

Vergleich von realen und simulierten akustischen
Raum- Stoßantworten und deren Beurteilung

von

D i e t e r H o f f m a n n

Diplomarbeit in Physik
vorgelegt der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Rheinisch- Westfälischen Technischen Hochschule
in Aachen

im August 1988

angefertigt im

Institut für Technische Akustik
Fakultät für Elektrotechnik
der Rheinisch- Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen

Vergleich von realen und simulierten akustischen
Raum- Stoßantworten und deren Beurteilung

1. Problematik und Zielsetzung

1.1.	Impulsantworten in der Akustik	S.3
1.2.	Raumakustische Parameter	S.3
1.3.	Ray- tracing	S.6
1.4.	Ziel der Arbeit	S.7

2. Ein echokritischer Parameter für Räume

2.1.	Echoproblematik	S.8
2.2.	Hörtests	S.10
2.2.1.	Prinzip	S.10
2.2.2.	Apparatives	S.10
2.2.3.	Kritisches	S.10
2.2.4.	Motivwahl	S.11
2.2.5.	Testreihe 1	S.13
2.2.6.	Testreihe 2	S.15
2.3.	Einige Echokriterien	S.18
2.3.1.	Tannenbaumkriterium	S.18
2.3.2.	Echokriterium nach Yamamoto	S.18
2.3.3.	Autokorrelationsfunktion und "zeitliche Diffusität"	S.20
2.4.	Echokriterium nach Dietsch	S.20
2.5.	Anwendung von Dietsch's Kriterium auf Hörtests	S.26
2.6.	Raumakustischer Parameter "Echoanfälligkeit"	S.29

3. Messung

3.1.	Meßapparatur	S.33
3.2.	Ablauf der Messung und Meßprogramm	S.34
3.3.	Messung im Eurogress	S.38

4. Vergleich der Ergebnisse von Messung und Ray- tracing

4.1.	Impulsantworten	S.40
4.2.	Raumakustische Parameter	S.55

5. Zusammenfassung und Ausblick S.64

Anhang S.70

- A Raumakustische Parameter aus Messung und Simulation
- B Flußdiagramme verwendeter Programme :
 - a) Messprogramm / Echoanalyseprogramm
 - b) Automatisiertes Auswertungsprogramm
 - c) Konvertierungsprogramm

1. Begriffsklärung und Zielsetzung

1.1. Impulsantworten in der Akustik

Die Impuls- oder Stoßantwort eines linearen Übertragungssystems ist die Zeitfunktion, die man erhält, wenn man dasselbe mit einem Diracstoßförmigen Signal anregt. Sie enthält alle Übertragungseigenschaften des Systems. In der Akustik nutzt man diesen Sachverhalt insbesondere zur Erfassung der Übertragungseigenschaften von Räumen. Praktisch geht man dabei meist so vor, daß man einen Raum mit einem sehr kurzen Signal mit bekannter spektraler Zusammensetzung akustisch anregt und die Schalldruck- Zeitfunktion oder die Energie- Zeitfunktion mißt. Das Ergebnis einer solchen Messung hängt vom Sendeort, vom Empfangsort und vom übertragenen Frequenzband ab, wobei man sich mit einem schmalen Frequenzband (Oktav- oder gar Terzbreite) eine längere Dauer des Anregungsimpulses einhandelt; Vorteile einer engeren Bandbegrenzung sind frequenzabhängige Messungen und verbesserter Fremdspannungsabstand. Die sogenannte Integrierte Impulsantwort (IIA) erhält man aus der Energie- Zeitfunktion, indem man von der Gesamtenergie die bis zum aktuellen Zeitpunkt α gemessene Energie abzieht, also

$$\text{IIA}(\alpha) = \int_0^{\infty} E(t) dt - \int_0^{\alpha} E(t) dt$$

Ihre Darstellung erfolgt meist logarithmisch. Die Integrierte Impulsantwort eines Diffusfeldes hat bei logarithmischer Darstellung einen linearen Verlauf, aus ihrer Steigung läßt sich die Nachhallzeit, also die Zeit, in der nach Abschalten eines stationären Schallereignisses die Energie um 60 dB abfällt, ermitteln.

1.2. Raumakustische Parameter

Aus der Impulsantwort eines Raumes lassen sich eine Reihe sogenannter raumakustischer Parameter bestimmen. Die Definition dieser objektiven Größen stellt den Versuch dar, Phänomene wie Sprachverständlichkeit oder auch Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen, die individuell verschieden empfunden werden, im Mittel zu beschreiben. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Parameter sind (vergleiche etwa [7]) :

$$\text{Deutlichkeit} : D = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt}$$

$$\text{Clarity} : C = 10 \cdot \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt} \text{ dB}$$

$$\text{Schwerpunktzeit} : ts = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt}{\int_0^{\infty} E(t) dt}$$

Early Decay Time :

$$EDT = 6 \cdot \{ t [IIA (-15 \text{ dB})] - t [IIA (-5 \text{ dB})] \}$$

$$\text{Seitenschallgrad : } S = \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} E(t) \cdot \cos^2(\theta) dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} E(t) \cdot \cos^2(\theta') dt}$$

$$\text{Stationärer Schalldruckpegel : } P = 10 \cdot \log \frac{16 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot EDT}{0,163 \cdot \text{Volumen}} \text{ dB}$$

(mit $r = 10 \text{ Meter}$),

sowie ein weiterer Parameter, der das Verhalten des Raumes in Bezug auf Echoerscheinungen beschreiben soll. Dazu näheres in Kapitel 2. Deutlichkeit und Schwerpunktzeit sind Maße für die Sprachverständlichkeit, wobei eine große Deutlichkeit und eine kleine Schwerpunktzeit günstig sind. Clarity oder Klarheitsmaß beschreibt die Durchsichtigkeit bei Musikdarbietungen, indem hierfür günstige Energie zu ungünstigen Anteilen ins Verhältnis gesetzt wird. Bei der Deutlichkeit bezieht man den günstigen Anteil auf die Gesamtenergie. Die Schwerpunktzeit stellt das erste zeitliche Moment der Impulsantwort dar. Die Early Decay Time ist das sechsfache der Zeit, die zwischen dem Abfall der Integrierten Impulsantwort um 5 dB und dem um 15 dB vergeht. Dieser frühe Abfall ist für das subjektive Nachhallempfinden (neben dem Halleinsatzpegel) verantwortlich und stellt eine mit der Nachhallzeit vergleichbare Größe dar; ihre Definition trägt der Tatsache Rechnung, daß man 60 dB Dynamik bei Impulsantwortmessungen nur sehr schwer erreichen kann. Der Seitenschallgrad setzt die frühe Energie aus seitlicher

Richtung ins Verhältnis zu der aus Direktschallrichtung und stellt somit ein Maß für die Seitlichkeit bei Musikdarbietungen, für das Gefühl des Zuhörers, von Schall eingehüllt zu sein, dar. Der Richtcharakteristik des verwendeten Mikrofons wird durch die gewichtenden Winkelfunktionen Rechnung getragen. Näheres zur Seitenschallgradmessung in Kapitel 3.2 und in [16]. Die Integrationsgrenzen (50 ms für Sprache, 80 ms für Musik) resultieren aus dem unterschiedlichen Wahrnehmungsverhalten des Gehörs bei Musik- und Sprachdarbietungen. Hiervon wird im 2.Kapitel noch die Rede sein.

Der im Rahmen dieser Arbeit benutzte Begriff "Stationärer Schall-druckpegel" stellt einen aus der Diffusfeldtheorie resultierenden und nur von der Early Decay Time und dem Raumvolumen abhängigen Erwartungswert dar, keineswegs das Ergebnis einer separaten Messung oder Auswertung. Er wird auf denjenigen Pegel bezogen, der sich bei Freifeldausbreitung in 10 Metern Abstand einstellen würde.

1.3. Ray- tracing

Bei der raumakustischen Projektierung ist es sehr nützlich und kostensparend, wenn man bereits vor Baubeginn etwas über das zu erwartende akustische Verhalten des Raumes weiß. Zu diesem Zwecke werden seit geraumer Zeit Messungen an verkleinerten Modellen mit entsprechend verkleinerten Schallwellenlängen vorgenommen.[1] Diese Methode ist recht wirkungsvoll, jedoch aufwendig und teuer verglichen mit einer rechnerischen Simulation etwa mit dem "ray- tracing"- Verfahren nach dem Schallteilchenmodell. Hierbei wird die Geometrie eines Raumes in den Computer eingegeben, sowie Positionen und Beschaffenheit von Schallquelle und Publikum. Im sogenannten Strahlverfolgungsprogramm wird dann der Weg einer großen Zahl punktförmiger Schallteilchen verfolgt, die an einer Wand je nach Absorptionsgrad derselben entweder reflektiert oder absorbiert werden, auch die Streuung der Wände findet Berücksichtigung. Als "Empfänger" dienen kugelförmige Detektoren, die durchfliegende Teilchen in Abhängigkeit von der Zeit registrieren, was die Auftragung und Auswertung von Impulsantworten ermöglicht, da die Trefferzahl in einem Zeitintervall ein Maß für die ankommende Energie darstellt.

Nähere Einzelheiten des verwendeten Verfahrens finden sich in [2], [11], [13] und [14].

1.4. Ziel der Arbeit

Im folgenden sollen nun zunächst Zusammenhänge zwischen Raumimpulsantwort und Echoerscheinungen erforscht werden mit dem Ziel der Angabe eines echokritischen Parameters. Weiter wird eine Impulsantwortmessung mithilfe einer neuentwickelten Schallquelle beschrieben, die in einem Konzertsaal von zirka 15000 Kubikmeter Volumen durchgeführt wurde, und es werden die Ergebnisse dieser Messung verglichen mit den entsprechenden Resultaten einer Computersimulation nach dem oben vorgestellten Verfahren. Die Messung dient vorrangig dazu, die Qualität der Ergebnisse der Computersimulation zu überprüfen, beziehungsweise zu verbessern.

Eine Impulsantwortmessung und Computersimulation vergleichende Arbeit ist in [3] beschrieben; als wesentliche Vorarbeit zum Thema Echo sei [5], beziehungsweise [15] genannt.

2. Ein echokritischer Parameter für Räume

2.1. Echoproblematik

Unter Echo wird im folgenden die zeitlich und möglicherweise auch räumlich getrennte wiederholte Wahrnehmung eines Schallereignisses verstanden, das heißt ein akustisches Signal zerfällt in Direktschall und Wiederholung. Treten mehrfache Wiederholungen auf, so spricht man von Mehrfachechos, im Falle gleicher zeitlicher Abstände der Wiederholungen zueinander wird der Begriff Flutterecho gebraucht.

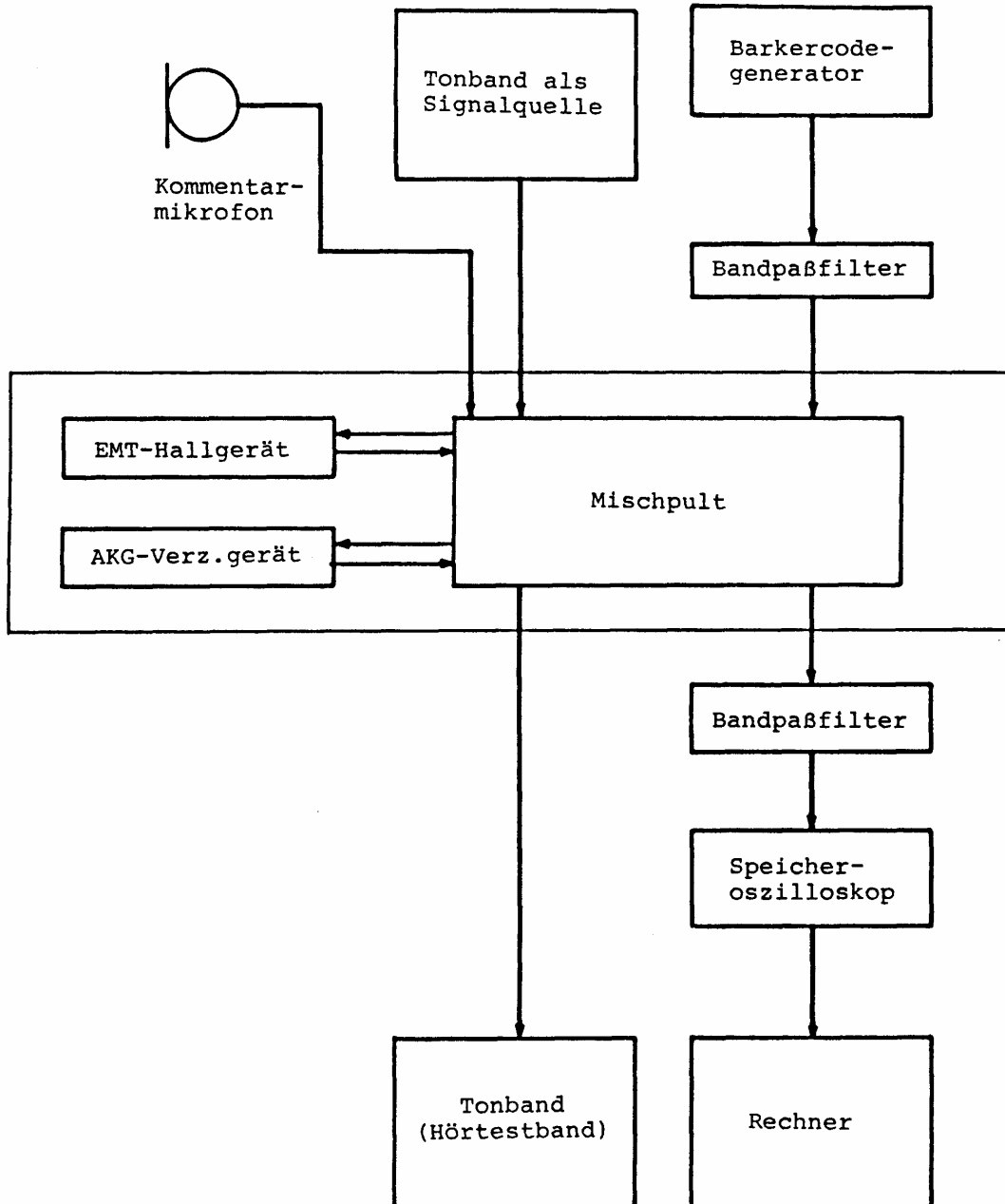
Ob nun eine Reflexion zum Echo wird, hängt von vielen Parametern ab. Große Zeitverzögerung und großer Pegel der Reflexion relativ zum Direktschall begünstigen die Echowahrnehmung. Im Falle zu kleiner Verzögerungszeiten - unterhalb der sogenannten Verwischungsschwelle, die im allgemeinen für Sprache bei 50 ms und für Musik bei 80 ms angenommen wird - werden keine Echos wahrgenommen, sondern Klangverfärbungen und Lokalisationsverschiebung. Die zeitliche und die spektrale Struktur des verwendeten Signals spielen eine große Rolle, kurze Signale mit starken hochfrequenten Anteilen sind besonders echokritisch. Neben der Anzahl und der Stärke der zwischen Direktschall und Reflexion vorhandenen "verdeckenden" Reflexionen, die die Echogefahr herabsetzen, haben der Absolutpegel des Direktschalls und das Spektrum der Reflexion einen Einfluß auf die Echowahrnehmung. Ein gewisser Mindestdirektschallpegel ist ja schon deshalb erforderlich, damit der Schall von Menschen überhaupt wahrgenommen werden kann. Auf der anderen Seite der Lautstärkeskala nimmt man bei Explosionen im Freien des öfteren Echos an Stellen wahr, wo man sonst keine zu hören gewohnt ist. Der "Frequenzgang" der reflektierenden Wand (Wände) legt fest, welche spektralen Anteile des Direktschalls man wie als Reflexion zu hören bekommt, egal ob man Direktschall und Reflexion zeitlich trennen kann oder nicht. Im letzteren Falle geht er in den Klangeindruck des Direktschalls ein. [4],[5],[15].

Was hier exemplarisch für eine Reflexion gesagt wurde, gilt entsprechend auch für Gruppen von mehreren Reflexionen. Das integrierende Verhalten des Gehörs hierbei wird noch zu untersuchen sein.

Da die Echowahrnehmung individuell sehr verschieden ist, ist es notwendig, zur Erforschung derselben zunächst Hörtests durchzuführen.

Abbildung 1

Apparatur zur Anfertigung von Hörtestbändern
und Messung von Impulsantworten



2.2. Hörtests

2.2.1 Prinzip

Den Testpersonen werden verschiedene Motive in verschiedenen elektronisch simulierten "Räumen" über Kopfhörer vorgespielt; die Frage ist : "Hören Sie ein Echo ?" ; Antwortmöglichkeiten sind "ja" und "nein".

2.2.2. Apparatives

Abbildung 1 zeigt die Apparatur zur Erstellung der Hörtestbänder und Messung der Raumimpulsantworten. Der eingerahmte Bereich (Hallgerät EMT 246, Verzögerungsgerät AKG TDU 7000 und Mischpult RTW) beschreibt den Teil des Aufbaus, der zur Simulation erforderlich ist. Das Hallgerät liefert frühe Reflexionen und diffusen Nachhall, das Verzögerungsgerät sorgt für echoverdächtige Reflexionen, mithilfe des Mischpults werden die Signale der beiden Geräte mit dem Direktschall zusammengemischt. Die Parameter des Hallgeräts sind denen eines Konzertsaals nachempfunden. Die eingestellte mittlere Nachhallzeit beträgt 2 Sekunden. Mit diesem "Raum" als Übertragungssystem werden nun zum einen die Hörtestbänder angefertigt, zum anderen die Impulsantworten gemessen. Diese Messung verläuft analog zur Messung der Impulsantwort eines realen Raumes, nur findet keine Wandlung des elektrischen Signals in ein akustisches statt. Das Rechtecksignal des Barkercodegenerators wird bandpaßgefiltert (oktavbreit) und auf den "Raum" gegeben. Das daraus resultierende Signal wird erneut bandpaßgefiltert, um einen besseren Störspannungsabstand zu erzielen, das Ergebnis wird einem digitalen Speicheroszilloskop (Nicolet 1090 A) zugeführt und gelangt von dort in den Rechner, wo es weiterverarbeitet werden kann.

2.2.3. Kritisches

Die Methode, für die Hörtests fest vorgegebene Räume zu verwenden, hat Vorteile in der Übersichtlichkeit und der guten Reproduzierbarkeit gegenüber einem Test, bei dem die Teilnehmer gebeten werden, bestimmte Parameter - etwa den Pegel einer Reflexion - zu verändern, bis sie ein Echo hören. Im letzteren Falle erhält man dafür allerdings Ergebnisse, die sich leichter quantitativ auswerten lassen.

Für die Kopfhörerwiedergabe läßt sich anführen, daß die Apparatur übersichtlich und die Durchführung der Tests in nahezu jedem Raum möglich ist im Gegensatz zur Verwendung eines sogenannten "synthetischen Schallfelds", wobei die Komponenten Direktschall, Reflexionen und Nachhall jeweils über einen oder mehrere Lautsprecher abgestrahlt werden und reflexionsarme Umgebung unumgänglich ist [5]. Bekannte Nachteile der Kopfhörerwiedergabe sind die unnatürliche Hörsituation und insbesondere die Im- Kopf- Lokalisation von Schallereignissen.

2.2.4. Motivwahl

Die Abhängigkeit der Echowahrnehmung von der Art der dargebotenen Signale wurde bereits erwähnt. Bei der Auswahl der Motive wurde deshalb versucht, eine große Bandbreite realistischer Motive abzudecken. Das Motiv "Schlagzeug" besteht aus einer langsamen Abfolge von Schlägen der Fußpauke ("bassdrum"), der kleinen Trommel ("snaredrum") und des geschlossenen Doppelbeckens ("hihat closed"). Da die Signale sehr kurz sind, ist zu erwarten, daß es sich hierbei um ein sehr echokritisches Motiv handelt, es stellt nach Meinung des Autors unter den realistischen Motiven den schlimmsten Fall dar; er kann in der Popmusik etwa während eines Schlagzeugsolos auftreten. Das Motiv "Sprache" beinhaltet eine Lesung des Anfangs der Erzählung "Hochzeitsvorbereitungen auf dem Lande" von Franz Kafka, es handelt sich um die ersten 87 Silben, die von einem männlichen Sprecher gelesen werden. Weiterhin wurde das Motiv "Jazz" angeboten, eine Komposition von Riedel mit dem Titel "Dialogie"; es handelt sich um ein Stück in Triobesetzung mit Klavier, Kontrabaß und Trompete. Schließlich wurde den Testhörern das Motiv "Streicher" vorgespielt, eine Aufnahme des Streichquartetts opus 33 in Es- Dur von Joseph Haydn.

Die Dauer von Motiv "Jazz" beträgt 45 Sekunden, Motiv "Streicher" dauert 30 Sekunden, "Schlagzeug" und "Sprache" sind zirka 20 Sekunden lang. Eine zunächst verwendete Version des Motivs "Sprache" dauert 45 Sekunden, wurde aber von der Mehrzahl der befragten Personen als zu lang empfunden.

Abbildung 2 : Testreihe 1 , verwendete Räume

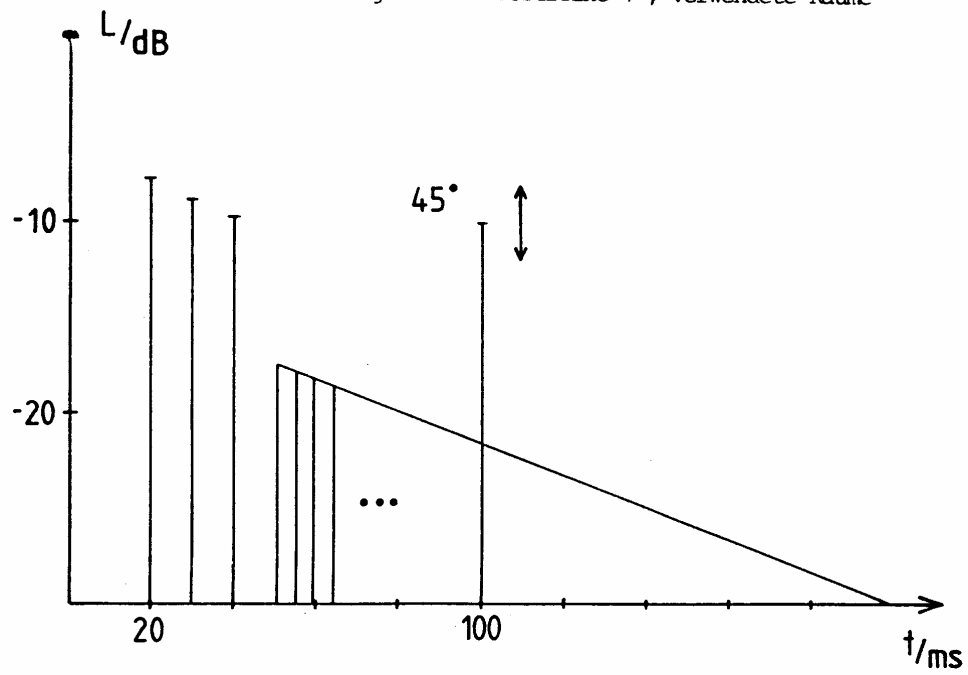
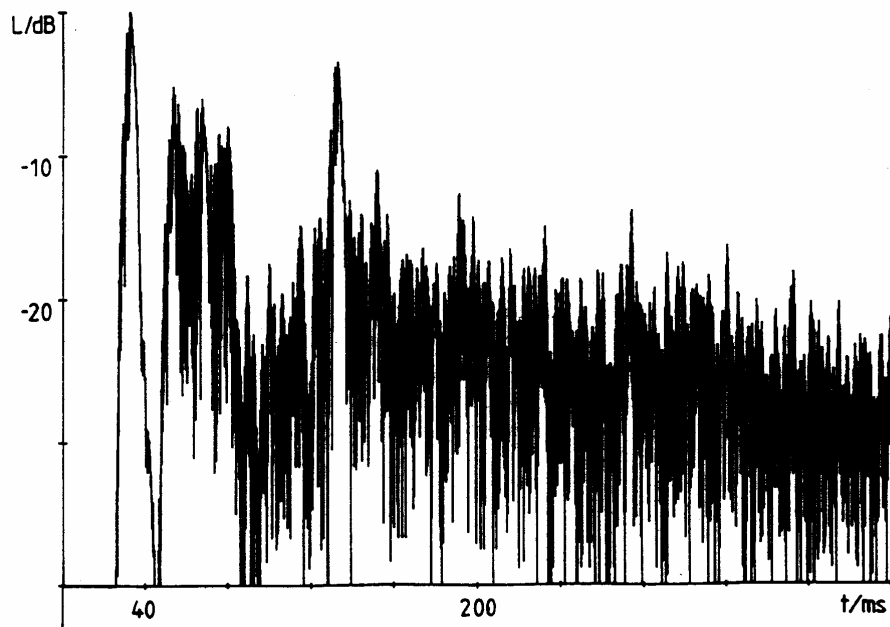


Abbildung 3 : Quadrierte Impulsantwort eines Raumes aus Testreihe 1



Als "Schlagzeug" wurde ein sogenannter Schlagzeugcomputer benutzt (Kawai R 50), was bei realistischem Klang (PCM- Samples "echter" Trommeln) eine einfache technische Handhabung und eine ausgezeichnete Reproduzierbarkeit zur Folge hat. Das Sprachmotiv wurde in reflexionsarmer Umgebung aufgezeichnet. Die Motive "Streicher" und "Jazz" wurden im Rahmen einer Konzertveranstaltung aufgezeichnet. Da die Aufnahmemikrofone nahe an den Instrumenten angebracht waren, ist die resultierende Nachhallzeit des Übertragungsraums sehr klein gegen die des simulierten.

2.2.5. Testreihe 1

Abbildung 2 zeigt die in der ersten Testreihe verwendeten Räume in Form eines sogenannten "stilisierten Reflektogramms". Hierbei wird keine gemessene Impulsantwort gezeigt, sondern eine idealisierte: Direktschall und Reflexionen, die in der Praxis eine endliche Dauer haben, werden durch Striche repräsentiert, vom Nachhall werden Einsatzpegel und Einhüllende gezeichnet, die den Nachhall bildenden diffus verteilten Reflexionen nur angedeutet. Diese Darstellung hat den Vorteil der guten Übersichtlichkeit gegenüber der Auftragung einer gemessenen Impulsantwort, wie sie in Abbildung 3 zu sehen ist. Darüberhinaus besteht die Möglichkeit, mehrere Räume in einem Diagramm darzustellen. Der Pfeil in Abbildung 2 deutet an, daß die (echokritische) Reflexion bei 100 ms in ihrer Stärke variiert wird und so die drei Räume der ersten Testreihe zustande kommen. Die Pegel dieser Reflexion sind - bezogen auf den Direktschall -

- 12,5 dB (Raum a1)
- 9 dB (Raum a2)
- 3,5 dB (Raum a3).

Betrachtet werden hierbei - wie bei der gesamten Echoanalyse - Impulsantworten bei oktavbreiter Anregung um die Mittenfrequenz 1000 Hertz. Die Reflexionen kommen alle aus halblinker Richtung, was durch die Angabe 45 Grad deutlich gemacht wird. Die anderen Komponenten des Raumes - Direktschall zur Zeit 0, frühe Reflexionen bei 20, 30 und 40 ms mit im Mittel -8 dB Pegel, Halleinsatz bei 50 ms mit zunächst -18 dB Pegel und Nachhallzeit 2 Sekunden (bei 1000 Hertz) - werden im Rahmen beider Testreihen nicht variiert, Vorversuche ergaben eine gute Eignung dieser Grundraumkonstellation, für die Hörversuche. Im Rahmen der ersten Testreihe wurden alle Motive in den selben Räumen angeboten, um zunächst grundsätzliches über die Echowahrnehmung zu erfahren. Tabelle 1 zeigt

die spezifischen Parameter der Räume zusammen mit der Auflistung der Anteile der Testhörer, die ein Echo zu hören angaben. Zur positiven Echobewertung sollte hierbei das Hören von einem Echo genügen, keineswegs mußte das Echo während des ganzen Motivs zu hören sein. Bei der Durchführung dieser ersten Testreihe zeigte sich bald, daß etwa die Abgrenzung der Begriffe "Echo" und "Hall" für viele Kandidaten schwierig ist; deshalb wurde im Vorspann des Hörtestbandes anhand von Beispielen versucht, den Testhörern die Problematik zu verdeutlichen.

TABELLE 1 : Positive Echobewertung bei Testreihe 1

Raum	a1	a2	a3
Verzögerungszeit ----- Millisekunden	100	100	100
Pegel / dB	-12,5	- 9	- 3,5
Jazz	8 %	14 %	53 %
Streicher	3 %	6 %	50 %
Sprache	14 %	44 %	92 %
Schlagzeug	53 %	75 %	89 %

Es stellt sich heraus, daß die Tendenzen - größere Pegel sollten zu vermehrter Echowahrnehmung führen - im Mittel sicher gehört werden, wenn auch Echos individuell sehr unterschiedlich wahrgenommen werden. Hierbei

spielt das Auflösungsvermögen des Gehörs sicher ebenso eine Rolle wie die akustisch- musikalische Vorbildung. Bei aller Vorsicht läßt sich nicht ganz ausschließen, daß die persönliche Prägung des Begriffs "Echo" von der gewünschten abweicht. Außerdem sollte man nicht außer acht lassen, daß die sinnliche Wahrnehmung des Menschen Schwankungen unterliegt. Konsequenz all dieser Eigenarten ist eine möglichst große Anzahl von Testpersonen, wobei die Aussagekraft der Untersuchung nicht verlorengehen darf. Deshalb wurde die Zahl der Motive auf 4, die der Räume auf 3 (bzw. 4) und die der Testreihen auf 2 beschränkt. Die Zahl der Teilnehmer der ersten Reihe war 36. Der Durchschnittshörer war (in beiden Testreihen) zwischen 20 und 30 Jahre alt, männlich und naturwissenschaftlich vorgebildet. Was die Motive angeht, so gab es auch hier deutliche Unterschiede: das Schlagzeugmotiv erwies sich als am echokritischsten, gefolgt von dem Motiv "Sprache", dahinter lagen "Jazz" und "Streicher" etwa gleichauf.

2.2.6. Testreihe 2

In Testreihe 2 wurden aufgrund der starken Motivabhängigkeit die Reflexionspegel an die Motive angeglichen. Darüberhinaus wurde die Abhängigkeit der Echowahrnehmung von der Reflexionsrichtung sowie zwei Mehrfachreflexionskonstellationen untersucht. Abbildung 4 zeigt die verwendeten Räume mit Einfachreflexionen. Sie liegen in beiden Fällen bei 140 Millisekunden; in einem Fall kommt der Rückwurf von ganz links (90 Grad), im anderen aus Direktschallrichtung (0 Grad). Abbildung 5 zeigt die Räume mit Dreifachreflexionen. Sie haben jeweils die Verzögerungszeiten 140, 150 und 160 Millisekunden; in einem Fall kommt die erste von links (90 Grad), die zweite aus der Mitte (0 Grad) und die dritte von rechts (-90 Grad); im anderen erreichen alle drei Reflexionen das Ohr des Zuhörers von links (90 Grad). Die Pegel der Reflexionen aus Abbildung 5 sind so gewählt, daß ihre Energiesumme in etwa der Energie der korrespondierenden Einzelreflexion entspricht.

Abbildung 4 : Testreihe 2 , verwendete Räume (1)

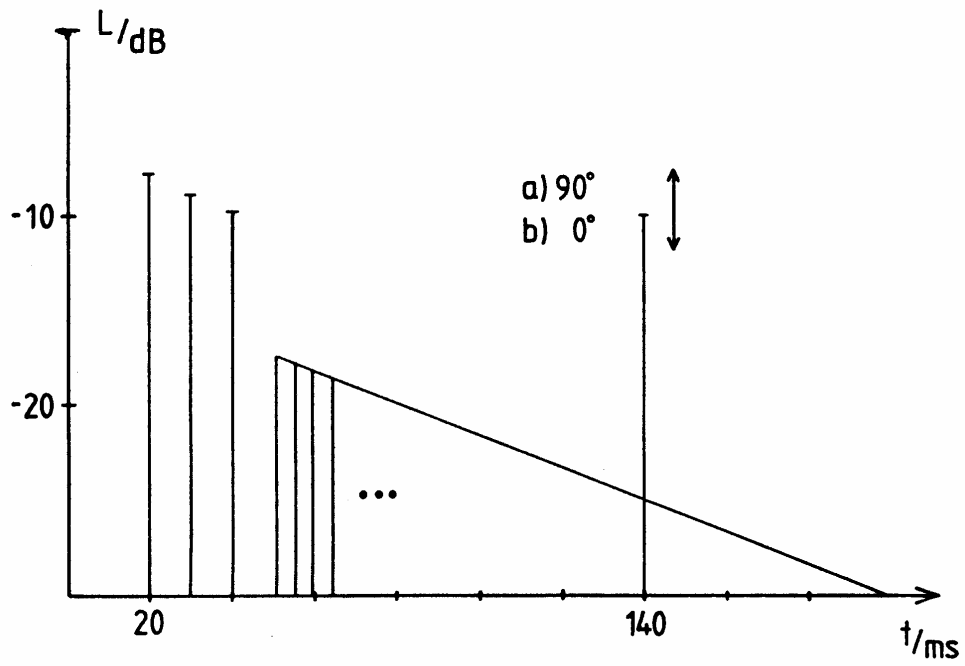


Abbildung 5 : Testreihe 2 , verwendete Räume (2)

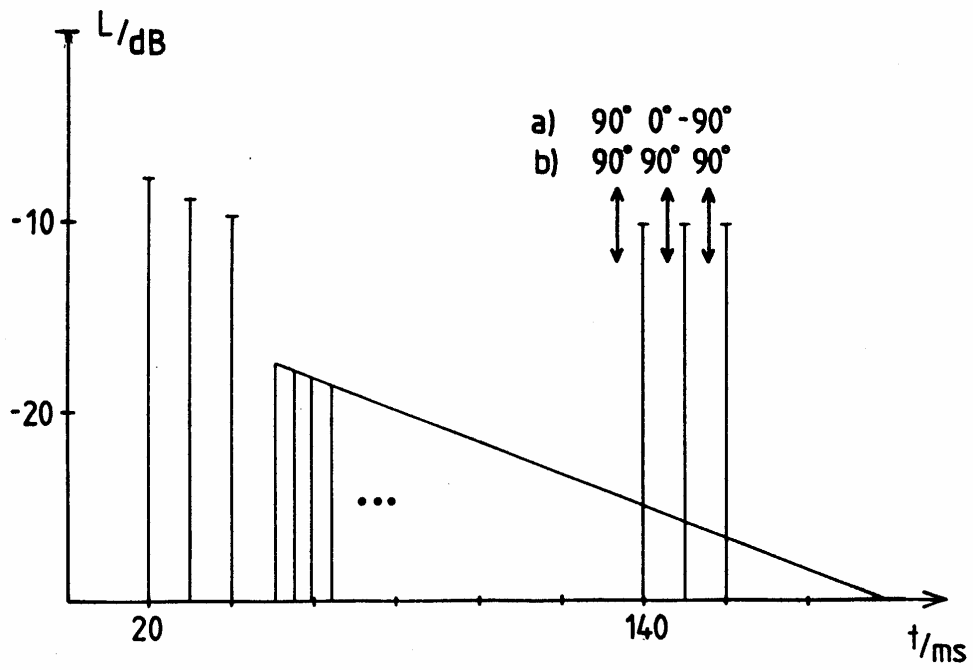


TABELLE 2 : Positive Echobewertung bei Testreihe 2

Raum	1 links	3 verteilt	3 links	1 Mitte
Verzögerungszeit(en)	140	140	140	140
-----		150	150	
Millisekunden		160	160	
Richtung(en)	links	links Mitte rechts	links links	Mitte
Jazz	36 %	12 %	12 %	16 %
Streicher	60 %	44 %	36 %	20 %
Sprache	72 %	32 %	36 %	12 %
Schlagzeug	84 %	64 %	56 %	96 %

Es zeigt sich, daß - unabhängig vom Motiv - eine seitliche Einzelreflexion echokritischer ist als die untersuchten Dreifachreflexionen und diese ihrerseits eher zur Echowahrnehmung führen als Einzelreflexionen aus der Mitte. Der Ausreißer beim Schlagzeug erklärt sich aus der Reihenfolge der Darbietung : nach den relativ echounkritischen Angeboten der Motive "Streicher" und "Jazz" gaben fast alle Testpersonen beim ersten Beispiel des Motivs Schlagzeug an, ein Echo zu hören. An dieser Stelle sei auch bemerkt, daß es aus apparativen Gründen schwierig war, die Pegel im Sinne von Energiegleichheit einzustellen, da aus zwei monofonen Impulsantworten zunächst durch energetische (quadratische) Addition eine resultierende Impulsantwort errechnet werden mußte. Nichtsdestoweniger läßt sich aus Tabelle 2 schließen, daß die Integrationszeit des Gehörs (bei Echowahrnehmung) kleiner als 10 Millisekunden ist. Im anderen Falle dürften die Zahlen der ersten Spalte nicht so deutlich über denen der dritten liegen. Während die Dreifachreflexion von links (wenn überhaupt) als Einzelwiederholung

wahrgenommen wurde, konnten zwei der 25 Teilnehmer der zweiten Testreihe bei der räumlich verteilten Dreierreflexion zwei Wiederholungen hören, eine von links und eine von rechts, und zwar beim Motiv Streicher. Dies bestätigt die Annahme, daß auch das Phänomen der Nachverdeckung von der Richtung des verdeckenden und der des möglicherweise verdeckten Schalls abhängt. Wie beim Ausreißer des Schlagzeugmotivs gesehen, ist die Reihenfolge der Darbietung bei Hörversuchen nicht unkritisch, da die Testpersonen dazu neigen, Paar- bzw. Gruppenvergleiche anzustellen, was im vorliegenden Fall nicht erwünscht, aber ebensowenig zu vermeiden ist wie der Effekt der Sensibilisierung der Testpersonen nach längerem Hören. Zum Phänomen der Nachverdeckung sei auf [6] verwiesen.

2.3. Einige Echokriterien

2.3.1. Tannenbaumkriterium

Dreht man die Schalldruck- Zeit- Funktion um 90 Grad, dergestalt, daß sich der Direktschall unten befindet, so besagt das Tannenbaumkriterium, daß dann keine Echoerscheinungen zu erwarten sind, wenn die Impulsantwort die Gestalt eines regelmäßig gewachsenen Tannenbaums aufweist. Ragen jenseits der Verwischungsschwelle einzelne Äste aus der erwarteten Struktur heraus - wie etwa in Abbildung 6, so muß man mit Echos rechnen. Dieses einfache Kriterium eignet sich kaum zur quantitativen Echoanalyse, wenn es auch bei der qualitativen Beurteilung von Impulsantworten durchaus nützlich sein kann. [7].

2.3.2. Echokriterium nach Yamamoto

Aus der Vielzahl der Echokriterien, bei denen eine Bewertungskurve über die Impulsantwort gelegt wird, deren Überschreiten Echoerscheinungen wahrscheinlich macht [5], sei das von Yamamoto herausgegriffen. Danach bleibt die Bewertungskurve über die logarithmisch aufgetragene quadratische Impulsantwort zunächst für

Abbildung 6 : Impulsantwort zur Verdeutlichung des Tannenbaumkriteriums

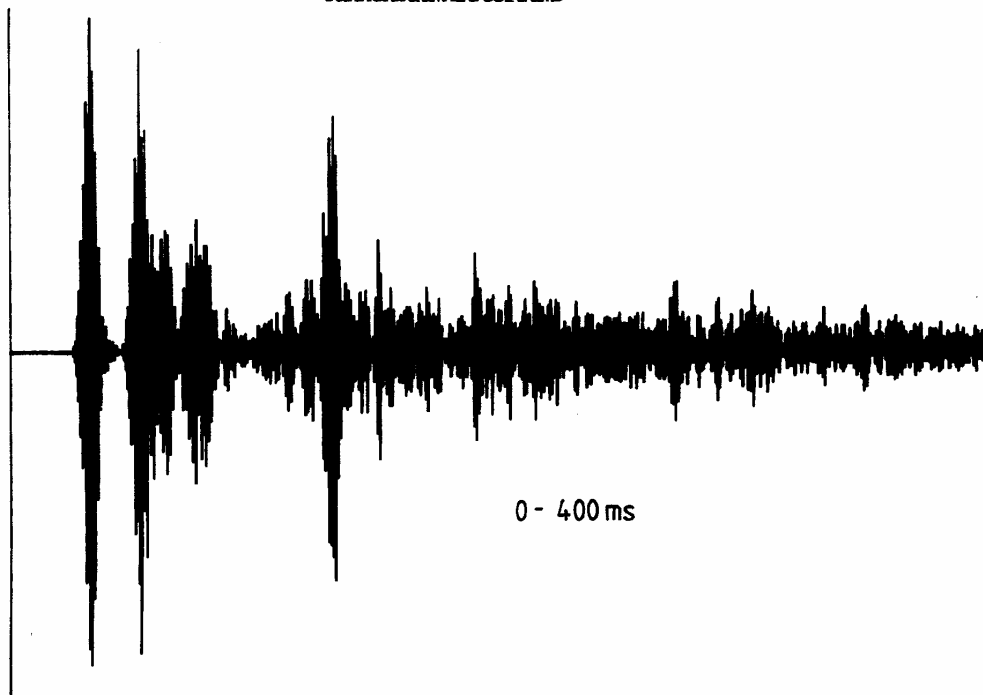
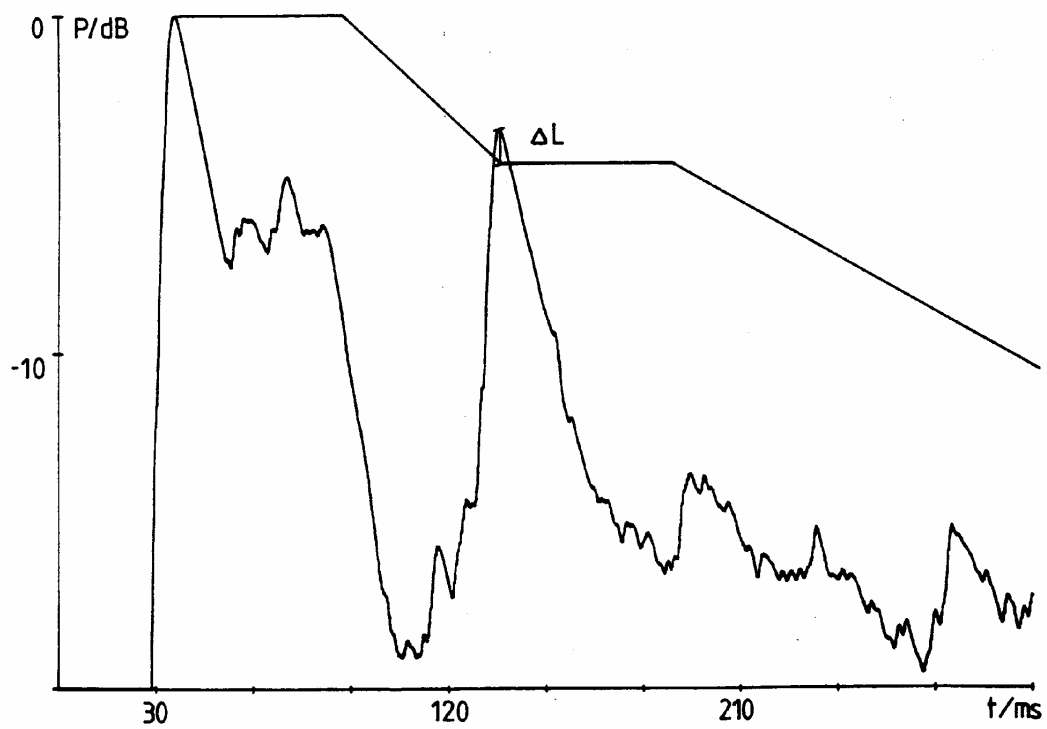


Abbildung 7 : Zum Echokriterium nach Yamamoto



eine gewisse Zeit konstant und fällt dann mit einer vom Direktschallpegel abhängigen Steigung ab, bis sie die Impulsantwort schneidet. Danach bleibt sie wieder konstant und fällt mit einer vom Reflexionspegel abhängigen Steigung ab, bis sie wieder die Impulsantwort schneidet und so weiter. Nach Yamamoto ist nun die größte Pegelüberhöhung L der Impulsantwort über der Bewertungskurve ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Echoerscheinungen. Abbildung 7 illustriert dieses Verfahren, das bisher nur für kurze, bandbegrenzte Rauschpulse erprobt wurde [8].

2.3.3. Autokorrelationsfunktion und "zeitliche Diffusität"

1965 wurde von Kuttruff vorgeschlagen, zur Detektion insbesondere von Flatterechos die Autokorrelationsfunktion der Impulsantwort zu bilden und den Wert des Hauptmaximums (im Falle einer normierten Autokorrelationsfunktion 1) zu dem des größten Nebenmaximums ins Verhältnis zu setzen. Diese Größe nannte er "zeitliche Diffusität"; eine kleine zeitliche Diffusität läßt Echoerscheinungen wahrscheinlicher erscheinen, wobei periodische Strukturen wie Flatterechos besonders gut erkannt werden können. Problematisch ist bei diesem Verfahren allerdings die Berücksichtigung der Verwischungsschwelle, da etwa ein Maximum der Autokorrelationsfunktion bei 10 ms sowohl von einer Reihe echounkritischer früher Reflexionen, als auch von Mehrfachreflexionen konstanten zeitlichen Abstandes bei über 100 ms stammen kann. Im ersteren Fall müßte die Erscheinung als unkritisch bewertet werden, im zweiten nicht unbedingt. Bei der Suche nach einem geeigneten Echokriterium wurde die Autokorrelationsfunktion als möglicher Weg in Betracht gezogen, doch liefert sie über den Grad der Periodizität hinaus für die Echoanalyse keine Informationen, die nicht auch aus der Impulsantwort selbst gewonnen werden könnten. [9].

2.4. Echokriterium nach Dietsch

Einen völlig neuen Weg zur Echoanalyse stellt das Kriterium nach Dietsch dar. Ausgehend von den in Kapitel 2.1. beschriebenen Tatsachen, insbesondere der Beobachtung, daß bei zunehmender Verzögerungszeit einer Reflexion relativ zum Direktschall der zur Echowahrnehmung erforderliche Reflexionspegel abnimmt, stellte er die an die Adiabatangleichung erinnernde Beziehung

$$t_v \cdot |p|_n = \text{constant} \quad (1)$$

mit t_v = Verzögerungszeit
 p = Schalldruck der Reflexion
 n = Bewertungsexponent

auf. Nun kennt man in der Schwerpunktzeit (vergleiche Kapitel 1.2.) eine Größe, die Zeit und Schalldruck von Reflexionen berücksichtigt. Die Schwerpunktzeit macht allerdings nur über alle Reflexionen eines Raumes als Gesamtheit eine Aussage. Dietsch definierte deshalb

$$t_s (\alpha) = \frac{\int_0^{\alpha} t \cdot E(t) dt}{\int_0^{\alpha} E(t) dt}$$

und nannte $t_s (\alpha)$ die "Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit"; ihr Wert an der Stelle α ist derjenige, den man für die Schwerpunktzeit erhalten würde, wenn $p^2(t)$ für $t > \alpha$ verschwinden würde; andererseits ist die Schwerpunktzeit der Grenzwert der Aufbaufunktion für t gegen unendlich. Um die Frage nach dem Bewertungsexponenten n in Gleichung (1) offen zu halten, wurde die Definition der Aufbaufunktion zu

Abbildung 8 : Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit

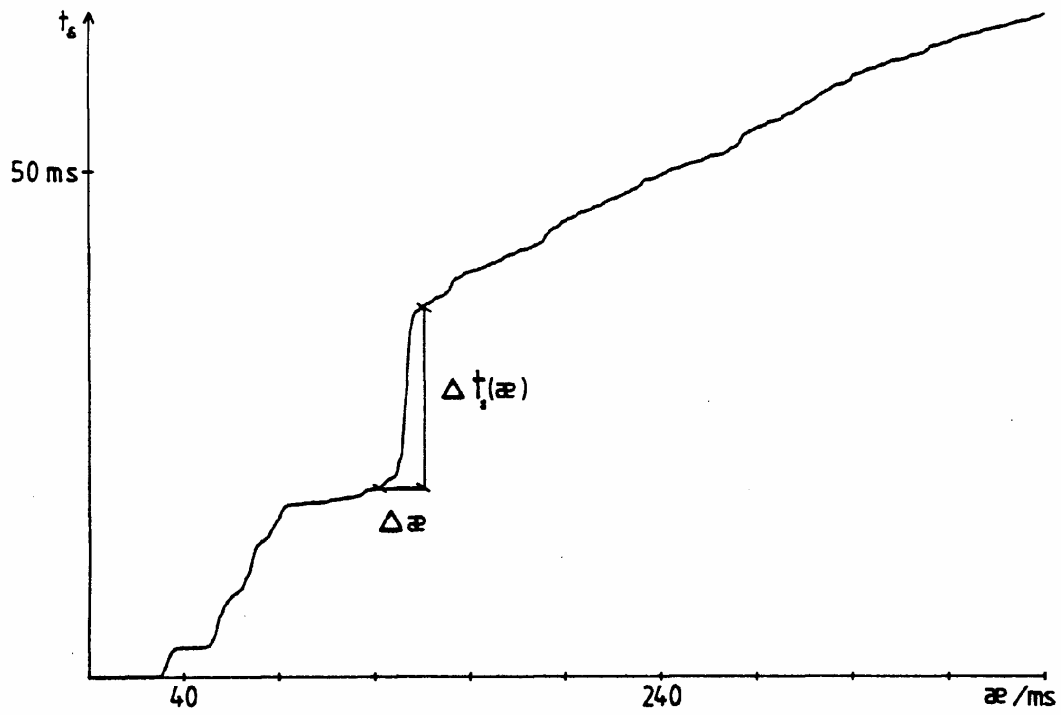
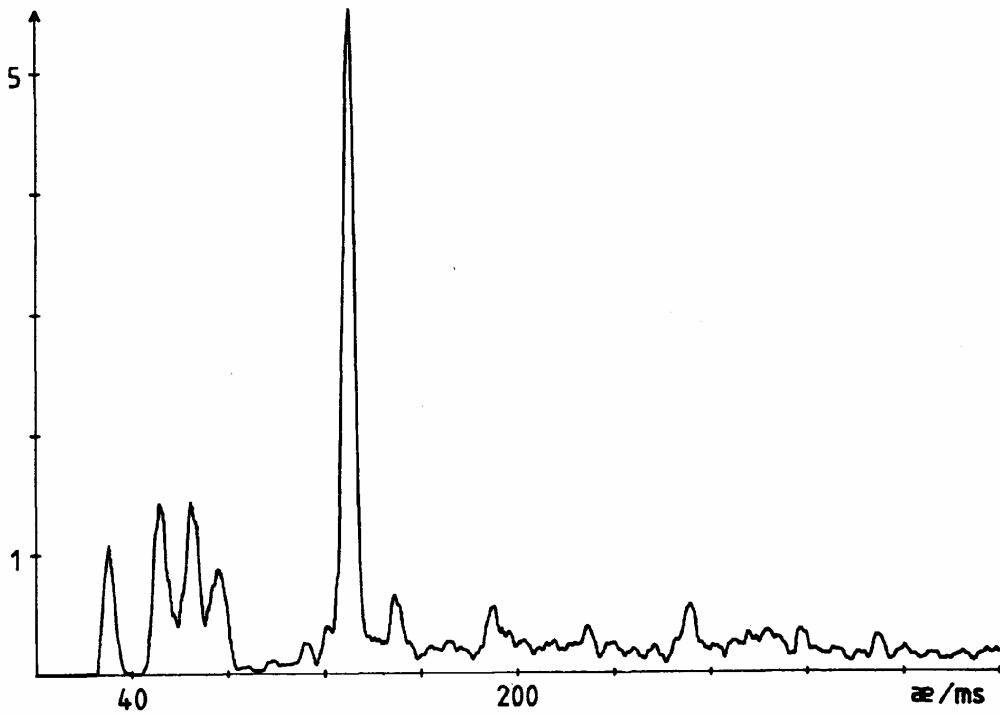


Abbildung 9 : EK : Funktion zur Ermittlung der "Echoanfälligkeit"



$$t_s(\alpha) = \frac{\int_0^{\alpha} t \cdot |p|^n(t) dt}{\int_0^{\alpha} |p|^n(t) dt} \quad (2b)$$

verallgemeinert. Abbildung 8 zeigt die Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit der Impulsantwort aus Abbildung 6 mit $n=2$. Man erkennt, daß sich die starke Reflexion bei 100 ms als schneller Anstieg der Aufbaufunktion bemerkbar macht. Die Änderung der Aufbaufunktion in einem Intervall von 5 ms Breite ist in Abbildung 9 dargestellt, und zwar bezogen auf die halbe Intervallbreite, eine Festlegung, die vom Autor aus darstellungstechnischen Gründen gewählt und beibehalten wurde. Das Kriterium von Dietsch besagt nun, daß das Maximum dieser Funktion EK unter der Nebenbedingung $\alpha >$ Verwischungsschwelle (Kapitel 2.1.) ein echokritisches Maß für Räume darstellt, in diesem Falle also

$$EK_{\max} = \text{Max} \left(\frac{2 \Delta t_s(\alpha)}{\Delta \alpha} \right) \quad (3)$$

mit $\alpha >$ Verwischungsschwelle, $\Delta \alpha = 5 \text{ms}$.

In diese Art der Echoanalyse geht die Gleichung (1) zugrundeliegende Tatsache ebenso ein wie zwischen Direktschall und echoverdächtiger Reflexion vorhandene, möglicherweise verdeckende Reflexionen. Sind solche Reflexionen nicht vorhanden, ist die Änderung der Aufbaufunktion größer; man betrachte etwa in Abbildung 8 das "Plateau" unmittelbar vor dem Anstiegsmaximum: wären hier noch stärkere Reflexionen vorhanden, würde die 100 ms- Reflexion einen schwächeren Anstieg der Aufbaufunktion bewirken. Ausführlich ist das Verfahren in [5] beschrieben.

Abbildung 10 : Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv : Sprache

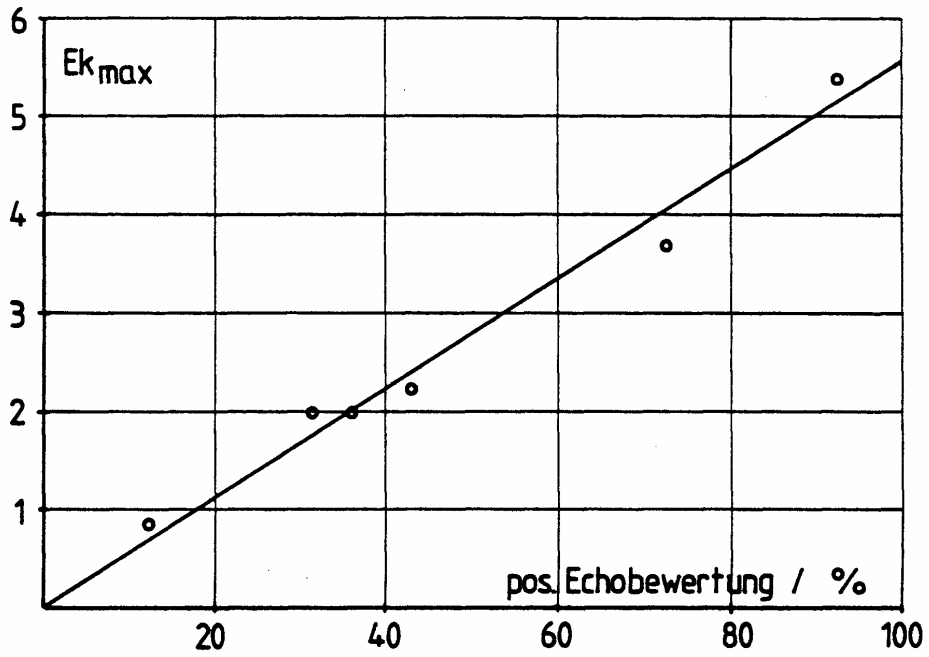


Abbildung 11 : Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv : Streicher

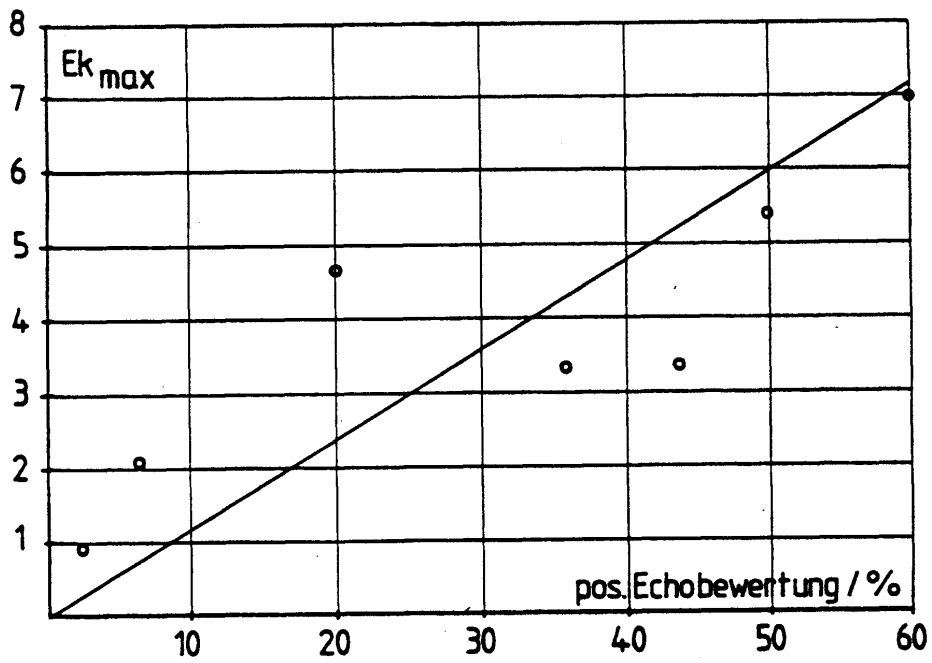


Abbildung 12 : Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv : Jazz

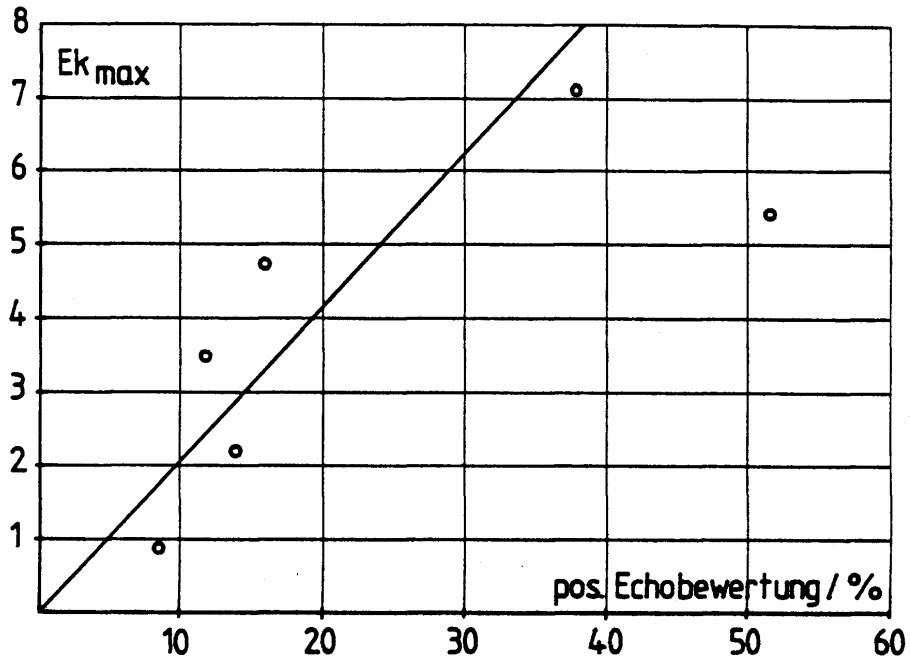
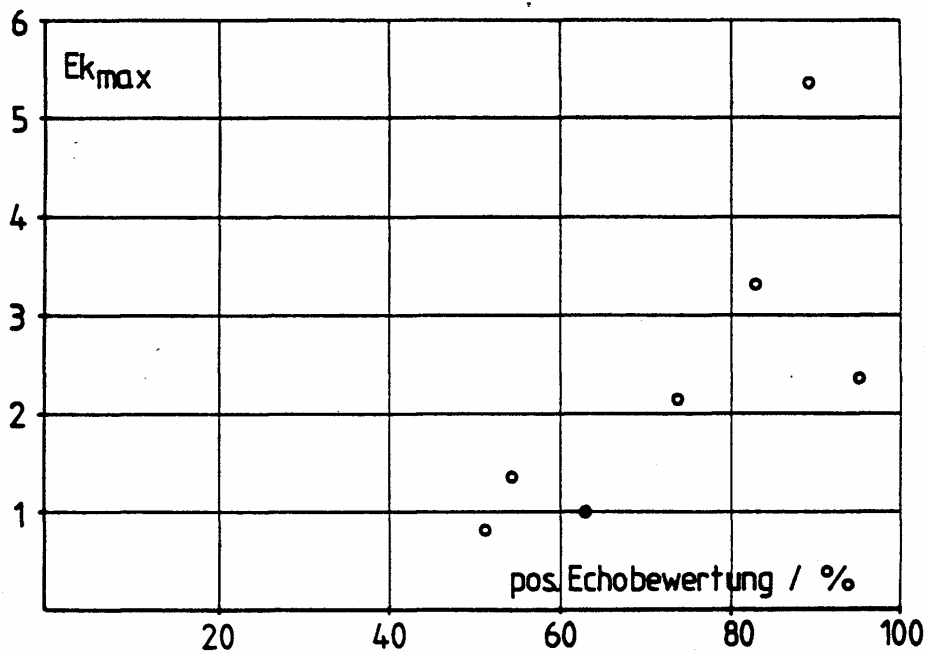


Abbildung 13 : Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv : Schlagzeug



2.5. Anwendung von Dietschs Kriterium auf Hörtests

Bei der Auswertung der Impulsantworten der bei den Hörtests verwendeten Räume wurden zunächst die EK_{\max} -Werte für verschiedene Werte von n (Bewertungsexponent) und $\Delta\alpha$ aufgelistet und gegen die Hörtestergebnisse aufgetragen, für jedes Motiv einzeln. Untersucht wurden zum einen die von Dietsch in [5] angegebenen Werte (Musik: $n=1$, $\Delta\alpha=14$ ms; Sprache: $n=2/3$, $\Delta\alpha=9$ ms), zum anderen verschiedene $\Delta\alpha$ -Werte (5,10,20 ms) bei $n=2$ für Musik und Sprache gleich. Eine Voruntersuchung erbrachte, daß die von Dietsch getroffene Unterscheidung von Musik und Sprache bei n und $\Delta\alpha$ nicht nötig ist, da die beiden Wertepaare keine deutlich unterschiedlichen Ergebnisse liefern. Weiter waren Dietsch's Vorschläge nicht in der Lage, Räume zu unterscheiden, deren Bewertungen weit auseinander lagen (Größenordnung: 20%). Physikalisch scheint ein Bewertungsexponent von 2 sinnvoll, zumal die Hypothese der energetischen Addition bereits in die Bestimmung der resultierenden Impulsantwort des stereofonen Systems gesteckt wurde. Nach den qualitativen Ergebnissen der 2. Testreihe war zu erwarten, daß ein $\Delta\alpha$ -Wert kleiner 10 ms die besten Ergebnisse liefern würde. Diese Erwartung wurde bestätigt, so daß für die weitere Auswertung

$n=2$ und $\Delta\alpha=5$ ms

gesetzt wurde. In Abbildung 10 bis 13 sind die Ergebnisse der Auswertung der Impulsantworten gegen die der Hörtests für das jeweilige Motiv aufgetragen.

Für das Motiv "Sprache" liegen die Messpunkte fast auf einer Geraden (Abbildung 10), so daß sich leicht angeben läßt, bei welchem Wert EK_{\max} des Raumes bei wieviel Prozent der Hörer Echoerscheinungen zu erwarten sind. Die sogenannte Unsicherheitsschwelle, der Wert, bei dem 50% der Hörer ein Echo hören, liegt etwa bei 2,8.

Beim Motiv "Streicher" (Abbildung 11) ergibt sich ebenfalls ein in etwa linearer Zusammenhang zwischen Hörtests und Auswertung der Impulsantwort. Die Unsicherheitsschwelle liegt bei 6.

Das Motiv "Jazz" stellte sich in der zweiten Testreihe als deutlich echounkritischer als das Motiv "Streicher" heraus (vergleiche Tabelle 2), es wurden - mit einer Ausnahme, bei der es sich höchstwahrscheinlich um einen reihenfolgebegünstigten Ausreißer handelt - nur Prozentzahlen der positiven Echobewertung kleiner als 40 erzielt. Eine Aussage über die Unsicherheitsschwelle scheint etwas gewagt, sie würde bei linearer

Extrapolation etwa bei 11 liegen. Da die Räume vor Beginn der Hörtests festgelegt wurden, war ein späterer Zugriff nicht mehr möglich; mit besser angepaßten Räumen müßte es möglich sein, signifikantere Ergebnisse für dieses Motiv zu erzielen. Wegen seines offensichtlich relativ unkritischen Verhaltens Echos gegenüber wurde auf Durchführung einer weiteren Reihe verzichtet. Es dürfte selten vorkommen, daß ein Raum ausschließlich zur Darbietung derart echounkritischer Musik konzipiert wird; im anderen Fall müßte man sich an den Werten der kritischeren Motive orientieren. Ergebnisse finden sich in Abbildung 12.

Bei den Ergebnissen des Motivs "Schlagzeug" (Abbildung 13) zeigen sich Grenzen der Aussagekraft, die aus der verwendeten Apparatur resultieren. Bei dem verwendeten Hallgerät zeigte sich nämlich insbesondere beim Schlagzeugmotiv ein sogenanntes "Shattern", ein rasselndes Geräusch, das sich von einem Echo kaum unterscheiden läßt. Bei musikalischen Anwendungen umgeht man diese Schwäche, indem man den Halleinsatzpegel absenkt und die Nachhallzeit verlängert, was einen ähnlichen subjektiven Halleindruck entstehen läßt, die Realitätsbezogenheit der Impulsantwort für die hier beschriebene Anwendung aber total infrage stellt. Für eine echte "worst-case"- Analyse reicht das verwendete Gerät nicht aus. Eine Aussage über die Unsicherheitsschwelle ist nicht möglich. Wegen der beschriebenen apparativen Schwäche ist auch bei den anderen Motiven Vorsicht geboten, wenn man die Ergebnisse auf den Bereich kleiner Prozentzahlen ausdehnen will, der genannte Mangel kann sich hier besonders bemerkbar machen.

Das hier vorgestellte und erprobte Verfahren zur Echoanalyse beschreibt die menschliche Echowahrnehmung auch quantitativ gut. Zur Optimierung des Verfahrens sind weitere umfangreiche Tests - insbesondere in realen Räumen - nötig, zumal die Aussagen für jede Gruppe von Motiven anders sind. Als echokritischer Parameter für Motive, beziehungsweise Motivgruppen, wird der Wert EK_{max} desjenigen Raumes vorgeschlagen, bei der ein zugelassener Prozentsatz (etwa 10 oder 50, je nach dem) der Hörer Echoerscheinungen wahrnehmen; diese Größe könnte man die "Echofestigkeit" der Motivgruppe nennen (innerhalb einer Gruppe ist stets das echokritischste Motiv zur Bewertung heranzuziehen, Beispiele für Motivgruppen : sinfonische Werke, Jazz- und Rockmusikstücke, Sprache).

Nennt man das EK_{\max} des untersuchten Raumes die "Echoanfälligkeit" des Raumes, so läßt sich als Bedingung für die "relative Echofreiheit" (abhängig vom zugelassenen Prozentsatz) der Darbietung des Motivs in dem Raum die einfache Forderung

$$\begin{array}{lcl} \text{"Echofestigkeit"} & > & \text{"Echoanfälligkeit"} \\ (EK_{\max} [\text{Motiv}] & > & EK_{\max} [\text{Raum}]) \end{array}$$

angeben.

Bei der Organisation der Hörtests zur Bestimmung der Echofestigkeit stellt sich die Frage, wer als Testperson infrage kommt. Die Beantwortung dieser Frage ist nicht einfach und nie ganz frei von Willkür. Bei den beschriebenen Hörversuchen stellte sich heraus, daß des Klavierspielens mächtige Personen beim Motiv "Jazz" tendenziell empfindlicher waren als andere, ähnliches gilt für Geiger beim Motiv "Streicher". Wenn man also etwa nur Musiker oder musikalisch gebildete Testhörer zulassen will, muß man noch zwischen Geigern und Nichtgeigern unterscheiden und so weiter. Da scheint es doch sinnvoller, zu versuchen, die Zusammensetzung eines "Standardpublikums" zu erreichen, also auch Nichtmusiker zuzulassen, wenn sie in der Lage sind, die angebotenen Beispiele im Sinne der Aufgabenstellung zu bewerten.

2.6. Raumakustischer Parameter "Echoanfälligkeit"

Der in Gleichung (3) als EK_{\max} definierte raumakustische Parameter "Echoanfälligkeit" reiht sich nahtlos in die Liste der in Kapitel 1.2. beschriebenen Parameter ein; er hängt nur von der Impulsantwort ab und beschreibt wie gefordert das Verhalten eines Raumes in Bezug auf Echoerscheinungen, wenn er auch die Richtung einer Reflexion nicht berücksichtigt, falls man - wie üblich - die Impulsantwort mit einem Mikrophon mit Kugelcharakteristik mißt. Eine Richtungsabhängigkeit ließe sich mit einer Richtmikrofonanordnung erzielen, für die eine geeignete Charakteristik erst noch zu bestimmen wäre.

Die "Echoanfälligkeit" läßt sich grundsätzlich für beliebige Impulsantworten berechnen. Bei der quantitativen Auswertung der Hörtests wurden oktavbreite Impulsantworten der Mittenfrequenz 1000 Hertz betrachtet. Bei Voruntersuchungen hatte sich gezeigt, daß man für 500, beziehungsweise 2000 Hertz Mittenfrequenz ähnliche Ergebnisse erhält wie bei 1000 Hertz. Im tieferen Bereich ist eine Analyse zwar möglich, doch läßt die Dauer des Anregungsimpulses von zirka 60 ms bei 125 Hertz die Aussagekraft der Ergebnisse fraglich erscheinen. Bei einer akustischen Messung verlängert sich diese Dauer noch aufgrund des Schwingungsverhaltens der Lautsprecher. Phänomene wie Verdeckung von hohen Stimmen durch tiefe werden bei der 1000-Hertz-Oktavanalyse nicht berücksichtigt. Hierfür wäre eine geeignet gewichtete Breitbandmessung erforderlich oder eine passende Verknüpfung der Ergebnisse vieler Frequenzbänder. Bei letzterer Methode hätte man es erneut mit dem Problem der zeitlichen Länge der Pulse tiefer Frequenzbänder zu tun.

Der angegebene Parameter beschreibt das Echoverhalten des Raumes unabhängig von der Art des Signals; wegen der unterschiedlichen Verwischungsschwellen für Musik und Sprache müßten allerdings eigentlich zwei Werte angegeben werden, wenn das EK_{\max} zwischen 50 und 80 ms liegt; davon wird bei der Angabe der "Echowerte" im Rahmen der nun zu untersuchenden Messung und Computersimulation abgesehen. Stattdessen wird die Zeit angegeben, bei der das Maximum auftritt. Die Unterscheidung "Musik" und "Sprache" für die Angabe der Verwischungsschwelle ist etwas unbefriedigend, die Abhängigkeit derselben vom Signal läßt sich so nur grob erfassen; andererseits möchte man aber das ganze Thema "Echo" im Sinne eines einheitlichen Kriteriums durch einen Wert beschreiben. Mit einer angenommenen Verwischungsschwelle von 50 Millisekunden liegt man da auf der sicheren Seite.

Abbildung 14 : Meßapparatur

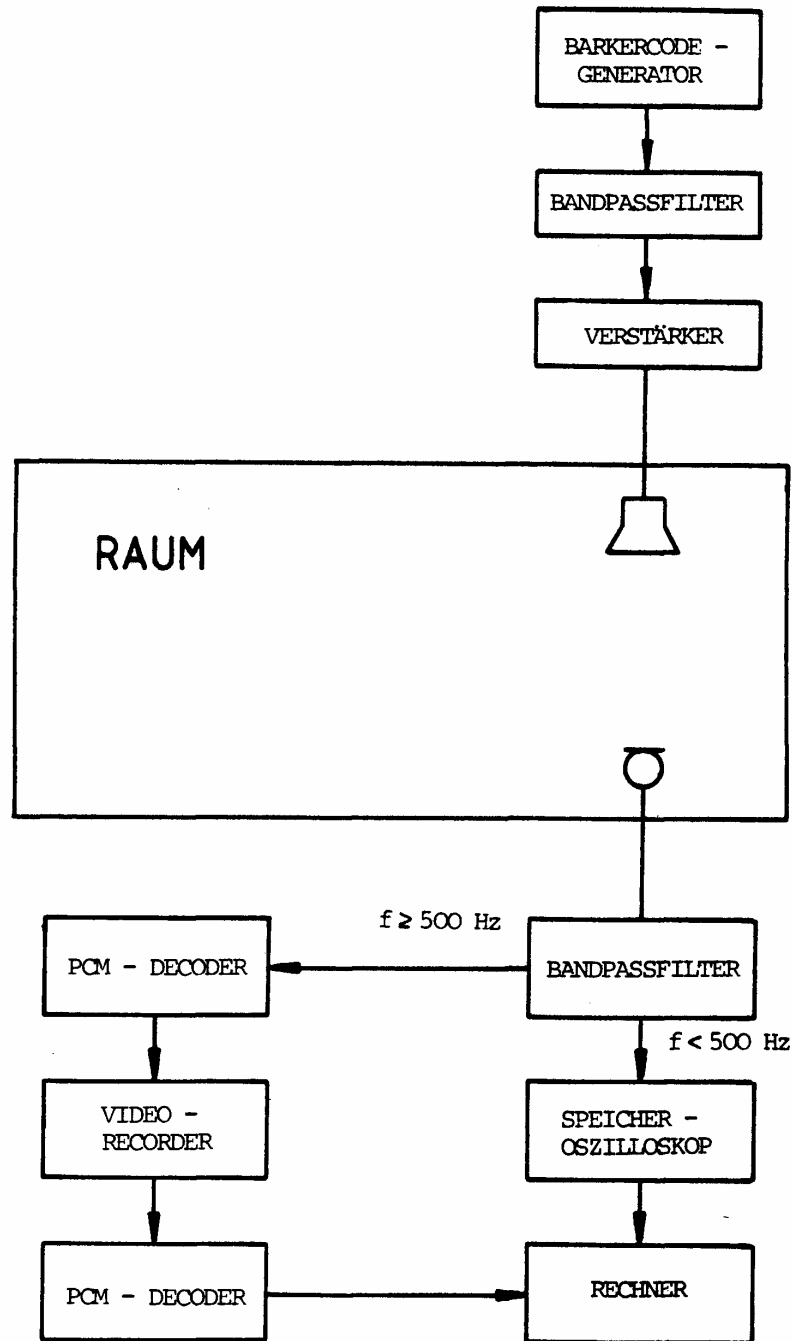
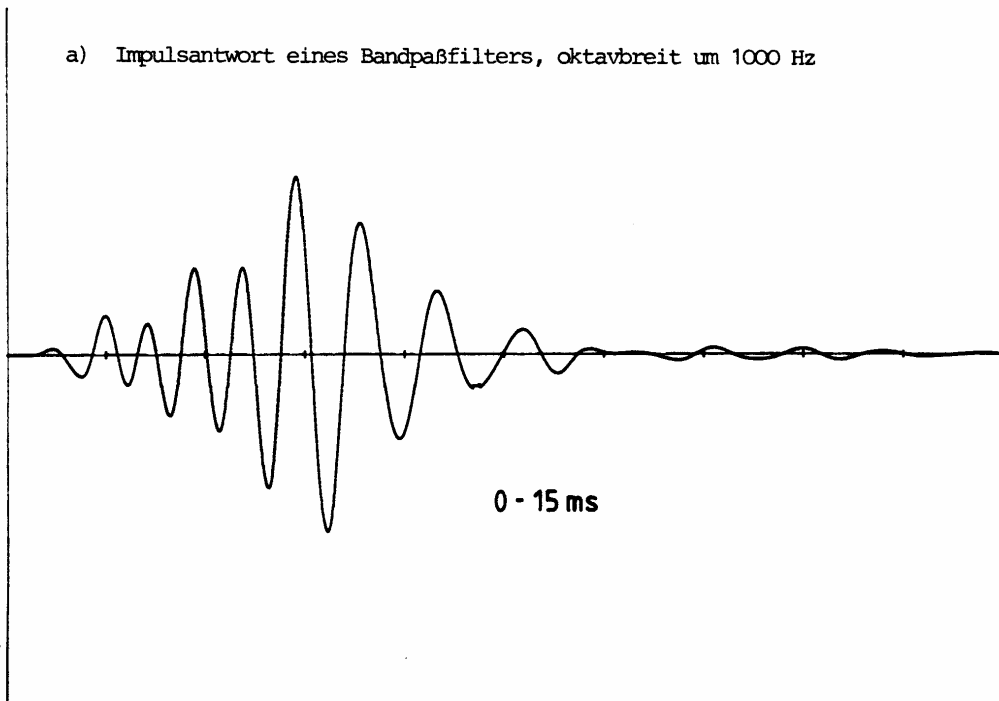


Abbildung 15

a) Impulsantwort eines Bandpaßfilters, oktavbreit um 1000 Hz



b) Spektrum von a)

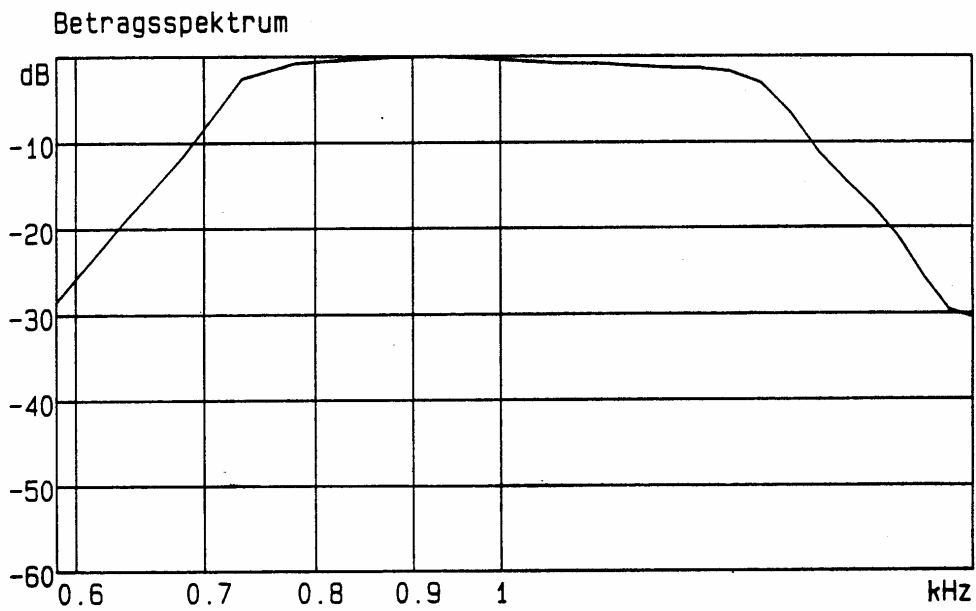
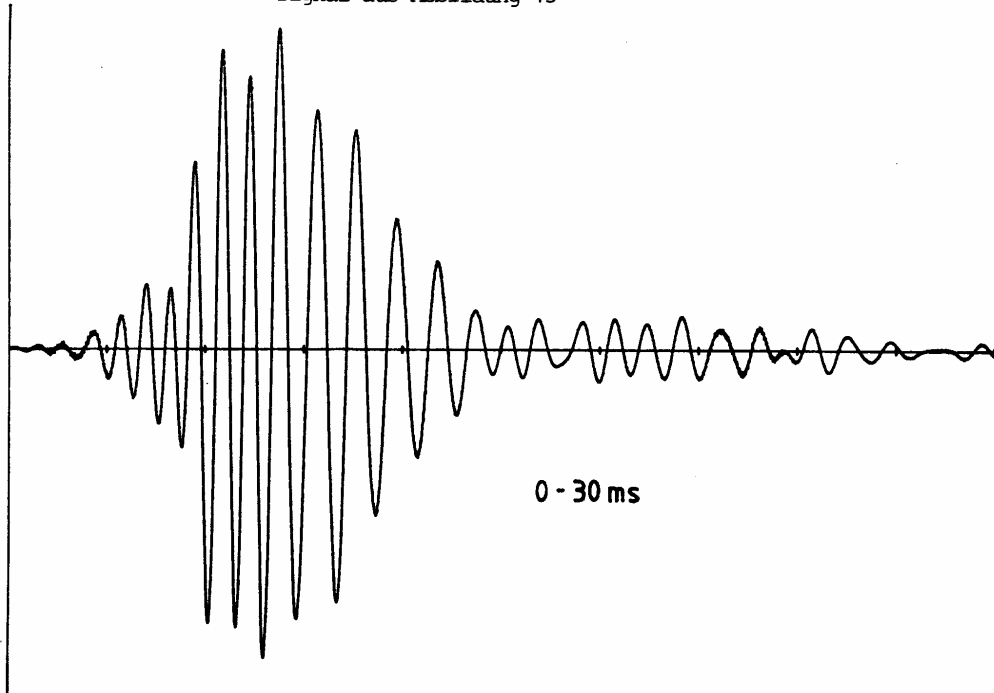
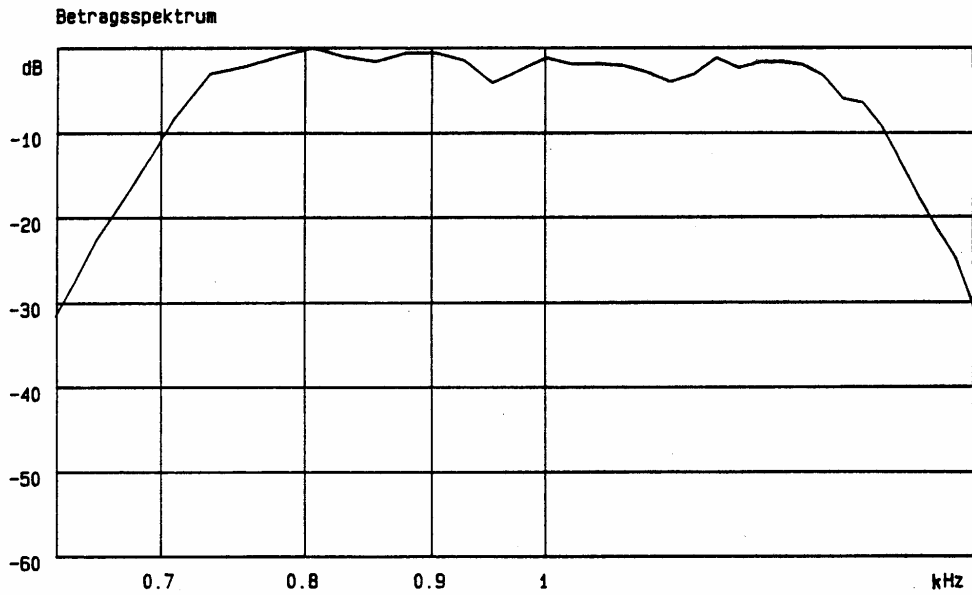


Abbildung 16

a) Impulsantwort des Lautsprechersystems, angeregt durch das Signal aus Abbildung 15



b) Spektrum von a)



3. Messung

3.1. Meßapparatur

Abbildung 14 zeigt die für die Impulsantwortmessung nötige Apparatur. Das vom Barkercodegenerator erzeugte Signal wird auf ein Bandpaßfilter gegeben - ein barkercodiertes Signal wird benutzt, um mehr Leistung am Ausgang des Filters zu erhalten, die Form des hieraus resultierenden Signals ist die gleiche wie bei Anregung mit einem Rechteckpuls. Abbildung 15 zeigt diese Stoßantwort des Bandpaßfilters für die Oktav um 1000 Hertz, sowie ihr Spektrum, bei anderen Mittenfrequenzen ändert sich lediglich die Zeitskala. Aus dem Bandpaßfilter gelangt das Signal zum Leistungsverstärker, von dort zu einer Lautsprecheranordnung bestehend aus einem Würfel mit je einem 15-Zoll-Tieftöner auf jeder Fläche, einem Dodekaeder mit je einem Mitteltöner auf jeder Fläche und einem Dodekaeder mit je einem Hochtöner auf jeder Fläche. Mit dieser Anordnung wird ein gutes Rundstrahlverhalten bis mindestens 3000 Hertz erzielt, man will ja nach Möglichkeit ungerichtete Abstrahlung des Schalls erzielen. Das die Lautsprecheranordnung verlassende Signal, welches die Stoßantwort der Sendeseite der Messung und damit das akustische Anregungssignal darstellt, ist für die 1000-Hertz-Oktav in Abbildung 16 dargestellt, ebenso das zugehörige Spektrum. Man erkennt, daß es eine deutlich längere Dauer hat als die (elektrische) Stoßantwort des Filters, was aus dem Schwingungsverhalten der Lautsprecher resultiert. Die Messung erfolgt in Oktaven mit den Mittenfrequenzen 125, 250, 500, 1000, 2000 und 4000 Hertz; eine breitbandige Messung erwies sich als nicht durchführbar, da bei breitbandiger Anregung kein hinreichend glattes Spektrum und kein ausreichender Störspannungsabstand erzielt werden konnte.

Empfangsseitig wird das ankommende akustische Signal von einem Mikrofon mit kugelförmiger Richtcharakteristik, beziehungsweise achtförmiger Charakteristik (nur für Seitenschallgrad: eine Messung erfolgt mit der empfindlicheren Seite in Signalrichtung, die andere um 90 Grad dazu gedreht) aufgenommen und umgewandelt, es folgt zur Vergrößerung des Störspannungsabstands eine weitere Bandpaßfilterung der gleichen Art wie auf der Sendeseite. Das hieraus resultierende Signal wird dem auch für die Echountersuchungen benutzten Speicheroszilloskop (Nicolet 1090 A) zugeführt, im Falle hoher Frequenzen zusätzlich mithilfe eines PCM-Decoders (Sony PCM F1) digital auf Videoband aufgezeichnet. Die im Oszilloskop gespeicherte Messung wird zur weiteren Verarbeitung - das bedeutet zunächst residentes Abspeichern - an den Rechner übergeben. Die zusätzliche Aufzeichnung des Signals auf Band ist erforderlich, da die Speichertiefe des Oszilloskops (4096 Werte) für hohe Frequenzen nicht

ausreichend ist. Zur Berechnung der Early Decay Time ist es nötig, die Impulsantwort bis etwa zur halben Nachhallzeit auszuwerten (Abbildung 17, berechnet für ein ideales Diffusfeld), andererseits muß man das Signal nach Shannon mit mindestens dem Doppelten der höchsten vorkommenden Frequenz abtasten. Diese Bedingungen ließen sich mit dem verwendeten Oszilloskop in dem gemessenen Raum nicht gleichzeitig erfüllen.

3.2. Ablauf der Messung und Meßprogramm

Zunächst sei die Seitenschallgradmessung beschrieben. Man benötigt dazu ein Mikrofon mit einer achtförmigen Richtcharakteristik oder besser zwei solcher Mikrofone, die so ausgerichtet werden, daß ihre Charakteristiken senkrecht zueinander verlaufen. Abbildung 18 zeigt die Anordnung der Mikrofone relativ zur Schallquelle : im Fall a) wird die Messung aufgenommen, aus der sich der Nenner des Seitenschallgrades errechnen läßt, Fall b) erlaubt die Bestimmung des Zählers (siehe Kapitel 1.2.). Zunächst wird also in Direktschallrichtung gemessen (Fall a), die Messung zum Rechner geschickt und der Anfangspunkt der Integration bestimmt, nämlich der Zeitpunkt, wo der Direktschall beginnt. Dann wird aus der gleichen Messung der Nenner des Seitenschallgrades durch Quadrieren und Summieren des Bereichs zwischen 0 und 80 Millisekunden bestimmt. Aus der zweiten Messung läßt sich analog der Zähler bestimmen, wobei der Integrationsanfang aus Fall a) benutzt wird. Sämtliche so berechnete Seitenschallgrade werden vom Meßprogramm in einer Datei abgespeichert.

Bei der Messung wurde eine Mikrofonanordnung mit zwei Wandlern der Firma Neumann (Typ SM 69) verwendet, deren Richtcharakteristiken sich umschalten lassen; die Empfindlichkeiten beider Wandler bei gleich gerichteter Achtcharakteristik wurde überprüft und für hinreichend gleich befunden. Für die im folgenden beschriebene Impulsantwortmessung mit Kugelcharakteristik wurde das obere Mikrofon benutzt.

Während der Seitenschallgrad gleich am Meßort bestimmt und abgespeichert wird, wird die mit ungerichtetem Mikro aufgezeichnete .pa ..

Abbildung 17 : Integrierte Impulsantwort in Abhängigkeit von der Abbruchzeit

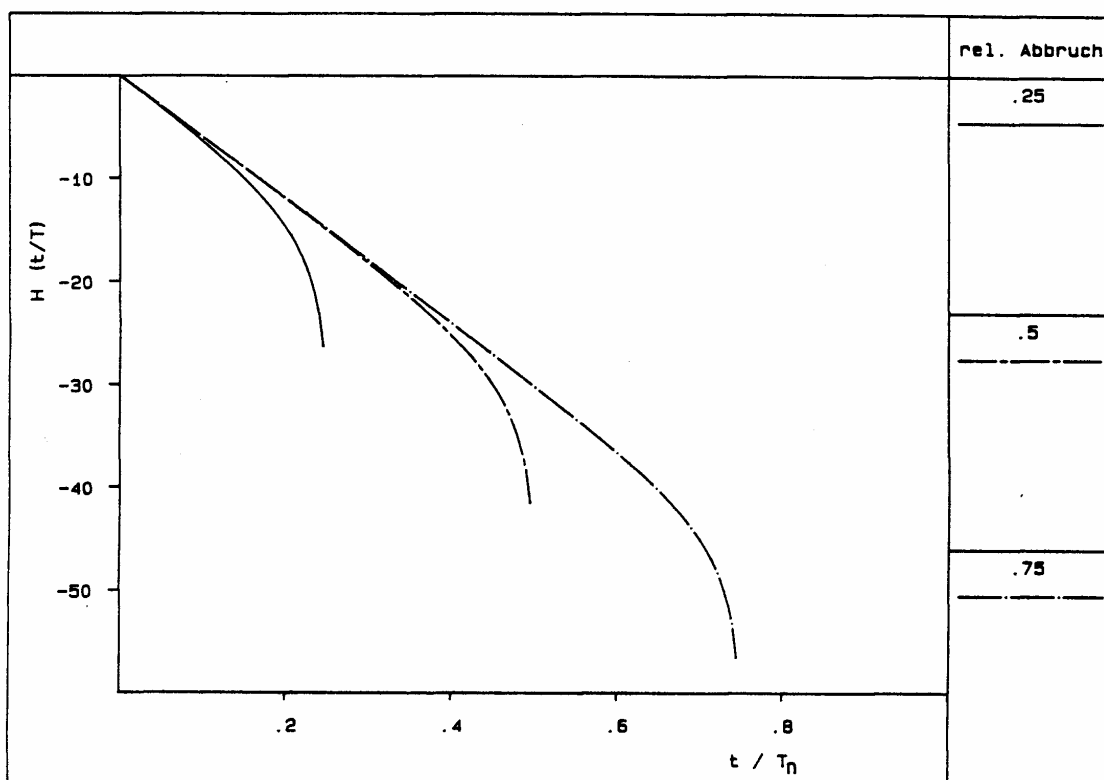
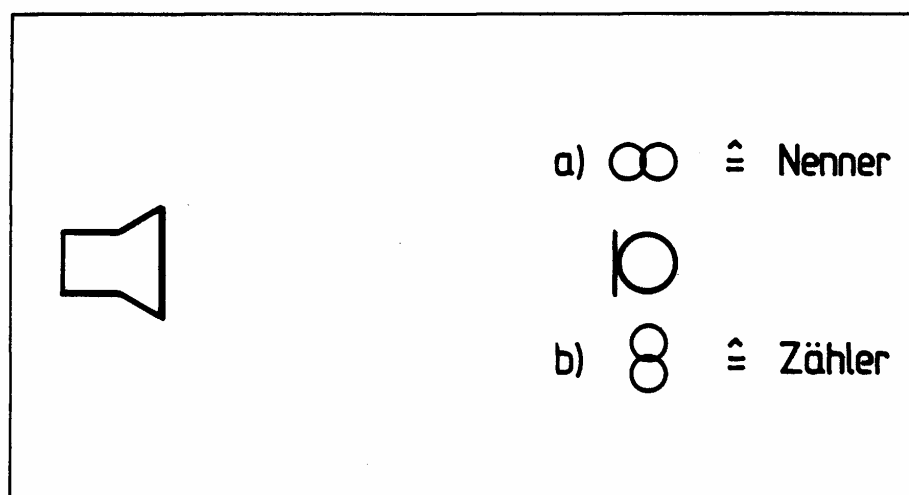


Abbildung 18 : Seitenschallgradmessung : Ausrichtung der Mikrofone



Impulsantwort zusammen mit einigen eingestellten Werten des Speicheroszilloskops auf entsprechende Datenträger (Disketten oder Festplatte) abgespeichert. Eine weitere Funktion des Meßprogramms erlaubt es, zur Überprüfung der Messung die Impulsantwort selbst, also die Schalldruck- Zeit- Funktion, die quadrierte Impulsantwort, also die Energie- Zeit- Funktion, und die Integrierte Impulsantwort gegebenenfalls auszurechnen und darzustellen. Eine eventuelle Übersteuerung des Oszilloskops wird bereits beim Datentransfer zum Rechner bemerkt und akustisch angezeigt. Die Integrierte und die quadrierte Impulsantwort können linear und logarithmisch dargestellt werden, bei der quadrierten besteht zusätzlich die Möglichkeit einer gewichteten Glättung. Näheres dazu in Kapitel 4.1.

Eine Berechnung und Speicherung der raumakustischen Parameter ist ebenfalls bereits unmittelbar im Anschluß an die Messung möglich, allerdings - wie bereits angedeutet - nur für tiefe Frequenzen sinnvoll. Des weiteren besteht die Möglichkeit, eine bereits abgespeicherte Messung vom Datenträger einzulesen und weiterzuverarbeiten.

Das zur Echoanalyse verwendete Programm basiert auf dem oben beschriebenen Meßprogramm; die Seitenschallgradberechnung und -verarbeitung entfällt, dafür besteht die Möglichkeit der Berechnung und Darstellung

- a) der Autokorrelationsfunktion
- b) der Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit (Abbildung 8)
- c) der Funktion EK (Abbildung 9) .

Tabelle 3 zeigt die Funktionen der beiden Programme auf einen Blick. Flußdiagramme aller wichtigen im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Programme finden sich in Anhang B.

TABELLE 3 : Meßprogramm und Echoanalyseprogramm

<u>Meßprogramm</u>	<u>Echoanalyseprogramm</u>
Seitenschallgradberechnung und -speicherung, bereits gespei- cherter Seitenschallgrade	Berechnung und Darstellung der Autokorrelationsfunktion, Einlesen sowie der Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit mit ver- änderbarem Bewertungs- exponenten und deren Veränderung in wählbarem Zeitintervall

gemeinsame Funktionen :

- Datentransfer von Speicheroszilloskop
mit Übersteuerungsprüfung
- Einlesen von Diskette oder Platte
- Abspeichern auf Diskette oder Platte
- Graphische Darstellung der Impulsantwort
- Berechnung und Darstellung der quadrierten und der
Integrierten Impulsantwort, linear oder logarithmisch
- gewichtete Glättung der quadrierten Impulsantwort
- Berechnung und Speicherung der raumakustischen Parameter
- Ausgabemöglichkeit sämtlicher Grafiken auf
Bildschirm, Drucker und Plotter

Eine impulsantwortweise Auswertung der Messung ist also mit dem Meßprogramm möglich. Um die Parameterberechnung zu automatisieren, wurde ein weiteres Programm geschrieben. Man gibt die Namen der auszuwertenden Meßplätze ein; diese werden in eine Datei geschrieben und nach Aufruf der Auswertungsfunktion nacheinander abgearbeitet, indem die zu jedem Meßplatz gehörigen Impulsantworten, sowie die dazu gehörigen Seitenschallgrade, nacheinander eingelesen und die raumakustischen Parameter berechnet und abgespeichert werden.

Bevor die auf Band aufgezeichneten Impulsantworten in der oben beschriebenen Weise ausgewertet werden können, ist es notwendig, sie mit einem Analog - Digitalwandlersystem abzutasten und das Ergebnis in eine für Meß- und Auswertungsprogramm lesbare Form zu bringen. Im Falle der

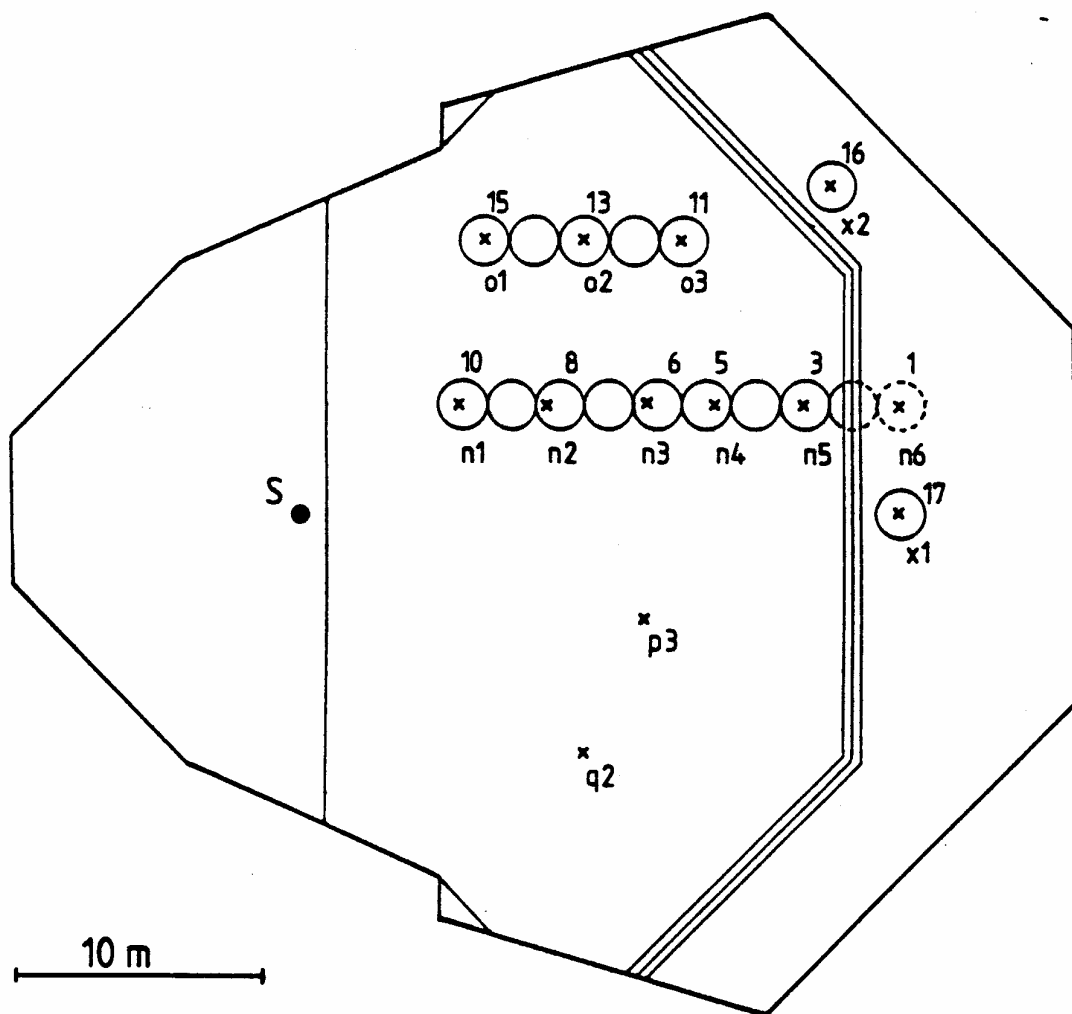
beschriebenen Messung wird dies mit dem ILS- Softwarepaket, sowie einem selbstgeschriebenen Konvertierungsprogramm erreicht. Mithilfe des ILS wird die Aufnahme zunächst digitalisiert und abgespeichert. Die Abtastfrequenz beträgt dabei konstant 25000 Hertz, die Wandlungsdauer 2 Sekunden. Der Programmstart erfolgt durch eine am Institut für Technische Akustik entwickelte Trigger- Schaltung. Um das Ergebnis für Fremdprogramme leichter zugänglich zu machen, erfolgt dann eine ILS-interne Umschreibung des Ergebnisses in das ASCII- Format. Das in analoger Weise wie das Auswertungsprogramm automatisierte Konvertierungsprogramm liest diese ASCII- Datei ein, summiert jeweils 25 Werte quadratisch auf und speichert das Ergebnis in einer für das Auswertungsprogramm verständlichen Form, wobei lediglich die Vorzeicheninformation der abgetasteten Impulsantwort verlorengelht; die Phasenlage der Reflexionen geht in keinen raumakustischen Parameter ein; außerdem liefert das zum Vergleich heranzuziehende Strahlverfolgungsprogramm ebenfalls nur die quadratische Impulsantwort, so daß sich dieser Informationsverlust leicht verschmerzen läßt. Vergleiche zwischen direkten Messungen und ILS- ausgewerteten ergaben bei 500 Hertz hervorragende Übereinstimmungen. Bei 1000 und 2000 Hertz stimmten alle Parameter sehr gut überein mit der erwarteten Ausnahme der Early- Decay- Time. Zur Kontrolle wurde an einigen Punkten eine Nachhallmessung mit Rauschanregung und Messung des Energieabfalls nach Abschalten durchgeführt.

3.3. Messung im Eurogress

Bei dem gemessenen Raum handelt es sich um den "Großen Saal" des Eurogressgebäudes in Aachen, Monheimsallee. Er hat 15387 Kubikmeter Volumen und in dem gemessenen bestuhlten Zustand etwa 1000 Sitzplätze, davon zirka 100 auf einer Empore. Es handelt sich um eine Mehrzweckhalle, in der Sinfoniekonzerte ebenso dargeboten werden wie Rockkonzerte, Opern und Theaterstücke; außerdem dient sie als Tagungsraum für Kongresse. Abbildung 19 zeigt den symmetrischen Grundriß des Saales mit den Meßplatzpositionen. Tabellen mit sämtlichen ermittelten raumakustischen Parametern finden sich in Anhang A, wo sie den korrespondierenden Ergebnissen der Computersimulation gegenübergestellt sind. Die Messung erfolgte an insgesamt drei Tagen, einer eintägigen Probemessung folgte mit einigen Tagen Abstand die eigentliche Messung; dieses Vorgehen erlaubt das Erkennen und Beheben von apparativen Mängeln und technischen Schwierigkeiten, wie etwa die mangelnde Speichertiefe des verwendeten Speicheroszillogoskops. Daneben hat man bei einer solchen Vor- Ort-

Messungen meist noch mit Störgeräuschen zu kämpfen, seien sie durch Filmvorführung, Saalreinigung oder Klavierstimmen bedingt.

Abbildung 19 : Eurogreß : Grundriß und Meßplätze



4. Vergleich der Ergebnisse von Messung und Ray- tracing

4.1. Impulsantworten

Die mit mäßigem Rechenaufwand (mehrere Tage) erreichbare Zeitauflösung der simulierten Impulsantworten beträgt 1 ms, bei der Messung sind höhere Abtastraten geradezu erforderlich. Nun besteht die Möglichkeit, so viele Abtastwerte der Messung quadratisch zusammenzufassen, daß die resultierende Zeitauflösung gerade 1 ms beträgt; dieses wurde im Falle der auf Band aufgezeichneten Impulsantworten durchgeführt. Abbildungen 20 und 21 zeigen solche Impulsantworten, zusammen mit den entsprechenden der Simulation, an den Plätzen n3 (Abbildung 20, Mitte des Saals) und n1 (Abbildung 21, vorne, Mitte). Zur Lage der Meßplätze vergleiche Abbildung 19. Wegen der relativ großen Schwankungen ist es schwierig, den globalen Verlauf zu erkennen, auffällig ist aber in Abbildung 21, daß der frühe Verlauf der Impulsantworten (bis etwa 140 Millisekunden), insbesondere was die Pegeldifferenz zwischen Direktschall und frühen Reflexionen angeht, sich doch deutlich unterscheidet, was in Abbildung 20 nicht so drastisch zum Ausdruck kommt. Am Meßplatz n1 ist man sehr nahe an der Quelle, was zu dieser Abweichung führen kann, die sich auch in den raumakustischen Parametern (Kapitel 4.2) niederschlägt. Der Meßplatz n1 ist allerdings von etwas untergeordneter Bedeutung, da man hier schon aus geometrischen Überlegungen viel Direktschall (relativ zum Rest) erwartet; wie groß er nun genau ist, spielt keine so entscheidende Rolle. Ob der Grund für die Abweichung bei der Messung (etwa Störung) oder der Simulation (beispielsweise Schwierigkeiten mit quellnahen Zählkugeln) zu suchen ist, konnte nicht geklärt werden.

Da der "Anregungsimpuls" der Simulation keine zeitliche Ausdehnung hat, wohl aber der der Messung, gilt es nun, geeignetere Wege zu finden, beide miteinander zu vergleichen. Eine Möglichkeit besteht in einer gewichteten Glättung beider Stoßantworten. Als Gewichtung wurde eine Exponentialfunktion gewählt, deren Verlauf der Nachverdeckungskurve nachempfunden ist, das bedeutet 10 dB Abfall in 20 ms. [6]

Abbildung 20 : Quadrierte Impulsantwort von a) Messung
b) Simulation am Meßplatz n3

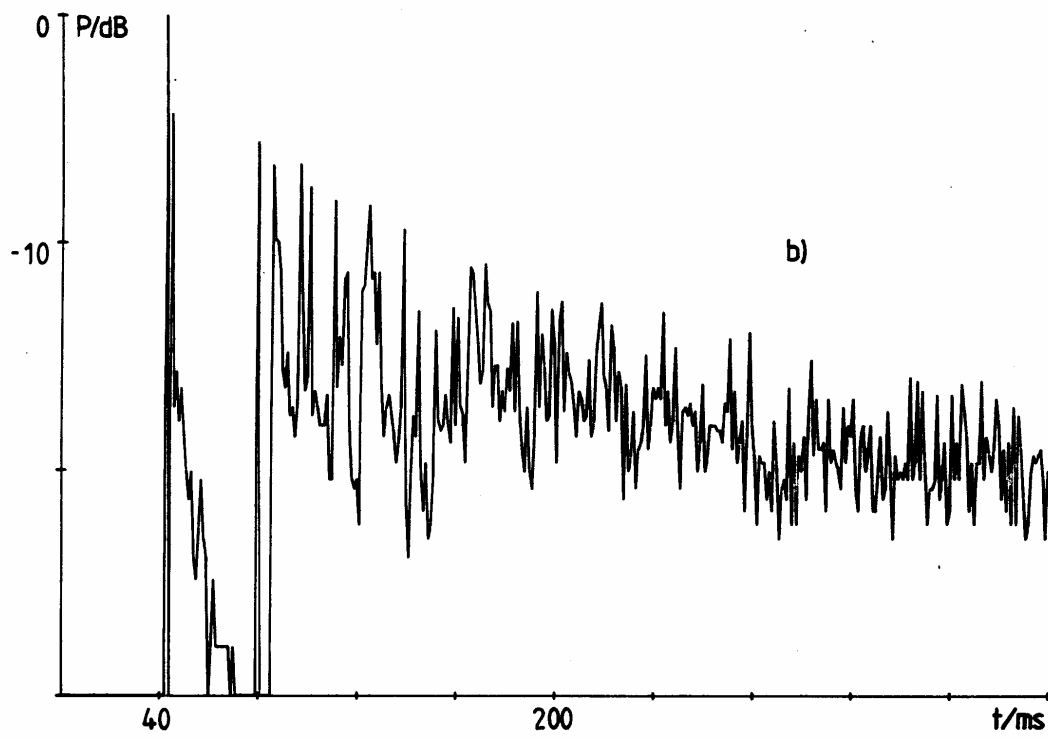
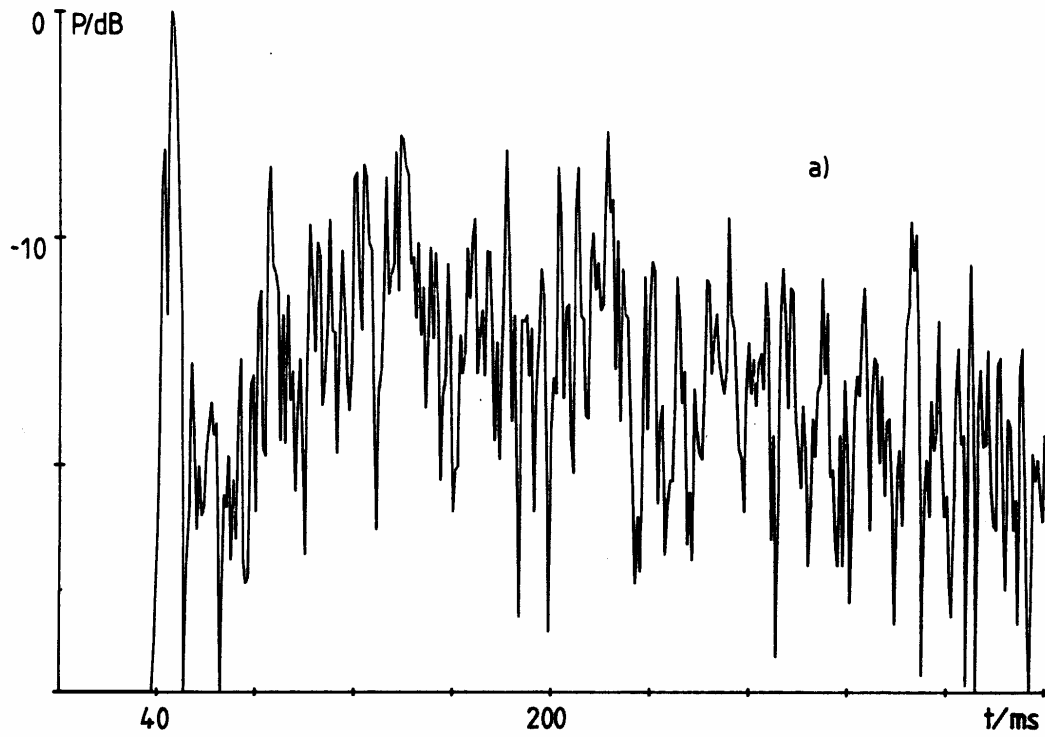


Abbildung 21 : Quadrierte Impulsantwort von a) Messung
b) Simulation am Meßplatz n1

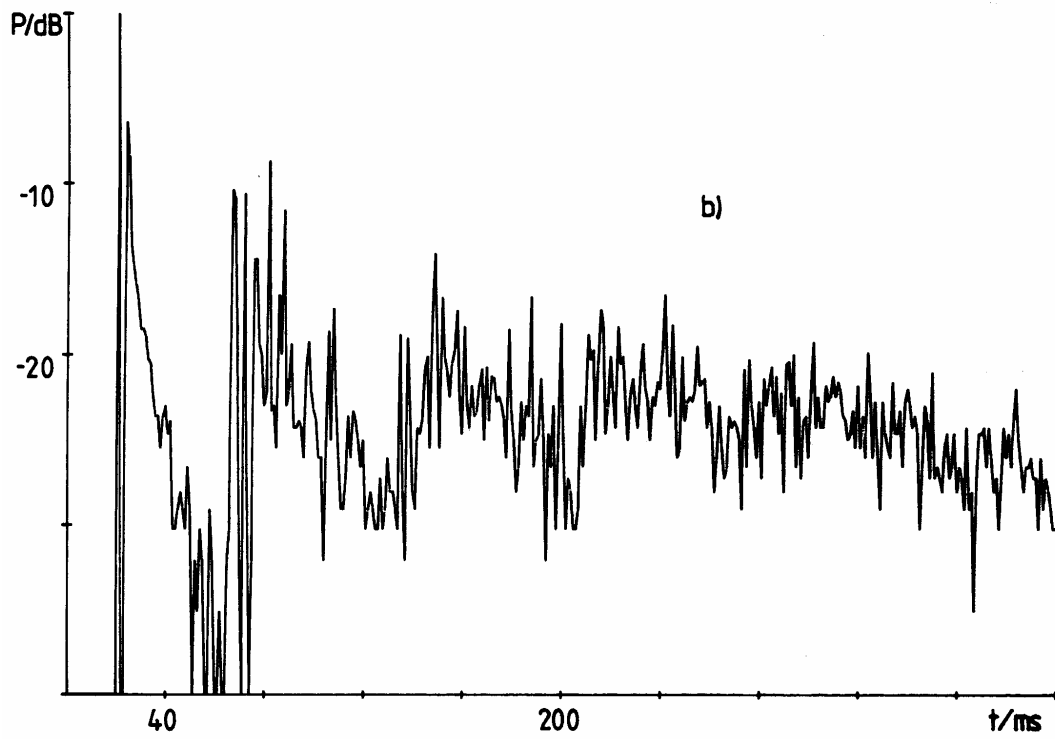
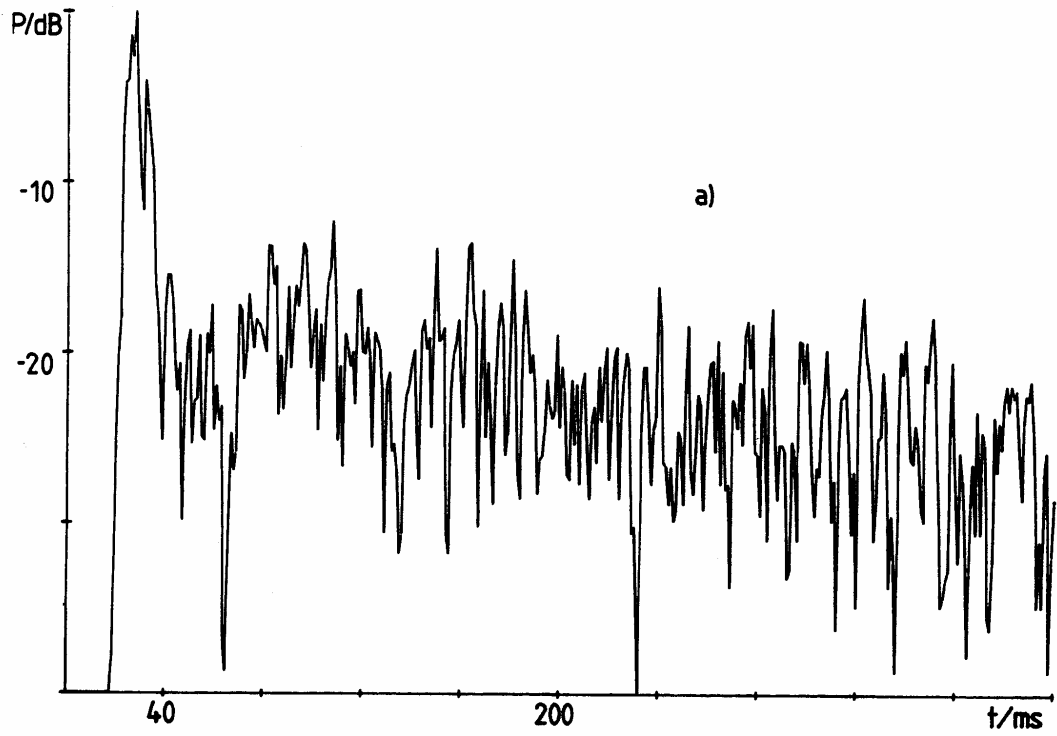


Abbildung 22 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
aus a) Messung b) Simulation am Platz n3

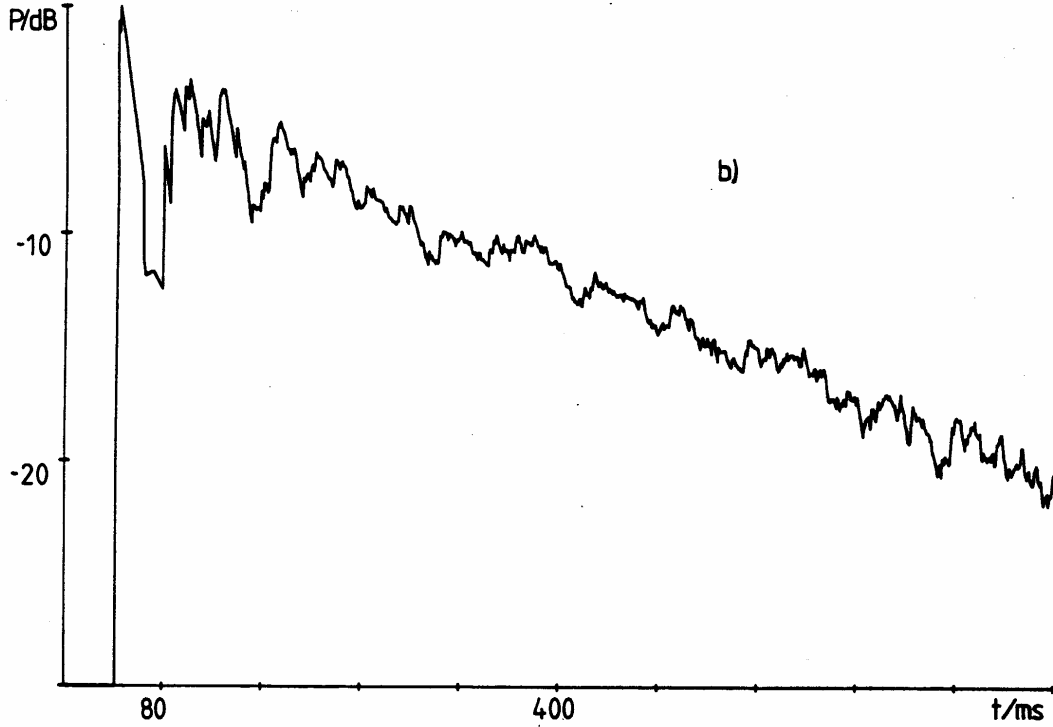
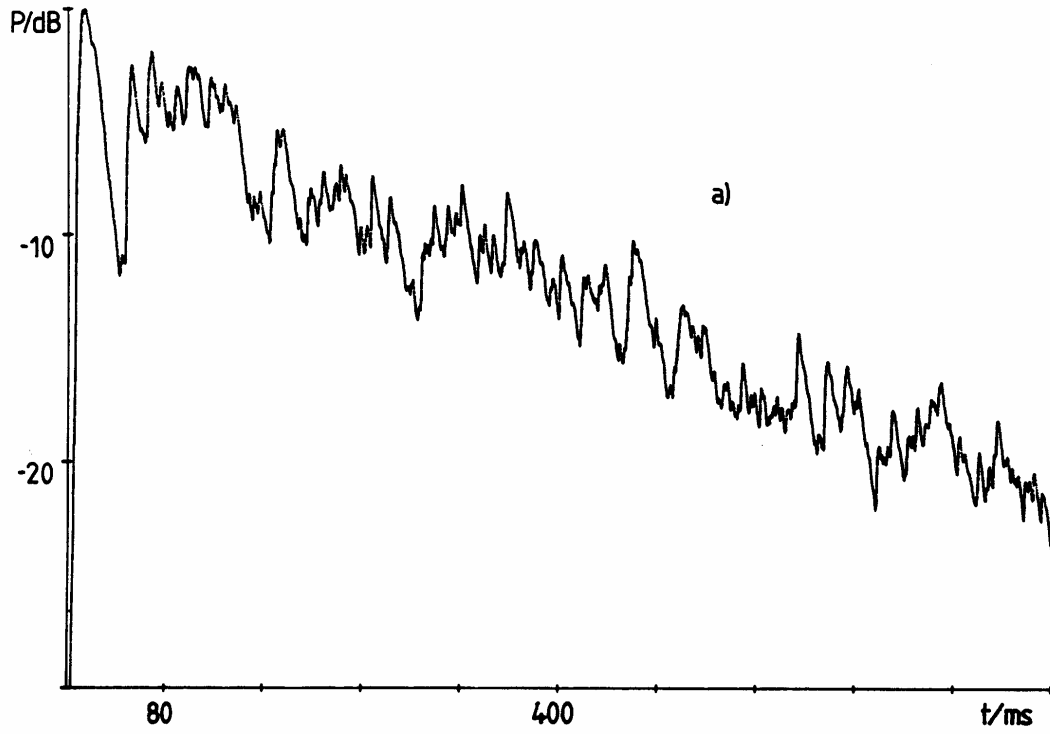


Abbildung 23 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
aus a) Messung b) Simulation am Platz o2

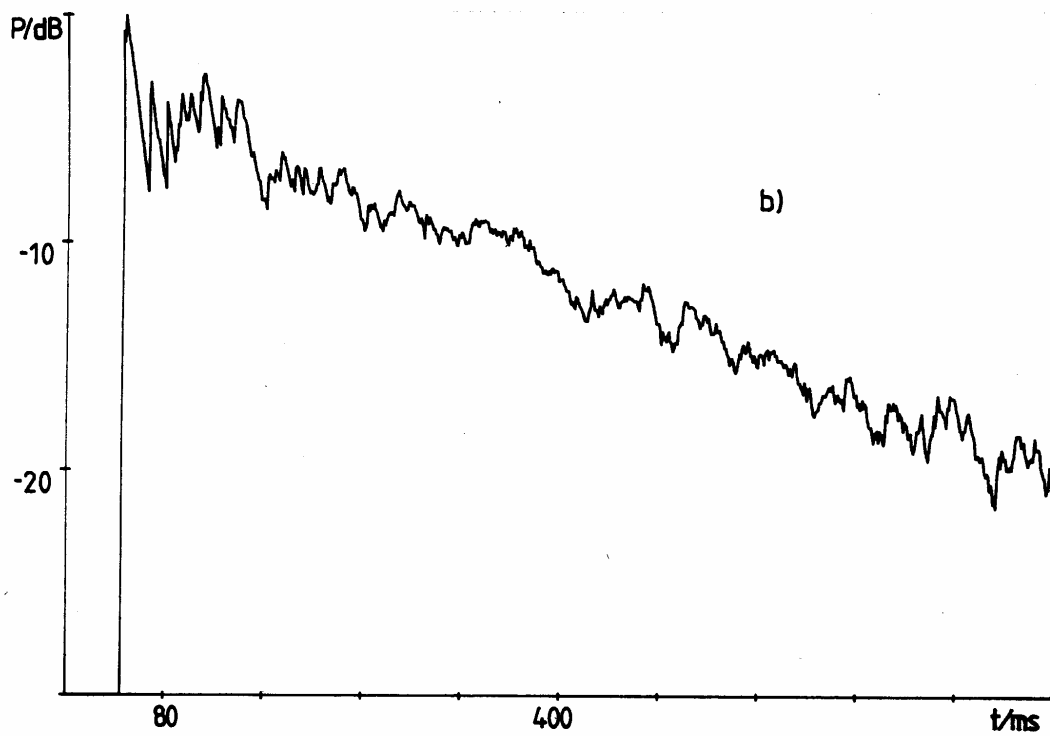
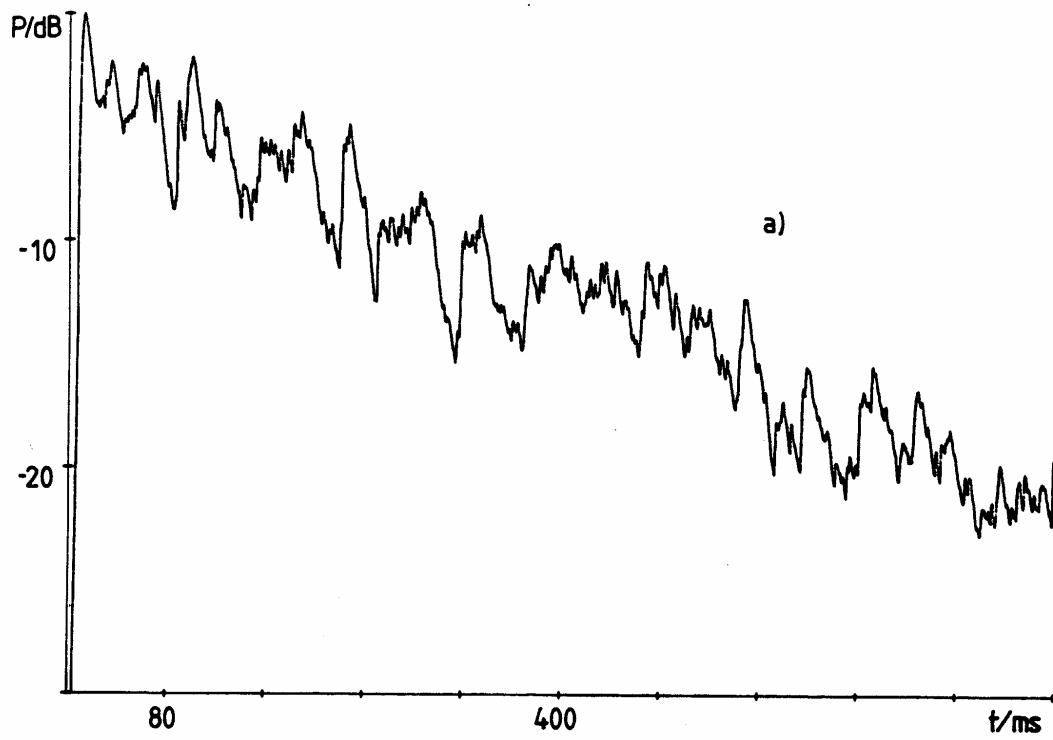


Abbildung 24 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
aus Messung und Simulation am Meßplatz n3

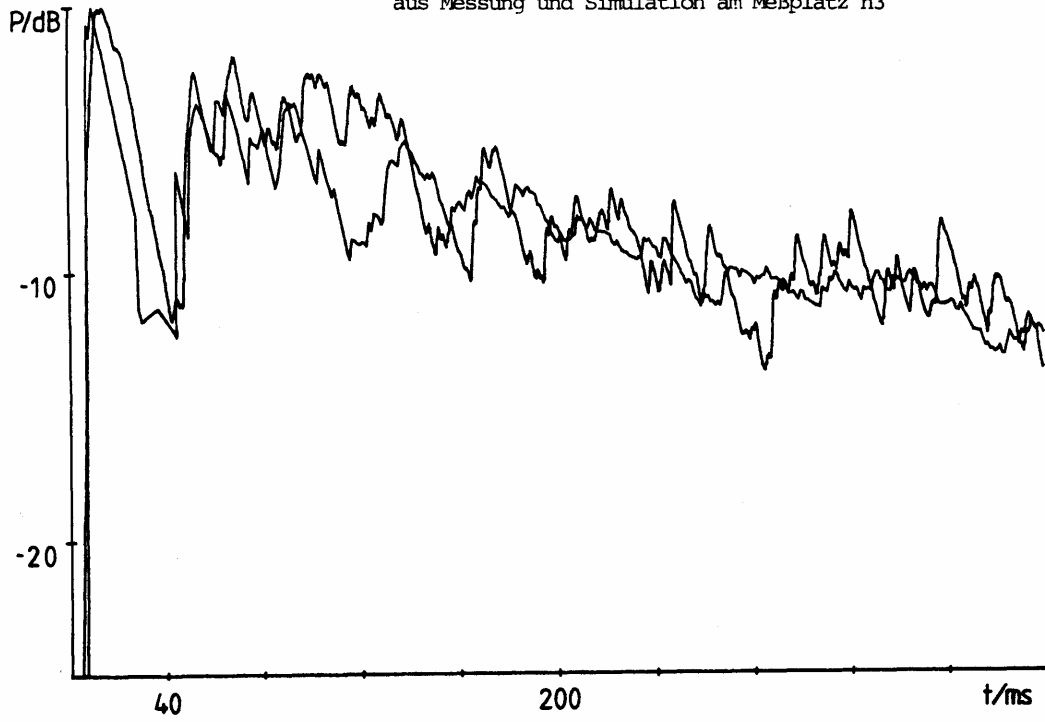
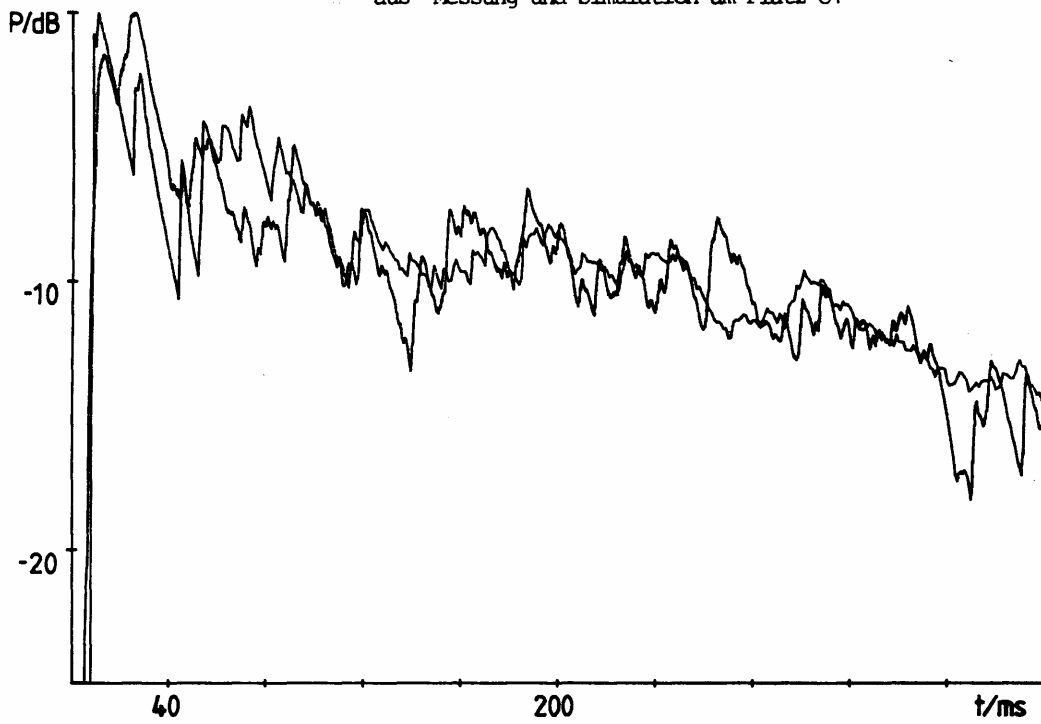


Abbildung 25 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
aus Messung und Simulation am Platz o1



Abbildungen 22 und 23 zeigen so behandelte Impulsantworten. In beiden Fällen zeigt sich recht gute Übereinstimmung. Die beiden Impulsantworten aus Abbildung 22 - es handelt sich erneut um den Meßplatz n3 - sind in Abbildung 24 in ein gemeinsames Koordinatensystem mit feinerer Zeit- und Pegelauflösung eingezeichnet, was die Ähnlichkeit der globalen Verläufe noch unterstreicht. Abbildung 23 zeigt mit Meßplatz o2 einen Randplatz, die Impulsantworten für den benachbarten Randplatz o1 sind in Abbildung 25 gemeinsam in ein besser aufgelöstes System eingezeichnet. Hier ist die Übereinstimmung noch besser.

Eine Impulsantwort der Messung stellt eigentlich die Impulsantwort des gesamten Übertragungssystems bestehend aus Filter, Verstärker, Lautsprecheranordnung, Raum, Mikrofon, Filter und Verstärker dar. Theoretisch bestünde die Möglichkeit, die Impulsantwort so zu manipulieren, daß lediglich die Stoßantwort des Raumes übrigbleibt, etwa durch Faltung mit einer geeigneten Funktion. Dieses ist aber praktisch nur schwer durchführbar, weshalb im Rahmen dieser Arbeit davon abgesehen wurde.

Andererseits ist es aber denkbar, die simulierte Impulsantwort mit dem akustischen Anregungssignal zu falten; dazu ist allerdings eine feinere Zeitauflösung wünschenswert. Mithilfe einer Kombination aus ray-tracing und Spiegelquellenmethode gelingt es, eine beliebig feine Zeitauflösung zu erzielen. Ein Problem bei der Spiegelquellenmethode ist die Vielzahl der auftretenden Quellen (für den untersuchten Raum etwa 10 bei Spiegelquellen bis zur Ordnung 10), wobei die Zahl der relevanten Quellen recht klein ist (im Beispiel etwa 1000 bis zu einer Verzögerungszeit von 400 Millisekunden). Die entscheidende Idee besteht nun darin, eine Strahlverfolgung durchzuführen, um die Position der wichtigen Quellen ermitteln zu können; aus dem Weg des Schalls (Energierückgang durch Absorption an Wänden und durch Luft) und der Laufzeit läßt sich der Zeitpunkt und die Stärke einer Reflexion bestimmen. Führt man das für hinreichend viele Spiegelquellen durch, so erhält man ein hochaufgelöstes Reflektogramm, welches nun mit der Stoßantwort des Messsystems (Abbildung 16) gefaltet werden kann oder aber auch mit realistischen akustischen Signalen wie reflexionsarm aufgezeichneter Musik oder Sprache. Ein wesentlicher Nachteil der Spiegelquellenmethode ist die Vernachlässigung der Schallstreuung. Näheres zu dem beschriebenen neuartigen Verfahren findet sich in [2] und [12].

Abbildungen 26 und 27 zeigen so manipulierte Impulsantworten der Simulation im Vergleich mit gemessenen. In Abbildung 26b (erneut Meßplatz n3) sieht man deutlich den Einbruch in der Impulsantwort nach dem Direktschall, welcher aufgrund der Vernachlässigung der Streuung ungleich ausgeprägter ist als bei der Messung. Beachtet man, daß es sich um eine lineare Auftragung handelt, so kann der weitere Verlauf durchaus ähnlich genannt werden, ein weiterer Einbruch zwischen dem vierten und fünften Zeitskalenstrich ist in beiden Fällen zu sehen, ebenso wie die anschließende stärkere Reflexion.

Der Meßplatz n6 (Abbildung 27) befindet sich hinten im Saal unter der Empore. Die von der Spiegelquellenrechnung als stärker als der Direktschall ausgewiesene Reflexionsgruppe unmittelbar nach dem zweiten Zeitskalenstrich zeigt sich in der Messung deutlich schwächer, wofür erneut die fehlende Streuung verantwortlich gemacht werden kann. Auch in diesem Beispiel findet sich in beiden Fällen ein Einbruch in der Impulsantwort, dieses Mal zwischen dem dritten und vierten Strich der Zeitskala.

Auf die mittels Spiegelquellenmethode und Faltung mit dem Meßsignal gewonnenen Impulsantworten läßt sich ebenfalls die oben beschriebene Glättung anwenden. Abbildungen 28 und 29 zeigen das Ergebnis dieser Operation für Messung und Simulation für die Meßplätze n3 und n6. Wie gut die Übereinstimmung ist, zeigt erneut eine gemeinsame Darstellung von Meß- und Rechenergebnissen, wie sie in Abbildung 30 und 31 zu sehen ist. Die oben beschriebenen Einbrüche zeigen sich in Abbildung 28 und 29 deutlich, die Gleichheit der Zeitverzögerungen unterstreicht Abbildung 30, beziehungsweise Abbildung 31.

In Abbildung 32 sind für den Meßplatz n3 die Ergebnisse von ray-tracing und Spiegelquellenmethode zusammen aufgetragen; man erkennt, daß die Spiegelquellenmethode den oben beschriebenen Einbruch besser berücksichtigt als das ray-tracing (vergleiche auch Abbildung 30), Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse aus Messung, Spiegelquellenmethode und ray-tracing in einem Bild zur Demonstration der guten Übereinstimmung.

Abbildung 26 : Impulsantwort von a) Messung b) Spiegelquellen-
methode und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3

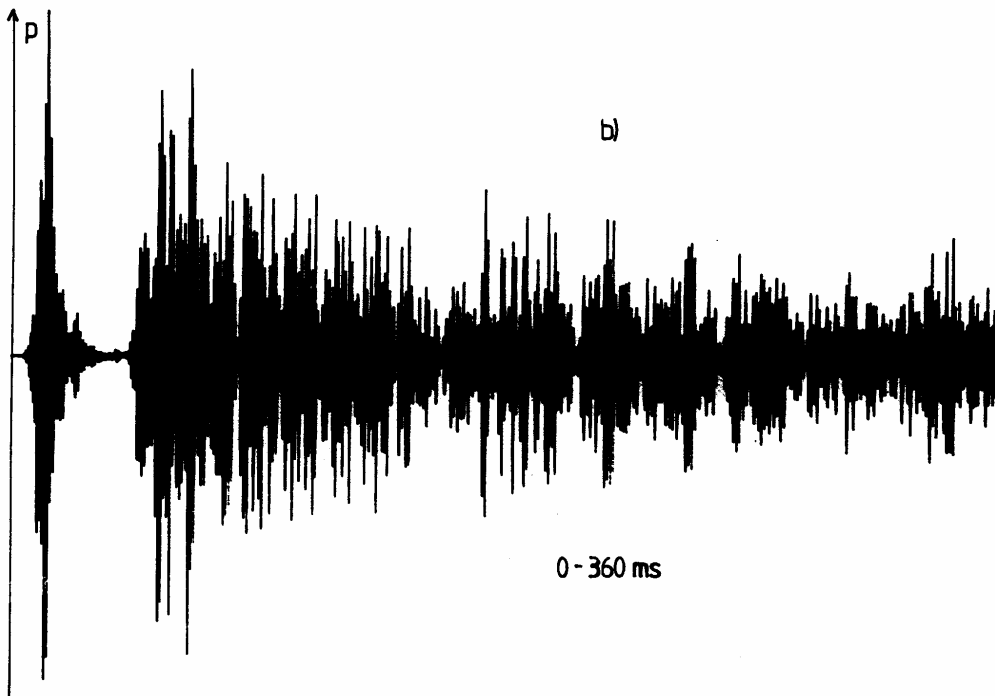
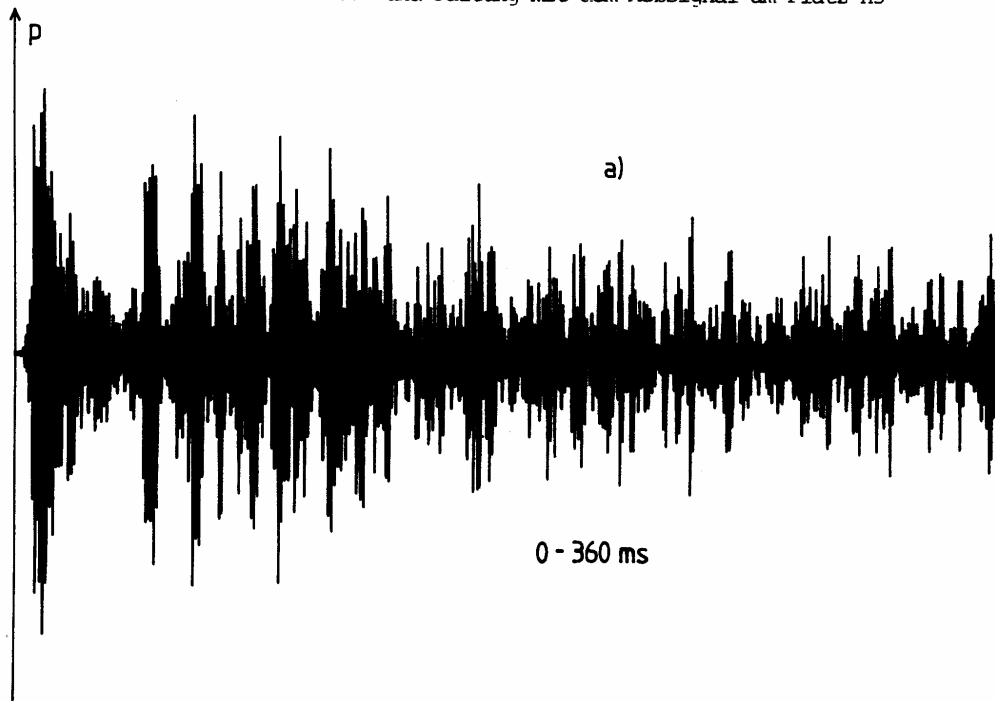


Abbildung 27 : Impulsantwort von a) Messung b) Spiegelquellen-
methode und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n6

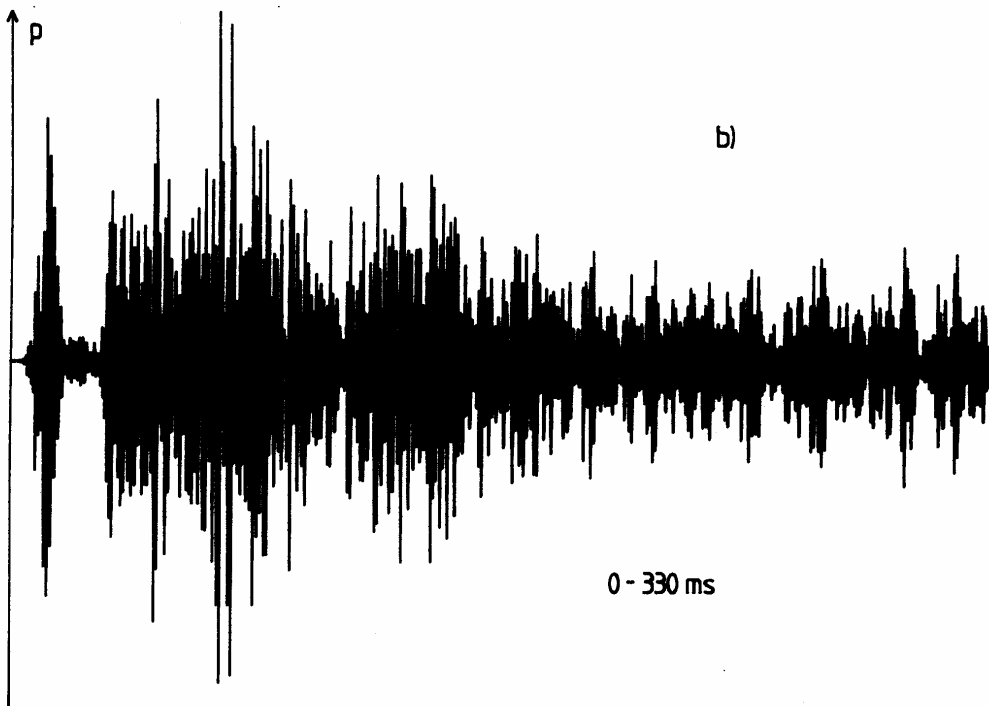
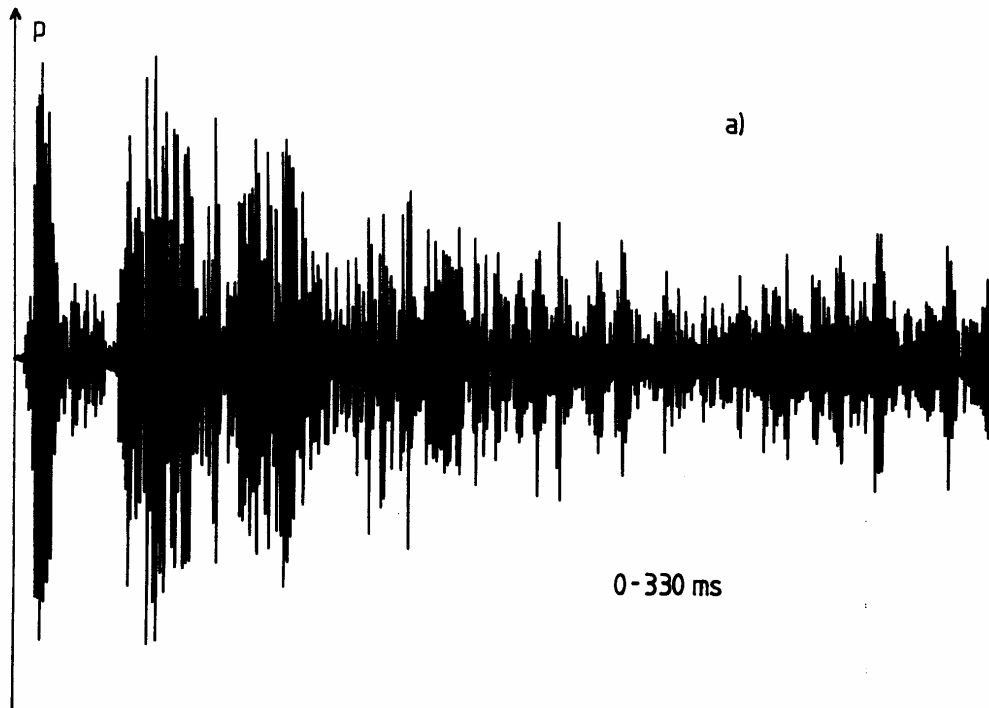


Abbildung 28 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
von a) Messung b) Spiegelquellen und Faltung
mit dem Meßsignal am Platz n3

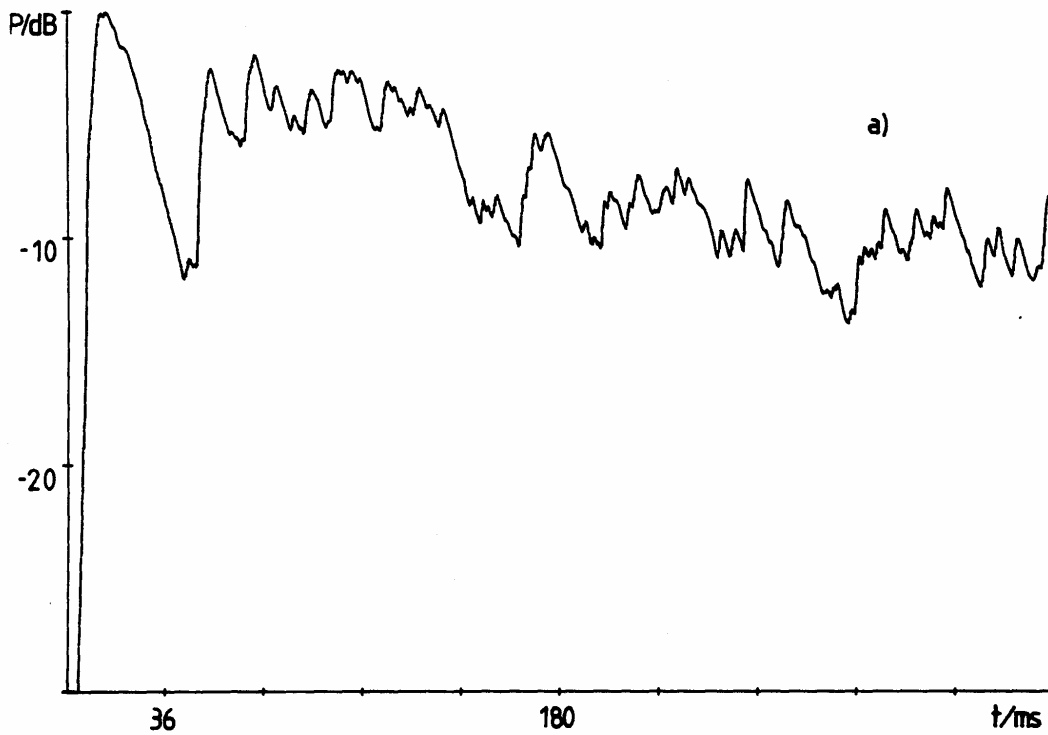


Abbildung 29 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
von a) Messung b) Spiegelquellen und Faltung
mit dem Meßsignal am Platz n6

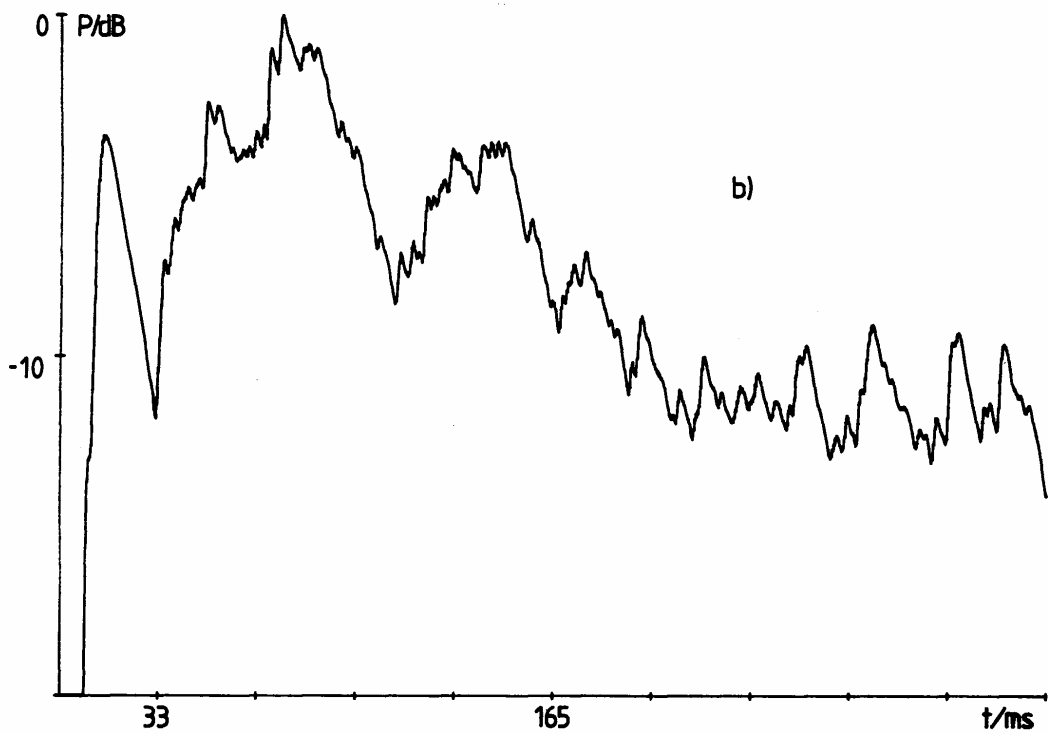
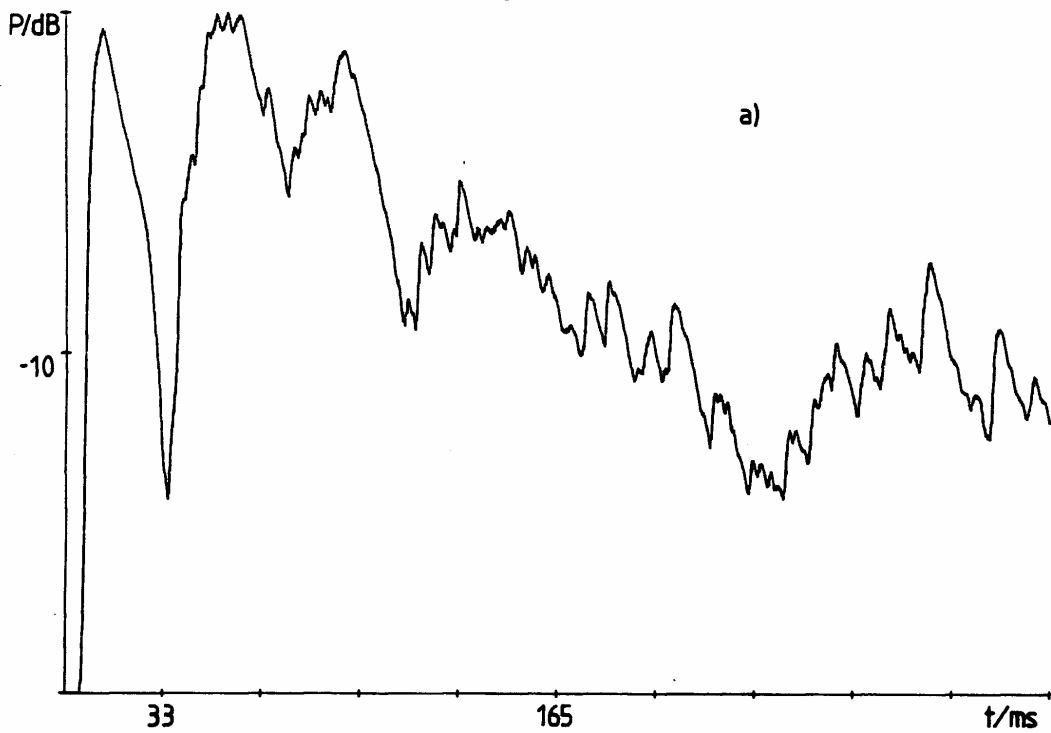


Abbildung 30 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von Messung und Spiegelquellen und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3

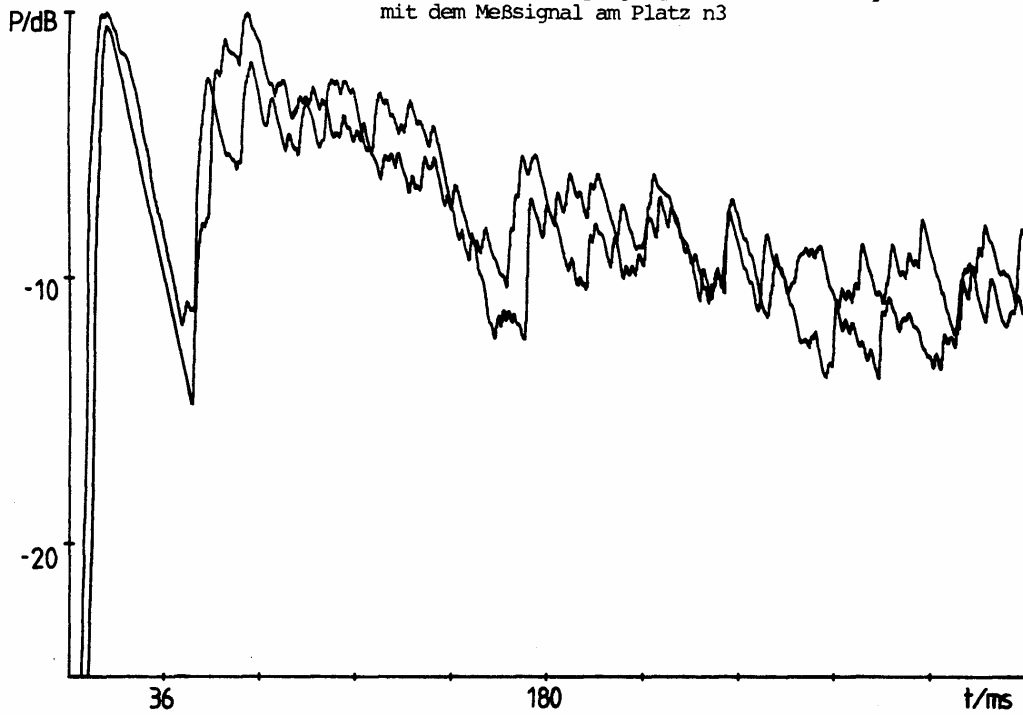


Abbildung 31 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von Messung und Spiegelquellen mit Faltung mit dem Meßsignal am Platz n6

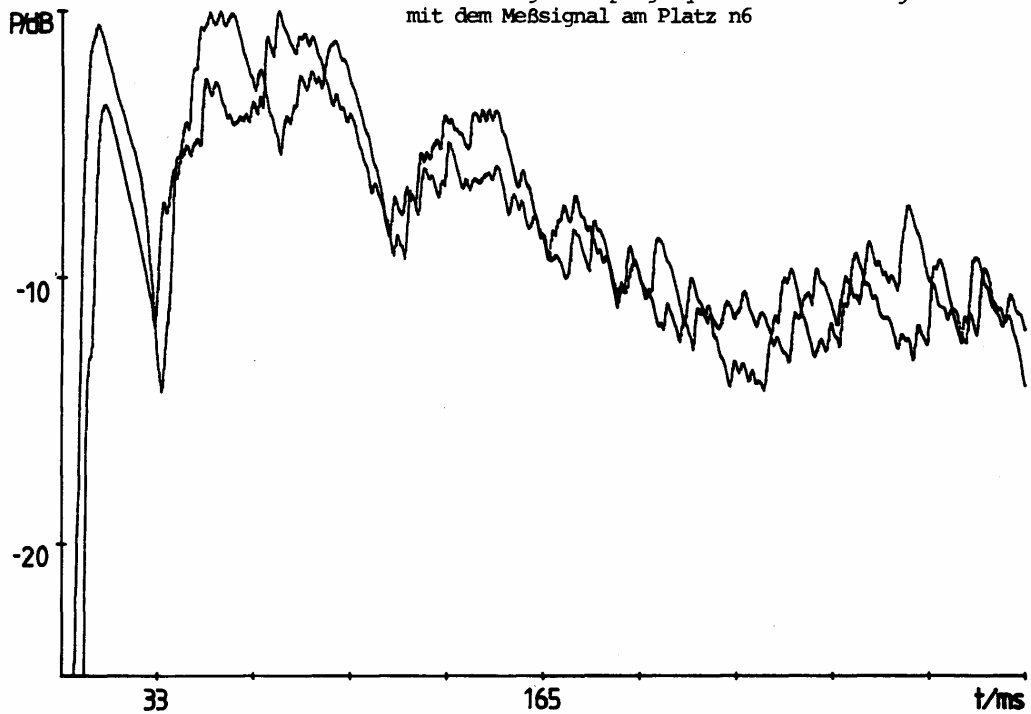
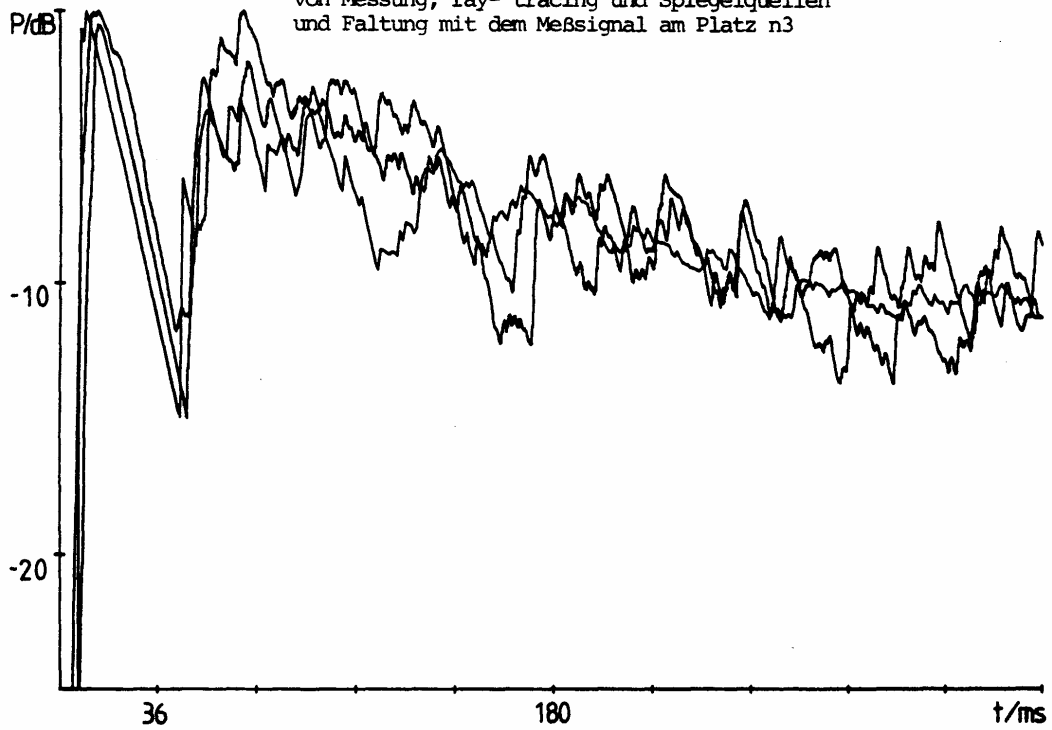
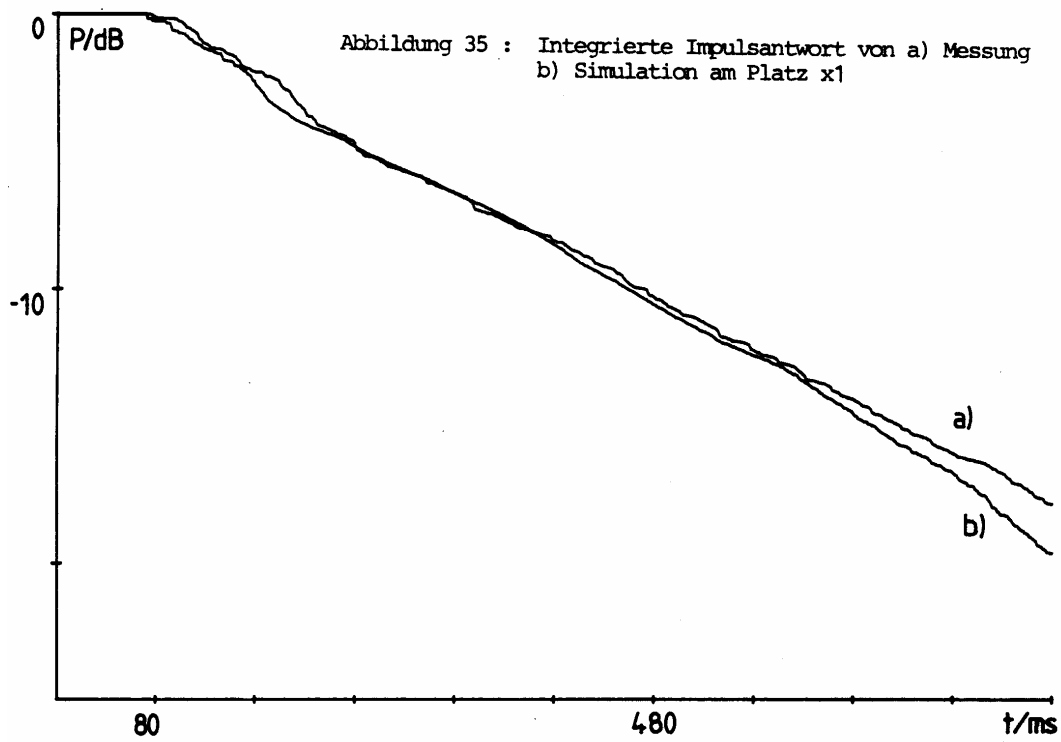
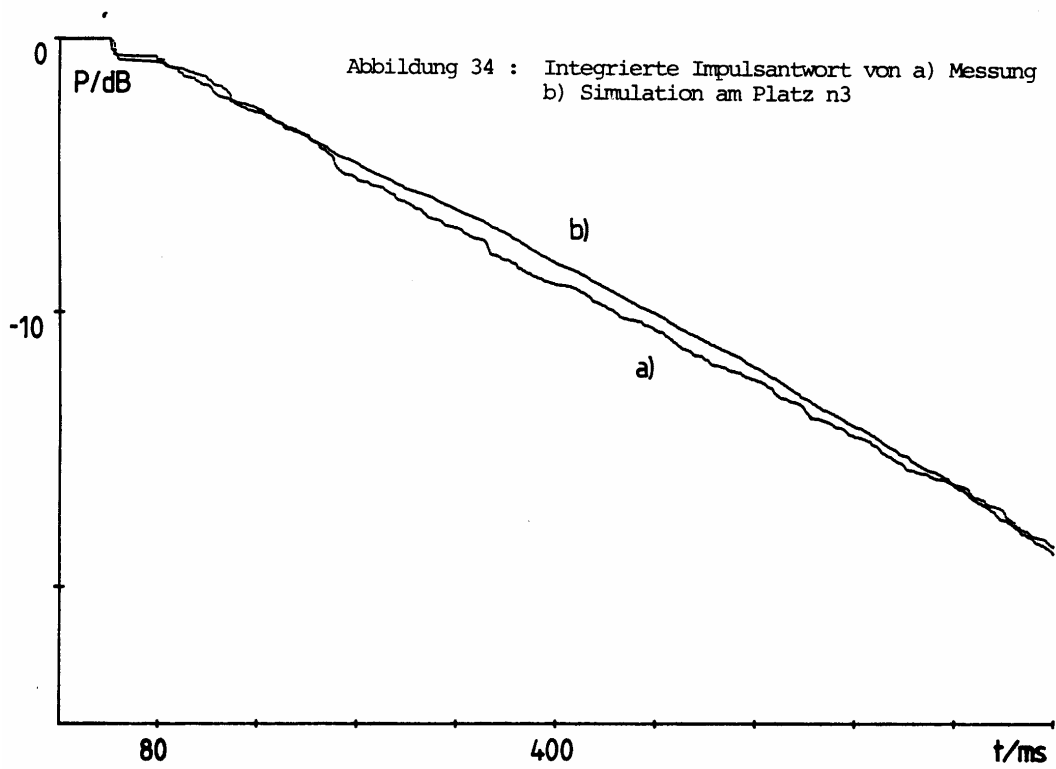


Abbildung 32 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
von ray- tracing und Spiegelquellen und Faltung
mit dem Meßsignal am Platz n3



Abbildung 33 : Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort
von Messung, ray- tracing und Spiegelquellen
und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3





Interessant ist noch ein Vergleich der Integrierten Impulsantworten, wengleich die wesentliche Information derselben in der Early Decay Time zum Ausdruck kommt (siehe Kapitel 4.2.).

In den Abbildungen 34 und 35 sind gemessene und simulierte Integrierte Impulsantworten jeweils gemeinsam dargestellt. Wenn sie sich auch erwartungsgemäß in der Feinstruktur unterscheiden, so zeigen sie global in dem interessanten Bereich bis 20 dB Abfall einen vergleichbaren Verlauf, was sich auch in der guten Übereinstimmung bei der Early Decay Time zwischen Messung und Simulation äußert, von der unter anderem im nächsten Kapitel die Rede sein wird.

4.2. Raumakustische Parameter

Um die Ergebnisse der Berechnung der raumakustischen Parameter von Messung und Simulation miteinander vergleichen zu können, muß man sich klar darüber sein, wie genau die Angaben sind. Da man nicht beliebig viel Dynamik (Messung), beziehungsweise Rechenzeit (Simulation) zur Verfügung hat, muß man die Auswertung von Impulsantworten meist vor Erreichen der Nachhallzeit T_n abbrechen. Dies führt zu einem Abbruchfehler für die Gesamtenergie von

$$\frac{\Delta E}{E} (t) = \frac{(t/T_n)}{(10^{-6})}$$

(mit ΔE = Energiefehler, E = Gesamtenergie, t = Abbruchzeit,
 T_n = Nachhallzeit)

Dieser Abbruchfehler ist für den (theoretischen) Fehler von Deutlichkeit und Clarity verantwortlich, auch in die Bestimmung der Schwerpunktzeit geht er ein, dort hat allerdings auch die Abtastrate einen Einfluß wegen der zeitlichen Gewichtung des Zählers.

Er beträgt weniger als ein Prozent; praktisch läßt sich etwa die Deutlichkeit nur bis auf 10 Prozent genau bestimmen, wie Reproduzierbarkeitstests ergaben. Das resultiert nicht zuletzt aus der endlichen zeitlichen Länge der Anregung. So ist es möglich, daß Energieanteile, die knapp außerhalb der 50- ms- Grenze liegen, bei kürzeren Pulsen noch zur Deutlichkeit beitragen würden. Ähnliches gilt für die Clarity bei 80 ms. Außerdem machen sich selbst kleine Welligkeiten der Richtcharakteristik des Sendesystems als deutliche Energieschwankungen bemerkbar, weshalb für

die beschriebene Messung eine gute Kugelcharakteristik der Lautsprecheranordnung sehr wichtig ist.

Aus der sehr guten Übereinstimmung der Parameter aus direkter und aufgezeichneter Messung (Kapitel 3.2.) läßt sich schließen, daß ein eventuell auf geringe Abstraten zurückzuführender Fehler zu vernachlässigen ist, denn im Falle der aufgezeichneten Messung wurde mit 25000 Hertz abgetastet. In diesem Falle bestimmte dann auch die Dynamik die "Abbruchzeit" und nicht die Wandlungsdauer von 2 Sekunden.

Für die Bestimmung der Early Decay Time (EDT) ist nach Abbildung 17 eine Auswertung der Impulsantwort bis zur halben Nachhallzeit hinreichend, die Ungenauigkeiten der Angabe dieser Zeit resultieren daraus, daß man es nicht mit einem idealen Diffusfeld zu tun hat. Berechnet wird die EDT aus der Integrierten Impulsantwort, indem für den Bereich zwischen 5 und 15 dB Abfall eine Ausgleichsgerade bestimmt wird, aus deren Steigung dann die EDT ermittelt wird.

Bei aller Sorgfalt ist es möglich, daß eine Messung durch ein Störgeräusch derart beeinflusst wird, daß sie zwar nicht als Fehlmessung identifiziert wird, die Parameter jedoch gegen eine Messung ohne Störung verändert erscheinen.

Sämtliche gemessenen (und aus der Simulation ermittelten) Parameter finden sich in Anhang A.

Die Meßplätze n3 und n3b sind identisch, ihre Messungen wurden allerdings an zwei verschiedenen Tagen durchgeführt, wobei die gesamte Meßapparatur zwischendurch ab- und wieder aufgebaut wurde. Meßplatz p3 liegt symmetrisch zu n3 auf der anderen Seite des Raumes, so daß für diesen Platz die gleichen Ergebnisse wie für n3 zu erwarten sind. Analoges gilt für o2 und q2 in den seitlichen Blocks (vergleiche auch Abbildung 19). Betrachtet man diese Ergebnisse und dazu noch einige Tests, die im Treppenhaus des Instituts für Technische Akustik vorgenommen wurden, so erhält man die in Tabelle 4 aufgelisteten, erfahrungsgestützte Meßunsicherheiten.

TABELLE 4 : Meßunsicherheiten

Deutlichkeit	D : ± 5 %
Clarity	C : ± 1 dB
Schwerpunktzeit	ts : ± 10 ms
Early Decay Time	EDT : ± 0,1 s
Seitenschallgrad	S : ± 5 %
Stationärer Schalldruckpegel	P : ± 1 dB
Echowert ("Echoanfälligkeit")	E : ± 0,5

Die Simulationsergebnisse sind mit einem statistischen Fehler behaftet, der daraus resultiert, daß man mit endlich vielen Teilchen rechnet. Im Falle der betrachteten 1000- Hertz- Simulation beträgt er für die Deutlichkeit und die Schwerpunktzeit weniger als ein Prozent, für die Clarity weniger als 0,05 dB, für die Early Decay Time weniger als 0,05 Sekunden, ist also wesentlich kleiner als die Meßungenauigkeit. [2], [14].

Die im folgenden beschriebenen Abbildungen 36 bis 38 beziehen sich exemplarisch auf die 1000- Hertz- Messung, beziehungsweise -simulation. Zur Lage der Meßplätze im Raum sei auf Abbildung 19 verwiesen.

In Abbildung 36 sind die Deutlichkeitswerte aufgetragen, innerhalb der n-Reihe (von der Bühne aus halblinks) nimmt die Deutlichkeit nach hinten hin zunächst ab, hält sich zwischen Platz 3 und 5 in etwa konstant und nimmt am Platz 6 wieder etwas zu, wobei dieser letztere Effekt von der Simulation nicht beschrieben wird. Betrachtet man Abbildung 27a, so erkennt man, daß gerade um die für die Deutlichkeit entscheidende 50-Millisekunden- Marke einige starke Reflexionen sind, die je nach Wahl des Zeitnullpunktes zur Deutlichkeit beitragen oder nicht, ein gutes Beispiel für diesen zu erhöhter Meßungenauigkeit führenden Effekt.

Abbildung 36 : Deutlichkeit (1000 Hertz) :
Messung und Simulation (x)

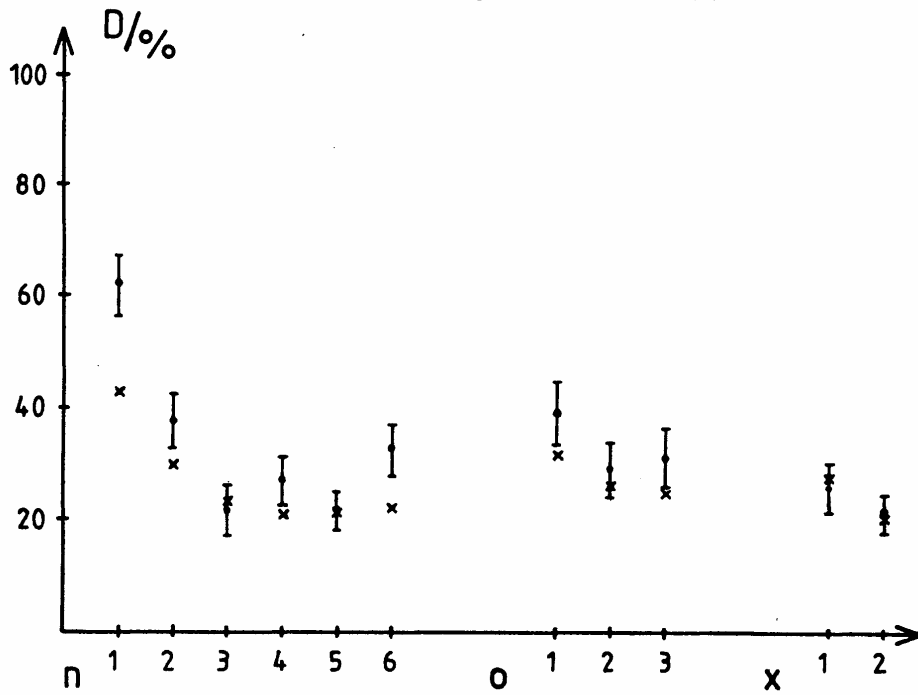
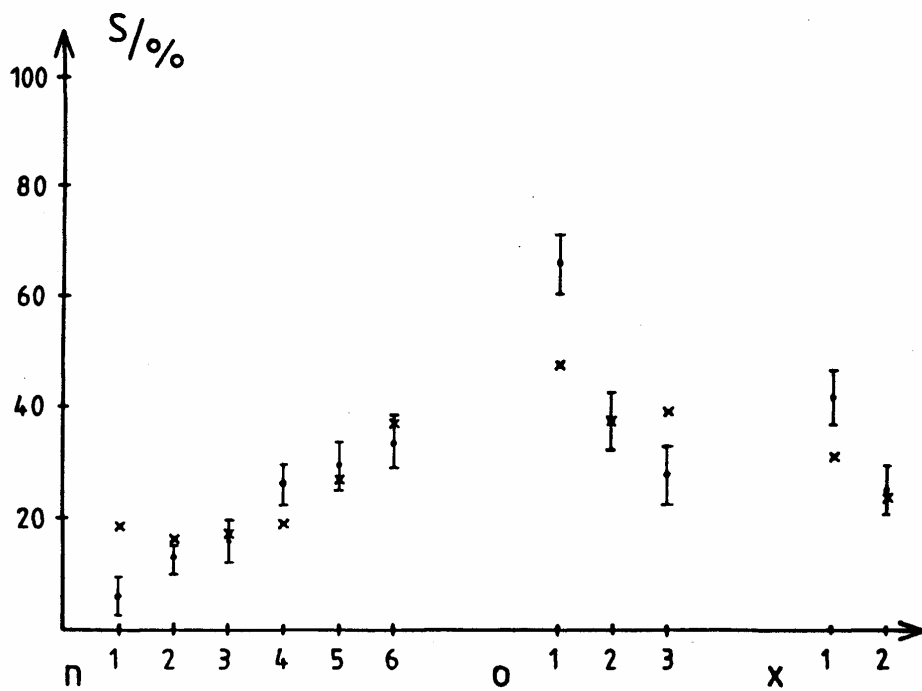


Abbildung 37 : Seitenschallgrad (1000) Hertz :
Messung und Simulation (x)



Berücksichtigt man die Meßunsicherheit, so sind die lokalen Abweichungen sehr gering, wenn man vom Platz n1 absieht. Mit Ausnahme dieses Platzes ist die Übereinstimmung recht gut. Vergleiche hierzu auch Abbildung 21 und die dazugehörigen Anmerkungen.

Auf eine Darstellung der Verteilung von Schwerpunktzeit und Clarity wird verzichtet, da der Verlauf im Falle der Clarity dem der Deutlichkeit ähnlich ist - die veränderten Integrationsgrenzen machen sich kaum bemerkbar, im Falle der Schwerpunktzeit erhält man erwartungsgemäß einen umgekehrten Verlauf.

Abbildung 37 zeigt die Verteilung der Seitenschallgrade. Innerhalb der n-Reihe nimmt die Seitlichkeit nach hinten monoton zu, in der o- Reihe nimmt sie ab. Überraschend ist, daß der Emporenrandplatz x2 weniger Seitlichkeit aufweist als der Platz x1 in der Emporenmitte. Die Übereinstimmung von Messung und Simulation kann als zufriedenstellend bezeichnet werden.

In Abbildung 38 ist der in Kapitel 2 ausführlich beschriebene Parameter Echowert (oder "Echoanfälligkeit") für die bearbeiteten Meßplätze aufgetragen. Demnach ist die Echogefahr in der Mitte am größten, an der Seite (o- Reihe) und hinten (n6) etwa gleich, ebenso in der Mitte der Empore (x1). Am Rande der Empore ist sie nach der Messung wiederum höher.

Die Übereinstimmung ist - von den Ausnahmen n1, n5 und x2 abgesehen - gut. Möglicherweise liegt bei den Ausreißern eine Störung der Messung vor. Denkbar wäre auch, daß eine feinere Zeitauflösung der Simulation zu noch besserer Übereinstimmung führen würde, zumal - insbesondere auf der Empore - die Meßergebnisse von der Beobachtung bestätigt werden. Eine leistungsfähige Echoanalyse wäre zu wünschen, da Echoerscheinungen meist sehr unerwünscht sind und oft nur mit drastischen baulichen Maßnahmen auf Kosten der Lautstärke behoben werden können.

Setzt man die Meßergebnisse in Bezug zu den oben beschriebenen Hörversuchen, so sind an einigen Plätzen - zumindesten im unbesetzten Zustand - für Sprachdarbietungen erhebliche und für Streicherdarbietungen merkliche Echoerscheinungen zu erwarten (vergleiche Abbildung 10 und 11). Tatsächlich wurden solche Effekte im untersuchten Saal - auch im besetzten Zustand - vielfach beobachtet.

Abbildung 38 : Echowert (1000 Hertz) :
Messung und Simulation (x)

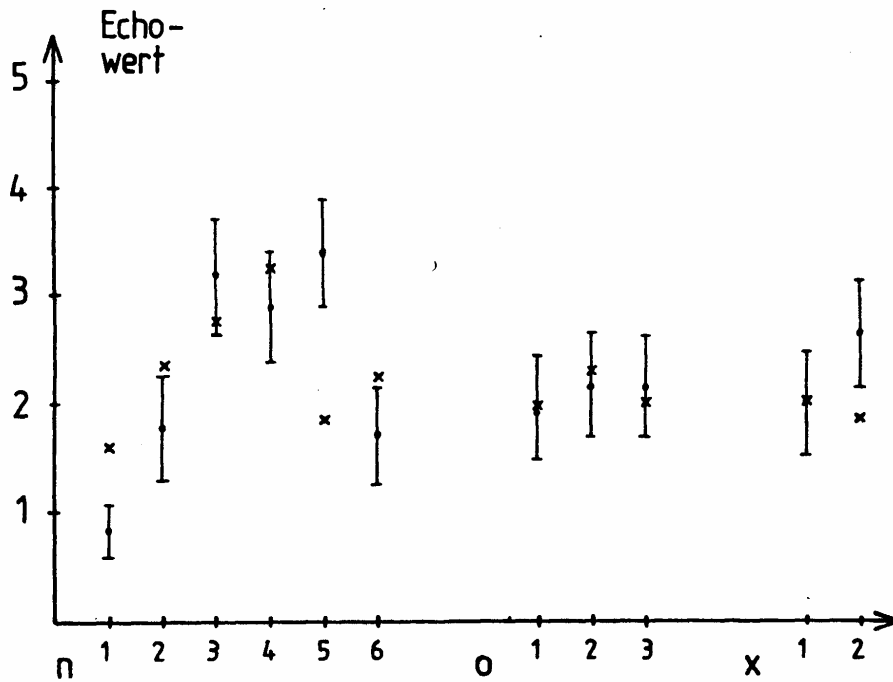
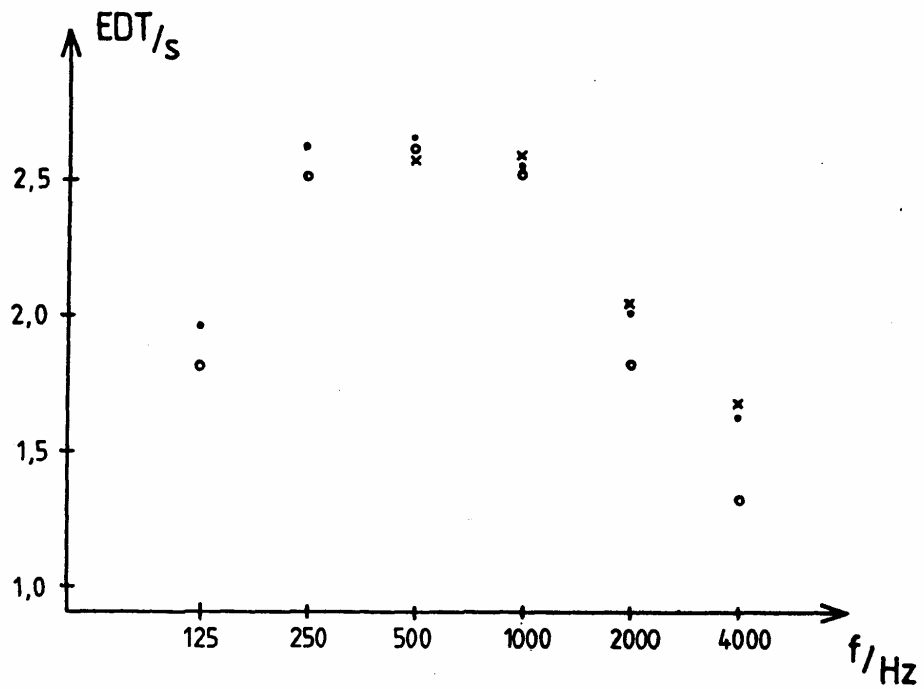


Abbildung 39 : Mittlere Early Decay Time aus Messung und Simulation (x), mittlere Nachhallzeit aus Rauschmessung (o)



Im Gegensatz zu den bisher diskutierten Parametern weist die Early Decay Time (EDT) keine ausgeprägte Ortsabhängigkeit auf. Lokale Schwankungen sind zwar in Messung und Simulation vorhanden, doch sind diese mit dem Ohr kaum wahrzunehmen, man interessiert sich eher für die mittlere EDT in Abhängigkeit von der Frequenz. In Anhang A sind auch die Ergebnisse der beschriebenen konventionellen Nachhallmessungen angegeben (T_n). Diese wurden an einigen Punkten durchgeführt, angegeben ist jeweils der Wert der nächstgelegenen Messung. Abbildung 39 zeigt nun die Mittelwerte aus Messungen und Simulation für das jeweilige Frequenzband.

Die Übereinstimmung zwischen Impulsmessung und Simulation ist sehr gut, die Abweichung zwischen Rausch- und Impulsmessung bei den beiden hohen Oktaven erklärt sich wohl aus der sich hier bemerkbar machenden Welligkeit in der Richtcharakteristik der Lautsprecheranordnung. Bemerkenswert ist noch der Abfall der EDT von 250 zu 125 Hertz hin; im allgemeinen versucht man, eine Nachhallzunahme zu tiefen Frequenzen hin zu erzielen, was dem Raumeigenklang einen "warmen" Charakter verleiht. Möglicherweise tritt im untersuchten Fall durch die Lattenroste an den Wänden und die Deckenbeschaffenheit bei tiefen Frequenzen Resonanzabsorption auf.

Der Stationäre Schalldruckpegel schwankt im Rahmen der Meßgenauigkeit kaum. Mit $(6,5 \pm 1)$ dB erfaßt man nahezu alle Werte außer denen der 4000- Hertz- Oktav, wohl aus den oben angegebenen Gründen. Wie bereits erwähnt, hängt dieser Pegel - jedenfalls bei der Messung - nur von der EDT und dem Raumvolumen ab und stellt lediglich einen Erwartungswert dar; dennoch befinden sich Meß- und Simulationsergebnisse in zufriedenstellender Übereinstimmung.

Bisher wurden im Rahmen dieses Kapitels hauptsächlich Ergebnisse der 1000- Hertz- Messung, beziehungsweise -Simulation betrachtet. Abbildung 40 zeigt nun die Deutlichkeitswerte aus Messung und Simulation am Meßplatz n3 in Abhängigkeit vom untersuchten Frequenzband. Das Maximum bei 125 Hertz liefert ein weiteres Indiz für die Resonanzabsorptionshypothese, da an diesem Meßplatz in der Mitte des Saals Wandreflexionen erst nach 50 Millisekunden eintreffen.

Abbildung 40 : Deutlichkeit (Frequenz) am Meßplatz n3

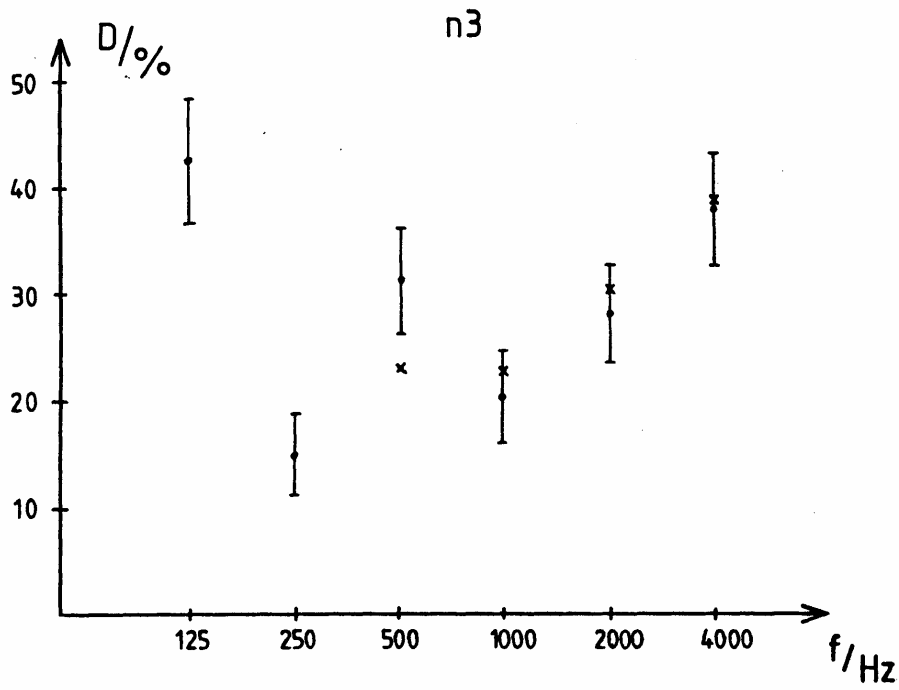
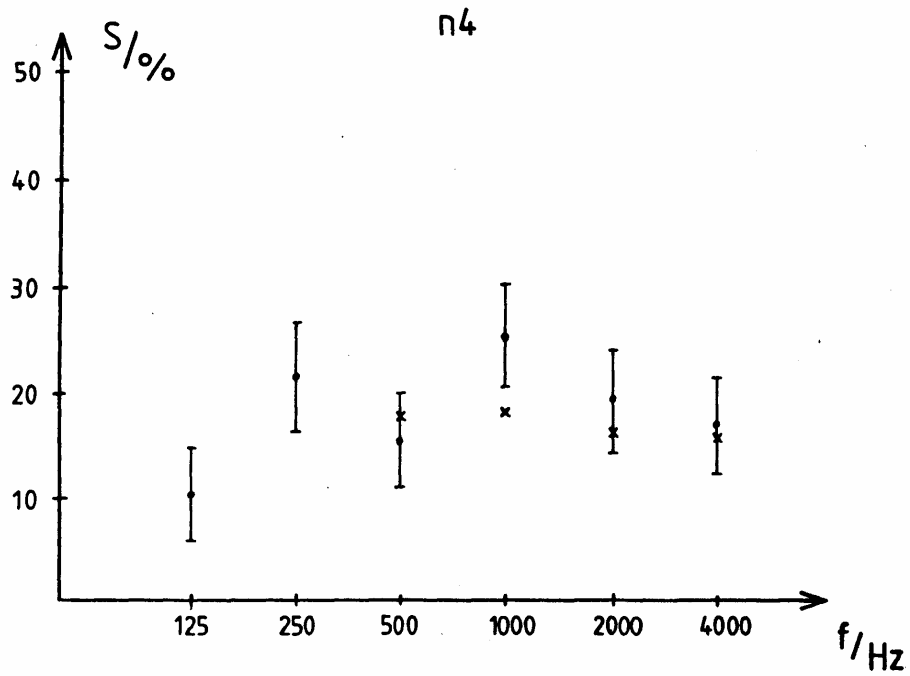


Abbildung 41 : Seitenschallgrad (Frequenz) am Meßplatz n4



Eine weitere frequenzabhängige Auftragung, dieses Mal für den Seitenschallgrad am Platz n4, zeigt Abbildung 41. Die Frequenzabhängigkeit des Seitenschallgrades an diesem Meßplatz ist im Rahmen der Meßgenauigkeit nur schwach ausgeprägt, was wohl in der zentralen Lage des Meßplatzes seine Ursache hat.

Wie man aus den Abbildungen 40 und 41 und aus dem Anhang A ersieht, sind die Ergebnisse für die anderen simulierten Frequenzbänder 500, 2000 und 4000 Hertz ähnlich gut wie für die 1000- Hertz- Oktav, wobei man bei 4000 Hertz aus den genannten Gründen etwas vorsichtiger sein muß.

Für die Mittenfrequenzen 125 und 250 Hertz wurde keine Simulation durchgeführt, da die Vergleichbarkeit wegen der Länge des Anregungssignals bei tiefen Frequenzen fraglich erscheint. Das 1000- Hertz- Band beinhaltet bei relativ kurzer Anregungsdauer (vergleiche Abbildung 16) noch einige wichtige Anteile etwa des Spektrums eines Orchesters, in den höheren Bändern befindet man sich bereits in einem Bereich, in dem fast nur Obertöne übertragen werden. Deshalb wurde die 1000- Hertz- Oktav bevorzugt zu Vergleichszwecken herangezogen.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Übereinstimmung zwischen den berechneten und den simulierten raumakustischen Parametern im Rahmen der erwähnten Genauigkeiten und mit den genannten Einschränkungen recht gut ist. Wünschenswert wären über das untersuchte hinaus Aussagen über das akustische Verhalten eines Raumes im besetzten Zustand, woran bereits gearbeitet wird [2]; zum Vergleich müßte dann allerdings auch eine Messung mit Publikum herangezogen werden, was praktisch schwer durchzuführen ist. Ein großes Problem der Raummodellierung ist die wirklichkeitsnahe Berücksichtigung der Absorption: hier ist man meist auf Absorptionsgradtabellen angewiesen, deren Angaben für gleiche Materialien oft erheblich streuen; eine in- situ- Messung der Absorption wäre wünschenswert, insbesondere für den Fall bereits bestehender Räume, da Materialproben oft schwer oder gar nicht zu bekommen sind.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde - aufbauend auf das Kriterium von Dietsch - ein echokritischer Parameter angegeben, der auf der Raumimpulsantwort basierend das Echowverhalten eines Raumes gut beschreibt; darüberhinaus wurde der Versuch unternommen, daraus quantitative Aussagen über die Echowahrnehmung zu machen, was mit den beschriebenen Einschränkungen ebenfalls gelang.

Weiterhin wurde eine Raumimpulsantwortmessung mit einer neuartigen Schallquelle durchgeführt und ihre Ergebnisse mit den entsprechenden von Computersimulationen verglichen. Hierbei wurde gute Übereinstimmung festgestellt.

Was die Echoanalyse nach dem beschriebenen Verfahren angeht, so läßt sie sich gewiß noch optimieren, indem man weitere Hörversuchsreihendurchführt. Die Zeitbreite α etwa, die der EK-Kurve (Abbildung 9) zugrunde liegt, entbehrt nicht einer gewissen Willkür, die im Rahmen dieser Arbeit nicht zu vermeiden war. Wichtig wäre es, das Verfahren in realen Räumen unter realistischen Bedingungen zu testen, also im besetzten Zustand, was nur schwer durchführbar ist, oder aber eine realitätsnähere Raumsimulation durchzuführen, durch verbesserte Verhallungseinrichtungen oder - was auf das gleiche hinausläuft - durch Faltung von Musik oder Sprache mit gemessenen oder simulierten Impulsantworten, wobei allerdings das Wiedergabeproblem erneut auftritt.

Die beschriebenen Computersimulationsverfahren werden durch die Messung weitgehend bestätigt, wenn auch Feinstrukturen der Raumimpulsantwort nicht wiedergegeben werden; das Ohr kann solche Feinheiten ebensowenig auflösen; was wir hören, ist das Signal, gefaltet mit der Impulsantwort des Übertragungsweges einschließlich des Raumes, gefaltet mit der Impulsantwort des Ohres, bewertet durch die Weiterverarbeitung von Nerven und Gehirn, wobei man gerade über die letztgenannten Prozesse der sinnlichen Wahrnehmung sehr wenig weiß. Ein energetisch integrierendes Verhalten des Ohres scheint wahrscheinlich, eine Annahme, die etwa durch das Phänomen der Nachverdeckung bestärkt wird. Für die Raumakustik ist es wünschenswert, bereits in der Planungsphase Aussagen über zu erwartende Werte für Parameter wie Nachhallzeit, bzw. Early Decay Time, oder Schalldruckpegel zu bekommen, auch die zu erwartenden Werte für die anderen Parameter sind von Fall zu Fall von großem Interesse. Diese Vorhersagen liefert das beschriebene Strahlverfolgungsprogramm, ebenso wie den globalen Verlauf der Raumimpulsantwort.

Ob die durch Kombination aus ray- tracing und Spiegelquellenmethode gewonnenen Reflektogramme bei Faltung mit Musik oder Sprache einen realitätsnahen Höreindruck vermitteln können, ist noch zu erproben. Wahrscheinlich sind feinaufgelöste Strahlverfolgungsimpulsantworten vorzuziehen, da hier auch die Schallstreuung Berücksichtigung findet. Um mehr Wirklichkeitsnähe zu erzielen, wäre es sinnvoll, das beidohrige Hören des Menschen zu berücksichtigen und die Impulsantworten für jedes Ohr einzeln zu berechnen, was eine Zeitauflösung in der Größenordnung der Schalllaufzeit zwischen den Ohren (einige hundert Mikrosekunden) erfordert. Zum Vergleich mit der Realität wäre dann etwa eine Kunstkopfaufnahme, beziehungsweise -messung heranzuziehen.

Schlußwort

Der Autor möchte Herrn Professor Kuttruff für zahlreiche fruchtbare Diskussionen und hilfreiche Anregungen danken, außerdem allen Angehörigen des Instituts für Technische Akustik, die zum Zustandekommen dieser Arbeit durch Tips, Bereitstellen von technischen Geräten und Assistenz bei Messungen und Zeichnungen beigetragen haben, sowie sämtlichen Hörtestteilnehmern.

Literatur

- [1] Cremer, L., und Müller, H.A., Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. Band 1 : Geometrische Raumakustik. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1976.
- [2] Vorländer, M., Zur Leistungsfähigkeit des Schallteilchenmodells. Dissertation, RWTH Aachen (in Vorbereitung).
- [3] Stephenson, U., Bestimmung physikalischer Schallfeldparameter, die für den "Räumlichkeitseindruck" in Räumen maßgeblich sind. Diplomarbeit RWTH Aachen 1982.
- [4] Kuttruff, H. Room Acoustics (second edition). Applied Science Publishers, London 1979.
- [5] Dietsch, L., Objektive raumakustische Kriterien zur Erfassung von Echostörungen und Lautstärke bei Musik- und Sprachdarbietungen. Dissertation, Technische Universität Dresden 1983 (Auszüge hieraus in [15]).
- [6] Zwicker, E., Psychoakustik. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1982.
- [7] Taschenbuch Akustik. VEB Verlag Technik, Berlin 1984.
- [8] Yamamoto, T., The perceptible limit of the echo due to multiplex reflections. J. Acoust. Soc. Jap. 27 [1971], 153.
- [9] Kuttruff, H., Über Autokorrelationsmessungen in der Raumakustik. Acustica 16 [1965 / 66], 166.
- [10] Meyer, J., Akustische und musikalische Aufführungspraxis. Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt am Main 1972.
- [11] Jerusalem, A., Berechnung der Schallausbreitung in Räumen nach einem "ray-tracing"-Verfahren. Diplomarbeit RWTH Aachen 1986.
- [12] Vorländer, M., Calculations of the transient and steady statesound propagation with a new combined sound particle-image source-method. J. Acoust. Soc. Am. (in Vorb.).
- [13] Vorländer, M., Ein Strahlverfolgungsprogramm zur Berechnung von Schallfeldern in Räumen. Acustica 65 [1988], 138.
- [14] Vorländer, M., Die Genauigkeit von Berechnungen mit dem raumakustischen Schallteilchenmodell und ihre Abhängigkeit von der Rechenzeit. Acustica 66 [1988], 90.
- [15] Dietsch, L. und Kraak, W., Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen. Acustica 60 [1986], 205.
- [16] Vorländer, M. und Kuttruff, H., Die Abhängigkeit des Seitenschallgrades von der Form und der Flächengestaltung eines Raumes. Acustica 58 [1985], 118.

Verzeichnis der Abbildungen

- 1 Apparatur zur Anfertigung von Hörtestbändern und Messung von Impulsantworten, S.9
- 2 Testreihe 1, verwendete Räume, S.12
- 3 Quadrierte Impulsantwort eines Raumes aus Testreihe 1, S.12
- 4 Testreihe 2, verwendete Räume (1), S.16
- 5 Testreihe 2, verwendete Räume (2), S.16
- 6 Impulsantwort zur Verdeutlichung des Tannenbaumkriteriums, S.19
- 7 Zum Echokriterium nach Yamamoto, S.19
- 8 Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit, S.22
- 9 EK : Funktion zur Ermittlung der "Echoanfälligkeit", S.22
- 10 Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv: Sprache, S.24
- 11 Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv: Streicher, S.24
- 12 Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv: Jazz, S.25
- 13 Ergebnisse der Echoanalyse, Motiv: Schlagzeug, S.25
- 14 Meßapparatur, S.30
- 15 a) Impulsantwort eines Bandpaßfilters, oktavbreit um um 1000 Hertz,
b) Spektrum von a), S.31
- 16 a) Impulsantwort des Lautsprechersystems, angeregt durch das Signal aus Abbildung 15,
b) Spektrum von a), S.32
- 17 Integrierte Impulsantwort in Abhängigkeit von der Abbruchzeit, S.35
- 18 Seitenschallgradmessung : Ausrichtung der Mikrofone, S.35
- 19 Eurogreß: Grundriß und Meßplätze, S.39
- 20 Quadrierte Impulsantwort von a) Messung b) Simulation am Platz n3, S.41
- 21 Quadrierte Impulsantwort von a) Messung b) Simulation am Platz n1, S.42
- 22 Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von a) Messung b) Simulation am Platz n3, S.43
- 23 Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von a) Messung b) Simulation am Platz o2, S.44
- 24 Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von Messung und Simulation am Platz n3, S.45
- 25 Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von Messung und Simulation am Platz o1, S.45
- 26 Impulsantwort von a) Messung b) Spiegelquellenmethode und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3, S.48

27	Impulsantwort von a) Messung b) Spiegelquellenmethode und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n6, S.49	
28	Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von a) Messung b) Spiegelquellen und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3, S.50	
29	Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von a) Messung b) Spiegelquellen und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n6, S.51	
30	Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von Messung und Spiegelquellen und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3, S.52	
31	Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von Messung und Spiegelquellen und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n6, S.52	
32	Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von ray- tracing und Spiegelquellen und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3, S.53	
33	Gewichtet geglättete quadrierte Impulsantwort von Messung, ray- tracing und Spiegelquellen und Faltung mit dem Meßsignal am Platz n3, S.53	
34	Integrierte Impulsantwort von a) Messung b) Simulation am Platz n3, S.54	
35	Integrierte Impulsantwort von a) Messung b) Simulation am Platz x1, S.54	
36	Deutlichkeit (1000 Hertz) : Messung und Simulation,	S.58
37	Seitenschallgrad (1000 Hertz) : Messung und Simulation,	S.58
38	Echowert (1000 Hertz) : Messung und Simulation,	S.60
39	Mittlere Early Decay Time und Nachhallzeit,	S.60
40	Deutlichkeit (Frequenz) am Platz n3,	S.62
41	Seitenschallgrad (Frequenz) am Platz n4,	S.62

Verzeichnis der Tabellen

1	Positive Echobewertung bei Testreihe 1	Seite 14
2	Positive Echobewertung bei Testreihe 2	Seite 17
3	Meßprogramm und Echoanalyseprogramm	Seite 37
4	Meßunsicherheiten	Seite 57

Anhang

A Raumakustische Parameter aus Messung und Simulation

B Flußdiagramme verwendeter Programme :

- a) Messprogramm / Echoanalyseprogramm
- b) Automatisiertes Auswertungsprogramm
- c) Konvertierungsprogramm

ANHANG A : RAUMAKUSTISCHE PARAMETER

Meßplatz : n1	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 18,39 %		
Deutlichkeit	= 42,10 %		
Clarity	= 1,39 dB		
Early Decay Time	= 2,12 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 131,0 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,3 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 11,34 %		
Deutlichkeit	= 54,80 %		
Clarity	= 3,19 dB		
Early Decay Time	= 2,71 s		2,5 s
Schwerpunktzeit	= 98,3 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,4 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 14,68 %	18,6 %	
Deutlichkeit	= 49,42 %	42,2 %	
Clarity	= 1,91 dB	1,1 dB	
Early Decay Time	= 2,56 s	2,35 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 122,9 ms	137,1 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB	8,7 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 5,95 %	17,5 %	
Deutlichkeit	= 62,20 %	42,7 %	
Clarity	= 3,52 dB	0,9 dB	
Early Decay Time	= 2,35 s	2,48 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 88,1 ms	141,7 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,7 dB	8,9 dB	
Echwert	= 1,03	1,58	
	(bei 137 ms)	(bei 60 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 10,52 %	17,8 %	
Deutlichkeit	= 54,26 %	51,2 %	
Clarity	= 2,14 dB	2,8 dB	
Early Decay Time	= 1,86 s	1,88 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 97,3 ms	96,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,7 dB	7,4 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= /	17,1 %	
Deutlichkeit	= 86,94 %	59,8 %	
Clarity	= 9,39 dB	4,8 dB	
Early Decay Time	= 1,75 s	1,61 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 26,1 ms	65,6 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,5 dB	6,8 dB	

Meßplatz : n2	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 5,26 %		
Deutlichkeit	= 48,81 %		
Clarity	= 1,10 dB		
Early Decay Time	= 1,99 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 110,4 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,0 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 12,08 %		
Deutlichkeit	= 23,01 %		
Clarity	= -2,16 dB		
Early Decay Time	= 2,45 s		2,5 s
Schwerpunktzeit	= 176,6 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,9 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 9,60 %	14,9 %	
Deutlichkeit	= 39,00 %	31,0 %	
Clarity	= -1,16 dB	-1,1 dB	
Early Decay Time	= 2,46 s	2,74 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 167,1 ms	164,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,9 dB	7,5 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 12,91 %	15,6 %	
Deutlichkeit	= 37,05 %	29,4 %	
Clarity	= -0,46 dB	-1,5 dB	
Early Decay Time	= 2,46 s	2,48 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 142,7 ms	175,2 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,9 dB	7,4 dB	
Echowert	= 1,79	2,31	
	(bei 76 ms)	(bei 56 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 18,15 %	15,8 %	
Deutlichkeit	= 33,17 %	39,6 %	
Clarity	= -1,31 dB	1,0 dB	
Early Decay Time	= 1,89 s	1,99 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 136,4 ms	119,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,8 dB	5,6 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= /	15,0 %	
Deutlichkeit	= 65,36 %	45,6 %	
Clarity	= 4,40 dB	2,3 dB	
Early Decay Time	= 1,49 s	1,73 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 60,4 ms	91,7 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,8 dB	4,8 dB	

Meßplatz : n3 -----	Messung	Simulation	Rauschen
Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 7,60 %		
Deutlichkeit	= 42,12 %		
Clarity	= 0,36 dB		
Early Decay Time	= 1,98 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 126,3 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,0 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 18,41 %		
Deutlichkeit	= 14,80 %		
Clarity	= -6,26 dB		
Early Decay Time	= 2,80 s		2,5 s
Schwerpunktzeit	= 214,2 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,5 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 10,10 %	17,7 %	
Deutlichkeit	= 31,13 %	22,8 %	
Clarity	= -1,40 dB	-2,7 dB	
Early Decay Time	= 2,98 s	2,99 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 169,3 ms	186,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,8 dB	6,7 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 14,92 %	16,4 %	
Deutlichkeit	= 20,68 %	22,6 %	
Clarity	= -3,56 dB	-2,7 dB	
Early Decay Time	= 2,57 s	2,53 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 180,9 ms	188,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB	6,8 dB	
Echowert	= 3,18	2,60	
	(bei 91 ms)	(bei 53 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 17,69 %	17,1 %	
Deutlichkeit	= 28,51 %	30,6 %	
Clarity	= -0,94 dB	-0,4 dB	
Early Decay Time	= 1,99 s	2,19 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 135,0 ms	132,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,0 dB	4,7 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 22,79 %	15,7 %	
Deutlichkeit	= 37,96 %	38,1 %	
Clarity	= 1,43 dB	1,4 dB	
Early Decay Time	= 1,54 s	1,65 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 95,0 ms	100,2 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,9 dB	3,7 dB	

Meßplatz : n3b	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 11,25 %		
Deutlichkeit	= 37,67 %		
Clarity	= -0,25 dB		
Early Decay Time	= 2,36 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 136,5 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,8 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 9,20 %		
Deutlichkeit	= 14,78 %		
Clarity	= -4,32 dB		
Early Decay Time	= 2,82 s		2,5 s
Schwerpunktzeit	= 235,3 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,5 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 11,54 %	17,7 %	
Deutlichkeit	= 32,47 %	22,8 %	
Clarity	= -2,41 dB	-2,7 dB	
Early Decay Time	= 2,33 s	2,99 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 202,5 ms	186,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,7 dB	6,7 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 24,95 %	16,4 %	
Deutlichkeit	= 24,22 %	22,6 %	
Clarity	= -2,56 dB	-2,7 dB	
Early Decay Time	= 2,55 s	2,53 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 175,7 ms	188,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB	6,8 dB	
Echwert	= 2,88	2,60	
	(bei 57 ms)	(bei 53 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 14,55 %	17,1 %	
Deutlichkeit	= 34,18 %	30,6 %	
Clarity	= -0,24 dB	-0,4 dB	
Early Decay Time	= 1,91 s	2,19 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 127,0 ms	132,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,8 dB	4,7 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 11,92 %	15,7 %	
Deutlichkeit	= 54,69 %	38,6 %	
Clarity	= 3,44 dB	3,7 dB	
Early Decay Time	= 1,46 s	1,65 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 70,2 ms	100,2 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,7 dB	3,7 dB	

Meßplatz : p3	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 6,13 %		
Deutlichkeit	= 33,50 %		
Clarity	= -0,47 dB		
Early Decay Time	= 1,85 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 128,8 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,7 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 10,30 %		
Deutlichkeit	= 14,30 %		
Clarity	= -5,66 dB		
Early Decay Time	= 2,44 s		2,5 s
Schwerpunktzeit	= 231,4 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,9 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 6,25 %	17,7 %	
Deutlichkeit	= 34,44 %	22,8 %	
Clarity	= -1,87 dB	-2,7 dB	
Early Decay Time	= 2,82 s	2,99 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 186,4 ms	186,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,5 dB	6,7 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 14,52 %	16,4 %	
Deutlichkeit	= 23,31 %	22,6 %	
Clarity	= -1,97 dB	-2,7 dB	
Early Decay Time	= 2,57 s	2,53 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 179,1 ms	188,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB	6,8 dB	
Echwert	= 2,89	2,60	
	(bei 55 ms)	(bei 53 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 28,94 %	17,1 %	
Deutlichkeit	= 25,83 %	30,6 %	
Clarity	= -2,74 dB	-0,4 dB	
Early Decay Time	= 2,02 s	2,19 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 154,2 ms	132,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,1 dB	4,7 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 49,52 %	15,7 %	
Deutlichkeit	= 25,95 %	38,6 %	
Clarity	= -1,77 dB	1,4 dB	
Early Decay Time	= 1,50 s	1,65 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 127,0 ms	100,2 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,8 dB	3,7 dB	

Meßplatz : n4 -----	Messung	Simulation	Rauschen
Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 10,74 %		
Deutlichkeit	= 30,21 %		
Clarity	= -0,46 dB		
Early Decay Time	= 1,58 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 147,2 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,0 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 21,25 %		
Deutlichkeit	= 13,21 %		
Clarity	= -4,56 dB		
Early Decay Time	= 2,57 s		2,5 s
Schwerpunktzeit	= 208,9 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 15,59 %	17,7 %	
Deutlichkeit	= 24,60 %	19,8 %	
Clarity	= -1,59 dB	-2,7 dB	
Early Decay Time	= 2,72 s	2,84 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 185,6 ms	197,1 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,4 dB	6,7 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 25,47 %	18,3 %	
Deutlichkeit	= 26,90 %	20,5 %	
Clarity	= -1,76 dB	-2,6 dB	
Early Decay Time	= 2,60 s	2,72 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 172,0 ms	192,7 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,2 dB	6,6 dB	
Echwert	= 2,88	3,19	
	(bei 70 ms)	(bei 67 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 19,30 %	16,8 %	
Deutlichkeit	= 26,50 %	26,0 %	
Clarity	= -0,43 dB	-0,7 dB	
Early Decay Time	= 1,93 s	2,18 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 138,2 ms	149,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,9 dB	4,5 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 17,07 %	16,3 %	
Deutlichkeit	= 41,62 %	34,1 %	
Clarity	= 3,41 dB	1,1 dB	
Early Decay Time	= 1,53 s	1,61 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 84,1 ms	104,9 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,9 dB	3,5 dB	

Meßplatz : n5	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 24,69 %		
Deutlichkeit	= 29,99 %		
Clarity	= -1,86 dB		
Early Decay Time	= 1,66 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 134,3 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,2 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 35,61 %		
Deutlichkeit	= 16,07 %		
Clarity	= -2,68 dB		
Early Decay Time	= 2,40 s		2,7 s
Schwerpunktzeit	= 177,7 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,8 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 14,43 %	24,0 %	
Deutlichkeit	= 25,04 %	20,8 %	
Clarity	= -2,66 dB	-2,8 dB	
Early Decay Time	= 2,40 s	2,51 s	2,7 s
Schwerpunktzeit	= 203,5 ms	184,9 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,8 dB	6,3 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 29,34 %	26,3 %	
Deutlichkeit	= 22,13 %	20,9 %	
Clarity	= -0,45 dB	-2,8 dB	
Early Decay Time	= 2,63 s	2,54 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 160,1 ms	185,8 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,2 dB	6,5 dB	
Echwert	= 3,36	1,84	
	(bei 56 ms)	(bei 65 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 35,93 %	22,3 %	
Deutlichkeit	= 18,63 %	29,2 %	
Clarity	= -1,44 dB	-0,3 dB	
Early Decay Time	= 2,16 s	2,13 s	1,9 s
Schwerpunktzeit	= 140,4 ms	137,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,4 dB	4,1 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 31,86 %	18,4 %	
Deutlichkeit	= 40,21 %	36,5 %	
Clarity	= 2,24 dB	0,8 dB	
Early Decay Time	= 1,93 s	1,83 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 106,9 ms	106,3 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,9 dB	3,0 dB	

Meßplatz : n6	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 13,91 %		
Deutlichkeit	= 24,61 %		
Clarity	= 1,66 dB		
Early Decay Time	= 1,93 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 128,5 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,9 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 60,91 %		
Deutlichkeit	= 13,26 %		
Clarity	= -3,72 dB		
Early Decay Time	= 2,82 s		2,7 s
Schwerpunktzeit	= 174,2 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,5 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 30,59 %	37,0 %	
Deutlichkeit	= 13,74 %	21,9 %	
Clarity	= -3,67 dB	-1,6 dB	
Early Decay Time	= 2,92 s	2,39 s	2,7 s
Schwerpunktzeit	= 191,9 ms	177,9 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,7 dB	6,0 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 33,65 %	36,9 %	
Deutlichkeit	= 32,55 %	21,3 %	
Clarity	= -0,15 dB	-1,8 dB	
Early Decay Time	= 2,65 s	2,65 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 148,1 ms	178,5 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,2 dB	6,2 dB	
Echowert	= 1,75	2,15	
	(bei 83 ms)	(bei 64 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 40,60 %	34,0 %	
Deutlichkeit	= 37,49 %	30,6 %	
Clarity	= 0,77 dB	1,1 dB	
Early Decay Time	= 2,05 s	2,55 s	1,9 s
Schwerpunktzeit	= 121,4 ms	130,8 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,1 dB	3,7 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 36,08 %	30,6 %	
Deutlichkeit	= 53,41 %	37,4 %	
Clarity	= 3,30 dB	2,1 dB	
Early Decay Time	= 1,73 s	1,99 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 84,5 ms	103,3 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,4 dB	2,5 dB	

Meßplatz : o1	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 30,11 %		
Deutlichkeit	= 50,33 %		
Clarity	= 0,54 dB		
Early Decay Time	= 2,10 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 118,9 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,2 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 56,97 %		
Deutlichkeit	= 28,47 %		
Clarity	= -2,88 dB		
Early Decay Time	= 2,93 s		2,6 s
Schwerpunktzeit	= 195,2 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,7 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 32,28 %	46,5 %	
Deutlichkeit	= 45,63 %	32,6 %	
Clarity	= 0,36 dB	-0,6 dB	
Early Decay Time	= 3,22 s	2,59 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 165,5 ms	165,4 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 8,1 dB	7,1 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 65,96 %	46,9 %	
Deutlichkeit	= 37,82 %	30,8 %	
Clarity	= -1,06 dB	-1,1 dB	
Early Decay Time	= 2,58 s	2,59 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 163,3 ms	170,2 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB	7,2 dB	
Echowert	= 1,91	1,91	
	(bei 254 ms)	(bei 59 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 68,40 %	46,9 %	
Deutlichkeit	= 33,83 %	40,5 %	
Clarity	= -1,48 dB	1,1 dB	
Early Decay Time	= 1,86 s	1,86 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 147,9 ms	115,4 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,7 dB	5,3 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 111,72 %	42,8 %	
Deutlichkeit	= 39,61 %	48,9 %	
Clarity	= 0,73 dB	2,8 dB	
Early Decay Time	= 1,46 s	1,54 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 114,4 ms	85,6 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,7 dB	4,4 dB	

Meßplatz : o2	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 18,45 %		
Deutlichkeit	= 42,13 %		
Clarity	= 2,20 dB		
Early Decay Time	= 1,67 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 110,8 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,2 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 37,43 %		
Deutlichkeit	= 32,11 %		
Clarity	= -2,47 dB		
Early Decay Time	= 2,54 s		2,6 s
Schwerpunktzeit	= 198,0 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 22,21 %	36,7 %	
Deutlichkeit	= 30,20 %	26,5 %	
Clarity	= -1,73 dB	-1,8 dB	
Early Decay Time	= 2,46 s	2,54 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 197,4 ms	177,8 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,9 dB	6,8 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 37,93 %	38,0 %	
Deutlichkeit	= 28,81 %	25,4 %	
Clarity	= -2,38 dB	-1,9 dB	
Early Decay Time	= 2,44 s	2,59 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 174,8 ms	181,4 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,9 dB	6,8 dB	
Echowert	= 2,16	2,24	
	(bei 88 ms)	(bei 60 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 41,59 %	34,7 %	
Deutlichkeit	= 20,68 %	33,8 %	
Clarity	= -2,68 dB	0,2 dB	
Early Decay Time	= 1,97 s	1,84 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 159,9 ms	130,6 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,0 dB	5,0 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 48,18 %	33,4 %	
Deutlichkeit	= 31,66 %	43,4 %	
Clarity	= -0,18 dB	2,4 dB	
Early Decay Time	= 1,50 s	1,43 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 119,2 ms	86,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,8 dB	3,8 dB	

Meßplatz : q2	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 19,78 %		
Deutlichkeit	= 37,83 %		
Clarity	= 1,20 dB		
Early Decay Time	= 2,00 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 122,0 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,0 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 29,42 %		
Deutlichkeit	= 26,49 %		
Clarity	= -2,58 dB		
Early Decay Time	= 2,54 s		2,6 s
Schwerpunktzeit	= 207,4 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 31,45 %	36,7 %	
Deutlichkeit	= 26,23 %	26,5 %	
Clarity	= -1,45 dB	-1,8 dB	
Early Decay Time	= 2,98 s	2,54 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 208,2 ms	177,8 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,8 dB	6,8 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 37,24 %	38,0 %	
Deutlichkeit	= 29,67 %	25,4 %	
Clarity	= -1,76 dB	-1,9 dB	
Early Decay Time	= 2,51 s	2,59 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 173,6 ms	181,4 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,0 dB	6,8 dB	
Echwert	= 1,88	2,24	
	(bei 111 ms)	(bei 60 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 20,27 %	34,7 %	
Deutlichkeit	= 27,05 %	33,8 %	
Clarity	= -1,57 dB	0,2 dB	
Early Decay Time	= 1,97 s	1,84 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 144,0 ms	130,6 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,0 dB	5,0 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 22,64 %	33,4 %	
Deutlichkeit	= 34,71 %	43,4 %	
Clarity	= 0,77 dB	2,4 dB	
Early Decay Time	= 1,51 s	1,43 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 117,6 ms	86,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 4,8 dB	3,8 dB	

Meßplatz : o3	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 10,72 %		
Deutlichkeit	= 36,26 %		
Clarity	= -0,19 dB		
Early Decay Time	= 2,57 s		1,8 s
Schwerpunktzeit	= 127,7 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 23,14 %		
Deutlichkeit	= 24,07 %		
Clarity	= -1,81 dB		
Early Decay Time	= 2,50 s		2,6 s
Schwerpunktzeit	= 182,6 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,0 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 25,55 %	39,4 %	
Deutlichkeit	= 27,37 %	23,1 %	
Clarity	= -3,19 dB	-2,4 dB	
Early Decay Time	= 2,58 s	2,22 s	2,6 s
Schwerpunktzeit	= 217,1 ms	180,7 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB	6,3 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 28,04 %	39,1 %	
Deutlichkeit	= 30,75 %	24,1 %	
Clarity	= -1,83 dB	-2,1 dB	
Early Decay Time	= 2,61 s	2,66 s	2,5 s
Schwerpunktzeit	= 169,5 ms	183,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,2 dB	6,5 dB	
Echowert	= 2,13	1,93	
	(bei 112 ms)	(bei 58 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 29,37 %	38,0 %	
Deutlichkeit	= 20,91 %	32,0 %	
Clarity	= -2,64 dB	-0,2 dB	
Early Decay Time	= 2,02 s	1,81 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 152,7 ms	125,7 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,1 dB	4,4 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 27,44 %	38,3 %	
Deutlichkeit	= 33,11 %	40,0 %	
Clarity	= 1,08 dB	1,7 dB	
Early Decay Time	= 1,60 s	1,60 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 108,9 ms	96,0 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,1 dB	3,4 dB	

Meßplatz : x1	Messung	Simulation	Rauschen

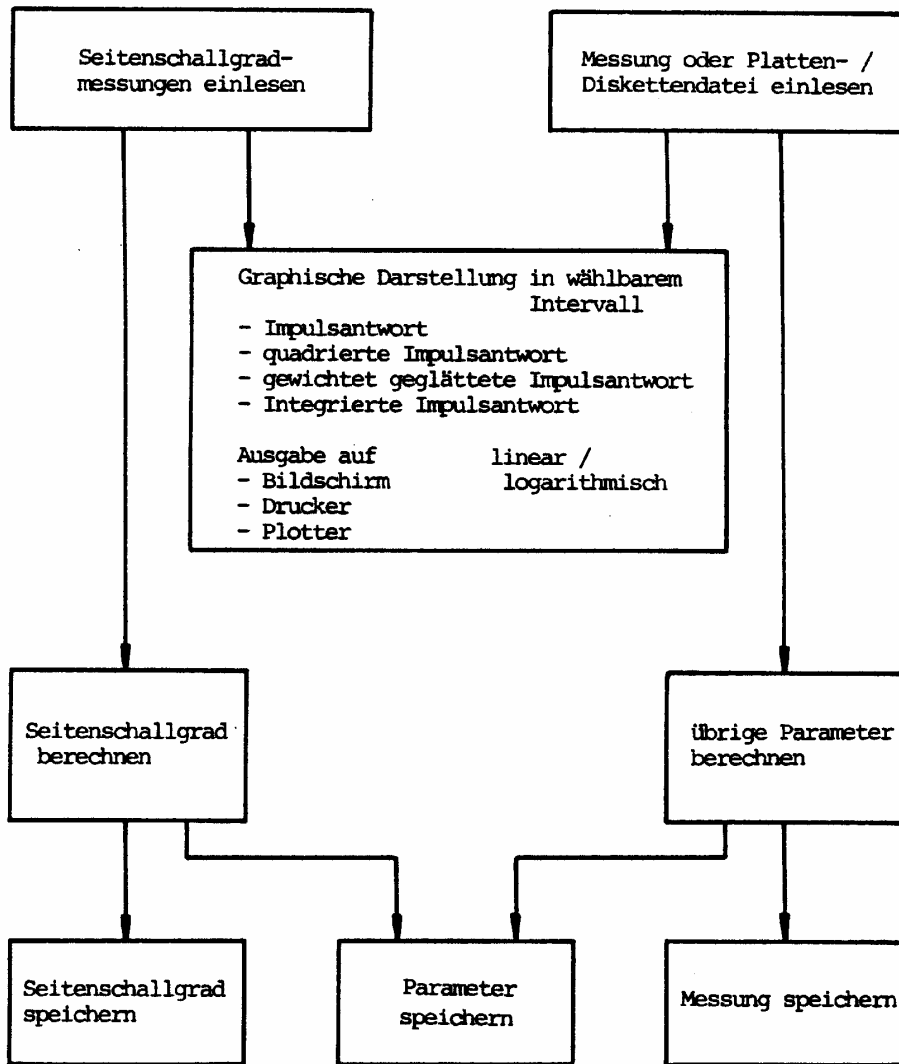
Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 1,77 %		
Deutlichkeit	= 38,70 %		
Clarity	= 0,47 dB		
Early Decay Time	= 1,76 s		1,6 s
Schwerpunktzeit	= 144,1 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,5 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 4,86 %		
Deutlichkeit	= 29,40 %		
Clarity	= -1,63 dB		
Early Decay Time	= 2,27 s		2,7 s
Schwerpunktzeit	= 178,3 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,6 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 12,47 %	30,8 %	
Deutlichkeit	= 20,39 %	29,2 %	
Clarity	= -3,60 dB	-1,3 dB	
Early Decay Time	= 2,64 s	2,71 s	2,2 s
Schwerpunktzeit	= 194,2 ms	151,7 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,2 dB	5,0 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 41,86 %	31,1 %	
Deutlichkeit	= 25,12 %	26,8 %	
Clarity	= -2,16 dB	-1,8 dB	
Early Decay Time	= 2,58 s	2,55 s	2,1 s
Schwerpunktzeit	= 169,0 ms	162,1 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,1 dB	5,3 dB	
Echowert	= 1,91	1,95	
	(bei 254 ms)	(bei 82 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 25,04 %	27,7 %	
Deutlichkeit	= 22,43 %	35,9 %	
Clarity	= -1,20 dB	0,3 dB	
Early Decay Time	= 2,23 s	1,77 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 144,1 ms	104,2 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,5 dB	3,1 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 35,97 %	27,2 %	
Deutlichkeit	= 27,25 %	44,6 %	
Clarity	= -0,01 dB	2,8 dB	
Early Decay Time	= 1,63 s	1,52 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 115,5 ms	77,3 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,1 dB	1,3 dB	

Meßplatz : x2	Messung	Simulation	Rauschen

Frequenz : 125 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 17,54 %		
Deutlichkeit	= 32,59 %		
Clarity	= -1,11 dB		
Early Decay Time	= 2,16 s		1,6 s
Schwerpunktzeit	= 151,7 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,4 dB		
Frequenz : 250 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 8,15 %		
Deutlichkeit	= 17,00 %		
Clarity	= -4,25 dB		
Early Decay Time	= 2,85 s		2,7 s
Schwerpunktzeit	= 212,4 ms		
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,6 dB		
Frequenz : 500 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 33,14 %	25,1 %	
Deutlichkeit	= 32,50 %	20,5 %	
Clarity	= -1,31 dB	-2,4 dB	
Early Decay Time	= 2,89 s	2,41 s	2,2 s
Schwerpunktzeit	= 162,5 ms	157,3 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 7,6 dB	5,8 dB	
Frequenz : 1000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 26,61 %	24,0 %	
Deutlichkeit	= 21,61 %	19,9 %	
Clarity	= -3,48 dB	-3,0 dB	
Early Decay Time	= 2,44 s	2,44 s	2,1 s
Schwerpunktzeit	= 187,6 ms	173,4 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,9 dB	6,0 dB	
Echowert	= 2,64	1,76	
	(bei 81 ms)	(bei 118 ms)	
Frequenz : 2000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 31,48 %	22,9 %	
Deutlichkeit	= 36,55 %	27,6 %	
Clarity	= -0,04 dB	-1,0 dB	
Early Decay Time	= 2,17 s	1,77 s	1,8 s
Schwerpunktzeit	= 132,3 ms	123,3 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 6,4 dB	3,8 dB	
Frequenz : 4000 Hertz			
SeitenSchallgrad	= 44,35 %	18,2 %	
Deutlichkeit	= 38,34 %	41,0 %	
Clarity	= 1,06 dB	1,9 dB	
Early Decay Time	= 1,59 s	1,42 s	1,3 s
Schwerpunktzeit	= 102,9 ms	87,3 ms	
Stationärer Schalldruckpegel	= 5,0 dB	2,2 dB	

Anhang B : Flußdiagramme verwendeter Programme

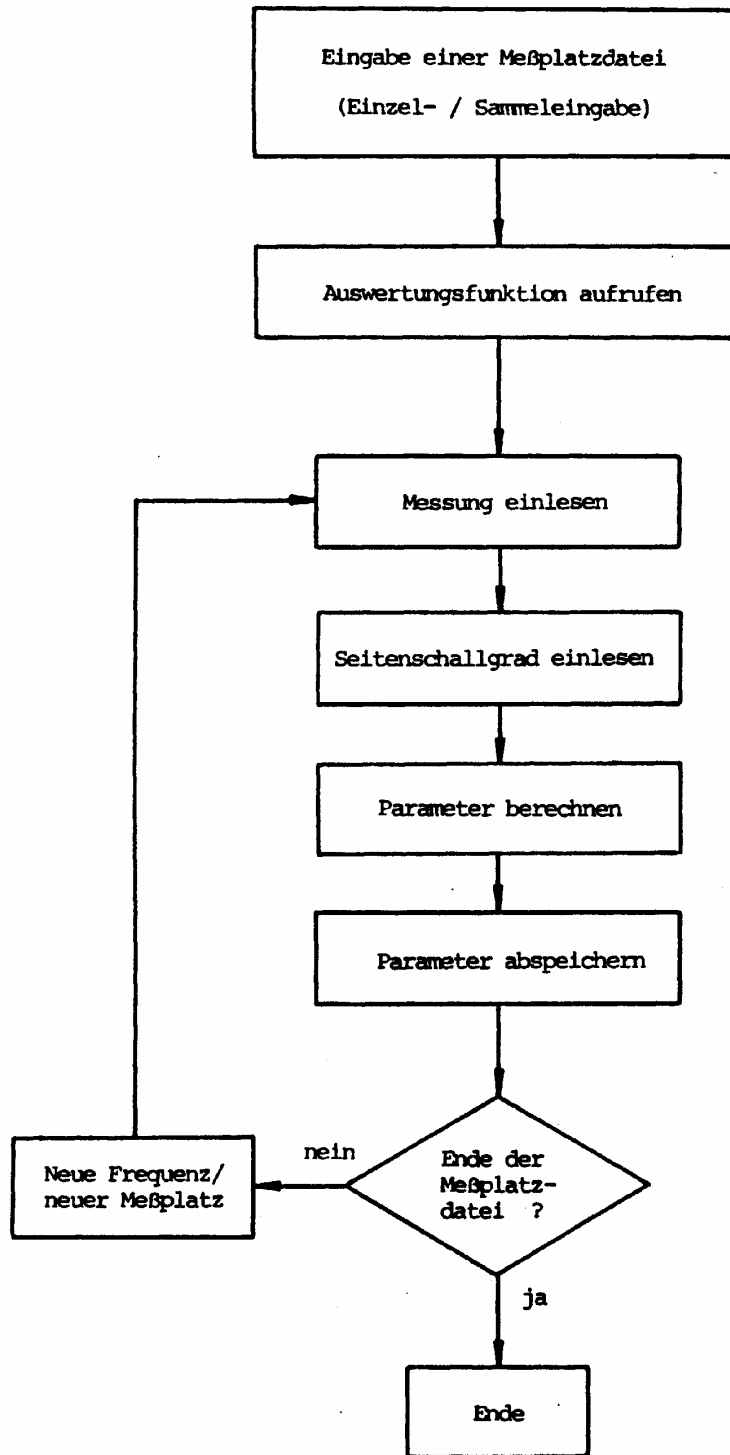
a) Meßprogramm / Echoanalyseprogramm



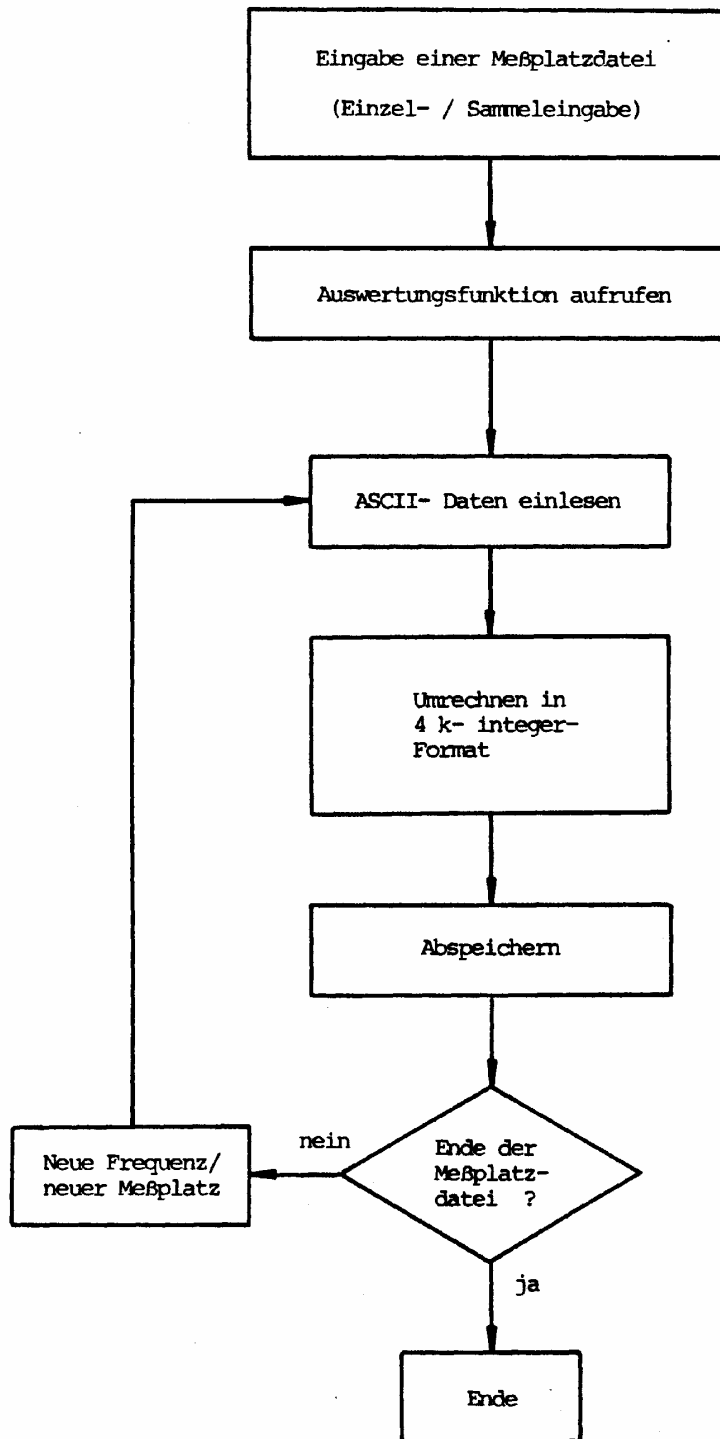
Abweichungen des Echoanalyseprogramms :

- Wegfall der Seitenschallanalyse
- Erweiterung der Grafik :
 - Autokorrelationsfunktion
 - Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit mit veränderbarem Bewertungsexponenten
 - EK - Kurve mit veränderbarer Zeitbreite

b) Automatisiertes Auswertungsprogramm



c) Konvertierungsprogramm



Darstellung des Bildungswegs von Dieter Hoffmann

- geboren am 04.12.1962 in Koblenz
- 1969 - 1973 Grundschule Dieblich
- 1973 - 1981 Staatliches Görres- Gymnasium Koblenz
- 1981 Abitur ebendort
- 1981 - 1982 Bundeswehr
- seit Wintersemester 1982 / 83 Studium der Physik an der RWTH Aachen
- 1984 Vordiplom ebendort