## Das Schallfeld in akustisch kleinen Räumen

Immer wieder liest man in der Audiopresse oder in Internetforen im Zusammenhang mit Musikwiedergabe in kleinen Räumen wie dem Wohnzimmer vom diffusen Schallfeld, vom Diffusfeldanteil, vom diffusen Restfeld, daß das Feld oberhalb der Schröderfrequenz diffus sei, darunter nicht, vom Hallradius. Der Begriff Diffusfeldanteil vermittelt den Eindruck, als ob ein Teil des Schallfeldes diffus sei, der Rest nicht. Genauso gut könnte man sagen, daß bei einem halbvollen Glas ein Teil des Glases voll ist, der Rest hingegen nicht.

Das Schallfeld in geschlossenen Räumen setzt sich zusammen aus dem direkten Schall und zahlreichen Reflexionen an den Raumbegrenzungsflächen. Ein Schallfeld ist diffus, wenn zwei Bedingungen erfüllt sind (Hodgson 1996, Jacobsen 2010, Gover 2002):

- das Feld ist isotrop (in jedem Raumpunkt kommen Schallwellen gleicher Intensität und zufällig verteilten Phasenbeziehungen aus allen Richtungen)
- das Feld ist homogen (in jedem Raumpunkt isotrop)

Als Folge davon ist der Schalldruck in jedem Raumpunkt gleich gross (Jacobsen 2010). Aus diesem Grunde wurden auch Messungen der Schwankungen des Schalldrucks verwendet, um den Grad der Diffusität zu bestimmen (Wente 1935, Bolt 1950).

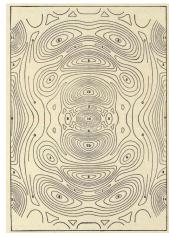
Ein diffuses Schallfeld könnte durch mehrere unkorreliertes Rauschen abstrahlende Lautsprecher in einem reflexionsfreien Raum angenähert werden (Jacobsen 2010). Als eine weitere Möglichkeit wird angegeben, den Raum gross zu machen, um die Anzahl der Raumresonanzen pro gemessener Bandbreite zu zu erhöhen (Schultz 1971).

Wenn das Schallfeld diffus ist, lassen sich Schallfeldgrössen wie Nachhallzeit und Schalldruck berechnen (Hodgson 1996). Für die Bestimmung von Absorptionskoeffizienten im Hallraum ist ein diffuses Feld absolut notwendig (Cops 1995, Vercammen 2010), sodaß die Formel von Sabine zur Berechnung angewendet werden kann (Bolt 1939).

Jedoch, schon Sabine (1922) hat beobachtet, daß das Schallfeld in den meisten Räumen nicht diffus ist (siehe Abb. 1). Gründe dafür sind z.B. eine ungleichmässige Verteilung der schallabsorbierenden Materialien im Raum, die Anregung der Raumresonanzen bei tiefen Frequenzen, die ungleichförmige Dämpfung dieser Resonanzen (Gibbs 1972).

Abb.1

Schalldruckverteilung mit Schallquelle in der Raummitte

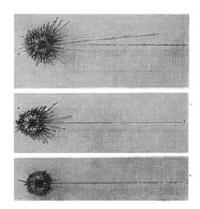


Im folgenden werden in chronologischer Folge Messungen von Schallfeldern in kleinen Räumen und ihrer Schallrichtungsverteilung vorgestellt.

1. Meyer (1954) benutzte ein rotierende Anordnung eines Mikrophons in einem Parabolspiegel sowie eine rundumstrahlende Schallquelle. Zur dreidimensionalen Darstellung wurde ein "Schall-Igel" verwendet (Abb. 2), wobei die Länge der Stacheln proportional zur einfallenden Schallenergie ist: für ein diffuses Feld wären alle Stacheln gleich lang. Abb. 2a zeigt eine geringe (der Schall kommt bevorzugt aus der Richtung der Schallquelle), Abb. 2c eine hohe Diffusität.

Abb. 2 a, b, c

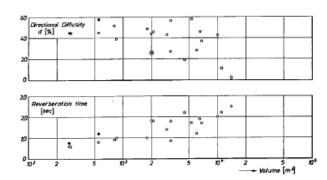
Schall-Igel für 3 verschiedene Räume



Meyer führt den Begriff der Richtungsdiffusität d ein, die sich aus der Richtungsverteilung beim Schall-Igel herleiten lässt, wobei der Wert im schalltoten Raum gleich 0 (bzw. 0%), im diffusen Raum gleich 1 (bzw. 100%) ist. Es wurden Messungen mit einem warble Ton von 2 kHz in Räumen von 300 - 15.000 m³ durchgeführt, wobei festgestellt wurde, daß d mit steigender Nachhallzeit abnimmt (siehe Abb. 3).

Abb. 3

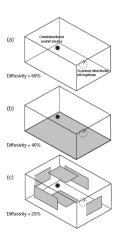
Richtungsdiffusität und Nachhallzeit in verschiedenen Räumen



Weitere Messungen wurden in einem Modellraum von 2 x 1 x 1 m mit einem 25 kHz Ton gemacht, wobei der leere Raum eine Diffusität von 69% hatte. Wurde der Boden mit absorbierendem Material bedeckt, sank der Wert auf 46%, wurde diese Menge an absorbierendem Material auf alle Begrenzungsflächen so verteilt, daß die Stellen der Erstreflexionen bedeckt waren, sank der Wert auf 26% (Abb. 4).

Abb. 4 (fig. 8.1 aus Toole (2008))

Modellraum zur Messung der Richtungsdiffusität



Wie die Ergebnisse deutlich zeigen, war weder im Modellraum noch in den realen Räumen ein diffuses Schallfeld messbar.

2. Randall et al. (1960) benutzten die Abklingkurven von Raumresonanzen zur Ableitung verschiedener Parameter, unter denen sich die mittlere Krümmung der Kurven als der am besten geeignete zur Beurteilung der Diffusität herausstellte. Bei einem diffusen Schallfeld hat diese Kurve einen exponentialen, und somit in logarithmischer Darstellung einen geraden Verlauf. Eine Änderung der Krümmung der Exponentialkurve ist gleichbedeutend mit einer Änderung der Steigung der Geraden in logarithmischer Darstellung. Die Abklingkurven wurden in 2 Abschnitte aufgeteilt, die mittlere Steigung jedes Abschnitts ermittelt und der Quotient S der beiden Werte bestimmt (grössere Steigung / kleinere Steigung), wobei S für eine Gerade gleich 1 (bzw. 100%) ist.

Es wurden Messungen in einem würfelförmigen Raum von ca. 3 x 3 x 3 m (Raum A) und in einem Raum mit nicht-parallelen Wänden von ca. 560 m³ (Raum B) für verschiedene Anordnungen von Absorbern und Diffusoren durchgeführt (A4 steht für den leeren würfelförmigen Raum).

Wie aus der Tabelle zu sehen ist, ist der Quotient S in keiner der Konfiguration gleich 100%, auch nicht im leeren Raum A4, somit liegt in keinem der Fälle ein diffuses Schallfeld vor.

Table 5

Effect of Room Condition on Double-Slope Ratio, S

Room condition	Frequency band				.,	Standard
	700 c/s	1 kc/s	1 · 4 kc/s	2 kc/s	Mean	error of mean
A8	62	69	68	70	67	1·7
A9	91	83	85	86	86	1·0
A10	75	80	71	87	78	1·7
B8	75	74	67	67	71	1·7
B9	75	82	86	84	82	1·4
B10	79	79	76	80	79	1·3
B8*	78	64	69	70	70	1·7
B9*	77	80	80	88	81	1·2
B10*	82	71	68	82	76	1·4
A4	75	79	77	75	77	1·6
A5	75	74	80	81	77	1·5

Absorbers and diffusers rearranged.

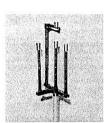
3. Spring et al. (1969) entwickelten die Methode von Randall et al. (1960) weiter, wobei die mittlere Steigung der Abklingkurve  $S_A$  auf eine andere Art bestimmt wurde. Die Messungen wurden in einem Raum von 6,7 x 4,9 x 3,4 m für verschiedene Konfigurationen (A-F) von absorbierendem Material durchgeführt. Auch hier konnte in keinem Falle ein diffuses Feld festgestellt werden.

## TABLE 2 Room Condition A B C D E F $S_A \qquad \qquad 0.93 \quad 0.85 \quad 0.80 \quad 0.87 \quad 0.89 \quad 0.96$

4. Yamasaki et al. (1989) benutzten eine Anordnung von 4 Mikrophonen (Abstand zueinander 33 mm) zur Messung von 4 Raumimpulsantworten, aus welchen die virtuellen Schallquellen der Reflexionen bestimmt wurden.

Abb. 5

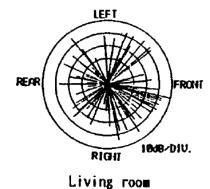
4-Mikrophon-Anordnung



Auf Basis von Richtung, Abstand und Pegel dieser virtuellen Quellen wurde ein Schall-Igel ähnlich dem von Meyer (1954) berechnet. Abb. 6 zeigt die Projektion dieses Igels auf den Boden eines Wohnzimmers.

Abb.6

Richtungsdiffusität in einem Wohnraum



Auch hier ist zu erkennen, daß kein diffuses Schallfeld vorliegt.

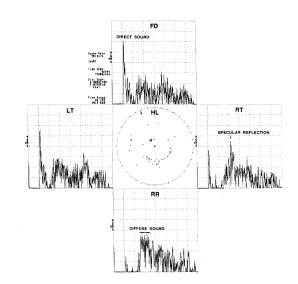
5. D'Antonio et al. (1989) führten Schallintensitätsmessungen in einem Studiokontrollraum durch. Der Raum hatte eine reflexionsfreie Zone (initial time delay gap von 17 ms) und Diffusoren an der Rückwand. Gemessen wurde an der Kante des Mischpultes mit einem Richtmikrofon, das nacheinander in alle 6 Raumrichtungen zeigte. Dargestellt wurden die Messungen in Diagrammen, in denen die Schallenergie über der Zeit aufgetragen ist (ETC: Energy-time curve oder Raumimpulsantwort).

Abb. 7 zeigt beispielhaft die Messung in der Horizontalebene für den linken Lautsprecher (angedeutet durch Pfeil im zentralen Kreis).

Abb. 7

Raumimpulsantworten im Kontrollraum der Master Sound Astoria Studios in Astoria (New York)

FD: von vorne RT: von rechts LT: von links RR: von hinten

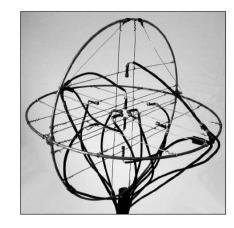


Wie deutlich zu sehen ist, sind die Impulsantworten aus den verschiedenen Richtungen sehr unterschiedlich, ein diffuses Feld liegt somit nicht vor.

6. Merimaa (2001) benutzt eine dreidimensionale Mikrofonanordnung (Abb. 8) zur Messung der Schallintensität im Frequenzbereich von 100 Hz – 8 kHz.

Abb. 8

3-D Mikrofon

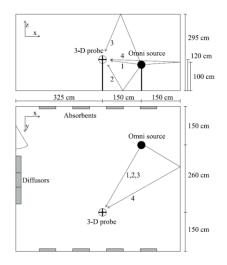


Auf Grund der dreidimensionalen Anordnung der Mikrofone lässt sich auf Basis der Schalldrücke benachbarter Mikrofone ein Intensitätsvektor berechnen, der somit ausser dem Betrag auch Richtungsinformation enthält. Die graphische Darstellung erfolgt in einem Diagramm, das eine Kombination aus Schalldruck und Schallintensität zeigt.

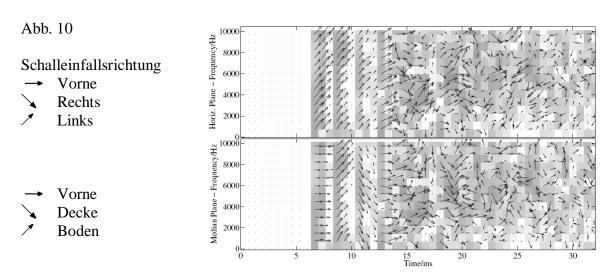
Das Schallfeld eines Hörraums von 6,25 x 5,60 x 2,95 m wurde vermessen, als Schallquelle wurde ein rundumstrahlender Lautsprecher verwendet.

Abb. 9

Messaufbau im Hörraum des Acoustics Laboratory der Technischen Universität Helsinki



Die Resultate sind in Abb. 10 dargestellt, wobei im oberen Teil die Horizontalebene, im unteren Teil die Vertikalebene gezeigt ist.

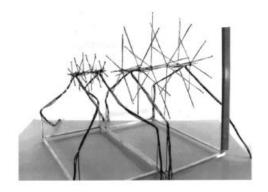


Auch hier ist gut zu sehen, daß das Schallfeld nicht diffus, sondern relativ stark gerichtet ist.

8. Gover et al. (2004) benutzen eine Anordnung von 32 auf der Oberfläche einer geodätischen Kugel angebrachten Mikrofonen mit kugelförmiger Richtcharakteristik, wobei Durchmesser und Mikrofonabstände untereinander für die beiden Frequenzbereiche 300 - 1000 Hz sowie 1 - 3,3 kHz unterschiedlich sind (siehe Abb. 11). Mit diesem Messsystem wurde die Richtungsdiffusität d im schalltoten Raum (21%) und im Hallraum (91%) bestimmt.

### Abb.11

Mikrofonanordnung (links für tiefe, rechts für hohe Frequenzen); 50 cm Lineal für den Größenvergleich



Ausser der Richtungsdiffusität wurde der Anisotropie-Index AI bestimmt. Dieser ist ein Maß für den Unterschied zw. maximalem und gemitteltem Pegel in jedem Messpunkt, ausgedrückt in dB, wobei der Wert mit zunehmender Anisotropie zunimmt, d.h. für den isotropen Zustand gleich Null ist.

Richtungsdiffusität d und Anisotropie-Index AI wurden in 3 Räumen bestimmt, die Schallquelle war ein rundumabstrahlender Lautsprecher.

# Raum 1 7,91 x 4,14 x 3,13 m (102,5 m<sup>3)</sup> Nachhallzeit 0,36 s Schröder-Frequenz (1996): 118 Hz Schröder-Frequenz (1954): 237 Hz d = 73% (300 - 1000 Hz) 70% (1 - 3,3 kHz) AI = 4,2 dB (300 - 1000 Hz) 4,0 dB (1 - 3,3 kHz)

Raum 1, zweiter Messpunkt d = 73% (300 - 1000 Hz) 59% (1 - 3,3 kHz) AI = 4,2 dB (300 - 1000 Hz) 7,8 dB (1 - 3,3 kHz) Raum 2 8,33 x 7,23 x 3,01 m (181,3 m<sup>3)</sup> Nachhallzeit 0,4 s Schröder-Frequenz (1996): 94 Hz Schröder-Frequenz (1954): 188 Hz d = 57% (300 - 1000 Hz) 58% (1 - 3,3 kHz) AI = 8,6 dB (300 - 1000 Hz) 7,4 dB (1 - 3,3 kHz)

Raum 3 16,45 x 12,62 x 2,55-5,69 m (ca. 875 m<sup>3)</sup> Nachhallzeit 0,6 s Schröder-Frequenz (1996): 52 Hz Schröder-Frequenz (1954): 104 Hz d = 62% (300 - 1000 Hz) 61% (1 - 3,3 kHz) AI = 6,8 dB (300 - 1000 Hz) 5,5 dB (1 - 3,3 kHz) In einem weiteren Schritt wurden die ersten 50 bzw. 100 ms der Messungen ausgeblendet, wobei in Räumen 1 und 2 die Positionen von Schallquelle und Messpunkt gegenüber den oben aufgeführten Messungen verändert wurde, gemessen wurde nur im Frequenzbereich 1 - 3,3 kHz.

Raum 1		
Volle Messung	50 ms	100 ms
d = 64%	d = 77%	d = 73%
AI = 6.2 dB	AI = 3,4 dB	AI = 4,4, dB
Raum 2		
Volle Messung	50 m s	100 ms
d = 67%	d = 74%	d = 69%
AI = 6.7 dB	AI = 4.3 dB	AI = 5,1 dB
Raum 3		
Volle Messung	50 ms	100 ms
d = 61%	d = 84%	d = 86%
AI = 5.5 dB	AI = 2,3 dB	AI = 2,7 dB

In keinem der Räume konnte ein diffuses Schallfeld festgestellt werden, auch oberhalb der Schröder-Frequenz nicht. Weiterhin zeigt der Anstieg des Wertes der Richtungsdiffusität bei Ausblendung der ersten 50 bzw. 100 ms, daß die Erstreflexionen einen starken Anteil am Schallfeld haben. Weiterhin wurde festgestellt, daß das Feld im grösseren Raum weniger diffus war als in den kleineren Räumen, ein Ergebnis, was das von Meyer (1954) bestätigt.

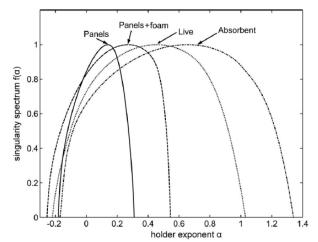
- 8. Loutridis (2009) bestimmte die Raumimpulsantwort in einem Raum von 6,5 x 4,2 x 2,7 m (73,7 m³) für 4 verschiedenen Konfigurationen von Absorbern und Diffusoren:
- a) 2,3 m² Absorbermaterial wurde gleichmässig an den Seitenwänden verteilt, an der Rückwand war ein schwerer Vorhang. Nachhallzeit war 0,34 s.
- b) 0,36 m² Absorbermaterial wurde gleichmässig an den Seitenwänden verteilt. Nachhallzeit war 0,7 s.
- c) Seitenwände waren bedeckt mit angewinkelten Holzpanelen, an der Rückwand war ein quadratischer residue diffusor. Nachhallzeit war 0,5 s.
- d) Seitenwände waren bedeckt mit angewinkelten Holzpanelen, ein wenig Absorbermaterial. Nachhallzeit war 0,32 s.

Ein Breitband MLS-Signal wurde über 2 rundumstrahlende Lautsprecher abgestrahlt. Die Impulsantwort wurde an 12 Raumpunkten mit einem Mikrofonen mit kugelförmiger Richtcharakteristik bestimmt. Aus der Impulsantwort wurde in mehreren Schritten das Singularitätsspektrum berechnet, dessen Breite bei idealer Diffusität gleich Null ist, und mit abnehmender Diffusität des Schallfeldes zunimmt. Abbildung 12 zeigt das Spektrum für die 4 Konfigurationen.



Singularitätsspektrum für 4 verschiedene Konfigurationen

Absorbent = a) Live = b) Panels = c) Panels + foam = d)



Wie deutlich zu sehen ist, liegt bei keiner der Konfigurationen ein diffuses Feld vor und die Diffusität nimmt mit zunehmender Anzahl von Absorbern ab. Diffusoren bewirken eine Zunahme der Diffusität, bewirken gleichzeitig aber eine temporal spread der Reflexionen.

Ein weiteres Resultat ist, daß in den beiden Konfigurationen mit etwa gleich grosser Nachhallzeit (Konfigurationen a), d)) die Diffusität deutliche Unterschiede aufweist, die Nachhallzeit als solche also kein besonders gut geeigneter Parameter zur Charakterisierung von kleinen Räumen ist (siehe auch Kuttruff 1998).

10. In Empfehlungen für Abhörbedingungen bei Heimwiedergabe wie der SSF – 01.1/2002 (Surround Sound Forum), oder für Hör- und Regieräume für Rundfunk und Fernsehen (EBU Tech. 3276) wird gefordert, daß das Nachhall-Schallfeld (d.h. Reflexionen, die später als ca. 15 ms nach dem Direktschall eintreffen) ausreichend diffus sein bzw. einen (in logarithmischer Darstellung) geraden Abklingverlauf haben soll. Wie oben unter Punkt 2. schon beschrieben, ist ein gerader Abklingverlauf nur in einem diffusen Schallfeld der Fall.

Wie das Verhalten des Nachhall-Schallfelds aussieht, ist den Arbeiten von Merimaa (2001) und Gover (2004) zu entnehmen. Bei Merimaa (2001) ist dieses Feld in Abb. 10 ab ca. 15 ms vorhanden, bei Gover (2004) geben die bei 50 und 100 ms gefensterten Messungen darüber Auskunft. In beiden Arbeiten wird deutlich, daß das Nachhall-Schallfeld zwar weniger stark gerichtet, aber nicht diffus ist. Man könnte also eventuell von einer ausreichenden Diffusität sprechen, einen geraden Abklingverlauf jedoch wird man nicht erhalten.

Es können akustisch wirksame Massnahmen getroffen werden, um die Diffusität zu erhöhen.

- a) Meyer (1954) brachte im oben genannten Modellraum, der leer eine Diffusität von 69% hatte, Diffusoren an allen Wänden an, wodurch der Wert auf 75% stieg.
- b) Bei Randall et al. (1960) wurden verschiedene Kombinationen von Absorbern und Diffusoren getestet. Der Quotient S für den leeren Raum (A4) war 77%, für den nur mit Diffusoren ausgestatteten Raum (A5) ebenfalls 77%, der höchste Wert von 86% wurde erzielt für eine Kombination aus Absorbern und Diffusoren (A9).
- c) Bei Loutridis (2009) ist zu sehen, daß mit zunehmender Menge an Diffusoren die Diffusität zunimmt.

Keine der Untersuchungen jedoch richtet sich speziell auf die Diffusität des Nachhall-Schallfeldes in dem Sinne, daß untersucht wird, wie sich dieses Feld ändert in Abhängigkeit von Absorbern und/oder Diffusoren. Auch liegen keine psychoakustischen Untersuchungen vor, die den eventuell wahrnehmbaren Einfluss der Diffusität dieses Feldes auf den Gesamtklang zum Thema haben.

Zusammenfassend sind folgende Punkte anzumerken:

Diffuse Schallfelder können in Realität nicht existieren (Kuttruff 1998). Daß dies der Fall ist, weder unterhalb noch oberhalb der Schröderfrequenz, wird durch die oben angeführten Messungen bestätigt.

Diffusoren sorgen für eine Erhöhung der Diffusität, gleichzeitig aber bewirken sie eine zeitliche Verschmierung der Reflexionen.

Dieselbe Fläche an absorbierendem Material hat je nach Verteilung im Raum eine andere Diffusität zur Folge. Die Diffusität/Richtungsdiffusität ist an verschiedenen Raumpunkten unterschiedlich gross.

Hallradius ist der Abstand von der Schallquelle an dem die Schalldruckpegel von Direktschall und Diffusschall gleich gross sind. Da es in kleinen Räumen kein diffuses Schallfeld gibt, gibt es auch keinen Hallradius.

Frühe Reflexionen sind ein massgeblich bestimmender Anteil des Schallfelds.

### Literatur

Bolt (1939), "Normal modes of vibration in room acoustics: angular distribution theory", J. of Acoust. Soc. of America 1939, Vol.11, S.74

Bolt (1950), "Frequency fluctuations in rooms", J. of the Acoustical Society of America 1950, Vol.22, No. 2, S.280

Cops et al. (1995), "Sound absorption in a reverberation room: Causes of discrepancies on measurement results", Applied Acoustics 1995, S.215

D'Antonio et al. (1989), "Sound intensity and interaural cross-correlation measurements using time-delay spectrometry", J, of the Audio Engineering Society 1989, S.659

Gibbs et al. (1972), "A simple method for calculating the distribution of sound pressure levels within enclosures", Acustica 1972, Vol.26, S.24

Gover et al. (2002), "Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields", J. of the Acoustical Society of America 2002, Vol.112, No.5, Pt.1, S.1980

Gover et al. (2004), "Measurements of directional properties of reverberant sound fields in rooms using a spherical microphone array", J. of the Acoustical Society of America 2004, Vol.116, No.4, Pt.1, S.2138

Hodgson (1996), "When is diffuse-field theory applicable?" Applied Acoustics 1996, Vol.49, No.3, S.197

Jacobsen (2010), "The sound field in a reverberation room", Note no. 31261 (Febr. 2010) > <a href="http://server.elektro.dtu.dk/ftp/fja/Room\_acoustics.pdf">http://server.elektro.dtu.dk/ftp/fja/Room\_acoustics.pdf</a></a>

Kuttruff (1998), "Sound fields in small rooms", Audio Engineering Society 15th International Conference 1998: Audio, Acoustics & Small Spaces

Loutridis (2009), "Quantifying sound-field diffuseness in small rooms using multifractals", J. of the Acoustical Society of America 2009, Vol.125, No.3, S.1498

Merimaa et al. (2001), "Measurement, analysis and visualisation of directional room responses", Audio Engineering Society preprint 5449 (2001)

Meyer (1954), "Definition and diffusion in rooms", J. of the Acoustical Society of America 1954, Vol.26, No.5, S.630

Peltonen et al. (2001), "A system for multi-channel and binaural room response measurements", Audio Engineering Society preprint 5289 (2001)

Randall et al. (1960), "Diffusion of sound in small rooms", Proceedings of the IEEE 1960, Part B, Vol.107, No.35, S.439

Sabine (1922), "Collected papers on acoustics", Harvard University Press 1922

Schröder (1954), "Die statistischen Parameter der Frequenzkurve in grossen Räumen", Acustica 1954, Vol.4, S.594

Schröder (1996), "The Schroeder frequency revisited", J. of the Acoustical Society of America 1996, Vol.99, No.5, S. 3240

Schultz (1971), "Diffusion in reverberation rooms", J. of Sound and Vibration 1971, S.17

Spring et al. (1969), "The measurement of sound diffusion index in small rooms", BBC RD 1969/16

Toole (2008), "Sound reproduction: loudspeakers and rooms", Focal Press

Vercammen (2010), "Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354", International Symposium on Room Acoustics, 29.-31. August 2010, Melbourne, Australien

Wente (1935), "Characteristics of sound transmission in rooms", J. of the Acoustical Society of America 1935, S.123

Yamasaki et al. (1989), "Measurement of spatial information in sound fields by closely located four point microphone method", J. of the Acoustical Society of Japan 1989, (E), 10, 2