarraum gewählt. Die beiden Messpositionen lagen im Bereich der mittleren bis hinteren Zuhörerreihen.
- **Audimax:**

Im gesamten Zuhörerbereich des Audimax der FH Köln befindet sich Wandklappgestühl mit abklappbaren Holztischplatten. Die Vorderseite der Sitzreihen ist absorbierend gestaltet. Die Decke ist mit großflächigen Diffusoren ausgestattet, die Seitenwände sind aus schallhartem Material. Die Rückwand ist mit Holz verkleidet und schallabsorbierend. Der Fußboden ist mit einem Filzteppich ausgelegt. Die Quellposition befand sich an einer üblichen Sprecherposition (im Bereich des Rednerpultes). Als Empfangsposition wurden sowohl ein Platz in etwa in der Hörsaalmitte als auch ein Hörerplatz am Rand betrachtet.

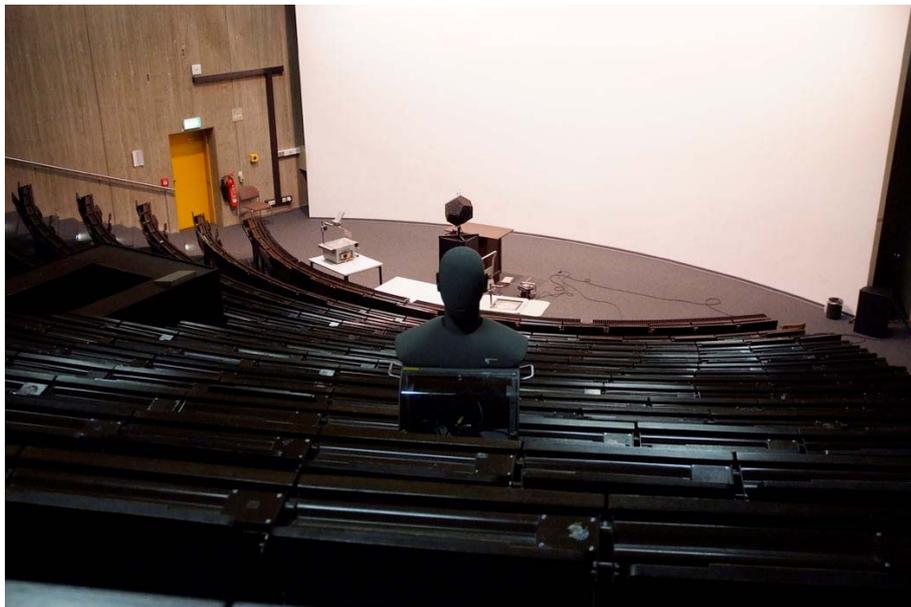


Abbildung 1: Messung der binauralen Raumimpulsantwort im Audimax des IWZ

In der folgenden Tabelle sind die charakteristischen Raumeigenschaften noch einmal zusammengefasst:

Raum	Flur	Treppenhaus	Seminarraum	Audimax
$Volumen [m^3]$	35	291	457	2275
$S [m^2]$	60	424	475	2752
$T_{60}[s]$	1,51	3,13	0,86	1,14
$A_{\alpha}[m^2]$	3,78	15,15	86,95	283,4
α_{mittel}	0,063	0,035	0,18	0,10

Tabelle 1: Charakteristische Raumdaten der vermessenen Räume

3.2. Messungen

Alle Messungen der Nachhallzeit bzw. der Impulsantworten wurden mit einer an der FH Köln entwickelten Acoustica Toolbox durchgeführt. Der zu messende Raum wurde dabei durch ein Sweep-Signal angeregt [13], die Aufnahme erfolgte über ein Mikrofon (Microtech Gefell M296S) bzw. einen Kunstkopf (Head HMS II.3). Als ungerichtete Quelle wurde ein Mehrwegedodekaeder [14] verwendet, für eine gerichtete Quelle kam ein Lautsprecher des Herstellers AD-Systems (Flex 15) mit einem Systemverstärker Impuls D1 zum Einsatz.

Die Messung der Nachhallzeit erfolgte gemäß ISO 3382-2 an jeweils sechs Kombinationen von Quelle und Empfänger im Raum. Zur Messung der binauralen Raumimpulsantworten wurden in jedem Raum zwei Empfängerpositionen im Diffusfeld der Schallquelle ausgewählt. Es wurden Messungen bei einer Schallabstrahlung eines gerichteten Lautsprechers und eines ungerichteten Lautsprechers durchgeführt. Weiterhin wurde die Richtung des Kunstkopfes in Bezug auf die Schallquelle in 90°-Schritten verändert. Damit ergaben sich je Raum 16 gemessene binaurale Raumimpulsantworten.

3.3. Algorithmus zur Erzeugung des diffusen Nachhalls

Zur Bestimmung der Mixing Time wurden Stimuli erstellt, bei denen mit Hilfe eines Algorithmus zur Erzeugung eines binauralen diffusen Nachhalls die späten Nachhallanteile durch ein synthetisches Signal ersetzt wurden, das die gleiche frequenzabhängige Nachhallzeit aufweist wie die gemessene Raumimpulsantwort. Neben der Anpassung des frequenzabhängigen Ausklings sollte die interaurale Kohärenz der synthetisierten Raumimpulsantwort unverändert bleiben. Deshalb wurde für die weitere Verarbeitung eine Sequenz eines im Hallraum gemessenen Binauralsignals verwendet, bei dem der Hallraum mit weißem Rauschen angeregt wurde. Diese Sequenz hat die folgenden Eigenschaften: Sie ist sowohl räumlich als auch zeitlich als völlig diffus zu betrachten, und sie hat den interauralen Kohärenzgrad einer binauralen Raumimpulsantwort.

Diese Sequenz wird in einem ersten Schritt mit Hilfe einer Polyphasenfilterbank in 24 terzbreite Frequenzbänder aufgespalten. Im nächsten Schritt wird die Hüllkurve jedes einzelnen Frequenzbandes entsprechend der gemessenen Nachhallzeit angepasst. Abschließend werden alle Frequenzbänder wieder überlagert. Dabei wird die Energie jedes einzelnen Frequenzbandes so normalisiert, dass die synthetisierte binaurale Raumimpulsantwort den gleichen spektralen Verlauf erhält wie die ursprüngliche Raumimpulsantwort.

In Abhängigkeit von der im Hörversuch abzutestenden Bedingung erfolgt dann um den jeweils gewählten Zeitpunkt ein Überblenden zwischen der gemessenen und der komplett diffusen binauralen Raumimpulsantwort.

Die Struktur des Algorithmus ist in der folgenden Abbildung noch einmal verdeutlicht:

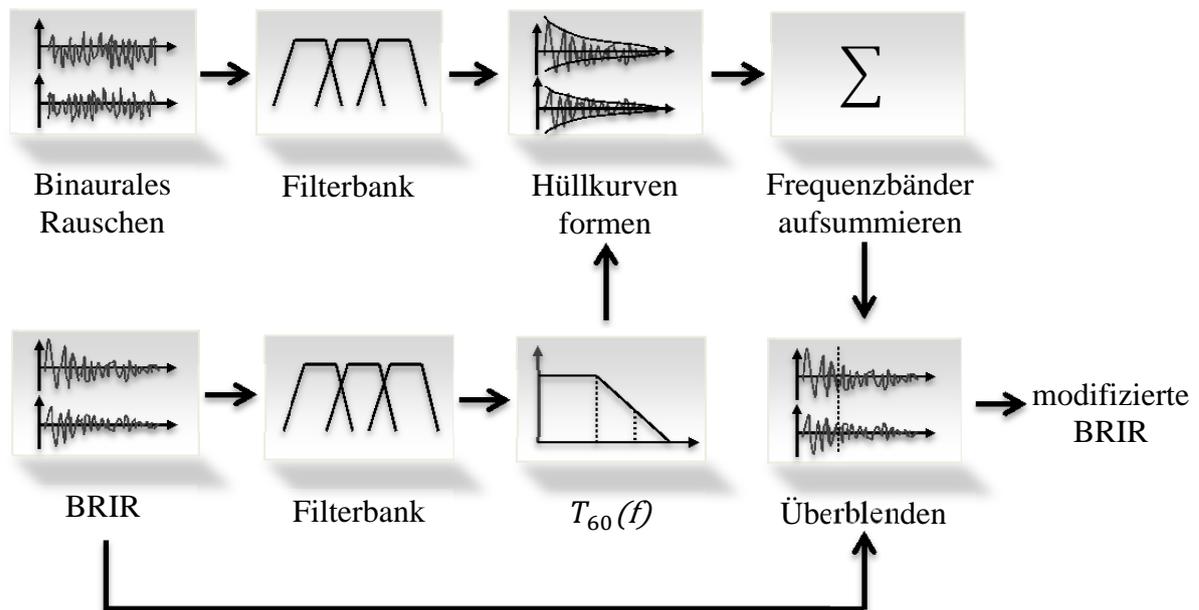


Abbildung 2: Blockdiagramm des Algorithmus zur Erzeugung eines diffusen binauralen Nachhalls. Die Eingangssignale werden mit Hilfe einer Filterbank in einzelne Frequenzbänder aufgespalten. Aus den binauralen Raumimpulsantworten werden die frequenzabhängigen Nachhallzeiten bestimmt. Diese dienen dazu, die Hüllkurve des binauralen Rauschens geeignet zu formen. Nach dem Aufsummieren aller Frequenzbänder wird abschließend in einem Zeitbereich um die Mixing Time zwischen der gemessenen binauralen Raumimpulsantwort und der synthetisierten diffusen Raumimpulsantwort übergeblendet.

3.4. Durchführung der psychoakustischen Untersuchung

Für die perzeptive Bestimmung der Mixing Time der ausgewählten Räume wurden Hörversuche konzipiert, vorbereitet und durchgeführt. Dabei sollte in erster Linie untersucht werden, ab welcher Mixing Time die frühen Anteile einer binauralen Raumimpulsantwort durch einen synthetischen, diffusen Nachhall ersetzt werden können. In den Hörversuchen wird der Schwellwert bestimmt, bei dem kein Unterschied zwischen der gemessenen binauralen Raumimpulsantwort und der teilweise synthetisierten binauralen Raumimpulsantwort wahrnehmbar war.

Zur Ermittlung dieses Schwellwertes wurde ein adaptiver 3-AFC-Test (3-Alternative-Forced-Choice) in Kombination mit dem 1-Down/1-Up-Staircase-Verfahren durchgeführt. Zwei davon sind identisch und nur ein Beispiel enthält das veränderte Signal. Die Durchführung des Experimentes erfolgte mit der Hörversuchssoftware WhisPER [15].

Aus Voruntersuchungen ergab sich, dass es ausreicht, die Mixing Times im Bereich von 3 – 70 ms darzubieten, um den Schwellwert im Rahmen des 3-AFC-Tests ermitteln zu können. Die Intervalle der Reizintensitäten wurden je nach Raum zwischen 3 ms und 7 ms gewählt. Im Rahmen des psychoakustischen Experiments wurden nicht sämtliche aufgenommenen Raumimpulsantworten verwendet. Aus Aufwandsgründen wurde nur die Schallabstrahlung des gerichteten Lautsprechers untersucht und es wurden nur zwei Kopfdrehungen betrachtet (der Quelle zugewandt und von der Quelle abgewandt). Jeweils wurden zwei verschiedene

Signale präsentiert, eine Schlagzeugsequenz sowie ein Sprachsignal (48 kHz, 16 bit). Eine Schlagzeugsequenz hatte sich bereits in früheren Studien als besonders kritisch erwiesen [5][6]. Die Stimuli wurden in einer zufälligen Reihenfolge präsentiert und von den Probanden beurteilt. Die Durchführung des Hörversuches erfolgte im reflexionsarmen Raum der Fachhochschule Köln. Der Störgeräuschpegel lag bei 25 dB(A). Der Mittelwert der Schalldruckpegel der Stimuli betrug 78 dB(A). Für die Wiedergabe der Stimuli wurde ein AKG K 271 verwendet.

An dem Hörversuch nahmen insgesamt 20 Versuchspersonen (15 männlich, 5 weiblich) im Alter zwischen 22 und 33 Jahren (Median 27 Jahre) teil. Von den Probanden wurde ein Audiogramm erstellt. Dabei zeigte sich, dass alle Probanden ein normales Hörvermögen hinsichtlich der Ruheshwelle aufwiesen. Im Rahmen einer Befragung im Anschluss an den Hörversuch gaben 65 % der Versuchspersonen an, ein Musikinstrument zu spielen bzw. über eine musikalische Ausbildung zu verfügen. 30 % der Versuchspersonen studierten bzw. arbeiteten im Audiobereich und hatten schon Erfahrung mit psychoakustischen Experimenten.

4. Ergebnisse

Aufgrund der Voruntersuchungen, in denen sinnvolle Werte für die Intervalle der Reizintensitäten, die Startwerte und den Bereich der dargebotenen Mixing Times festgelegt wurden, konnten mit den vorprozessierten Stimuli für alle Probanden und nahezu alle Testbedingungen die Schwellwerte ermittelt werden. Eine Betrachtung der Verteilungen der ermittelten Mixing Times bestätigte nicht für alle dargebotenen Szenarien eine Normalverteilung der Ergebnisse. Für einige der Stimuli ergaben sich sogar mehrgipflige Verteilungen. Dies deutet darauf hin, dass die Probanden unterschiedliche perzeptive Kriterien für die Bestimmung der Mixing Times herangezogen haben. Die Befragung der Versuchspersonen am Ende des Experiments zeigte, dass die veränderten Signale hauptsächlich anhand von Lateralisationsunschärfen, Klangverfärbungen sowie wahrnehmbaren Artefakten identifiziert wurden.

Eine erste Analyse der Ergebnisse zeigte, dass es zwischen den einzelnen Probanden große Unterschiede in der Wahrnehmung des Einsatzzeitpunktes des diffusen Nachhalls gab. Die individuellen Ergebnisse einzelner Personen werden im Rahmen der hier vorgestellten Ergebnisse jedoch nicht weiter dargestellt, sondern die Auswertung beschränkt sich auf die Betrachtung der Mittelwerte sowie der 95%-Konfidenzintervalle.

Wie zu erwarten ergaben sich mit einer Zunahme des Raumvolumens tendenziell höhere Mixing Times. Abbildung 3 stellt die ermittelten Mixing Times in Abhängigkeit vom Raumvolumen dar. Es fällt jedoch auf, dass das Kriterium von $t_{mix} \propto \sqrt{V}$ nur für die größeren der vier Räume tendenziell passend ist. Eine bessere Modellierung kann durch einen wie in [5] vorgeschlagenen Offset erzielt werden. Besonders große Abweichungen von diesem Kriterium zeigten sich für das Treppenhaus. Aufgrund der speziellen geometrischen Struktur des Raumes (mehrere Etagen, L-förmig), ergab sich eine deutlich kleinere Mixing Time, die eher zu einem Raum mit einem Volumen von weniger als 100m³ passend wäre. Eine plausible Erklärung hierfür ist, dass für die Betrachtung der Diffusität jede Ebene dieses Raumes als separater Teilraum aufgefasst werden muss.

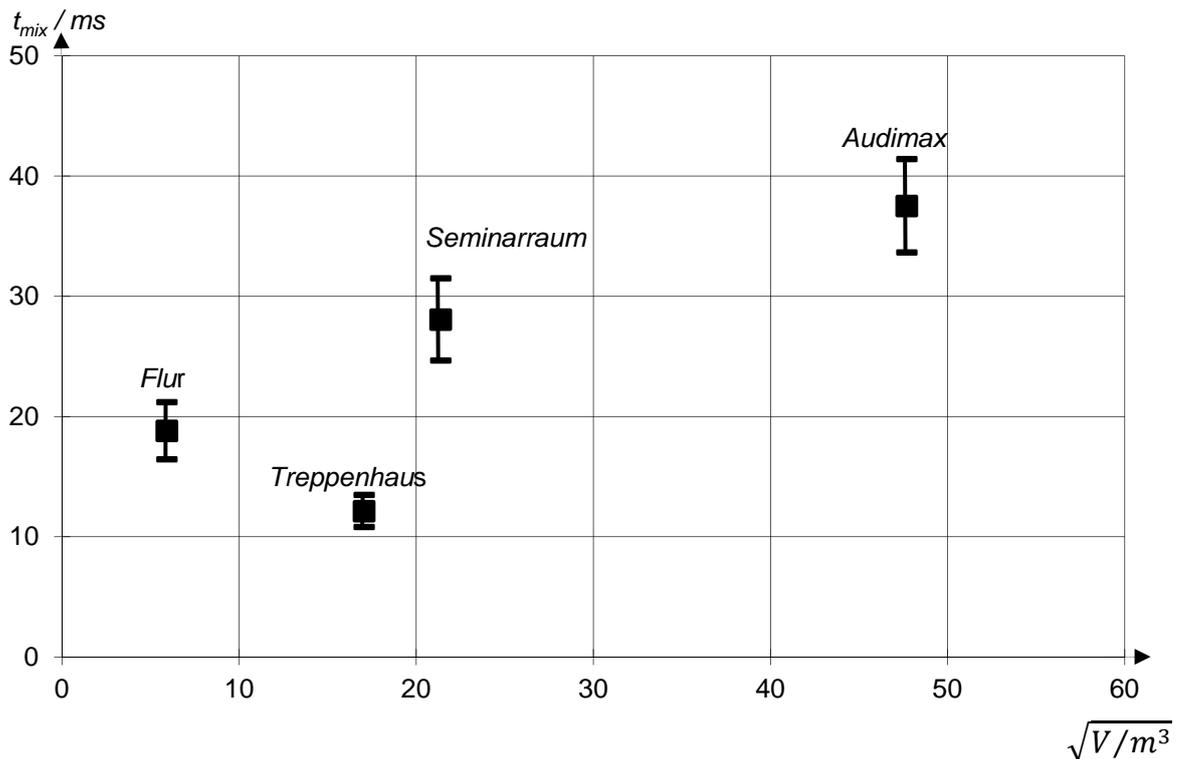


Abbildung 3: Einfluss der Räume auf die perzeptive Mixing Time. Dargestellt sind die Mittelwerte der Mixing Times sowie die 95 % Konfidenzintervalle in Abhängigkeit von \sqrt{V} .

Betrachtet man die Ergebnisse des Hörversuches detaillierter und vergleicht die Mixing Times für Schlagzeugstimuli und für Sprachstimuli getrennt, so fällt auf, dass die Unterschiede zwar für einige Räume deutlich messbar sind, aber diese nur ein niedriges Signifikanzniveau aufweisen. Zudem sind sie überschaubar klein und liegen im Mittel bei wenigen ms (Abbildung 4).

Im Vergleich dazu sind die Unterschiede innerhalb eines Raumes an verschiedenen Positionen deutlich größer. Insbesondere für die größeren beiden Räume (Audimax und Seminarraum) sind diese Unterschiede signifikant (Abbildung 5). Die Ursache hierfür kann nicht maßgeblich in der Entfernung zwischen Schallquelle und Empfänger liegen, da diese sich nicht gravierend unterschied, sondern muss vornehmlich darin begründet liegen, dass der Zeitpunkt, zu dem eine ausreichend hohe Diffusität auftritt, von der Empfängerposition abhängig ist. Solche Schwankungen zwischen verschiedenen Messpositionen innerhalb eines Raumes können auch bei der Analyse raumakustischer Eigenschaften beobachtet werden [16]. Deshalb ist es sinnvoll, in Folgeuntersuchungen eine größere Anzahl von Messpositionen in einzelnen Räumen zu erfassen, um Gesetzmäßigkeiten der perzeptiven Mixing Time in Bezug auf die Messpositionen bestimmen zu können und weitere Informationen darüber zu erhalten, inwieweit Messungen an einzelnen Positionen generalisierbar sind.

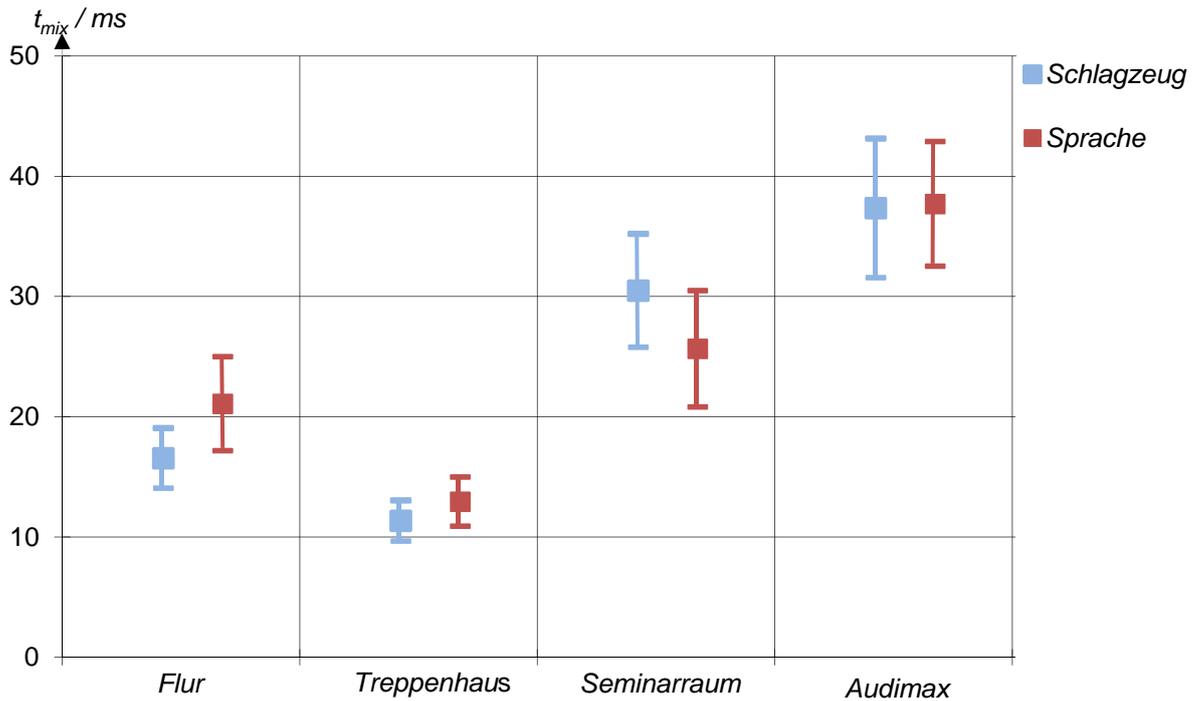


Abbildung 4: Einfluss der verwendeten Stimuli auf die perzeptive Mixing Time. Dargestellt sind die Mittelwerte der Mixing Times sowie die 95 % Konfidenzintervalle der einzelnen Räume für die unterschiedlichen Stimuli (Schlagzeug: hellblau; Stimme: rot).

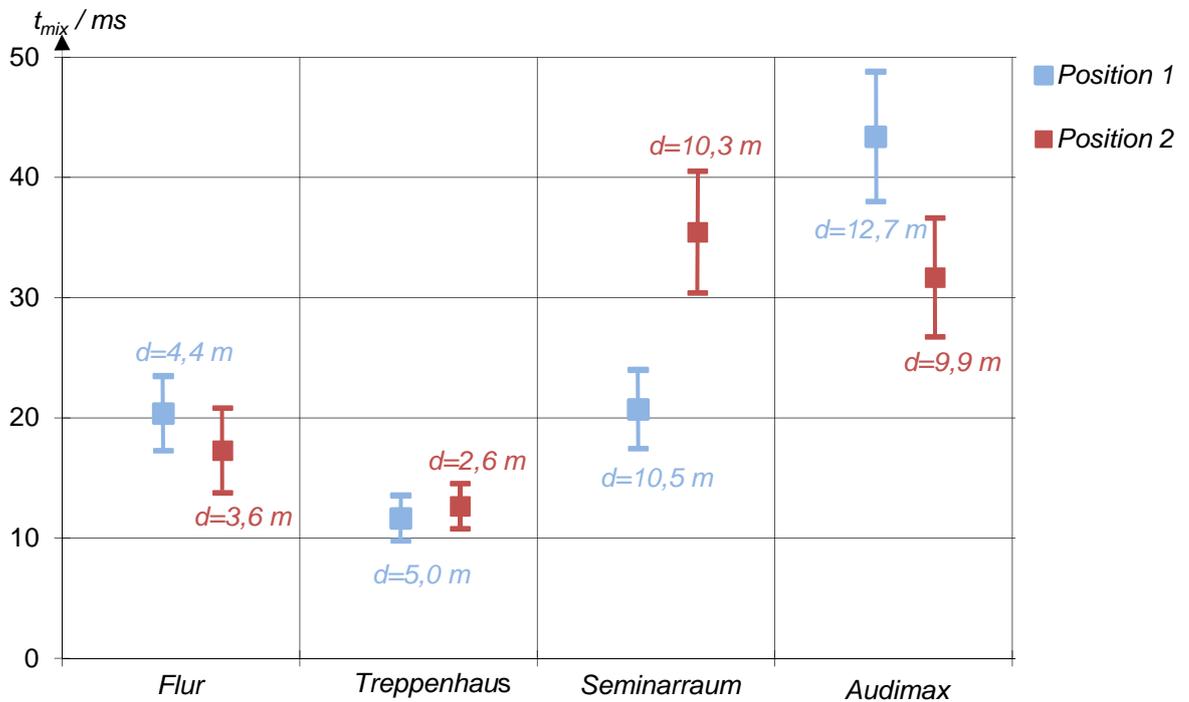


Abbildung 5: Auswirkung der Empfängerposition auf die perzeptive Mixing Time. Dargestellt sind die Mittelwerte der Mixing Times sowie die 95 % Konfidenzintervalle der einzelnen Räume für die unterschiedlichen Positionen. Angegeben sind zusätzlich die Entfernungen zwischen Quelle und Empfänger.

Die Ergebnisse sind besonders in Bezug auf deren Einsatz im Bereich der Auralisierung für virtuelle auditive Umgebungen interessant. Das psychoakustische Experiment bestätigt, dass eine exakte Modellierung der Raumimpulsantwort nur für sehr frühe Anteile der binauralen Raumimpulsantwort erforderlich ist. Die Ergebnisse decken sich tendenziell mit anderen Studien, in denen auch das dargebotene Schallfeld an die Kopfbewegung angepasst wurde [5][6]. Insofern ist zu erwarten, dass der hier beschriebene Algorithmus zur Modellierung des späten Nachhalls auch mit vergleichbaren Ergebnissen in virtuellen auditiven Umgebungen eingesetzt werden kann, die über eine Nachführung der Kopfposition verfügen. Es ist vorgesehen, dieses in Folgeuntersuchungen im Rahmen der an der FH Köln bearbeiteten Forschungsprojekte zu überprüfen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorgestellten psychoakustischen Untersuchungen wurde der Einsatzzeitpunkt des diffusen Nachhalls für verschiedene Räume bestimmt. Die Ergebnisse zeigen wie aus vorhergehenden Untersuchungen bereits bekannt deutliche Abhängigkeiten von dem Raumvolumen. Überraschend stark waren die Einflüsse der Messposition innerhalb des Raumes. Deshalb ist es sinnvoll, in Folgeuntersuchungen eine größere Anzahl von Messpositionen in einzelnen Räumen zu erfassen, um Gesetzmäßigkeiten der perceptiven Mixing Time in Bezug auf die Messpositionen bestimmen zu können.

Weiterhin hat sich der in diesem Artikel beschriebene Algorithmus zur Erzeugung eines binauralen diffusen Nachhalls als tauglich erwiesen, um die späten Nachhallanteile zu modellieren. Damit wird es möglich, die Hallanteile, die nach der Mixing Time eintreffen auf einfache Weise zu auralisieren.

6. Förderung

Die Untersuchungen wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekte 1707X08-ASAR und 17009X11-MARA durchgeführt. Die Autoren danken für die Unterstützung.

7. Quellenverzeichnis

- [1] Bernschütz B., Stade P. and Rühl M., “Sound Field Analysis in Room Acoustics,” In: Proceedings of the VDT International Convention, 2012.
- [2] Bernschütz B., Pörschmann C., Spors S. and Weinzierl S., “Entwurf und Aufbau eines sphärischen Mikrofonarrays für Forschungsanwendungen in Raumakustik und Virtual Audio,” In: Fortschritte der Akustik - DAGA 2010, DEGA e.V., D - Oldenburg, pp. 717-718, 2010.
- [3] Cremer, L.; Müller, H. A., „Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik,“ Bd. 1: Geometrische Raumakustik. Statistische Raumakustik. Psychologische Raumakustik. 2nd ed., Stuttgart: Hirzel, 1978
- [4] Ahnert, W., Tennhardt, K.-P., „Raumakustik,“ In Handbuch der Audiotechnik, Editor St. Weinzierl, 1.Auflage, Springer Verlag, 2008.
- [5] Lindau, A., Kosanke, L., Weinzierl, S., "Perceptual evaluation of physical predictors of the mixing time in binaural room impulse responses," Proc. of the 128th AES Convention, London, 2010.
- [6] Kosanke, L., “Untersuchung des Zusammenhangs physikalischer Maße zur Bestimmung der mixing time in Raumimpulsantworten und ihrem perceptiven Äquivalent,” Magisterarbeit, TU Berlin, 2010.
- [7] Schreiber, L., „Was empfinden wir als gleichförmiges Rauschen?“ In: Frequenz, Vol. 14, No. 12, pp. 399 ff., 1960.
- [8] Polack, J.-D., “La transmission de l'énergie sonore dans les salles,” Dissertation. Université du Maine, 1988.
- [9] Rubak, P., Johansen, L.G., “Artificial Reverberation based on a Pseudorandom Impulse Response II,” In: Proc. of the 106th AES Convention, München, Preprint 4900, 1999.
- [10] Abel, J.S., Huang, P., “A Simple, Robust Measure of Reverberation Echo Density,” In: Proc. of the 121st AES Convention, San Francisco, 2006.
- [11] Reichardt, W., Lehmann, U., „Raumeindruck als Oberbegriff von Räumlichkeit und Halligkeit, Erläuterungen des Raumeindrucksmaßes R,“ In: Acustica 40.5, S. 277-290, 1978
- [12] Pörschmann, C., Bednarzyk, M., „Erzeugung eines synthetischen binauralen diffusen Nachhalls,“ in: Fortschritte der Akustik – DAGA '96, DEGA e.V., D – Oldenburg, pp. 400-401, 1996.
- [13] Müller S., Massarani P., “Transfer-Function Measurement with Sweeps,” In: Journal of the Audio Engineering Society (AES), vol. 49, issue 6, pp 443-471, 2001.
- [14] Meuleman, J., Bernschütz, B., Pörschmann, C., „Entwurf und Aufbau eines konzentrischen Mehrwegedodekaeders“ In: Fortschritte der Akustik – DAGA 2011, Berlin, pp. 719-720, 2011.
- [15] Ciba, S, Wlodarski, A., Maempel, H.-J., “ WhisPER – A new tool for performing listening tests,” In: Proc. of the 126th AES Convention, Preprint 7749, München.2009.
- [16] Witew, I., Dietrich, P., de Vries, D., Vorländer, M., „ Uncertainty of room acoustic measurements - How many measurement positions are necessary to describe the conditions in auditoria?,“ Proceedings of the International Symposium of Room Acoustics, ISRA, 2010.