

11.A Anhang: Messtechnik

Im Folgenden werden einige der für Lautsprechermessungen benötigten Geräte und Verfahren in Kurzform vorgestellt. Ausführlichere Informationen sind z.B. in den Publikationen der Messgeräte-Hersteller zu finden, insbesondere bei Brüel&Kjaer (Technical Reviews).

11.A.1 Messmikrofone

Der Übertragungskoeffizient T_{Up} von Messmikrofonen soll (im Gegensatz zu Studiomikrofonen) frequenzunabhängig sein [3]. Beispielsweise variiert G_{Up} , das Übertragungsmaß, bei einem typischen Freifeldmikrofon ($\frac{1}{2}$ " B&K 4190) im Bereich 10 Hz – 15 kHz um weniger als ± 0.7 dB. Dieser Toleranzbereich gilt allerdings nur bei axialer Beschallung; sobald die Schalleinfallrichtung von der Mikrofonachse abweicht, machen sich durchmesserabhängige Bündelungseffekte bemerkbar, die mit steigender Frequenz zunehmen. Im Reflexionsarmen Raum (RAR) stören derartige **Bündelungen** nicht, weil das Mikrofon direkt auf die Quelle gerichtet wird, im Hallraum (HR), mit seinem diffusen Schallfeld, bewirken sie aber eine zu hohen Frequenzen hin zunehmende Dämpfung, die bei 15 kHz durchaus 5 dB betragen kann. Deshalb verwendet man im HR bevorzugt $\frac{1}{4}$ "-Mikrofone, und akzeptiert, dass diese im Vergleich zu $\frac{1}{2}$ "-Mikrofonen stärker rauschen. Bei dem verwendeten B&K 4135* beträgt der Bündelungs-Fehler bei 5 kHz 0.5 dB, und bei 10 kHz 1dB – das erschien akzeptabel.

Die nichtlinearen **Verzerrungen** (Klirrfaktoren) der verwendeten Mikrofone sind bei den erzeugten Schallpegeln weit unterhalb jeglicher Relevanz, das **Eigenrauschen** ist beim 4190 unbedeutend (15 dB_A), beim 4135 grenzwertig (45 dB_A). Nicht unbedeutend sind die Auswirkungen der **Mikrofonbefestigung**: An Halteklammern und Stativstäben werden Wellen reflektiert, die zu kammfilterartigen Interferenzen[†] führen. Durch geeigneten Aufbau konnten derartige Fehler aber unter ± 0.2 dB gehalten werden.

11.A.2 Nachhallzeit

Als Nachhallzeit wird die Zeit spezifiziert, die vergeht, bis nach dem Abschalten der Schallquelle der Diffusschallpegel im Hallraum um 60 dB abnimmt. Damit auch tatsächlich überwiegend Diffusschall gemessen wird, darf das Mikrofon nicht zu nahe bei der Schallquelle stehen, und damit möglichst viele Raummoden erfasst werden, sollte sich das Mikrofon auf einem (schrägen) Kreis bewegen. Alle Hallraum-Messungen erfolgten mit zu 50% überlappender Terzanalyse (IEC 1260 class 0), das Mikrofon durchlief in 80 s einem Kreis ($\varnothing = 3$ m). Der auf einen **Drehtisch** (B&K 3299) montierte Mikrofontalgen übertrug zunächst inakzeptabel viel **Körperschall** (äquivalenter Luftschallpegel: 84 dB), durch geeignete Entkopplung konnte dieser Wert aber auf gerade noch akzeptable 45 dB reduziert werden.

Zur Bestimmung der Nachhallzeit wird der Hallraum üblicherweise durch Breitbandrauschen angeregt. Nach dem Abschalten des Rauschens ermittelt man die Steigung (dB/s) des Pegelabfalls, und hieraus ergibt sich die Nachhallzeit T_N . Typische Werte sind 2 – 5 s, im tieffrequenten Bereich auch bis zu 10 s. Da Rauschprozesse stochastischer Natur sind, muss über mehrere Abklingvorgänge gemittelt werden.

* Brüel&Kjaer bietet auch ein spezielles Druckmikrofon an (4136), das noch besser geeignet ist.

† M. Zollner: Einfluss von Stativen und Halterungen..., Acoustica, Vol. 51 (1982), 268-272.

Aber schon vor dieser Mittelung (über mehrere Pegelverläufe) ist eine **RMS-Mittelung** erforderlich, um vom Schalldruck zum Schallpegel zu gelangen. **Abb. 11.A1** erläutert diesen Vorgang zunächst anhand eines abklingenden Sinustones.

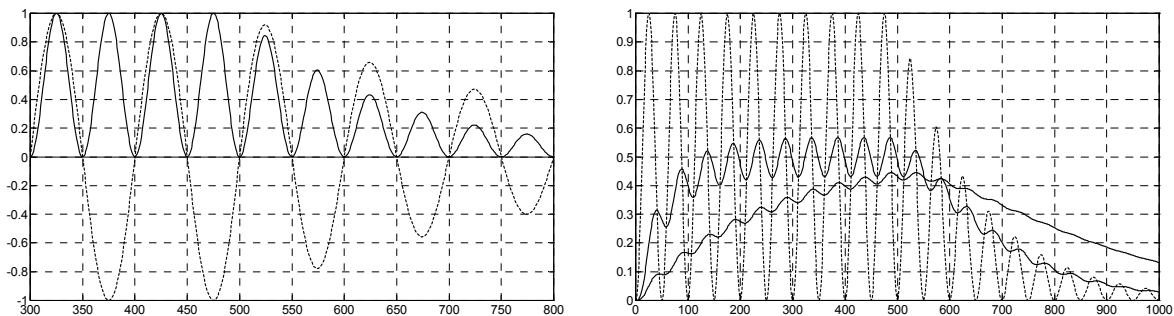


Abb. 11.A1: RMS-Mittelung. Linkes Bild: Exponentiell abklingender Sinuston (----), dessen Quadrat (—). Rechts: Exponentiell gemittelter Abklingvorgang, zwei verschiedene Zeitkonstanten. Noch keine Wurzel.

Um zum RMS-Wert (Root-Mean-Square = Effektivwert) zu gelangen, muss im ersten Schritt das Signal quadriert werden (Square), darauf erfolgt die Mittelung (Mean), und zuletzt wird die Wurzel aus dem Mittelwert gezogen (Root). Das Quadrieren ist ein eindeutiger Vorgang, das Mitteln nicht. Die Messtechnik verwendet vor allem zwei Mittelungsverfahren: Die sog. **exponentielle Mittelung**, und die sog. **lineare Mittelung**, die besser arithmetische Mittelung genannt werden sollte. Mittler im o.g. Sinne sind lineare Tiefpassfilter, die durch ihre Impulsantwort eindeutig beschrieben werden. Zur exponentiellen Mittelung verwendet man einen einfachen RC-Tiefpass (erster Ordnung), dessen Impulsantwort die abklingende e -Funktion ist. Die lineare Mittelung erfolgt im Spalttiefpass, seine Impulsantwort ist der unipolare Rechteckimpuls. Beide Mittelungsarten können durch je einen Parameter beschrieben werden: Bei der exponentiellen Mittelung durch die Zeitkonstante τ , bei der linearen Mittelung durch die Rechteckdauer (Blocklänge) T . Auch bei $\tau = T$ erhält man ungleiche Ergebnisse.

In Abb. 11.A1 ist die generelle Problematik jeder Mittelung ersichtlich: Bei kurzer Zeitkonstante ist die Glättung unzureichend, bei langer Zeitkonstante wird der Abklingvorgang verfälscht. **Abb. 11.A2** zeigt hierzu die Pegelverläufe, man erkennt, dass bei der exponentiellen Mittelung die Flankensteigung von der Zeitkonstante abhängt. Bei der linearen Mittelung wird die abfallende Flanke lediglich verzögert, ihre Steigung bleibt aber erhalten. Für die Bestimmung der Nachhallzeit bedeutet dies, dass die lineare Mittelung Vorteile bietet. Ganz unproblematisch ist aber auch diese nicht: Gerade im wichtigen Anfangsbereich (**early Decay**) ist die Steigung zu flach, was eine zu lange Nachhallzeit vortäuschen könnte. Und dieser Anfangsbereich ist wichtig, reale Nachhallkurven fallen nicht immer so ideal ab wie in diesem Beispiel, sondern zeigen einen degressiven Abfall (flacher werdende Kurve).

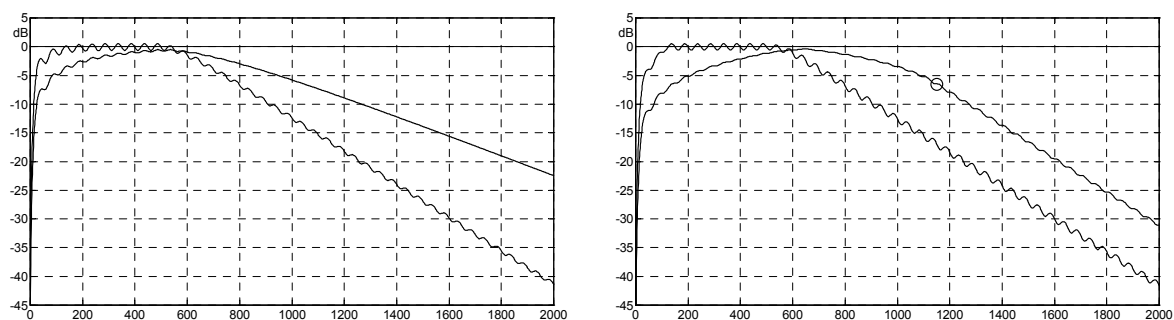


Abb. 11.A2: Pegelabfall bei exponentieller Mittelung (links, zwei verschiedene Zeitkonstanten) bzw. bei linearer Mittelung (rechts, zwei verschiedene Blocklängen).

Mitteln bedeutet aus systemtheoretischer Sicht Filtern: Das zu mittelnde Signal wird mit der Impulsantwort des Mittlers gefaltet. Anders ausgedrückt: Jede Mittelung ist die gewichtete (Faltungs-) Integration über einen *Bereich*. Bei der linearen Mittelung (= Blockmittelung oder arithmetische Mittelung) erfolgt diese Integration über die Blocklänge T , die zeitlich vor dem Mittelungszeitpunkt liegt. Für $T = 0.4$ s spezifiziert der zum Zeitpunkt $t = 2$ s angegebene lineare Mittelwert das Integral über 1.6 ... 2 s. Der lineare Mittelwert, der zum Zeitpunkt des Abschaltens der Schallquelle ($t = 0$) gemessen wird, stellt also noch keine Mittelung über den Abklingvorgang dar. Um bei $T = 0.4$ s zu bleiben: Der bei $t = 0.2$ s gemessene lineare Mittelwert wird zu 50% über den stationären Vorgang ermittelt, und zu 50% über den Abklingvorgang. Erst der bei $t = T$ gemessene lineare Mittelwert erfasst zu 100% den Abklingvorgang*. Und genau ab diesem Punkt wird bei der linearen Mittelung die Steigung des Pegelabfalls richtig wiedergegeben (Abb. 11.A2, rechtes Bild). Jede (zeitliche) Mittelung muss, wie oben erläutert, über einen *Bereich* erfolgen. Wird die Dauer dieses Bereichs zu kurz gewählt, kann die Mittelung ihren Zweck nicht mehr erfüllen – die Faltung mit einem Dirac-Impuls ergibt das unveränderte Signal. Da die Mittelung über einen Bereich erfolgen muss, dessen Dauer größer als null ist, kommen alle Mittelwerte verzögert nach dem zu mittelnden Signal.

Wäre nun der Abklingvorgang eine exponentiell abklingende Sinusschwingung wie im ersten Bild, könnte man bei Kenntnis der Mittlerlaufzeit die Abfallsteigung mit linearer Mittelung präzise bestimmen. Aber schon bei einer aus zwei verschiedenen e -Funktionen zusammengesetzten Hüllkurve (Abb. 11.A3) wird die Steigungsbestimmung schwierig: Wenn sich die Steigung innerhalb der Blocklänge T signifikant ändert, kann dies auch durch eine lineare Mittelung nicht mehr sicher erkannt werden.

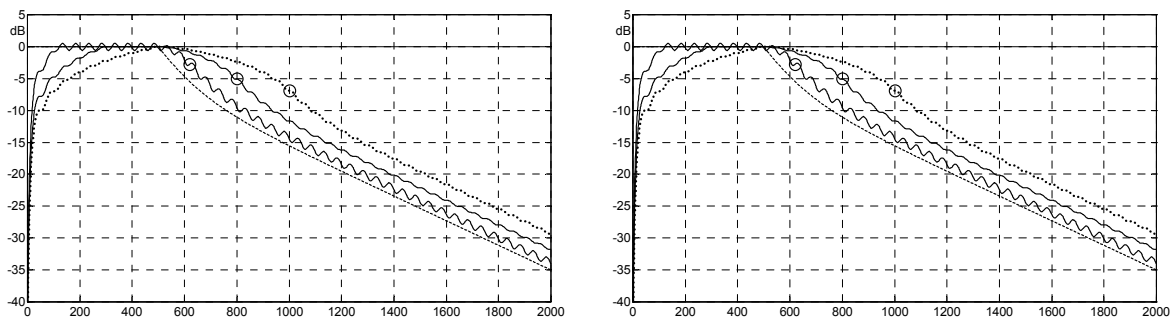


Abb. 11.A3: Pegelabfall bei exponentieller Mittelung (links, drei verschiedene Zeitkonstanten) bzw. bei linearer Mittelung (rechts, drei verschiedene Blocklängen). Degressive Abfallkurve.

Die Mittelungszeit T bzw. die Zeitkonstante τ muss also einerseits kurz genug sein, um den Zeitverlauf der Raum-Impulsantwort (bzw. –Sprungantwort) nicht zu sehr zu verfälschen, andererseits aber auch lang genug sein, um die stochastischen Schwankungen des Rauschens ausmitteln zu können. Denn im Gegensatz zu den bisher gezeigten Bildern werden Nachhallkurven nicht mit Sinustönen, sondern mit (Oktav- oder Terz-) Rauschen ermittelt. Wenn nun eine lineare Mittelung über z.B. 50 ms noch nicht reicht, um das Rauschen ausreichend zu mitteln, und eine längere Mittelungszeit das Ausmessen der Anfangssteigung einer gekrümmten Abfallkurve verhindert, bleibt noch eine weitere Dimension: Die **Scharmittelung** über verschiedene Realisierungen des Rauschprozesses. Hierzu wird einfach über mehrere Abklingkurven gemittelt – wobei aber nicht mit identischem Rauschen angeregt werden darf, sondern mit unterschiedlichen Ausschnitten eines Rauschsignals (z.B. Terzrauschen).

* Streng genommen muss auch noch die Schalllaufzeit berücksichtigt werden.

In **Abb. 11.A4** sind im linken Bild vier Abklingkurven dargestellt, die aus dem quadrierten Schalldrucksignal durch lineare Mittelung über 50 ms Blocklänge bestimmt wurden. Mikrofon und Lautsprecher waren bei dieser Messung ortsfest, sodass diese Signalfluktuationen überwiegend der Rauschstochastik zuzuordnen sind. Im rechten Bild ist eine Vielzahl derartiger Kurven übereinander gezeichnet, sowie die daraus gewonnene Mittelungskurve. Zur Orientierung ist gestrichelt das Abklingen für 1,6 s Nachhallzeit eingezeichnet. Man erkennt, dass dies ungefähr der Anfangssteigung entspricht; der weitere Verlauf ist flacher. Die jetzt noch verbleibenden Fluktuationen der Abklingkurve sind nicht primär der Rauschstochastik, sondern dem Raum zuzuordnen. Die Überlagerung vieler (verschiedenfrequenter und unterschiedlich bedämpfter) Abklingvorgänge ergibt nicht eine einzige Abklingzeitkonstante; vielmehr entsteht eine beliebig komplexe Kurve, der i.A. nur abschnittsweise eine Gerade als Steigung angenähert werden kann. Für Leistungsmessungen im Hallraum ist hierbei nicht der Pegelbereich zwischen -5 und -35 dB zu erfassen, sondern die anfängliche Steigung*.

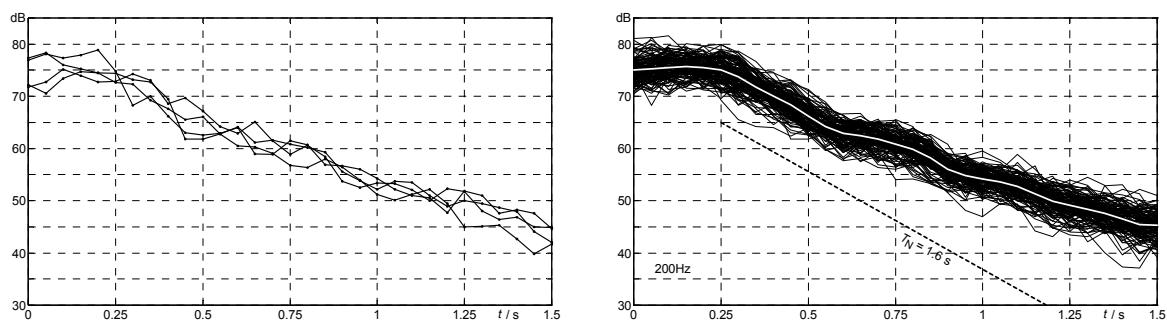


Abb. 11.A4: Abklingkurven, aus terzbreitem Rauschen ($f_m = 200$ Hz) durch lineare Mittelung (50 ms) gebildet. Im rechten Bild ist weiß die Scharmittelkurve eingezeichnet (Ensemble-Mittelwert).

Abschließend soll noch kurz zur **Hilbert-Transformation** Stellung genommen werden, da ihr gelegentlich die Eigenschaft zugeschrieben wird, ideale Mittelungen vornehmen zu können. Bei einem abklingenden Sinuston gelingt es tatsächlich, aus dem Schalldruck mittels Hilbert-Transformation das analytische Signal, und daraus eine glatte Abklingkurve zu erhalten. Bei dem zur Nachhallmessung üblichen Schmalbandrauschen ist die Hilbert-Transformation aber keine Option – zumindest nicht, solange sie alleine angewandt wird (**Abb. 11.A5**).

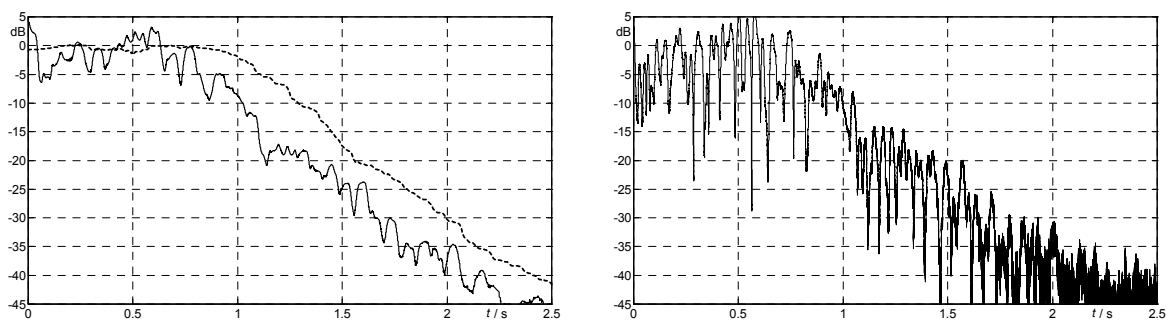


Abb. 11.A5: Links: Terzbreit gefilterte Abklingkurve ($f_m = 200$ Hz), linear mit $T = 50$ ms bzw. 500 ms gemittelt. Rechts: Pegel des zum linken Bild gehörenden analytischen Signals (auch "Magnitude" genannt).

* H. Larsen, Technical Review Nr. 4, Brüel&Kjaer, 1978.