

Der Mythos der “schädlichen” frühen Reflexionen

Wenn man Diskussionforen im Internet, Audiozeitschriften und Webseiten von Herstellern liest, wird einem ständig die Botschaft vermittelt, daß frühe Reflexionen erster Ordnung grundsätzlich schlecht seien und eliminiert bzw. im Pegel abgesenkt werden müssen, entweder durch strategische Positionierung von Lautsprechern und Hörplatz (Theiss 1996b), durch akustische Behandlung (Völker 1998, Völker 1999), oder durch Verwenden von Lautsprechern mit hoher Directivity oder von Dipolen (Linkwitz 2007). Oftmals wird auf Abhörbedingungen in Studiokontrollräumen (Stichwort: reflexionsfreie Zone) bzw. Standards oder Empfehlungen wie z.B. SSF-01 2002 verwiesen, wo Reflexionen innerhalb der ersten 15 ms um 10 dB leiser sein sollen als der Direktschall.

1. In geschlossenen Räumen wird der von einer Schallquelle ausgestrahlte Direktschall immer von Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen begleitet.

Was sind frühe Reflexionen erster Ordnung?

Frühe Reflexionen erster Ordnung sind diejenigen Reflexionen, die 1. von nur einer Raumbegrenzungsfläche reflektiert werden, bevor sie beim Hörer eintreffen und die 2. innerhalb des Zeitfensters ankommen, in welchem der Präzedenz-Effekt wirksam ist. Die relevante Literatur (z.B. Blauert et al. 2005, Damaske 1967/68, Kuhl 1978, Litovsky 1999) gibt für verschiedene Signale (Klicklaute, Rauschen, Sprache, langsame oder schnelle Musik) verschiedene Obergrenze dieses Zeitfensters an, als Maximalwert wird 80 ms genannt (siehe auch Michelsen et al. 1997). In akustisch kleinen Räumen jedoch, d.h. in Räumen, in denen die Raumabmessungen kleiner sind als die in Frage kommenden Wellenlängen (17.15 m bei 20 Hz), gibt es keine frühen Reflexionen mit derartigen Verzögerungen gegenüber dem Direktschall. In Hinblick auf Devantier (2002) und insbesondere Bech (1995) scheint 20 ms ein angemessener Wert.

Die Laufzeit der frühen Reflexionen bestimmt den Eindruck von der Größe des Raumes. Dies gilt für natürliches Hören und auch für zweikanalige Schallübertragung (Kuhl 1978).

In Aufführungssälen sind frühe Reflexionen (<80 ms) für den räumlichen Eindruck verantwortlich, Verbreiterung der Abbildung, scheinbare Ausdehnung der Schallquelle (Blauert 1986, Tohyama 1989), während späte Reflexionen (>80 ms) für die Einhüllung des Zuhörers verantwortlich sind.

2. Zuerst sind zwei Fragen zu stellen (Rubak 2004):

1. Wo liegen die absoluten Wahrnehmbarkeitsschwellen AWS
2. Wann werden Reflexionen als störend angesehen

Bei dieser Fragestellung ist es interessant anzumerken, daß „AWS keinesfalls die Empfindung der hörbaren Reflexionen beschreiben, nämlich welche mehrdimensionale Wahrnehmungsänderungen eintreten, sobald Reflexionen oberhalb der AWS sind“ und „Reflexionen können deutlich hörbar sein, jedoch nicht als störend wahrgenommen werden“ (Brüggen 2001).

Idealerweise werden die Experimente, die Antworten zu obigen Fragen finden sollen, unter realistischen heimischen Hörbedingungen durchgeführt, d.h. in akustisch kleinen Räumen und mit über 2-Kanal Stereolautsprecher wiedergegebener Musik. „Raumakustische Änderungen nehmen jedoch immer eine gewisse Zeit in Anspruch. Dadurch wird das raumakustische Gedächtnis der Versuchspersonen vielfach überfordert. Auch ist es meistens unmöglich, nur einen Schallfeldparameter getrennt und unabhängig von den anderen zu verändern“ (Reichardt et al.

1967). Die beste Lösung ist es daher, synthetische Schallfelder zu verwenden (Bech 1995, Reichardt et al. 1967), oder Ansätze wie den „aktiven Hörraum“ von Naqvi (2005). Derzeit hat nur eine geringe Anzahl Forscher tatsächlich Interesse an diesem speziellen Thema gezeigt. Weiterhin ist Musik das am wenigsten geeignete Signal, um die Wahrnehmbarkeit individueller Reflexionen zu untersuchen, da Musik kontinuierlich ist, eine zeitlich komplexe Struktur aufweist und meistens Nachhall enthält, welcher maskierend wirkt (Jensen et al. 2003).

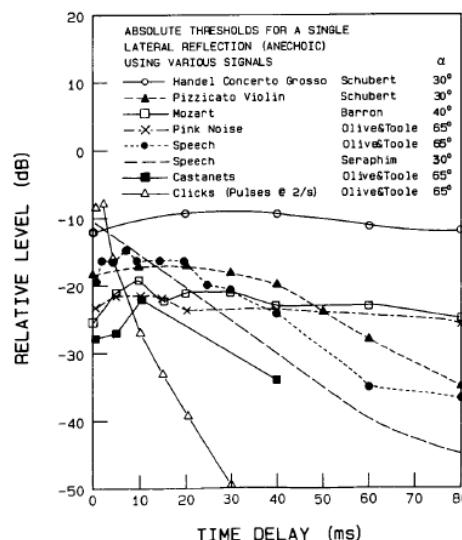
Jedoch sind Parameter wie AWS oder die Grenzen des Zeitfensters des Präzedenzeffekts unterschiedlich für künstliche Signale, Sprache und Musik, subjektive Eindrücke von Räumen sind unterschiedlich für Sprache und Musik (Völker 1983a, Völker 1983b), der Einfluss von z.B. Reflexionen (kontralateral und von hinten) auf die Abbildungsgröße ist bei Musik geringer als z.B. bei Pulsen oder Sprache (Wrightson et al. 1986), die Schwellenwerte für Echostörungen sind bei Sprache niedriger als bei Musik (siehe Abb. 7, Dietsch et al. 1986). Daher können Ergebnisse von Experimenten, bei denen künstliche Signale oder Sprache benutzt wurden, nicht ohne weiteres auf Musik übertragen werden.

Um die ermittelten AWS in Perspektive zu setzen, werden gemessene Mittelwerte von zeitlicher Verzögerung und Abschwächung früher Reflexionen gegenüber dem Direktschall in realen Hörräumen angegeben (Devantier 2002); Zahlen in Klammern von Bech (1995) berechnet:

- Fußboden: 1.8 ms, 1.5 dB (3.6 dB)
- Decke: 4.9 ms, 3.6 dB (5 dB)
- Seitenwände: 9.3 ms, 3.6 dB (kleinster Winkel: 0-20°) (9.7 dB)
 12.6 ms, 5.7 dB (2. Winkel: 30-70°)
 9.1 ms, 6.6 dB (3. Winkel: 80-110°)
 4.4 ms, 3.3 dB (größter Winkel: 110-180°)

2.1 Abb. 1 zeigt die AWS einer Seitenreflexion für verschiedene Signale (Klicklaute, Rauschen, Sprache, Musik):

Abb.1 (Olive et al. 1989, Abb.6)



Betrachtet man die AWS für (wohnraumtypische) 10 ms Verzögerung, stellt man fest, daß Klicklaute am leichtesten wahrzunehmen sind, gefolgt von Rauschen, Musik und Sprache. Wie Abb. 2 und 3 zu entnehmen ist, hängen die AWS bei Musik mit Werten zw. -18 und -10 dB (Abb.2: richtungsgleich) und zw. -25 und -18 dB (Abb.3: 60° lateral) stark vom Musikmotiv ab.

Bei Rauschen wurden Unterschied von bis zu 8 dB zw. den einzelnen Hörern festgestellt (Olive et al. 1989).

Abb.2 Abhängigkeit der AWS vom Musikmotiv, richtungsgleiche Reflexion (Schubert 1966, Abb.2)

- 1 Violinpizzicato
- 2 Choral f. Violine, Cello, Klarinette, Oboe
- 3 Mozart: Sinfonie KV 385
- 4 Mozart : Sinfonie KV 543
- 5 Händel: Concerto grosso
- 6 Ravel: Bolero

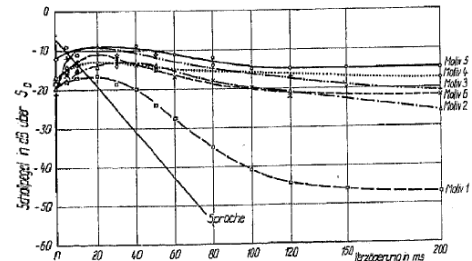
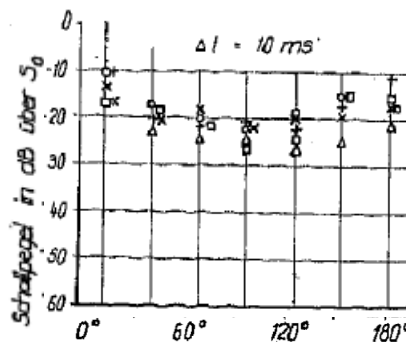


Abb.3 Richtungsabhängigkeit der AWS für verschiedene Musikmotive (Schubert 1966, Abb.4)



In Abb. 1-3 wurden bei den Untersuchungen von Barron (1971), Olive (1989), Schubert (1966) sowie Seraphim (1961) ein Einzellausprecher als Quelle für den Direktschall verwendet, untersucht wurde eine Einzelreflexion im reflexionsfreien Raum.

Absolute Wahrnehmbarkeitsschwellen einer Einzelreflexion in einem kompletten Schallfeld wurden von Bech (1995) und Olive et al. (1989) untersucht. Bech (Abb. 4) verwendete ein synthetisches Schallfeld mit 17 Reflexionen + Nachhall und einen Einzellausprecher als Quelle für den Direktschall. Olive et al. (Abb. 5) führten die Untersuchungen in einem Raum gemäß IEC 268-13 durch, mit (RRF) und ohne zusätzliche akustische Behandlung (IEC).

Abb. 4 AWS einer Einzelreflexion in einem kompletten Schallfeld (Bech 1995, Abb.3)

- Rauschen
- * Sprache
- o natürl. Pegel (berechnet)

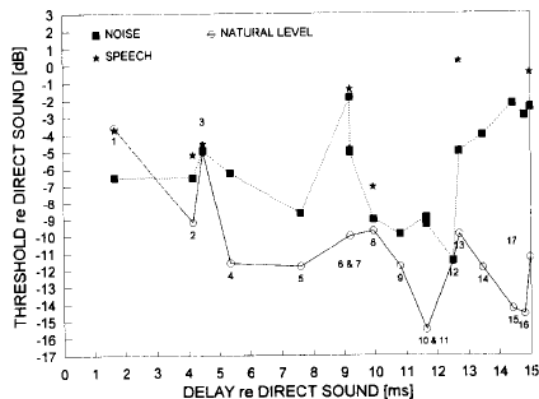


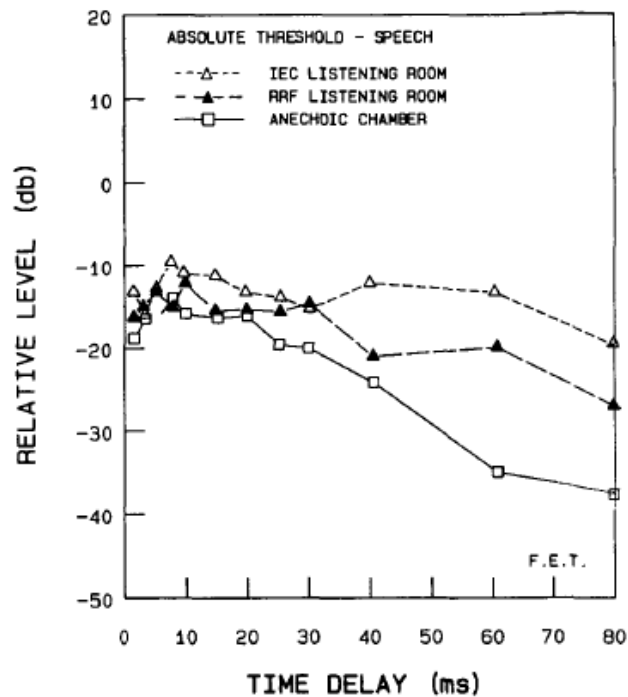
Tabelle 1 Verzögerung und Pegel der Reflexionen des synthetischen Schallfeldes (Bech 1995, Tabelle 1)

Delay (ms)	Att. (dB)	Azimuth	Elevation	Reflection No.	Surface
0.00	0.0	-22°	0°	...	primary lsp
1.64	3.6	-25°	-28°	1	floor
4.16	9.2	-50°	-2°	2	right wall
4.48	5.0	-25°	48.2°	3	ceiling
5.36	11.6	-53°	-28°	4	floor
7.60	11.8	-50°	48°	5	ceiling
9.20	10.0	-25°	48.2°	6	ceiling
9.20	10.0	-25°	-56°	7	floor
9.94	9.7	65°	0°	8	left wall
10.80	11.8	65°	-14°	9	left wall
11.64	15.5	-53°	-56°	10	floor
11.64	15.5	-50°	48°	11	ceiling
12.50	11.5	65°	30°	12	left wall
12.70	9.9	-170°	0°	13	back wall
13.46	11.9	-170°	-15°	14	back wall
14.42	14.3	-25°	-56°	15	floor
14.80	14.6	-154°	0°	16	back wall
14.98	11.3	-170°	33°	17	back wall

Im allgemeinen liegen die natürlichen Pegel unterhalb der jeweiligen AWS, Ausnahmen bilden Reflexionen 1, (Boden), 3 (Decke), 8, 12 (Wand), deren Pegel oberhalb oder ungefähr gleich der jeweiligen AWS ist. In Übereinstimmung mit Abb.1 liegen auch bei Bech die AWS für Sprache generell höher als für Rauschen. Aus weiterführenden Experimenten folgert Bech (1996a), daß für Rauschen nur die Bodenreflexion und für Sprache keine der Reflexionen auf individueller Basis zur Klangfarbe beiträgt.

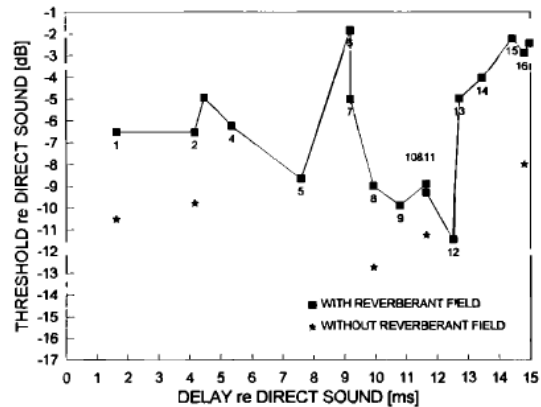
Abb. 5 AWS für Seitenreflexion (65°) und Sprache (Olive et al. 1989, Abb.11)

- △ IEC-Raum unbehindert
- ▲ IEC-Raum behandelt (RRF)
- reflexionsfreier Raum



Wird Nachhall hinzugefügt, erhöht sich die AWS um bis zu 11 dB (Bech 1995, Begault et al. 2004, Olive et al. 1989, Seraphim 1961, Völker 1997). Für Sprache sind die AWS eine einzelnen Seitenreflexion (65°) in einem kompletten Schallfeld (Reflexionen + Nachhall) um 5 dB (Olive 1989, siehe auch Abb. 5) bzw. 11 dB (Bech 1995) höher als die AWS im reflexionsfreien Raum. Dieser Effekt wird als rückwärtige Maskierung bezeichnet (Yamada et al 2006).

Abb. 6 Einfluss von Nachhall auf die AWS für Rauschen (Bech 1995, Abb.4)



Es wurde weiterhin gefunden, daß die Anwesenheit von anderen Reflexionen mit gleicher Verzögerung einen maskierenden Effekt für individuelle Reflexionen hat, deren AWS dann höher sind (Bech 1995).

Daraus folgt, daß in Räumen mit niedriger Nachhallzeit einzelne Reflexionen hörbar werden können und damit einen individuellen Beitrag zur Klangfarbe des Schallfeldes liefern. In solchen Räumen muss daher dem Pegel der einzelnen Reflexionen eine größere Beachtung geschenkt werden (Bech 1995).

Weiterhin sind Reflexionen bei höheren Pegeln einfacher wahrzunehmen als bei niedrigen Pegeln (Buchholz 2001). AWS sind niedriger bei abnehmendem Abstand von der Quelle (Jensen et al. 2003).

Wenn die Reflexion aus einer von der Richtung des Direktschalls unterschiedlichen Richtung kommt, sind die AWS niedriger als die AWS für richtungsgleiche Reflexionen (siehe hierzu Abb. 2, 3). Der Grund dafür ist, daß bei gleicher Einfallsrichtung der Direktschall die Reflexion maskiert (Buchholz et al. 2001). Wenn zwei Lautsprecher verwendet werden (Phantomschallquelle) sind für Rauschen die AWS ein wenig höher (3 dB), die Phantomschallquelle maskiert folglich seitliche Reflexionen besser (Burgtorf 1963, Burgtorf 1964).

Eine weitere Untersuchung der AWS früher Reflexionen in einem Schallfeld wurde von Holzkämper et al. (1988) durchgeführt, wobei als Testsignale Claves (hölzerne Klangstäbe) und Sprache (Tracks 26 und 49 der EBU SQAM-CD) verwendet wurden. In einem Meßraum wurden für verschiedene Konfigurationen Kunstkopfaufnahmen gemacht und mit einem an den Kunstkopf angepaßten Kopfhörer wiedergegeben. Wände und Decke des Raums waren mit 25 cm dickem Absorptionsmaterial bekleidet, der Boden mit Teppich, die Rückwand konnte mit absorbierenden Stellwänden abgedeckt werden. Die Vorderwand war unbehandelt, da Reflexionen von dort wegen der Richtcharakteristik der Regielautsprecher (Klein + Hummel O92) nicht berücksichtigt werden brauchten, was durch TDS-Messungen nachgewiesen wurde. Die zu untersuchende Reflexion wurden durch Simulation über Lautsprecher (Klein + Hummel O98) erzeugt, wobei die von beiden Regielautsprechern erzeugten Reflexionen an Seiten- und Rückwand durch jeweils einen Lautsprecher simuliert wurden.

Folgende Konfigurationen wurden untersucht:

Abb. 7 (Holzkämper et al. 1988, Bild 1)

a₁ Reflexion von rechts
a₂ Reflexion von hinten
Referenz: keine Reflexion

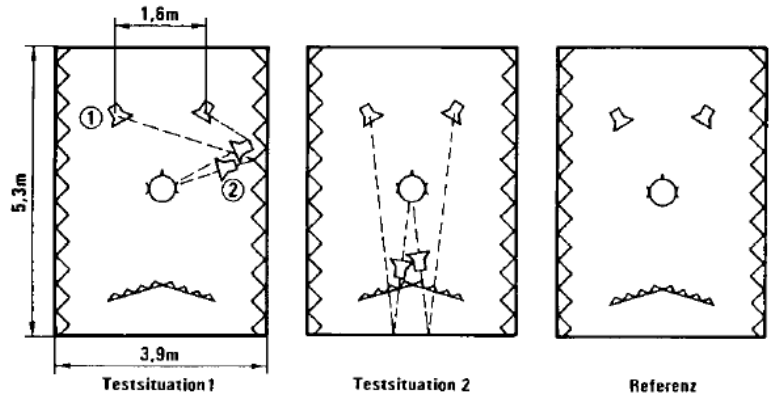


Abb. 8 (Holzkämper et al. 1988, Bild 2)

b₁ Reflexion von rechts
Referenz: Reflexionen von links u.hinten

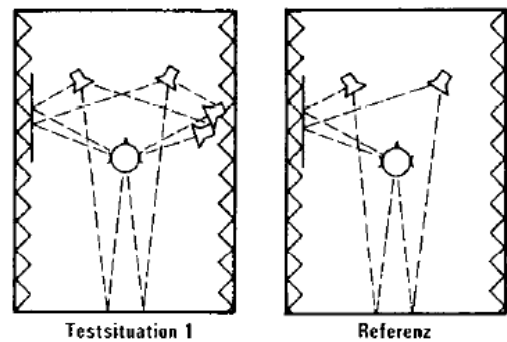
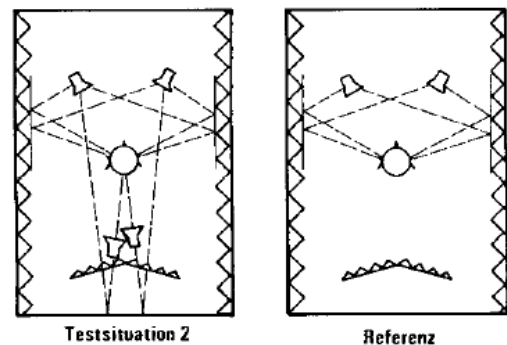


Abb. 9 (Holzkämper et al. 1988, Bild 2)

b₂ Reflexion von hinten
Referenz: Reflexionen von rechts u.links

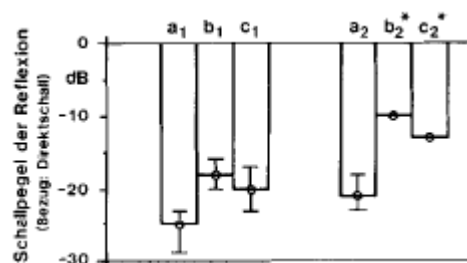


In einer weiteren Konfiguration c₁, c₂ wurde zusätzlich die Reflexion vom Mischpult simuliert.

In den Hörversuchen wurde die Testsituation B mit der Referenz A verglichen: A-B-A-B. Der Pegel der zu untersuchenden Reflexion wurde in Schritten von 4 dB geändert,.

Die ermittelten Wahrnehmungsschwellen zeigen, daß zusätzliche Reflexionen (Konfiguration b₁, b₂) die AWS der zu untersuchenden Reflexion heraufsetzen. Die AWS der Seitenreflexion stimmt in etwa mit der von Schubert (1966) ermittelten überein. Auch zeigt sich, daß Seitenreflexionen (Konfiguration a₁, b₁) eher wahrgenommen werden als Reflexionen von hinten (a₂, b₂), was sich mit den Ergebnissen von Schubert (1966) und Bech (1995) deckt.

Abb. 10 (Holzkämper et al. 1988, Bild 6)
Absolute Wahrnehmungsschwellen

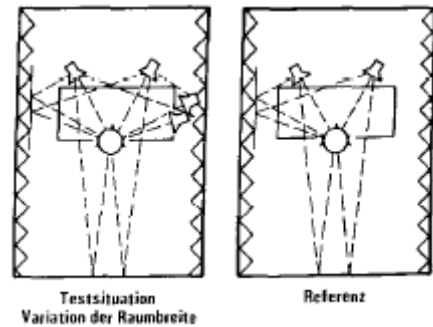


Die Mischpultreflexion wird als kritisch angesehen, da sie auf Grund des hohen Pegels und der kurzen Verzögerungszeit (- 4 dB, 1 ms) zu kammfilterbedingten Klangverfärbungen führt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Aussagen von Toole (2008) und den Resultaten von Clark (1983).

In einem weiteren Schritt wurde der Einfluß der Raumbreite (Verbreiterung in 5 Schritten von 3,9 auf 7,3 m) auf die AWS der rechten Seitenreflexion (b_1) untersucht. Zu diesem Zweck wurde die simulierte Reflexion der gewünschten Breite entsprechend zeitlich verzögert abgestrahlt. Es wurde ein Anstieg der AWS um ca. 4 dB festgestellt.

Abb. 11 (Holzkämper et al. 1988, Bild 5)

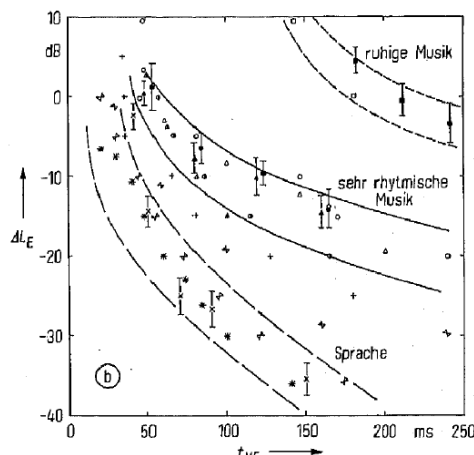
Einfluß der Raumbreite auf die AWS der rechten Seitenreflexion



Es wird kurz auf weiterführende, auf die qualitativen Aspekte früher Reflexionen eingehende Untersuchungen hingewiesen, aus denen hervorgeht, daß starke Dämpfung insbesondere der Seitenreflexionen nicht das Optimum darzustellen scheint, da den Reflexionen durchweg positive Wirkung zugeschrieben wird.

2.2 Ab einer gewissen Verzögerung wird die Reflexion als eigenständiges, störendes Schallereignis wahrgenommen; die Verzögerungswerte sind davon abhängig, ob es sich um langsame oder schnelle Musik handelt. Für langsame Musik wurden Werte von 150 ms (Dietsch et al. 1986, Wagener 1971), für schnelle Musik ca. 50 ms (Dietsch et al. 1986) bzw. 70 ms (Wagener 1971) ermittelt. Die Schwellenwerte nehmen mit abnehmender Verzögerung zu. Bei gleicher Verzögerung haben schnelle Motive die niedrigsten Schwellenwerte (i.e. Pegeldifferenz relativ zum Direktschall) (Dietsch et al. 1986). Bei 50 ms Verzögerung liegen die Schwellenwerte für eine richtungsgleiche Reflexion und Reflexion von der Seite (90°) schon um 0 dB, d.h. daß bei in kleinen Räumen typischen Verzögerungen von weniger als 15 ms Reflexionen nicht als störend empfunden werden, da sie zu niedrigem Pegel haben.

Abb. 12 Echoschwellen für Musik und Sprache (Dietsch et al 1986, Abb.6)



3. Für die Notwendigkeit der Behandlung von frühen Reflexionen werden in der Regel zwei Gründe genannt:

1. Überlagerung der Akustik des Aufnahme- und Wiedergaberaumes
2. Klangverfärbung

3.1 Überlagerung der Akustik des Aufnahme- und Wiedergaberaumes

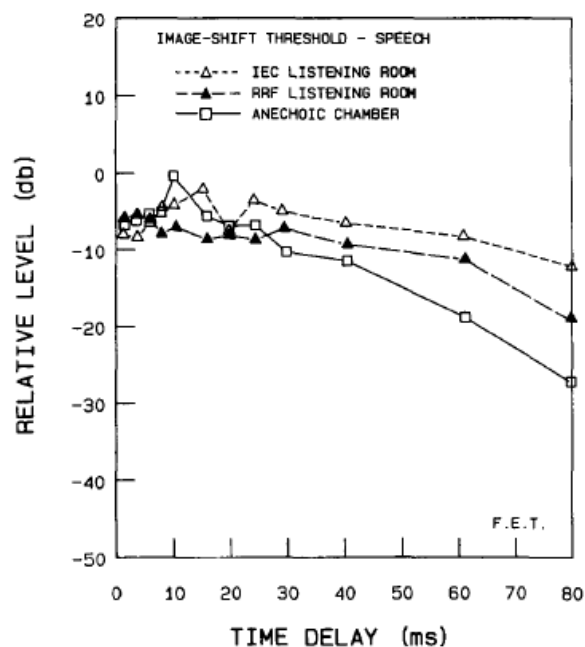
Olive et al. (1989) und Bech (1998) haben die räumlichen Aspekte einer Einzelreflexion (Abbildungs-Schwellenwert) untersucht.

Olive et al. (1989) fanden, daß bei Sprache "bei Reflexionspegeln deutlich oberhalb des AWS bei Verzögerungen unterhalb von 10 ms eine Verbreiterung der Abbildung von der Schallquelle hin zur Reflexion wahrgenommen wurde, bei Verzögerungen zw. 10 und 30 ms eine Verbreiterung der Abbildung sowie zunehmende Räumlichkeit, und bei noch grösseren Verzögerungen weiter zunehmende Räumlichkeit sowie ein klares Echo. Beim nachfolgenden Absenken des Pegels der Reflexion kam ein Punkt, wo Verbreiterung der Abbildung nicht länger deutlich und die Reflexion als solche nicht mehr identifizierbar war. Dies war die für die Bestimmung des Abbildungs-Schwellenwertes notwendige Bedingung. Bei diesem Schwellenwert gab es noch stets andere Artefakte, jedoch wurden Ort und scheinbare Ausdehnung der Schallquelle dadurch nicht beeinflusst".

Dieser Schwellenwert wurde im reflexionsfreien Raum, im IEC-Raum (IEC) sowie im akustisch behandelten IEC-Raum (RRF) bestimmt.

Abb. 13 Abbildungs-Schwellenwert bei Sprache für Seitenreflexion (65°) (Olive et al.1989, Abb.12)

- △ IEC-Raum unbehandelt
- ▲ IEC-Raum behandelt (RRF)
- reflexionsfreier Raum



Im reflexionsfreien Raum lagen die Werte im Mittel um 12.3 dB höher als die AWS, im RRF um 8 dB, im IEC um 7 dB.

Für Pulse und Rauschen wurde gefunden, daß eine aufgenommene Reflexion durch die richtungsgleiche Deckenreflexion nicht verdeckt wurden. Dies sei logisch, da die aufgenommene Reflexion Bestandteil sowohl des Direktschalls als auch der Raumreflexion ist.

Der Einfluss einer Einzelreflexion auf Ausdehnung und Ort der Schallquelle sind laut Olive et al. (1989) wichtig im Zusammenhang mit live-Aufführungen und bei Stereowiedergabe für den Fall, daß Signale nur aus einem Lautsprecher kommen.

Sobald die Wiedergabe über Stereo-Lautsprecher erfolgt, wird eine Phantomschallquelle bzw. Phantomabbildung zwischen den Lautsprechern erzeugt.

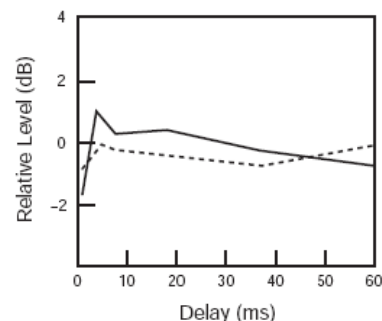
Bei Vergleich einer Phantomschallquelle mit einem einzelnen Lautsprecher stellt man fest, daß geringe klangliche und größere Abbildungsunterschiede (Abbildungsschärfe, Ausdehnung, Abstand) bestehen; beide Unterschiede variieren mit Signaltyp und Aufnahmetechnik (Lee 2004). Die Ausdehnung der Phantomschallquelle war ca. 2mal so groß wie die der Mono-Referenz, die Mono-Referenz was etwas dunkler im Klang als die Phantomschallquelle (Theiss et al. 1996a). Die interaurale Kreuzkorrelation bei 2-Kanal-Stereo Lautsprechern ist niedriger als bei einem einzelnen Lautsprecher (Furlong et al. 1992). Daher scheint die Frage angebracht, welchen Wert Untersuchungen vom Typ Einzellautsprecher/Einzelreflexion für die Anordnung vom Typ 2-Kanal Stereo/mehrfache Reflexionen haben.

In weiterführenden Experimenten wurden die Auswirkungen einer einzelnen Seitenreflexion auf die Phantomschallquelle untersucht, welche mittig zw. den beiden Lautsprechern wahrgenommen wird und mit einem einzelnen Lautsprecher verglichen, welcher an derselben Stelle wie die Phantomschallquelle platziert wurde.

„Als AWS und Abbildungs-Schwellenwerte bestimmt wurden, erst mit einer realen, dann mit einer Phantomschallquelle, im Beisein einer asymmetrischen, einzelnen Seitenreflexion, waren die Unterschiede verschwindend gering“ (Toole 2008).

Abb. 14 Unterschiede zw. Wahrnehmungsschwellen für Real- und Phantomschallquelle, im unbehandelten IEC-Raum, für Sprache (Toole 2008, Abb. 6.12)

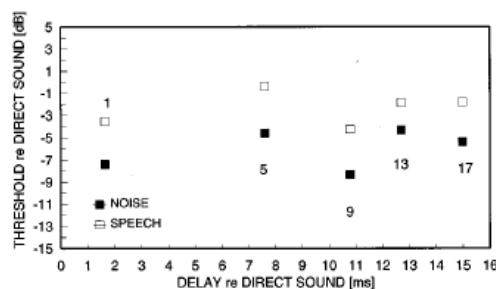
— AWS - - - Abbildungs-Schwellenwert



Bech (1998) bestimmte die AWS, bei dem eine zweite Schallquelle deutlich wahrgenommen wurde. Bei Sprache lagen alle Werte, mit Ausnahme der Bodenreflexion, oberhalb der jeweiligen natürlichen Pegel (natürliche Pegel: siehe Abb.4).

Abb. 15 Schwellenwerte für das Auftreten einer zweiten, separaten Schallquelle (Bech 1998, Abb. 6)

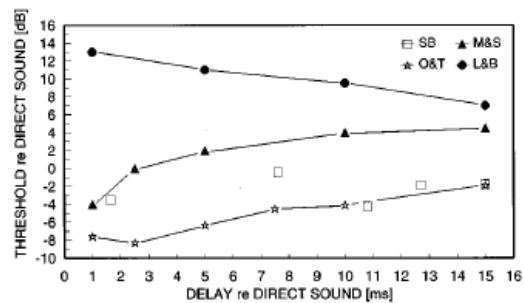
■ Rauschen
□ Sprache



Der Teil der Experimente, wo die Absorption der Raumbegrenzungsflächen simuliert wurde (Abb. 10), entspricht am meisten den natürlichen Bedingungen in realen Räumen, so daß Bech folgert, daß unter diesen Bedingungen nur die Bodenreflexion stark genug ist, um individuell zum räumlichen Eindruck beizutragen.

Die Größe der Abbildungs-Schwellenwerte hängen davon ab, wie der Reiz, an Hand dessen eine Änderung der Räumlichkeit bzw. Abbildung wahrgenommen wird, definiert ist und weiterhin, wie der Schwellenwert selber definiert wird (Bech 1998). Bei Sprache bewegen sich die Schwellenwerte für 10 ms Verzögerung zw. -6 und +10 dB (Abb. 15).

Abb. 16 Abbildungsschwellenwerte für verschiedene Wahrnehmungskriterien für Sprache (Bech 1998, Abb. 7)



Folgende Wahrnehmungskriterien wurden benutzt:

SB: Auftreten einer zweiten Schallquelle

O&T: Verschieben, Verbreiterung der Abbildung, Räumlichkeit

M&S: Auftreten einer zweiten Schallquelle

L&B: Auftreten einer zweiten Schallquelle

Die deutlichen Unterschiede sind durch die verschiedenen Definitionen der Schwellenwerte sowie durch die verschiedenen räumlichen Bedingungen begründet: M&S definierten die Schwellenwerte bei kaum, L&B und SB bei deutlich wahrnehmbarer zweiten Schallquelle, M&S sowie L&B arbeiteten im reflexionsfreien Raum, SB und O&T in kompletten Schallfeldern mit Reflexionen und Nachhall.

Yanagawa et al. (2001) fanden, daß für Rauschimpulse (4 Sekunden) (Einzellautsprecher / Einzelreflexion) die Abbildung mit zunehmender Verzögerung der Reflexion breiter wurde (ohne Verzögerung war die Abbildung mittig zw. den beiden Lautsprechern lokalisiert). Bei Verzögerungen oberhalb von 10 ms wurde ging die Verbreiterung der Abbildung in subjektive Diffusität über.

Richtung und Abbildungsschärfe von durch Stereo-Lautsprecher erzeugten Phantomschallquellen wurde von v. Ripka et al. (1987) untersucht. Für korreliertes Rauschen ($k=1$) wurde gefunden, daß mit Reduktion des Abhörabstandes eine Steigerung der Abbildungsschärfe einherging. Gleichzeitig wurde ein deutlicher Unterschied bzgl. der Abbildungsschärfe zw. den verwendeten Lautsprechern beobachtet.

Lautsprecher mit verschiedenen Bündelungsmaßen BM produzieren verschieden grosse Anteile an horizontalen bzw. vertikalen Reflexionen (Linkwitz 2007, Ringlstetter et al. 1996). Es gibt Hinweise darauf, daß diese verschieden großen Anteile zu Unterschieden in der Abbildungsschärfe führen (Kuhl et al. 1978), zu Unterschieden in Phantomschallquellenbreite (Ringlstetter et al. 1996) und zu Unterschieden in Phantomschallquellenlokalisation (Linkwitz 2007). Für Rauschen waren die Unterschiede in der Schallquellenbreite gering. Hinsichtlich der Präferenz wurden keine deutlichen Tendenzen festgestellt bei der Beurteilung verschiedener Bündelungsmaße (Flindell 1991, Kuhl et al. 1978).

Frühe Reflexionen scheinen weiterhin sehr geringen Einfluss auf Abbildungsqualität und Räumlichkeit zu haben (Flindell et al 1991).

In Tests mit Toningenieuren, die einer Orchesteraufnahme eine Solostimme zumischen sollten (3 verschiedenen Passagen derselben CD), wobei der Pegel der zugemischten Stimme gemessen wurde, zeigte es sich, daß bei verschiedenen Behandlungen der Seitenwände von 2 Kontrollräumen mit Diffusor, porösem Absorber, reflektierender Gipsplatte kein oder nur ein leichter Unterschied zw. den zu erstellenden Abmischungen festzustellen war, wobei der Absorber die Testpersonen am meisten daran hinderte, konsistente Ergebnisse zu produzieren (King et al. 2011). Es zeigte sich weiterhin, daß das Musikmaterial einen signifikanten Einfluß auf die Abmischung hatte.

In einer Fortführung der Versuche im ersten der beiden Kontrollräume mit dem gleichem Musikmaterial wurden die gleichen akustischen Behandlungselementen auf einem motorisierten drehbaren Träger montiert, welcher die Umschaltzeiten zw. den verschiedenen akustischen Bedingungen auf einige Sekunden herabsetzte, wodurch die Variable der Anpassung des Hörers an die veränderten akustischen Bedingungen eliminiert werden konnte (King et al. 2013a). Wiederum zeigte sich, daß der Pegel der zugemischten Stimme bei allen Behandlungen in etwa gleich war, wobei in diesem Versuch die größte Varianz nicht beim Absorber, sondern beim Reflektor festgestellt wurde, während der Absorber die kleinste Varianz zeigte, was auf einen nutzbringenden Effekt der Absorptionsbehandlung hindeuten scheint. Wiederum zeigte sich, daß das Musikmaterial einen statistisch signifikanten Effekt auf den Pegel der zugemischten Stimme hatte, wie auch einen sehr großen Einfluß auf die Varianz der jeweiligen Passage.

Die Autoren weisen darauf hin, daß die Absorber auf Grund der Abmessungen unnatürlich nah am Hörplatz platziert wurden, sodaß im Vergleich zur ersten Versuchsreihe (King et al. 2011) andere akustische Bedingungen vorlagen, wodurch die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind.

Weitere Tests mit dem gleichen Protokoll und den gleichen akustischen Behandlungselementen wie in (King et al. 2013a) wurden in einem Halbraum (nur Fußboden reflektierend) durchgeführt. Bei einer globalen Analyse der Resultate wurden nur minimale Unterschiede zwischen den verschiedenen akustischen Behandlungen (Absorber, Diffusor, Reflektor) festgestellt. Bei Betrachtung der individuellen Resultate der 20 Testpersonen schien sich ein Trend dahingehend anzudeuten, daß der Diffusor einen positiven Effekt hatte.

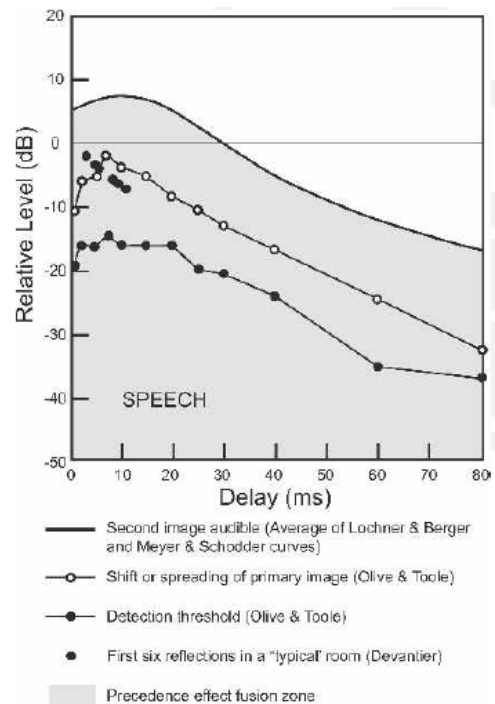
In einem Paar-Vergleichs-Test von Kunstkopfaufnahmen von 9 verschiedenen Raumbehandlungen (Hörabstand 1,5m) und Wiedergabe über Kopfhörer, bei dem den Klang und die räumliche Wiedergabe beschreibende Attribute auf einer Skala von -3 bis +3 beurteilt wurden, wurde festgestellt, daß frühe Reflexionen einen statistisch signifikanten Einfluss auf räumliche Aspekte (Schallquellenbreite, Einhüllung) sowie Klarheit haben, jedoch keinen auf klangliche Aspekte (Helligkeit und Natürlichkeit der Klangfarbe) sowie Bevorzugung für fast alle verglichenen Paare (Imamura et al 2013).

Der Abstand der Phantomschallquelle scheint von frühen Reflexionen nicht beeinflusst zu werden (Michelsen et al. 1997).

Bei Sprache sind alle bekannten Abbildungs-Schwellenwerte oberhalb oder ungefähr gleich dem natürlichen Reflexionspegel, so daß sich die Schlussfolgerung ziehen lässt, daß natürliche Reflexionen zu schwach sind, um die oben angegebenen Effekte (Auftreten einer zweiten Schallquelle, Verschieben bzw. Verbreiterung der Abbildung) zu erzielen.

Abb. 17 Wahrnehmungsschwellen einer Einzelreflexion im reflexionsfreien Raum für Sprache (Toole 2006, Abb. 7)

- Zweite Schallquelle (L&B, M&S)
- Verschieben, Verbreiterung der Abbildung (Olive et al. 1989)
- AWS einer 65° Seitenreflexion (Olive et al.1989)
- Ersten 6 Reflexionen (Devantier 2002)
- Wirksame Zone des Präzedenzeffekts



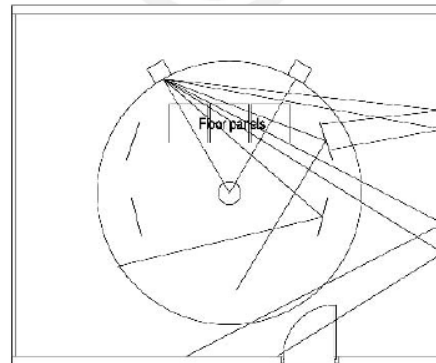
Betrachtet man den Kontext der Wiedergabe von Musik, sind alle der obigen gemessenen Reflexionen (Devantier 2002) oberhalb der AWS einer Einzelreflexion. Toole (1990): "In vielen normalen Hörsituationen sind einige Reflexionen oberhalb der AWS. Die Tatsache, daß die Schwellenwerte hoch sind, bedeutet, daß die entstehenden Störungen im allgemeinen nicht sehr bedeutend sind. Zweifellos hilft dies, zu erklären, warum in diesen Situationen die Stereoabbildung und die Klangqualität so gut sind wie sie sind".

Auf jeden Fall sind Pegel und Verzögerungen früher Reflexionen in typischen Hörräumen weit unterhalb der Pegel und Verzögerungen, die sowohl bei Sprache (Ando et al.1977, Toole 2006) als auch bei Musik (Dietsch et al.1986, Wagener 1971) als störend empfunden werden.

Weiterhin liegen Belege dafür vor, daß frühe Reflexionen in typischen Hörräumen nicht kräftig und spät genug sind, um optimale Effekte zu haben (Ando et al.1977, Muncey et al. 1953, Toole 2006).

Ein interessantes Experiment wurde von Naqvi (2005) durchgeführt: in einem Raum gemäß ITU-R. BS.1116 wurde eine reflexionsfreie Zone dadurch gebildet, daß die frühen Raumreflexionen durch Paneele an der Hörzone vorbeigelenkt wurden (siehe hierzu Walker 1995). Bedingt durch die Abmessungen der Paneele konnten nur Frequenzen bis ca. 500 Hz abgelenkt werden.

Abb. 18 Reflexionsfreie Zone
2-Kanal Anordnung
(Naqvi 2005, Abb. 13)

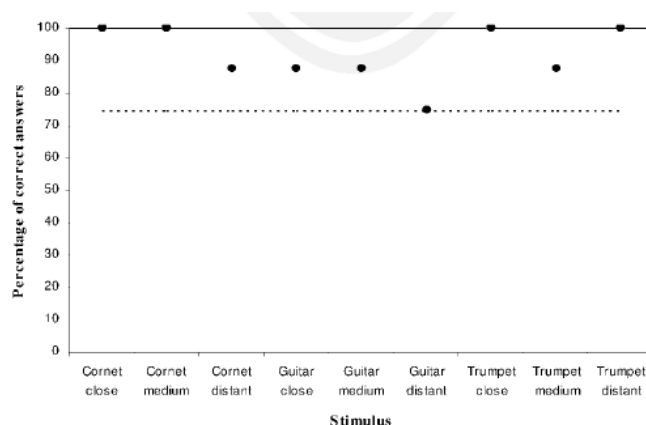


Durch diesen „geometrischen, absorptionslosen“ Ansatz wurde vermieden, daß gleichzeitig mit der Dämpfung der Reflexionen auch die Nachhallzeit gesenkt wurde (lt. Niaounakis et al. (2002) liegt der Wahrnehmungsschwellenwert für die Änderung der Nachhallzeit bei ca. 0.05 s). Tatsächlich wurden rundumstrahlende NXT Biegewellenlautsprecher als Paneele verwendet, welche außer dem Wegleiten der von den Hauptlautsprechern erzeugten frühen Reflexionen auch selber künstliche Reflexionen erzeugen konnten. Die Änderung der Nachhallzeit durch Hinzufügen der künstlichen Reflexionen betrug weniger als 0.012 s, also unterhalb des Schwellenwertes.

Als Signale wurden Aufnahmen im schalltoten Raum von Horn, Trompete, akustischer Gitarre verwendet. Bei den Experimenten wurden diese Aufnahmen als Direktschall über einen einzelnen, zentralen LS (also Mono-Schallquelle) wiedergegeben. Über einen Lexicon Prozessor wurden frühe Reflexionen (15-40 ms) und Nachhall (>40 ms) erzeugt und zu gleichen Teilen auf 2 zusätzliche Frontlautsprecher gegeben (siehe hierzu Neher 2002). Über die im Prozessor erzeugten relativen Pegel der Reflexionen wurden verschiedene wahrgenommene Abstände des Schallereignisses erzeugt (sehr nah, nah, sehr weit).

Untersucht wurde nun (ABX-Methode), ob hinzugefügte künstliche Reflexionen einen wahrnehmbaren Effekt hätten. Es wurden 12 Reflexionen mit einer Verzögerung von 1.5 bis 12.5 ms und einem relativen Pegel von -7 bis -12 dB erzeugt. In allen Fällen konnte das Hinzufügen der künstlichen Reflexionen wahrgenommen werden (>75% korrekte Antworten), wobei die Trefferquote je nach Signal unterschiedlich hoch war.

Abb. 19 Resultate des ABX-Tests
(mit/ohne Reflexionen)
(Naqvi 2005, Abb. 25)

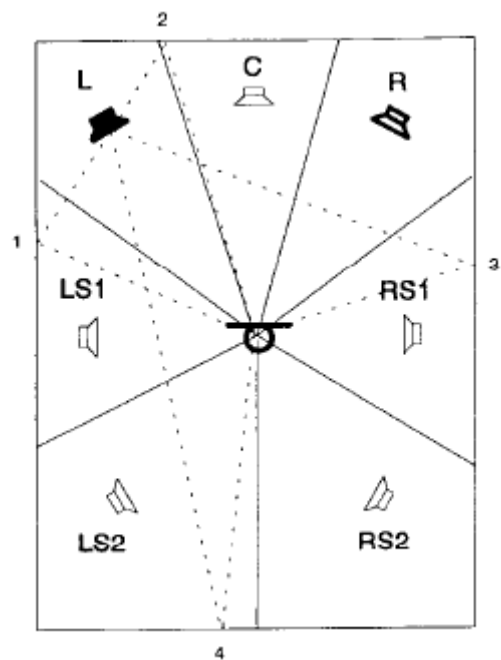


In den meisten Fällen hatte das Vorhandensein der künstlichen Reflexionen eine Verbreiterung der Schallquelle und eine Verminderung der Abbildungsschärfe zur Folge. Anzumerken ist jedoch, daß auch dieser Versuchsaufbau nicht dem üblichen 2-Kanal-Stereo Aufbau mit mittiger Phantomschallquelle entspricht.

Der Einfluß des Abhörtraumes (frühe Reflexionen, Nachhall) auf die Qualität des wahrgenommenen Schallereignisses der 2-Kanal-Stereo-Wiedergabe wurde von Schneider und Spikofski (1992) untersucht. Dabei wurden im reflexionsarmen Raum mittels einer 7-kanaligen Anlage (Klein + Hummel O92, O98) Schallfelder synthetisiert, via Kunstkopf aufgezeichnet und über einen an den Kunstkopf angepaßten Kopfhörer wiedergegeben. Der zu simulierende Raum wurde in 7 Sektoren unterteilt.

Abb. 20 (Schneider et al. 1992, Abb.2)

Sektorkonzept: Durchgezogenen Linien stellen die Sektorengrenzen dar. Gestrichelt gezeichnet sind die Reflexionen 1. Ordnung des linken Lautsprechers L.



Es wurden Schallfeldsituation für 3 unterschiedliche Raumgrößen erzeugt: $R1 = 90 \text{ m}^3$; $R2 = 120 \text{ m}^3$; $R3 = 150 \text{ m}^3$. Drei verschiedene Reflexionssituationen (nur Horizontalreflexionen, Boden und Decke wurden vernachlässigt) wurden simuliert: 1. alle Reflexionen 1. und 2. Ordnung; 2: die zwei frühesten in einem Sektor auftretenden Reflexionen; 3: eine Reflexion pro Sektor. Die Bezeichnung Raum x/y kennzeichnet die Situation im Raum x, Reflexionssituation y. Nachhall (mittlere Nachhallzeit 0,36 s) wurde inkohärent über alle 7 Lautsprecher abgestrahlt.

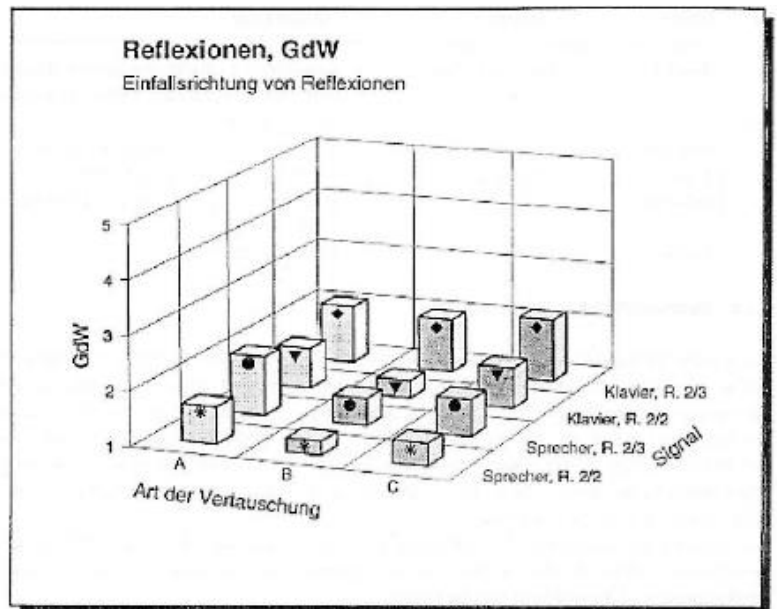
Als Programmmaterial gebraucht wurde Sprache und Klavier. Es wurden ausgewählte Schallfeldsituationen mit einer Referenzsituation verglichen und der Grad der Wahrnehmbarkeit auf einer fünfstufigen Skala von „nicht wahrnehmbar“ bis „überdeutlich wahrnehmbar“ bestimmt.

Für die Tests wurden die Schallfeldsituationen Raum 2/2 und Raum 2/3 als Referenzsituationen sowie Sprecher und Klavier als Testsignale ausgewählt. Für den Vergleich mit der Referenz wurden die Einfallsrichtungen wie folgt geändert:

- A) Vertauschung der Reflexionen von links vorne (L) und rechts hinten (RS1, RS2)
- B) Vertauschung der Reflexionen von vorne (L, C, R) und hinten (LS2, RS2)
- C) Reflexionen von vorne (L, C, R) werden zusätzlich von hinten abgestrahlt (LS2, RS2)

Abb. 21 (Schneider et al. 1992, Abb.5)

Einfluß der Schalleinfallsrichtung auf den Grad der Wahrnehmbarkeit



Die ermittelten Wahrnehmbarkeitsgrade liegen zwischen 1 und 2, d.h. zwischen „nicht wahrnehmbar“ und „gerade wahrnehmbar“. Die Grade sind für die verschiedenen Einfallsrichtung der Reflexionen nicht signifikant unterscheidbar, woraus die Autoren folgern, daß die Einfallsrichtung von geringer Bedeutung ist.

Der Vollständigkeit halber sollen die Untersuchungen von (Imamura et al. 2014) erwähnt werden. In einem quasi-reflexionsfreien Raum wurde der Einfluß der Reflexionen von vorne, hinten und der Seite auf Klarheit (Klangfarben) und räumliche Klarheit, sowie scheinbare Schallquellenausdehnung ASW und Einhüllung des Hörers LEV untersucht. Dazu wurden die Reflexionen von je einem Lautsprecher simuliert, mit und ohne Berücksichtigung des Abstrahlverhaltens der Direktschallquelle. Es wurde mit 2 Zeitverzögerungen gearbeitet, 10 und 30 ms, d.h. 3,4 bzw. 10,3 m Weglängenunterschied. Im Falle der Reflexionen von Vorder- und Hinterwand erscheint eine Verzögerung von 30 ms praxisfremd, da die Schallquelle bzw. der Hörer 5 m vor der jeweiligen Wand platziert sein muß. Die einzelnen Reflexionen wurden paarweise miteinander verglichen. Getestet wurde mit einer 30s langen Musikpassage, wiedergegeben von einer Mono-Schallquelle.

Folgende Resultate wurden erzielt:

1. Die zeitliche Verzögerung der Reflexion hat einen starken Einfluß auf Klarheit, ASW, LEV
2. Die Seitenreflexion hat einen starken Einfluß auf räumliche Klarheit, ASW, LEV
3. Die Berücksichtigung des Abstrahlverhaltens der Schallquelle hat einen signifikanten Einfluß auf die Ergebnisse.

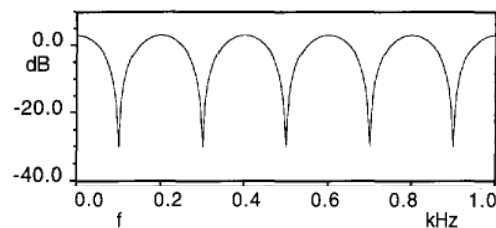
Zu diesen Untersuchungen muß folgendes angemerkt

- a) kein Nachhall vorhanden
- b) Mono-Schallquelle
- c) kein komplettes Schallfeld (Reflexionen von Boden und Decke fehlen, es wurde jeweils eine einzelne Reflexion mit einer anderen Einzelreflexion verglichen)

3.2 Klangverfärbung

Wenn direkte und reflektierte Töne gemischt werden, treten Phasenstörungen auf (Interferenzen) und kammähnliche Strukturen mit Minima und Maxima erscheinen auf der Einhüllenden des Spektrums (Seki 2003). Die Frequenzen der Maxima dieser Kammstruktur ist gegeben durch n/T ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$), die der Minima durch $(n+0.5)/T$, wobei T die zeitliche Verzögerung der Reflexion in Bezug auf den Direktschall ist. Eine um 1 ms verzögerte Reflexion ergibt eine Kammstruktur mit Maxima bei 1000, 2000, 3000 etc. Hz und Minima bei 500, 1500, 2500 etc. Hz. Eine um 10 ms verzögerte Reflexion ergibt eine Kammstruktur mit Maxima bei 100, 200, 300 etc. Hz und Minima bei 50, 150, 250 etc. Hz.

Abb. 22 Kammfilter für weisses Rauschen,
 $T = 5$ ms
(Salomons 1995, Abb. 2.1)



Wird ein Mikrofon für eine Aufnahme unter solchen Umständen benutzt, dann wird der reproduzierte Ton häufig als klanglich verfärbt wahrgenommen. Es ist weithin bekannt, daß eine solche Klangverfärbung beim direkten Hören der Schallquelle weniger auffällig ist (Koenig 1950). Die zentrale Frage ist, führen diese Kammfilter zu hörbarer Klangverfärbung?

Die Amplitude (oder Modulationstiefe) des Kammfilters hängt vom Pegel der Reflexion ab. Je niedriger dieser, desto niedriger die resultierende Amplitude und die Klangverfärbung nimmt ab (Salomons 1995). Die Verfärbung hängt im weiteren davon ab, ob eine einzelne oder mehrfache Reflexionen vorhanden sind und im Falle der mehrfachen Reflexionen, ob diese regelmäßig oder unregelmäßig auf der Zeitachse verteilt werden. Unregelmäßig verteilte Raumreflexionen führen zu einer niedrigeren Amplitude des Kammfilters und die wahrgenommene Klangverfärbung wird kleiner, wenn die Zahl solcher Reflexionen zunimmt (Case 2001, Halmrast 2000, Salomons 1995). Bei kleinen Verzögerungen (Größenordnung 1 ms) bedarf es, bei weißem Rauschen, einer großen Anzahl von unregelmäßig verteilten Reflexionen, um Klangverfärbung zu vermeiden: 16 Reflexionen verursachen kaum eine Unterdrückung der Verfärbung (Bilsen 1995, Salomons 1995). Bei größeren Verzögerungen (Größenordnung 30 ms) genügen schon 3 unregelmäßige Reflexionen, um einen Unterdrückungseffekt zu erzielen.

Für regelmäßig verteilte Raumreflexionen wird die Verfärbung mit steigender Anzahl der Reflexionen stärker.

Die Interaktion eines Tones mit seiner Wiederholung ist ausführlich untersucht worden (z.B. Atal et al. 1962, Bilsen 1967, Salomons 1995) und Grenzwerte der Wahrnehmbarkeit für einzelne und mehrfache Reflexionen, unter Berücksichtigung der Frequenzgruppen im Innenohr, sind ermittelt worden (Salomons 1995). Für Breitbandrauschen tritt Klangverfärbung am wahrscheinlichsten im Zeitfenster von 5-25 ms auf (Atal et al. 1962, Salomons 1995). Verfärbungseffekte beim Hören von Musik sind geringer auf Grund der kontinuierlichen spektralen Änderungen (Salomons 1995).

Für Zeitverzögerungen bis zu ca. 25 ms ist die wahrgenommene Verfärbung (für Rauschsignale) hauptsächlich auf regelmäßige Änderungen des Frequenzgangs zurückzuführen (spektrale Verfärbung), bei größeren Verzögerungen ist die wahrgenommene Verfärbung hauptsächlich im Zeitbereich, z.B. Schwebungen (Rubak 2004). Bei weißem Rauschen ist das menschliche Gehör besonders empfindlich für Verfärbungen, die durch Verzögerungen von etwa 5 ms verursacht werden (Johansen 2001).

Unterschiedliche Verzögerungszeiten für Reflexionen von links und rechts können zweiohrige (binaurale) „Klangverfärbungsunterdrückung“ (Salomons 1995) bewirken.

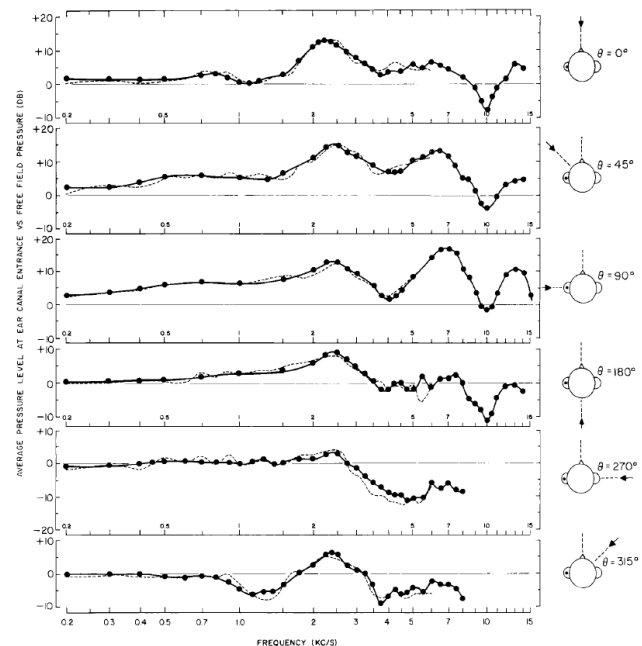
Zweiohrige Klangverfärbungsunterdrückung: wenn man zweiohrig hört, kommen der Direktschall und seine Reflexionen aus unterschiedlichen Richtungen, ein interauraler Pegelunterschied ILD wird beobachtet, der Ton wird als weniger verfärbt wahrgenommen als bei einohrigem (monoauralem) Hören (Salomons 1995, Zurek 1979). In einem Experiment zur Klangverfärbung und Klangverfärbungsunterdrückung (Brüggen 2001), wobei mittels binauraler Raumsimulation verschiedene Räume sowie verschiedene Konfigurationen von Quelle und Empfänger im jeweiligen Raum erstellt wurden (im folgenden „Kanäle“ genannt), wurde Musik, im Vergleich mit Sprache, als zu schwierig beurteilbar eingestuft, in der Hinsicht, daß die Unterscheide zw. den Kanälen nicht so deutlich waren wie bei Sprache und weiter, daß bestimmte klangbeschreibende Attribute in exklusiver Weise für ein bestimmtes Stück verwendet wurden.

Kammfilterbildung ist ein Phänomen stationärer Schallfelder (Everest 2001). Breitbandsignale wie weißes Rauschen sind gut geeignet, spektrale Verfärbungen aufzuzeigen. Jedoch ist Musik ein komplexes Gemisch aus stationären und transienten Signalen (Cox et al. 2004), also stellt sich die Frage, inwiefern Studien, bei denen weißes Rauschen oder andere künstliche Signale verwendet werden, für Musikhören in heimischen Hörräumen relevant sind.

Folglich ist es angesichts des Mechanismus der binauralen Klangverfärbungsunterdrückung nicht sinnvoll, mit einem einzelnen Messmikrophon am Hörplatz Raum-Frequenzgänge zu messen, in denen Phänomen wie Kammfilterstrukturen natürlich sichtbar werden. Es ist ebenfalls nicht sinnvoll, zwei Mikrophone zu benutzen, welche ca. 15 Zentimeter voneinander entfernt sind (entspricht ungefähr dem Durchmesser des menschlichen Kopfes), weil solche Mikrophone in der Tat bedeutende Pegelunterschiede aufzeigen können, das menschliche Gehör jedoch die Signale der beiden Ohren im Hirnstamm integriert, um so ein „zentrales Spektrum“ zu erzeugen, etwas, was zwei Mikrophone nicht tun. Zudem berücksichtigt eine solche Messmethode in keinsten Weise die durch den Kopf verursachten interauralen Pegel- und Zeitdifferenzen (kopfbezogene Übertragungsfunktion), noch werden die spektralen Filter der Ohrmuscheln berücksichtigt (Rodgers 1981).

Weiterhin reagiert das menschliche Gehör auf Schallsignale aus unterschiedlichen Richtungen unterschiedlich (Außenohr, Diffraktion, Absorption, Resonanz) was in unterschiedlichen Trommelfell-Frequenzgängen zum Ausdruck kommt (Møller et al. 1995, Shaw 1965).

Abb. 23 Mittelwerte der Trommelfrequenzgänge von 9 Versuchspersonen, verschiedene Einfallrichtungen (Shaw 1965, Abb. 4)



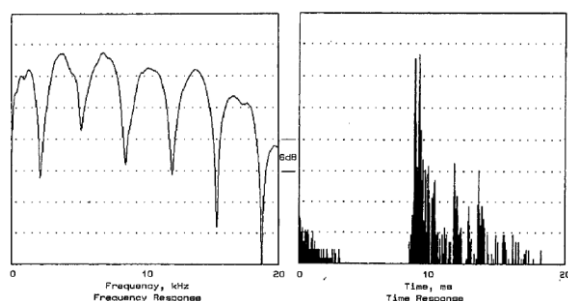
Während künstliche Signale, mit einigen wenigen kontrollierten Reflexionen kombiniert, hörbare Kammfiltereffekte produzieren, „neigt die Interaktion des Direktschalls mit jeder der zahlreichen Reflexionen, in Kombination mit der Interaktion dieser zahlreichen Reflexionen untereinander, dazu, einen Durchschnittswert zu bilden bzw. der erwarteten Kammfilterverfärbung einen Zufallscharakter zu verleihen“ (Case 2001).

Toole (2008): „Der [Kammfilter-] Effekt ist hörbar offensichtlich ... wenn eine einzelne, starke vertikale Reflexion (in der Medianebene) in einer ansonsten reflexionsfreien Umgebung vorliegt [wie z.B. die Reflexion vom Mischpult in der reflexionsfreien Zone im Studiokontrollraum]. Jedoch, für Reflexionen, die, in einer normal reflektiven Umgebung mit einer Vielzahl von Reflexionen, unter großen Horizontalwinkeln einfallen, ist dieser Effekt kein Problem mehr.“

Blauert (1983) stellt fest: „Frühe Reflexionen von starren Oberflächen wie Tischplatten oder Raumwänden können bei einohrigem Hören auch zu starken Klangverfärbungen führen. Diese Phänomen ist jedoch beim zweiohrigen Hören weniger bemerkbar, und manchmal überhaupt nicht. Das Gehör hat also deutlich die Fähigkeit, beim zweiohrigen Hören gewisse lineare Verzerrungen der Ohrsignale bei der Bildung der Klangfarben des Hörereignisses nicht zu beachten.“

Clark (1983) benutzte eine Anordnung mit einem einzelnen Lautsprecher und einem Reflektor, welcher eine Seitenreflexion erzeugt, mit einhergehendem Kammfilter:

Abb. 24 Frequenzgang und Impulsantwort für Einzel-LS und seitlichem Reflektor (Clark 1983, Abb. 6)



Clark: "Der hörbare Effekt des Reflektors war ziemlich schwierig wahrzunehmen. Als der Reflektor auf einer Tischplatte angeordnet wurde, war der Effekt stärker. Wahrscheinlich waren die Interferenz-Frequenzen nun für beide Ohren dieselben, da die Wege von Direktschall und Reflexion für beide Ohren dieselben waren. Bei dem seitlich angeordneten Reflektor ist der Kammfilter für jedes Ohr ein anderer, wodurch jede Frequenz von mindestens einem der beiden Ohren wahrgenommen wird."

Klangfarbenunterschiede bei verschiedenen hohen Anteilen an horizontalen bzw. vertikalen Reflexionen waren bei Musik quasi nicht vorhanden (Linkwitz 2007, Rundumstrahler vs Dipolar), gering bei Sprache und sehr gering bei Gesang (Ringlstetter et al. 1996, gleiche (selektierte) Lautsprecher, in horizontaler bzw. vertikaler Aufstellung)

Die wichtigste Schlussfolgerung ist, daß für natürliches (d.h. binaurales) Hören in Räumen Klangverfärbung kein Problem ist (Kuhl 1969, Toole 2006).

Die allgegenwärtige Behauptung, daß Reflexionen bei der Musikwiedergabe über Lautsprecher Kammfilterverfärbung verursachen, beruht auf ungeeignetem Beweismaterial (Klicken, Rauschen, Messungen mit Einzelmikrofon) und ist folglich nicht relevant für das binaurale Hören von Musik. Der Nachweis, daß durch Reflexionen erzeugte Kammfilter beim Hören von über Lautsprecher wiedergegebener Musik in kleinen Räumen zu Klangverfärbungen führen, wurde noch nicht geführt. Es scheint, als ob obige Behauptung eine Folge des Ende der 60iger von Richard Heyser entwickelter TDS (Time Delay Spectrometry) Meßverfahrens war, welches durch frühe Reflexionen erzeugte Kammfilter in den gemessenen Frequenzgängen erstmals sichtbar machte, ohne daß diesbezügliche psychoakustische Untersuchungen oder Hörtests durchgeführt wurden (Voetmann 2007).

„Die unvermeidliche Schlussfolgerung ist, daß beim natürlichen Hören Raumreflexionen kein Problem darstellen.“ (Toole 2006, siehe auch Cremer et al. 1956).

4. Sowohl bei Sprache als auch bei Musik werden seitliche Reflexionen gegenüber richtungsgleichen bevorzugt (Ando 1977, Ando 1979), wobei für Sprache der bevorzugte Einfallswinkel bei 30° liegt (Ando et al. 1977), für Musik bei $55^\circ \pm 20^\circ$ (Ando 1976).

Reflexionen haben einen positiven Beitrag zur Präferenz des Zuhörers. Je größer der Unterschied der an beiden Ohren eintreffenden Signale, als desto größer wird der Raum empfunden (Toole 2006). Reflexionen in der Median-Ebene (Ebene, die vertikal mittig zw. den Ohren verläuft) können der subjektiven Präferenz abträglich sein, weil die Signale, die am linken und rechten Ohr ankommen, einander sehr ähnlich sind (Schroeder 1979). Von vorne oder hinten kommende Reflexionen werden weniger bevorzugt, während seitliche Reflexionen wünschenswerter sind (Ando et al. 1977, Toole 2006). Folglich kann das Bedämpfen der Reflexionen von zentralen Teilen der Vorder – bzw. Rückwand vorteilhafte Effekte haben. Reflexionen, die innerhalb 2-3 ms nach dem Direktschall eintreffen, wie sie von den Lautsprechern sehr nahen Oberflächen erzeugt werden, erzeugen eine hohe interaurale Kreuzkorrelation und sind folglich die am wenigsten vorteilhaften (Ando 1977). Das Bedämpfen solcher Reflexionen kann positive Effekt zur Folge haben (Toole 2006, Walker 1994b). Eine hohe interaurale Kreuzkorrelation ist mit hoher binauraler Ähnlichkeit gleichzusetzen, welche ein niedrige subjektive Präferenz (Schroeder 1979) ergibt. Andererseits ist die Präferenz für ungleiche Ohrsignale (hohe binaurale Verschiedenartigkeit) hoch. Akustische Asymmetrie senkt die interaurale Kreuzkorrelation, was zu einem erhöhten Gefühl von Räumlichkeit führt und im allgemeinen erhöhte Präferenz zur Folge hat (Ando 1977, Toole 2006).

Um bei Zweikanal-Stereosystemen null Kreuzkorrelation (maximale Verschiedenartigkeit) zu erzielen, sollten die Lautsprecher unter einem Winkel von 23, 67, 126, 158° bzgl. der Hörachse angeordnet sein (Damaske et al. 1972), laut Ando (1998) ist ein Winkel von 26° optimal für alle Signaltypen. Die interaurale Kreuzkorrelation nimmt mit zunehmender Nachhallzeit der Raumes ab (mit gleichzeitigem verbesserten räumlichen Eindruck) (Kurozumi 1983).

„Einzelne Reflexionen scheinen im allgemeinen Musik und Rede zu schmeicheln, und diejenigen, die natürlicherweise in kleinen Räumen auftreten sind, wenn überhaupt, zu niedrig im Pegel, einen optimalen Effekt zu haben. In der Tat haben zahlreiche frühe Reflexionen einen positiven kumulativen Effekt auf Sprachverständlichkeit. Aus der Perspektive der Klangqualität verringern mehrfache Reflexionen die Kammfiltereffekte (gut) und erhöhen unsere Wahrnehmung von Resonanzen (gut für die Musik und schlecht nur, wenn die Resonanzen in den Lautsprechern sind),“ (Toole 2006).

Frühe Reflexionen, die innerhalb des Integrationszeit für Sprache eintreffen (ungefähr 30 ms) verbessern die Verständlichkeit (Bradley 2003, Toole 2006). Die Verständlichkeit verbessert sich in zunehmendem Maße, wenn die zeitliche Verzögerung einer Einzelreflexion verringert wird. Für Auftrittsräume wie Konzertsäle gibt es reichlich vorhandene Literatur, die die positiven Effekte von Reflexionen zeigt (wie Ando 1977, Barron 1971, Schroeder 1979). Moulton (1995) fand, daß frühe Reflexionen in kleinen Räumen im allgemeinen als vorteilhaft beurteilt werden.

Es sollte nunmehr deutlich sein, daß der einzige Effekt, den frühe Reflexionen möglicherweise haben können, eine Veränderung der räumlichen Darstellung ist, wie beispielsweise eine Verschiebung oder Verbreiterung der Abbildung, jedoch wurde in allen Fällen nur eine einzelne Seitenreflexion untersucht, in keinem Fall die Reflexionen von beiden Seiten. Insbesondere seitliche Reflexionen tragen zur Räumlichkeit bei (Blauert 1986, Damaske 1967/68, Schmidt 1973) wobei die Bestandteile unter 3 kHz für Abbildungstiefe und Bestandteile über 3 kHz für die Verbreiterung der Abbildung verantwortlich sind (Blauert 1986). Ob dieses als gut oder schlecht angesehen wird, ist eine reine Angelegenheit der Beurteilung des Einzelnen.

Es wurde gefunden, daß normale Reflexionen in typischen Wohnräumen die Wahrnehmung der Räumlichkeit des Aufnahme Raumes nicht behindern (Olive et al. 1989) und daß für das Genießen von aufgenommener Musik reflektierende Wände einen besseren Effekt haben (Kishinaga 1979). Falls Reflexionsbehandlung aus irgendeinem Grund gewünscht wird, dann müssen (frequenzunabhängige) Breitbandabsorber benutzt werden. Der Präzedenzeffekt ist am stärksten, wenn die Spektren von Direktschall und Reflexionen ähnlich sind. Maskierungseffekte sind am stärksten, wenn die Spektren von Maskierer und maskiertem Signal identisch sind (Buchholz et al. 2001). Wenn das Spektrum einer Reflexion von dem des Direktschalls unterschiedlich ist, wird die Wahrscheinlichkeit größer, daß sie als separates Klangereignis wahrgenommen wird (der Präzedenz-Effekt ist weniger wirkungsvoll). Daher sollten akustische Vorrichtungen gleichmäßig bis hinunter zu ungefähr 200 Hz wirken (Olive et al. 1989, Toole 2006).

Jedoch verursacht akustische Behandlung eine nicht unwesentliche, frequenzabhängige Änderung des interauralen Kreuzkorrelationskoeffizienten IACC (Tohyama 1989), im allgemeinen resultiert bei Anbringen von Absorbern oder Diffusoren eine Abnahme des Koeffizienten (King et al. 2011) mit folglich verringerter Abbildungsbreite (Kishinaga 1979) und führt im Extremfall reflexionsfreier Raum dazu, daß das wahrgenommene Schallfeld sich vom Originalfeld stark unterscheidet (Tohyama 1989).

Es sollte deutlich sein, daß Experimente wie das von Salmi (1982) durchgeführte bzw. vorgeschlagene, bei dem eine einzelne Bodenreflexion in einem reflexionsfreien Raum untersucht wurde, mit Rauschen aus einem einzelnen Lautsprecher als Signal (mit folglich maximal möglicher Ähnlichkeit der Signale am linken und rechten Ohr), ohne großen Wert für die Musikwiedergabe durch zwei Lautsprecher (Phantomschallquelle) in einer halligen Umgebung wie dem heimischen Wohnzimmer mit vielfachen Reflexionen ist.

Es sollte weiterhin deutlich sein, daß Raumimpulsmessungen, die drastische Änderungen im Messergebnis produzieren, sobald Position von Schallquelle oder Mikrofon verändert werden, wohingegen der Zuhörer solche Änderungen nicht wahrnimmt, von geringem Nutzen sind (Buchholz et al. 2001). Außerdem ist bekannt, daß nicht alles, was in einer Raumimpulsantwort sichtbar ist, auch wahrnehmbar ist (Buchholz et al. 2001).

Offensichtlich kann es Situationen geben, in denen eine Behandlung von Reflexionen notwendig sein kann, wie zum Beispiel

1. ein Lautsprecher sehr nah an, der andere sehr weit von der Wand aufgestellt
2. ein Lautsprecher nah an einer Wand, keine Wand auf der anderen Seite
3. Frequenzgang auf Achse sehr gut, Frequenzgang ausserhalb der Achse katastrophal (Olive 1990, Olive et al. 2007, Toole 1990)
4. der Raum hat eine sehr niedrige Nachhallzeit (Bech 1995)

In solchen Fällen kann eine der Situation angepasste Behandlung die Situation verbessern. Folglich muß man das Thema der frühe Reflexionen in jedem Einzelfall gesondert betrachten.

Zum Abschluss einige Passagen aus Floyd Tooles Buch (Toole 2008):

„... einige Abweichungen von akustischen Riten und Praktiken einer Industrie, die sich ohne Stützung durch die Wissenschaft entwickelt hat.“

„Das Thema der seitlichen Reflexionen der Frontlautsprecher (L, C, R) bedarf einiger Diskussion, auf Grund des weitverbreiteten Glaubens, daß diese Reflexionen standardmäßig eliminiert werden müssen. Dieses Ritual hat seine Ursprünge in Aufnahmestudiokontrollräumen, gerechtfertigt durch Vorsicht gebietende Warnrufe in Bezug auf Kammfilter, verminderte Sprachverständlichkeit oder Maskierung von in Aufnahmen enthaltenen Reflexionen. Unter die Lupe genommen, erweist sich keines dieser Probleme als solches. Der eigentliche Faktor scheint Räumlichkeit und die diese erzeugenden Reflexionen zu sein, sowie die Tatsache, daß Toningenieure, wie auch Musiker, eine diesbezüglich höhere Sensibilität haben als der Durchschnittshörer. Obwohl viele, wenn auch nicht alle Toningenieure das Gefühl haben, daß ihre Arbeit durch seitliche Reflexionen behindert wird, bevorzugen die meisten beim Musikhören in ihrer Freizeit die Anwesenheit dieser Reflexionen.“

„Was also tun mit diesen Reflexionen im heimischen Hörraum? Wenn die Lautsprecher gute Abstrahleigenschaften außerhalb der Achse haben, und besonders dann, wenn der Musikfreund mit Vorliebe in 2-Kanal Stereo hört, geht meine Empfehlung dahin, an den Stellen der seitlichen Reflexionen die Wand unbehandelt zu lassen.“

„Es scheint keinen Nachweis in der nunmehr zahlreichen Literatur zu geben dahingehend, daß diese seitlichen Reflexionen erster Ordnung in normal eingerichteten bzw. in geringem Maße behandelten Räumen ein Problem sind. Es ist schwierig, die Vorteile, ohne die scheinbaren Nachteile, der Verwendung von normalen, breit abstrahlenden Konus-Lautsprechern mit gutem Abstrahlverhalten außerhalb der Achse zu ignorieren, wobei die entsprechenden Stellen der Seitenwände reflektierend bleiben.“

“Verwende Absorber an der Wand hinter den Lautsprechern. Verwende Absorber oder Diffusoren an der Wand hinter dem Hörplatz.”

Zu der ersten dieser beiden Empfehlungen muß allerdings angemerkt werden, daß Toole sich hierbei auf die Untersuchungen von Kishinaga stützt, welche in diesem speziellen Fall in einem Raum durchgeführt wurden, in dem die Reflexionen von Seitenwänden, Decke sowie der Wand hinter dem Hörer durch Absorption behandelt waren, welche Tatsache die Wahrnehmbarkeit und den Einfluß der verbliebenen Reflexionen vergrößert. Was die zweite dieser beiden Empfehlungen angeht, sagt Toole im entsprechenden Abschnitt des Buches, daß die betreffende Reflexion hinsichtlich der räumlichen Abbildung einen geringen Nutzen habe, sie vermutlich unschädlich sei, man aber erwägen könne, sie akustisch zu behandeln.

5. Fazit

- Es gibt keinen wissenschaftlichen Nachweis dafür, daß frühe Reflexionen erster Ordnung beim Hören in 2-Kanal Stereo ein grundsätzliches Problem darstellen.
- Es gibt Indizien dafür, daß frühe Reflexionen einen hörbaren Einfluss haben auf die räumliche Darstellung. Ob dieser Einfluss als positiv oder negativ eingestuft wird, hängt von der individuellen Betrachtungsweise ab.
- Reflexionen, die aus derselben Richtung wie der Direktschall kommen, werden weniger bevorzugt als seitliche Reflexionen, so daß eine Behandlung einen positiven Effekt haben kann.
- Akustische Maßnahmen (Absorber, Diffusoren) zur Behandlung von frühen Reflexionen haben eine Verringerung des interaurale Kreuzkorrelationskoeffizienten IACC zur Folge, während hohe Werte des IACC bevorzugt werden.
- Wie sich in einem Versuch (King et al. 2011) gezeigt hat, können akustische Maßnahmen auch störende Wirkung haben.

Literatur

Ando et al. (1977), “Subjektive Präferenz für Schall mit einer einzelnen, frühen Reflexion”, *Acustica*, Vol. 37, S.111

Ando (1977), “Subjective preference in relation to objective parameters of music sound fields with a single echo”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 62, No.6, S.1436

Ando et al. (1979), “Effects of early multiple reflections on subjective preference judgements of music sound fields”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 65, No.2, S.524

Ando (1998), “Architectural Acoustics”, Kapitel “Design of electroacoustic systems”, Springer Verlag

- Angus (2001), "The effects of specular vs diffuse reflections on the frequency response at the listener", *Journal of the Audio Engineering Society*, S.125
- Atal et al. (1962), "Perception of coloration in filtered Gaussian noise – short-time spectral analysis by the ear", 4th Int. Congress on Acoustics, Copenhagen, 21.-28. August 1962
- Barron (1971), "The subjective effects of first reflections in concert halls – the need for lateral reflections", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.15, No.4, S.475
- Bech (1995), "Timbral aspects of reproduced sound in small rooms I", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.97, No.3, S.1717
- Bech (1996), "Perception of reproduced sound: Audibility of individual reflections in a complete sound field", *Audio Engineering Society preprint 4195*
- Bech (1996a), "Timbral aspects of reproduced sound in small rooms II", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.99, No.6, S.3539
- Bech, "Spatial aspects of reproduced sound in small rooms", *J. of the Acoustical Society of America* 1998, vol.103, no. 1, S.434
- Begault et al. (2004), "Early reflection thresholds for anechoic and reverberant stimuli within a 3-D sound display", *The 18th International Congress on Acoustics, Kyoto, Japan, 4.-9. April 2004*
http://human-factors.arc.nasa.gov/publibrary/20050322115330_Begault_ICA-finalREVISED.pdf
- Bilsen (1967/68), "Thresholds of perception of repetition pitch. Conclusions concerning coloration in room acoustics and correlation in the hearing organ", *Acustica*, Vol. 19, S.27
- Bilsen (1995), "Binaural modeling of spaciousness and coloration", *Music and Concert Hall Acoustics, Conference Proceedings from MCHA95, Kirishima International Concert Hall, Japan, Mai 1995, S.327-335, Herausgeber: Y. Ando & D. Noson*
- Blauert et al. (1986), "Auditory spaciousness: some further psychoacoustic analyses", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 80, No.2, S.533
- Blauert (1983), "Spatial hearing", MIT Press
- Blauert et al. (2005), "Acoustical communication: The precedence effect", *Proceedings FORUM ACUSTICUM BUDAPEST, OPAKFI Budapest*
- Bradley et al. (2003), "On the importance of early reflections for speech in rooms", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.113, No.6, S.3233
- Brüggen (2001), "Coloration and binaural decoloration in natural environments", *Acustica/acta acustica*, Vol. 87, S.400
- Buchholz et al. (2001), "Room masking: understanding and modelling the masking of room reflections", *Audio Engineering Society preprint 5312*

- Burgtorf (1963), "Zur subjektiven Wirkung von Schallfeldern in Räumen (Rückverdeckung, Phantomschallquellen, Acustica, Vol. 13, S.86
- Burgtorf et al. (1964), "Untersuchungen über die richtungsabhängige Wahrnehmbarkeit verzögerter Schallsignale", Acustica, Vol. 14, S.254
- Case (2001), "An investigation of the spectral effect of multiple early reflections", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 109, No. 5, S.2003 (Abstract)
- Cox et al. (2004), "Room sizing and optimization at low frequencies", Journal of the Audio Engineering Society, S.640
- Clark (1983), "Measuring audible effects of time delays in listening rooms", Audio Engineering Society preprint 2012
- Cremer et al. (1956), "Zusammenfassung der Ergebnisse des Colloquiums vom 18.-23. 5. 56", Gravesaner Blätter, Vol. 2, No. 17, S.17
- Damaske et al. (1972), "Interaurale Kreuzkorrelation für mehrkanalige Lautsprecherwiedergabe, Acustica, Vol. 27, S.232
- Damaske 1967/68, "Subjektive Untersuchung von Schallfeldern, Acustica, Vol. 19, S.190
- Devantier (2002), "Characterizing the amplitude response of loudspeaker systems", Audio Engineering Society preprint 5638
- Dietsch et al. (1986), "Ein objectives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen, Acustica, Vol. 60, S.205
- Everest, "Master Handbook of Acoustics", McGraw-Hill 2001
- Flindell et al. (1991), "Subjective evaluations of preferred loudspeaker directivity", Audio Engineering Society preprint 3076
- Furlong et al. (1992), "Loudspeakers, listening rooms, and effective synthetic auralization", Audio Engineering Society preprint 3445
- Halmrast (2000), "Orchestral timbre: comb-filter coloration from reflections", Journal of Sound and Vibration, Vol.232, No.1, S.53
Ähnlicher Artikel: http://www.akutek.info/Papers/TH_Coloration2001.pdf
- Holzkämper et al. (1988), „Wahrnehmbarkeit von Reflexionen in Regieräumen – neue Ergebnisse“, 15. Tonmeistertagung (1988)
- Imamura et al. (2013), "Influence of first reflections in listening room on subjective listener impression of reproduced sound", Audio Engineering Society Convention e-Brief 82
- Imamura et al. (2014), "Influence of directional differences of first reflections in small spaces on perceived clarity", Audio Engineering Society Convention e-Brief 134

- Jensen et al. (2003), "The Importance of Reflections in a Binaural Room Impulse Response", Audio Engineering Society preprint 5839
- Johansen et al. (2001), "Listening test results from a new loudspeaker/room correction system", Audio Engineering Society preprint 5323
- Kendrick et al. (2006), "Room acoustic parameter extraction from music signals", Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Toulouse (Frankreich), 14.-19. Mai 2006, Vol. 5
- King et al. (2011), "The practical effects of lateral energy in critical listening environments", Audio Engineering Society preprint 8565
- King et al. (2013a), „Balance preference testing utilizing a system of variable acoustic condition“, Audio Engineering Society Preprint 8843
- King et al. (2014), „The role of acoustic condition on high frequency preference“, Audio Engineering Society Preprint 9135
- Kishinaga et al. (1979), "On the room acoustic design of listening rooms", Audio Engineering Society preprint 1524
- Koenig (1950), "Subjective effects in binaural hearing", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 22, No. 1, S.61
- Kuhl (1969), "Unterschiedliche Bedingungen beim Hören in einem Raum und bei elektroakustischen Übertragungen, Rundfunktechnische Mitteilungen, Vol. 13, No. 5, S.205
- Kuhl (1978), „Räumlichkeit als Komponente des Raumeindrucks, Acustica, Vol. 40, S.167
- Kuhl et al. (1978), „Einfluss des abgestrahlten Diffusschalls eines Lautsprechers auf das Hörereignis“ Acustica, Vol. 40, No.3, S.182
- Kurozumi et al. (1983), „The relationship between the cross-correlation coefficient of two-channel acoustic signals and sound image quality“, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 74, No. 6, S.1726
- Lee et al. (2004), "Elicitation and grading of subjective attributes of 2-channel phantom images", Audio Engineering Society preprint 6142
- Linkwitz (2007), "Room Reflections Misunderstood", Audio Engineering Society preprint 7162
- Michelsen et al., (1997) „Parameters of distance perception in stereo loudspeaker scenario“, Audio Engineering Society Preprint 4472
- Møller et al. (1995), "Head-related transfer functions of human subjects", Journal of the Audio Engineering Society, S.300
- Moulton (1995), "The significance of early high-frequency reflections from loudspeakers in listening rooms", Audio Engineering Society preprint 4094

- Muncey et al. (1953), "The acceptability of speech and music with a single artificial echo", *Acustica*, Vol. 3, S.169
- Naqvi et al. (2005), "The active listening room- a novel approach to early reflection manipulation in critical listening rooms", *Journal of the Audio Engineering Society*, S.385
- Niaounakis et al. (2002), "Perception of reverberation time in small listening rooms", *Journal of the Audio Engineering Society*, S.343
- Olive et al. (1989), "The detection of reflections in typical rooms", *Journal of the Audio Engineering Society*, S.539
- Olive (1990), "The Preservation of Timbre: Microphones, Loudspeakers, Sound Sources and Acoustical Spaces", 8th International Conference: The Sound of Audio, paper 8-018
- Olive et al. (2007), "Interaction between Loudspeakers and Room Acoustics Influences Loudspeaker Preferences in Multichannel Audio Reproduction", *Audio Engineering Society preprint 7196*
- Reichardt et al. (1967), "Die Wahrnehmbarkeit der Veränderung von Schallfeldparametern bei der Darbietung von Musik", *Acustica*, Vol. 18, S.274
- Ringlstetter et al. (1996), "Untersuchungen zum Bündelungsmaß von Lautsprechern", *Fortschritte der Akustik, DAGA '96, 22. Jahrestagung für Akustik (Deutsche Gesellschaft für Akustik)*, Bonn 1996
- Von Ripka et al. (1987), "Die Beurteilung verschiedener stereofoner Wiedergabeeinrichtungen bezüglich der Abbildungsschärfe", *Fortschritte der Akustik, DAGA '87, 13. Gemeinschaftstagung der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Akustik*, Aachen 1987
- Rodgers (1981), "Pinna transformations and sound reproduction", *Journal of the Audio Engineering Society*, S.226
- Rubak (2004), "Coloration in room impulse responses", *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 8.-10. Juni 2004, Mariehamn, Åland*
<http://www.acoustics.hut.fi/asf/bnam04/webprosari/papers/o23.pdf>
- Salmi et al. (1982), "Listening room influence on loudspeaker sound quality and ways of minimizing it", *Audio Engineering Society preprint 1871*
- Salomons (1995), "Coloration and binaural decoloration of sound due to reflections", *Doktorarbeit, TU Delft*
<http://www.darenet.nl/en/page/repository.item/show?saharaIdentifier=tuddare:oai:tudelft.nl:200755>
- Schmidt et al. (1973), "Einfluß der Richtungs- und Zeitdiffusivität von Anfangsreflexionen auf den Raumeindruck", *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden*, Vol. 22, No.2, S.313
- Schneider et al. (1992), "Untersuchungen zur Wahrnehmbarkeit früher Reflexionen und des Nachhalls in Abhörräumen", *17. Tonmeistertagung (1992)*

- Schroeder (1979), "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound diffusion", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 65, No. 4, S.958
- Schubert (1966), "Untersuchungen über die Wahrnehmbarkeit von Einzelmüßigkeiten bei Musik, Technische Mitteilungen RFZ, Vol. 10, No. 3, S.124
- Seki et al. (2003), "Coloration perception depending on sound direction", IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, Vol. 11, No.6, S.817
- Seraphim (1961), "Über die Wahrnehmbarkeit mehrerer Rückwürfe von Sprachschall, Acustica, Vol. 11, S.80
- Shaw (1965), "Ear canal pressure generated by a free sound field", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 39, No.3, S.465
- Theiss et al. (1996a), "Localization experiments in three-dimensional sound reproduction", Audio Engineering Society Preprint 4156
- Theiss et al. (1996b), "Loudspeaker placement for optimized phantom source reproduction", Audio Engineering Society preprint 4246
- Tohyama et al. (1989), "Interaural cross-correlation coefficients in stereo-reproduced sound fields", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 85, No. 2, S.780
- Toole (1990), "Loudspeakers and rooms for stereophonic sound reproduction", Audio Engineering Society 8th International Conference 1990
- Toole (2006), "Loudspeakers and rooms for sound reproduction – a scientific review", Journal of the Audio Engineering Society, S.451
- Toole (2008), "Sound reproduction: loudspeakers and rooms", Focal Press
- Voetmann (2007), "50 years of sound control room design", Audio Engineering Society Preprint 7140
- Völker (1983a), "Control rooms for music monitoring" Audio Engineering Society preprint 1958
- Völker (1983b), "Acoustical design for control rooms for speech and music monitoring" Audio Engineering Society preprint 2002
- Völker (1997), "The importance of early sound reflections for recording and reproduction – is the quality of digital sound transmission sufficient?" Audio Engineering Society preprint 4579
- Völker (1999), "Absorption and reflections – useful tools in room acoustical design", Audio Engineering Society preprint 4982
- Völker (1998), "Acoustics in control rooms – that recurring, burdensome subject", Audio Engineering Society preprint 4832

Wagener (1971), "Räumliche Verteilung der Hörrichtungen in synthetischen Schallfeldern", Acustica, Vol. 25, No. 4, S.203

Walker (1993), "A new approach to the design of control room acoustics for stereophony", Audio Engineering Society preprint 3543

Walker (1994a), "Early reflections in studio control rooms: the results from the first controlled image design installations", Audio Engineering Society preprint 3853

Walker (1994b), "High frequency room responses: Acoustic design and the control of stereophonic image quality", BBC RD 1994/11
<http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1994-11.pdf>

Walker (1995), "Controlled Image Design: The management of stereophonic image quality", BBC RD 1995/4
<http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/reports/1995-04.pdf>

Wrightson et al. (1986), "Influence of rear-wall reflection patterns in LEDE-type recording studio control rooms", Journal of the Audio Engineering Society, S.796

Yamada et al. (2006), "A simple method to detect audible echoes in room acoustical design", Applied Acoustics, Vol. 67, S.835

Yanagawa et al. (2001), "Sound image broadening by a single reflection considering temporal change of interaural cross-correlation", Acustica, Vol.87, S. 247

Zurek (1979), "Measurements of binaural echo suppression", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 66, No.6, S.1750