

Günstige Schallreflexionen machen die Musik – der Tonmeister als Akustiker

Prof. Dr. Ernst-Joachim Völker
Institut für Akustik und Bauphysik
DE-Oberursel



Günstige Schallreflexionen machen die Musik – der Tonmeister als Akustiker

1. Einleitung

Der Direktschall vom Musikinstrument oder die Nachhallzeiten in einem Konzertsaal beschreiben die Akustik oder Hörsamkeit im Raum nur unvollständig. Es fehlen Schallreflexionen, ihre zeitliche Aufeinanderfolge, Größe des Raumes und Anordnung von Schallschluckmaterialien. Kuhl sieht 1965 die verschiedenen Anteile als Direktschall D, erste starke Schallreflexionen R und T als Nachhallzeit [1]. Er spricht von der Feinstruktur des Schalles. Optimale Schalllenkung nennt Völker 1967 „Gezielte Akustik“ und beschreibt die Ausrichtung auf den Platz des Dirigenten, auf den Tonmeister im Regieraum oder das Aufnahmemikrofon im Studio [2]. Von Braunmühl erkannte bereits 1928 die Einflüsse von Reflexionen und Schallabsorption, wie in Abbildungen 1 und 2 dargestellt [3].

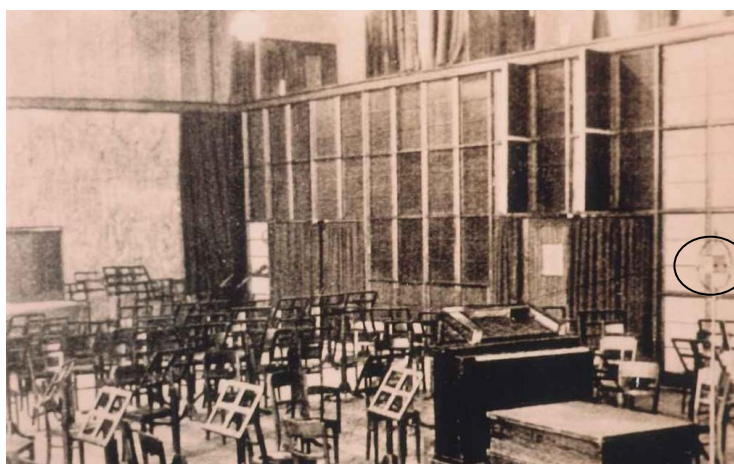


Abbildung 1 und 2: Sendesaal 2, Haus des Rundfunks 1931 an der Masurenallee in Berlin. Akustischer Berater: Dr. von Braunmühl. Im Kreis: Kohlemikrofon von Dr. Eugin Reiss.

Die Kassetterung der Wände erlaubt die gezielte Schalllenkung. Dazu werden die Drehelemente als Absorber oder Reflektor eingestellt. Zusätzlich lassen sich Vorhänge öffnen oder vorziehen. Sie sind zu erkennen an der Seite, und an der Rückwand, die aus Marmorplatten besteht. Die Bläser des Orchesters sitzen vor der Marmorwand, jedoch mit einem Vorhang zur Verminderung des reflektierten Schalles. An der linken Wand gibt es Vorhänge vor den Fenstern. Musiker, Dirigent und Zuhörer hatten ein gutes Verhältnis zur Kassetterung, zu Stoff an den Wänden, zu perforierten Verkleidungen und zu Steinflächen. Sie bevorzugten den besseren Klang mit immer besserer Tonqualität [4]. Man erinnerte sich an den Stummfilm mit Orchesterbegleitung in den UFA Palästen, in denen Plüsch und Kinoakustik vorherrschten. Abbildung 3 zeigt das erste Rundfunkstudio 1924 mit einer Übertragung aus dem VOX Haus (Ort des jetzigen Sony Centers) mit Pferdedecken an den Wänden und Teppichboden. Hinter den Decken war zusammengeknülltes Papier gestopft worden. Es gab Vorhänge an der Wand und Tücher, die von der Decke abgehängt waren. Auf dem Fußboden lagen Schafsfelle.

Bei dieser akustischen Umgebung gelangte überwiegend Direktschall an das Aufnahmefon. Schallreflexionen wurden verschluckt. Die Kontrolle der Aufnahme erfolgte mit Kopfhörern, die ebenfalls den Raum ausschlossen. Hierfür gab es die einfache Erklärung. Man wollte genau so die Kopfhörer benutzen, wie die Hörer zuhause. Abbildung 4 vermittelt das Interesse der ganzen Familie am Radiohören.



Abbildung 3: Studio für erste Rundfunkübertragung aus dem VOX Haus Berlin am 29. Oktober 1923 mit dem Kohlemikrofon von Eugin Reiss.



Abbildung 4: Radiohören 1925 als schönstes Weihnachtsgeschenk.

2. Gravesano

Die verschiedenen akustischen Massnahmen waren bekannt und wurden in den nachfolgenden Jahren angewendet. In Gravesano baute Scherchen 1954 ein Experimentalstudio. Er lud weltweit Experten ein, um über die Wirkung von einzelnen und mehreren Schallreflexionen, künstlichem Nachhall durch über 20 Lautsprecher an Wänden und Decke und Stereophonie zu sprechen [5] [6]. Es wurde die Frage diskutiert, ob Musik bei Aufnahme und Wiedergabe durch elektronische Eingriffe verändert werden darf.

Ist es zulässig, einzelne starke Reflexionen elektronisch hinzuzufügen? Konnte man also Schall „trocken“ ohne Reflexionen bei starker Bedämpfung des Raumes aufnehmen und dann mit Zumischung einer künstlichen Feinstruktur des Schalles verändern? Es wurde ein Qualitätseinbruch befürchtet. Obwohl die Diskussionen in den Gravesaner Blättern geführt wurden, hat es fast 20 Jahre gedauert, bis dieses Tabu ca. 1970 aufgehoben wurde. Toningenieur und Tonmeister hatten die Aufnahme verändert und hatten über den Hallraum Nachhall hinzugefügt. Ausserdem wurde diese Zumischung verzögert, was mit einem Tonbandgerät und durchlaufendem Band geschah (Bandgeschwindigkeit 76cm/s) [7]. Die Zumischungen klangen zum Teil besser als das Original. Völker untersuchte die verschiedenen Einstellungen und fand, dass D und R1 allein hallig wie ein leeres Zimmer klangen. Weitere R verstärkten den Eindruck. Wohltuend war der hinzugefügte Nachhall T. Abbildung 5 zeigt die zeitliche Folge von D, R und T. Die Einstellungen erfolgten mit dem PCM 70 der Fa. Lexicon, Messung mit TEF (Time Delay Spectrometry) [8]. Änderungen des Raumeindruckes können auf Knopfdruck vorgenommen werden. Optimierungen sind möglich. In Gravesano waren die technischen Mittel vergleichsweise bescheiden. Scherchen begab sich mit dem von ihm entwickelten Stereophoner auf einen Irrweg. Er hatte aus einem monophonen Ursprungssignal zwei pseudostereophone Ausgänge abgeleitet, wobei er Phasendrehungen verwendete. Ausserdem gab es Höhen-, Tiefen- und Mittenverzerrungen für beide Kanäle unterschiedlich. Er bevorzugte diese Technik und schlug vor, den gesamten grossen Bestand an monophonen, historisch wertvollen Aufnahmen zu verbessern. Die Anstösse waren gut. Den Anschluss an die rasante Entwicklung der Stereophonie ist ihm jedoch nicht gelungen.

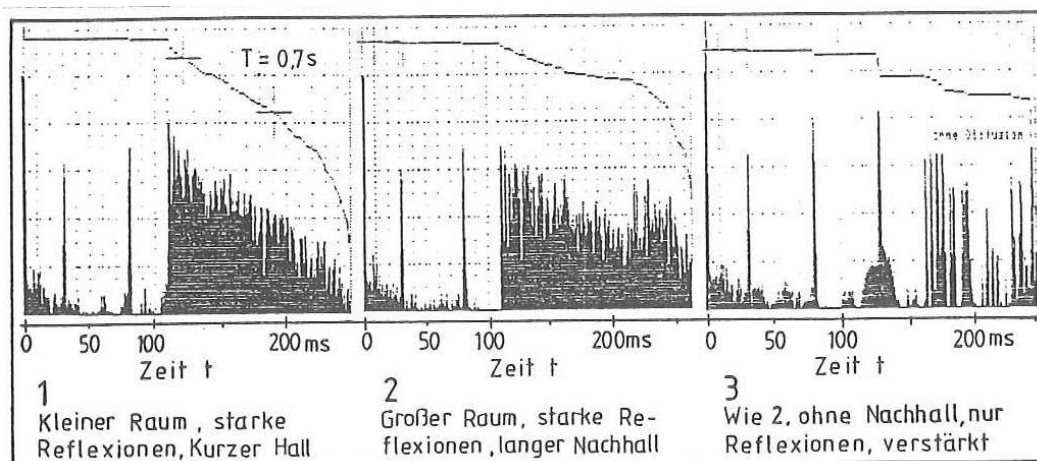


Abbildung 5: Künstliche Schallfelder, bestehend aus D Direktschall, R Reflexionen und T Nachhall.

3. Schallfelder

Schall von einer Schallquelle erzeugt ein Schallfeld, das durch D, R und T an jedem Zuhörerplatz beschrieben werden kann.

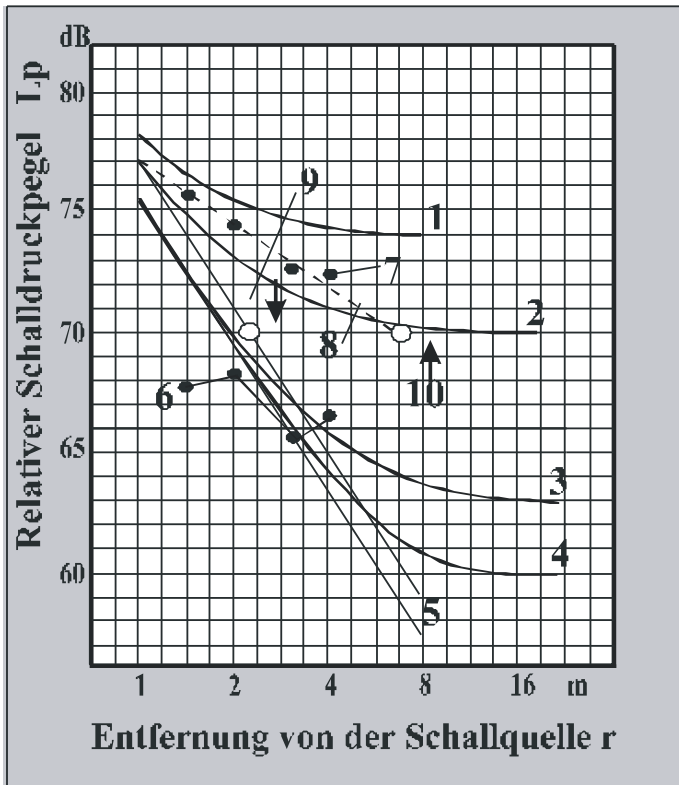
$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \text{ dB}$$

$$A = \frac{0,16V}{T} \text{ m}^2$$

$$L_p = L_{p1m} + 10 \lg \left(\frac{1}{r^2} + \frac{16\pi}{QA} \right) \text{ dB}$$

L_w	dB	Schalleistungspegel
L_p	dB	Schalldruckpegel = SPL
r	m	Entfernung von der Schallquelle
Q	-	Bündelungsgrad = Q-Faktor
A	m^2	Äquivalente Schallabsorptionsfläche
T	s	Nachhallzeit

Die Quelle erzeugt im Abstand r den Schalldruckpegel L_p , abhängig vom Schalleistungspegel L_w und vom Schallanteil aus dem Raum, der wiederum abhängig ist vom Volumen und vom Schallschluckvermögen A des Raumes. Dieses ist durch eine einfache Messung zu bestimmen. Abbildung 6 gibt den Abfall des Schallpegels der Quelle mit zunehmender Entfernung an. Im Wohnzimmer gibt es nur eine geringe Pegelabnahme. Der Nachteil besteht darin, dass störende Reflexionen kurzzeitig nach dem Direktschall eintreffen. Für die Kurve 2 gilt ähnliches. Es fällt jedoch auf, dass die Werte 7 höher liegen als 2. Diese Erhöhung ist auf zusätzliche Reflexionen zurückzuführen, die als erste starke Reflexionen am Hörerplatz eintreffen. Wenn die Schallpegel des Direktschalles und des diffusen Schallfeldes gleich gross sind, ist der Hallradius erreicht. In dieser Entfernung ist der Nachhall T aus dem Raum deutlich zu hören.



- 1 Wohnzimmer
- 2 Regieraum
- 3 Grosse Kirche
- 4 Stadthalle
- 5 Freies Schallfeld
Direktschall
- 6 Einzelne Schallreflexion
für Erhöhung von 2 auf 7
- 7 wie 2, Messung
- 8 Mittelwerte von 2
- 9 Hallradius von 2
- 10 Hallradius von 7+2

Abbildung 6: Pegelabnahme mit der Entfernung.

Wenn nur Direktschall gehört oder aufgenommen werden soll, sind zwei Entscheidungen möglich: Der Raum ist sehr stark bedämpft. Schallreflexionen fehlen. Es gilt der Zustand 5 in Abbildung 6. Es gibt keinen Nachhall, sondern nur die Pegelabnahme wie im Freien. Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Abstand zu verringern, sodass der Abstand etwa 2 bis 3m beträgt. Mikrofone befinden sich häufig in diesem Nahbereich [9]. Hier dominiert das direkte Schallfeld, allerdings mit der Möglichkeit der elektronischen Veränderung. In Abbildung 7 ist der Direktschall erkennbar, wenn alles überbedämpft ist. Ganz anders in Abb. 8 mit vielen Schallreflexionen, die von unterschiedlichen Oberflächen herrühren, insbesondere von Holz und Stoff.



Abbildung 7: Schalltot? Klavieraufnahme ohne Schallreflexionen.



Abbildung 8: Aufnahmestudio mit diversen Schallabsorptionen als Holz, Stoff, Stellwände, Vorhänge, Stoff unter Lichtverteilung, gewölbte Holzwand. Mikrofone für Nahaufnahmen.

Der Pianist kann mit dem Pedal längeres Nachklingen einstellen. Der Flügel lebt mit Luft- und Körperschall, mit besonderer Schallabstrahlung, mit einem geöffneten oder geschlossenen Flügel. Das Schlagzeug ist auf Teppich gestellt, um zusätzliche Körperschalleinleitungen und Körperschallabstrahlungen zu vermindern.

4. Günstige Reflexionen für den Tonmeister

Es muss gut klingen, wenn im Regieraum abgehört wird. Der Tonmeister hat die Verantwortung dafür, dass die Musik- und Sprachaufnahmen den Anforderungen und Wünschen genügen. Musik und Technik werden aufeinander abgestimmt. Das geschulte Ohr hört genau. Der Techniker kennt und beherrscht das Aufnahmeverfahren. Am Regietisch begegnen sie sich, der Künstler und der Techniker, häufig in einer Person als Tonmeister. Er hört das verstimmte Musikinstrument und die störenden Schallreflexionen. Der Teppich unterhalb der Instrumentalisten muss entfernt werden, siehe Abbildung 9. Der Vorhang hinter den Bläsern stört. Es fehlen die Reflexionen. Die Stellwand steht falsch. Die Musiker müssen sich sehen können. Es gibt Klangfärbungen im tiefen Frequenzbereich und eine Überbedämpfung an einigen Plätzen. Der Schlagzeuger hört sich doppelt. Der Schall kommt zurück von der Decke. Er ist deutlich hörbar und störend. Seine Verzögerung beträgt ca. 40ms. D und R wirken auch ein auf benachbarte Mikrofone. 1973 stellte sich im Sendesaal 1 des Hessischen Rundfunks die Frage nach einer Verbesserung der Versorgung mit frühen Schallreflexionen, wenn mehr als 100 Reflektoren rund um das Sinfonieorchester angeordnet werden, Abbildung 10. Die umfangreiche Befragung sowie die Messungen führten zu keinem konkreten Ergebnis. Die an den Wänden und der Decke vorhandenen 86000 daumendicken Holzstäbe hatten für sich allein keine Verbesserung gebracht, wie durch Anordnung von Schallschluckmaterial davor nachgewiesen werden konnte. Die 200 Kugelkalotten brachten bei ca. gleichem Abstand zum Hauptmikrofon eine Verzögerung von ca. 35ms. Die erste wichtige Zeitlücke wurde daher nicht zerstört, etwa mit zwischengeschobenen frühen Schallreflexionen. Tonmeister, Musiker und Dirigent waren zufrieden.



Abbildung 9: Big Band im Studio 2 des HR. Akustische Korrekturen mit Teppich, Vorhang und Stellwand [10].



Abbildung 10: Versuch im Sendesaal des HR. Verbesserung der Versorgung mit frühen Schallreflexionen auf dem Orchesterpodium mit Publikumsbefragung.

5. Impulsverhalten

Es war lange ein Geheimnis, das Einschwingen des Musikinstrumentes und dessen zeitlicher Verlauf. Molin hatte mit Holografie 1991 festgestellt, dass bereits nach 0,07 ms erste Klangfiguren auf dem Korpus der Geige gesehen werden konnten. Für ihn war dieses frühe Einschwingen der „Most important Part“ seiner Arbeiten. Nach 0,3 ms waren die Schwingungsfiguren über den Steg und über die Stimme auf Decke und Boden des Instruments verteilt [11]. Das bedeutet, dass das Musikinstrument sehr schnell anspricht, aber auch Impulsschall sehr schnell abstrahlen kann. Zur Erzeugung des Impulsschalls wurde der Steg des Streichinstrumentes mit Körperschall angeregt [12], Abbildung 11. Die Messung erfolgte nach der Methode TEF. (Time Delay Spectrometry). Das Messmikrofon wurde im direkten Schallfeld in 1 m Entfernung angeordnet. Die Überraschung: Nach etwa 10 ms war die Anregung und Abstrahlung beendet. In dieser kurzen Zeit wurden die Eigenschaften des Musikinstrumentes erfasst und übertragen. Die wichtige Erkenntnis lautet, dass während dieser Zeit bis ca. 15 ms keine Störungen zugelassen werden können. Daher ist nach dem Direktschall (als Direktschallpaket) eine zeitliche Lücke notwendig, bevor die Schallreflexionen von der Decke oder den Wänden nach Abbildung 12 eintreffen (20 – 40 ms). Werden jedoch Reflexionen durch Schallrückwürfe in dieser Zeitspanne erlaubt, dann entsteht bei den Mikrofonaufnahmen der oben beschriebene Raumeindruck, zum Beispiel eines kleinen Raumes. Die zeitliche Abfolge geht aus Abbildung 12 hervor. Der Dirigent hört an seiner Position dieses Direktschallpaket, bestehend aus D und den ersten frühen Reflexionen bis ca. 15 ms, bevor die Masse der späteren Reflexionen eintrifft, denen auch der Nachhall als Raumantwort folgt.



Abbildung 11: Anregung eines Musikinstrumentes, Kontrabass, am Steg und Messung der Impulsantwort mit TEF.

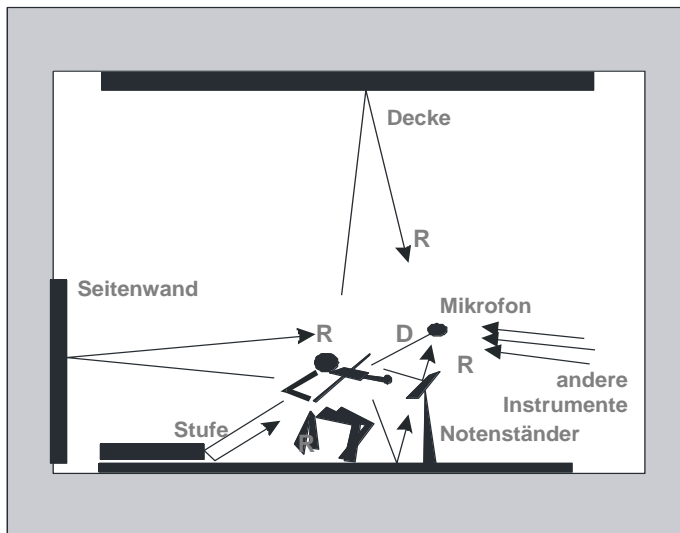


Abbildung 12: Direktschall D, erste Reflexionen R und Nachhall T aus dem Raum. Direktschallpaket nach [12/.

6. Der beste Platz

Oft wird behauptet, der beste Platz im Konzertsaal sei im vorderen Parkett, etwa 10. Reihe Mitte, weil dort ein ausgewogenes Klangbild entsteht. Richtig ist jedoch, dass der Dirigent die Instrumente „direkt“ hört einschliesslich der sehr kurzzeitig folgenden Reflexionen. als „Direktschallpaket“. Aus Abbildung 12 lassen sich folgende Zeiten ablesen:

- * D erreicht das Mikrophon oder den Dirigenten
- * Die Fußbodenreflexion trifft nach 8 bis 10ms ein
- * Die Reflexion vom Notenständer oder benachbarten Musikinstrumenten möge nach ca. 8 ms eintreffen
- * Reflexion von der Stufe ca. 12 ms

Auf dem Übertragungsweg bis zum Abhörlautsprecher im Regieraum sind keine Signale erlaubt, die diesen Empfang stören. Ein gutes Beispiel ist der Regietisch, auf dem eine starke Reflexion entsteht, wenn der Schall vom linken und rechten Lautsprecher eintrifft [13]. Seine Verzögerung beträgt ca.3ms. Ähnliches gilt für die Rückwand hinter de Tonmeister mit ca. 10ms. Weitere Störungen können herrühren von Prozessoren, Verzögerungsgeräten, Filtern und zwischengeschalteten Mischpulten, die oft unvermeidliche

Verzögerungen erzeugen. Die Frage entsteht, ob der Regieraummonitor selbst Reflexionen oder verzögerte Schallanteile enthält, die das Musikinstrument ungenau wiedergeben. Abbildung 13 zeigt, dass Regieraumlautsprecher sehr sorgfältig ausgewählt werden müssen. Wenn diese Lautsprecher die Impulsantwort der Musikinstrumente wiedergeben sollen, kann dieses nur mit dem Lautsprecher 1 erfolgen. Der Monitor 3 verwischt die feinen Strukturen. Es verwundert nicht, dass für sehr genaues Abhören die Impulsantwort 1 bevorzugt wird. Der Unterschied ist hörbar, wie in [12] gezeigt ist. Durch seine Nähe zu den Musikinstrumenten hört der Dirigent die Schallquelle genauer als der Tonmeister im Regieraum. Seine Erwartungen sind eventuell nicht erfüllt. Es gibt Dirigenten, die mit der Qualität des Regierumes unzufrieden sind. Diese Unzufriedenheit kann so weit gehen, dass die gesamte Aufnahme abgelehnt wird.

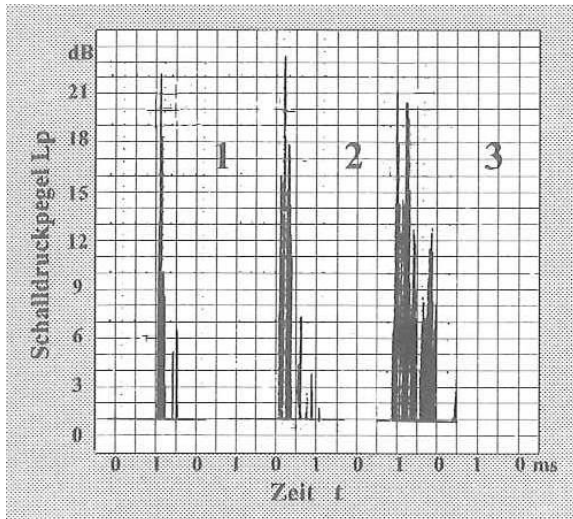
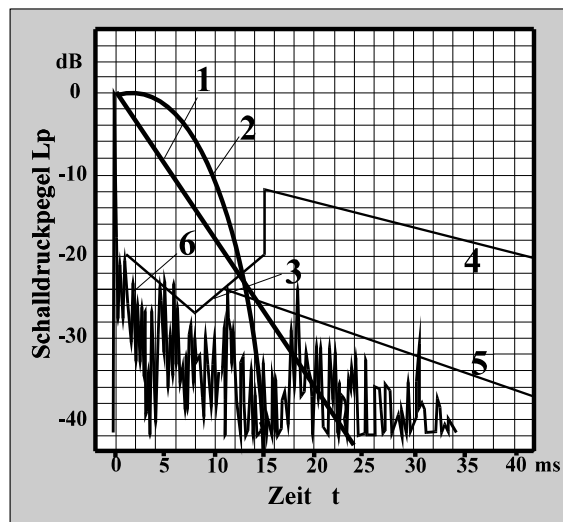


Abbildung 13: Impulsantwort von Monitorboxen für Regieräume, Messungen in /12/.

1: MSS, Fa. Manger 2: K+L O86, Fa. Klein und Hummel 3: B+W S.2 Fa. Bauer und Wilkensen

7. Das V-Kriterium

Es geht um die ersten 15 ms, aber auch um spätere Schallanteile. Die frühen sind mit ihrer schnellen Erkennung (Lokalassoziation) ebenso wichtig wie die späteren Anteile (Gestaltassoziation) der frequenten Auswertung, der Nachhallzeit, der Raumgröße, der Verzögerungen, des Seitenschalls, der Ortung in der Medianebene, der Klangfarben oder der Energieverhältnisse zwischen frühem und spätem Schall. Diese höhere, spätere Ebene nutzt die Erfahrung und das Wissen des Menschen aus. Die zeitliche Struktur ist im V-Kriterium dargestellt, siehe Abbildung 14. Wegen der nachgewiesenen Erkennung der frühen Reflexionen ist das V-Kriterium als Beurteilungsmaßstab heranzuziehen.



- 1 Wohnzimmer
- 2 Regieraum
- 3 Grosse Kirche
- 4 Stadthalle
- 5 Freies Schallfeld
- Direktschall
- 6 Einzelne Schallreflexion für Erhöhung von 2 auf 7
- 7 wie 2, Messung
- 8 Mittelwerte von 2
- 9 Hallradius von 2
- 10 Hallradius von 7+2

Abbildung 14: Schallpegel im Regieraum bei Wiedergabe durch den linken Lautsprecher.

Beispiel: Bei 11ms darf eine störende Schallreflexion den Pegel von -25 dB nicht überschreiten, wie das V-Kriterium zeigt. Dann sind die Kurven 1 und 2 geschützt. Sie beschreiben die Musikinstrumente oder andere Schallquellen in ihrer Schallabstrahlung. Bei Verzögerungen >ca.15ms beginnt der Nachhall, der grösser oder kleiner sein darf, je nach Geschmack, z.B. bedämpfte oder hallige Regieräume, unterschiedliche Studios oder elektronische Zumischungen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die Feinstruktur des Schalles bildet sich aus von der Schallquelle bis zum Ort des Hörers oder bis zum Aufnahmемikrofon im Studio. Der Tonmeister im Regieraum hört hinein, beurteilt und wird zum Akustiker, wenn raumakustische Korrekturen notwendig sind. Es gibt Stellschrauben, die jeweils vorsichtig betätigt werden können. Die betreffen das Zusammenwirken von Direktschall, Schallreflexionen und Nachhall. Der Klang von Sprache und Musik lässt sich beschreiben, wenn diese Anteile in richtiger Grösse und Relation zueinander stehen.

- * Anregung durch Impulsschall am Musikinstrument
- * Abstrahlung vom Kontrolllautsprecher mit impulsgetreuer, scharfer Abbildung (Manger Lautsprecher)
- * Ausbildung des Direktschallpakets, bestehend aus Direktschall und frühen, zum Musikinstrument gehörenden Schallreflexionen bis ca. 10ms
- * Diese reflexionsfreie Zone darf nicht durch Schallanteile in diesem Bereich gestört werden. V-Kriterium als Grenzwerte. Die Forderung gilt einschliesslich Regieraum
- * Spätere Reflexionen im Sinne der Gestaltassoziation einschliesslich der Beurteilungsmöglichkeiten, die aus der Erfahrung entstehen, z.B. Klang, Raumgrösse, Verzerrungen, Räumlichkeit, Seitenschall und Sprachverständlichkeit.
- * Unterschiedliche Länge der Nachhallzeit, z.B. halbhaller oder trockener Regieraum, Konzertsaal für romantische oder klassische Musik, Schallabsorption für Klassenräume oder Musik-Übungsräume nach DIN 18041 Hörbarkeit
- * Pegelabnahme mit zunehmender Entfernung als wichtiger Parameter für Behaglichkeitsfeld in Grossraumbüros



Abbildung 15: Prof. Dr. Völker erläutert dem Philharmonischen Orchester die akustischen Massnahmen beim Neubau der Pfälzischen Philharmonie in Ludwigshafen.

Der Tonmeister hat bei jeder Art der Tonaufnahme das Konglomerat der unterschiedlichen Reflexionen zu berücksichtigen. Sein Hinweis auf Fehler zieht Konsequenzen nach sich. Er wird zum Akustiker, weil er auch die Sprache der Künstler oder Betroffenen spricht. Antworten können gefunden werden.

Musik hat einen hohen Stellenwert, was an den vielen Klassikprogrammen im Rundfunk abgelesen werden kann. Abbildung 15 vermittelt einen Eindruck von der verantwortlichen Tätigkeit des Tonmeisters und Akustikers, wenn er sich den Fragen beider Seiten stellt.

Finden sich Musiker und Dirigent wieder? Ist der Tonmeister mit den Aufnahmen zufrieden oder gibt es Änderungen? Im Konzertsaal der Pfälzischen Philharmonie waren von vornherein grosse Vorhänge eingebaut worden, um eine Flexibilität der Akustik zu ermöglichen. Diese raumakustischen Verhältnisse gab es auch im Sendesaal 2 des Hauses des Rundfunks 1931 in Berlin (s.o.).

Die Bemühungen um eine gute Akustik, die vom Tonmeister für die Schallaufnahme erwartet wird, sollte fortgesetzt werden, um die hohe Qualität der Musik- und Sprachaufnahme zu erhalten. Auf den Tonmeister als wichtiges Bindeglied zwischen Kunst und Technik kann nicht verzichtet werden.

9. Literatur

- [1] Kuhl, W.: Das Zusammenwirken von direktem Schall, ersten Reflexionen und Nachhall bei der Hörsamkeit von Räumen und bei Schallaufnahmen, Rundfunktechnische Mitteilungen (1965) Heft 3
- [2] Völker, E.J. Gezielte raumakustische Ausgestaltung der Nachrichtensprecherräume des Hessischen Rundfunks und der Studios der Werbung im Rundfunk GmbH in Frankfurt, Die Schalltechnik 26 Nr. 67/68 (1966)/
- [3] V.Braunmühl, H.J., Weber, W.: Einführung in die angewandte Akustik, Hirzel Verlag Leipzig (1936)
- [4] Voelker, E. J.: On the acoustics of old Berlin Studios for Film and Radio, 116. AES-Convention Berlin, (2004), Preprint 6104
- [5] Voelker, E. J.: Acoustical and electro-acoustical sound fields – the beginnings in Gravesano 1954, NAG/DAGA 2009, Rotterdam (2009) CD-ROM
- [6] Cremer, L. and Kuhl, W.: Künstlicher Nachhall und erster Rückwurf, Zusammenfassung der Ergebnisse des Colloquiums vom 18.-23.5.1956, Gravesaner Blätter Nr. 5(1956) 17-2-0/7/
- [7] Voelker, E. J.: The alteration of the reverberation times in a small theatre and a concert hall using loudspeaker equipment, 40. AES Convention Los Angeles (1971) Preprint 785 (F-3)
- [8] Heyser, W.C.: Acoustical measurements by Time Delay Spectrometry, JAES Vol 15(1967) 370
- [9] Völker, E. J.: Mikrofone im direkten und diffusen Schallfeld, Studio 8 Nr.8 (1985)26-28
- [10] Voelker, E. J., Moehrke, F.: Akustik und Aufnahmetechnik in Tanzmusik Studios deutscher Funkhäuser, Rundfunktechnische Mitteilungen 19 Nr. 5 (1975) S 211-225
- [10] Molin, N.E. Walin, A.O.: Transient wave response of the violin body, JASA 980 (1991) 2192
- [12] Völker, E.J. Zur Bedeutung der ersten 15ms bei der Beurteilung von Schallaufnahmen im Regieraum, Dissertation an der TU Berlin (1996)
- [13] Wolherr, H.: Lautsprecher und ihre Beurteilung, DAGA 1985, Fortschritte der Akustik (1985) Tagungsband