

# Bewertung der Unsicherheit von Terzband-Analysen bei akustischen Messungen

Philipp Piprek<sup>1</sup>, Christian-Wilhelm Budde<sup>2</sup>

<sup>1</sup> GTA Hannover, E-Mail: P.Piprek@GTA-Akustik.de

<sup>2</sup> Hannover, E-Mail: Christian@aixcoustic.com

## Motivation

Zur Bestimmung des Vertrauensbereiches bei Schalldruckmessungen und daraus abgeleiteten Messungen (z.B. Schallleistung im Hallraum) ist es hilfreich, zunächst den Vertrauensbereich bzw. die Messunsicherheit der verwendeten Einzelkomponenten zu bestimmen. Insbesondere wird diese Herangehensweise im Leitfaden zur Angabe von Messunsicherheiten (ENV-13005, kurz: "GUM Leitfaden") empfohlen. Aus den Einzelkomponenten lässt sich dann abhängig von den Rahmenbedingungen der Messung eine kombinierte Unsicherheit angeben.

Für den Fall dass die Einzelkomponente unkorreliert sind, lässt sich die Unsicherheit nach GUM zu

$$U_{\text{Gesamt}} = \sqrt{U_{\text{Em}}^2 + U_{\text{Mik}}^2 + U_{\text{Kal}}^2 + U_{\text{Pos}}^2 + U_{\text{Filt}}^2 + \dots} \quad (1)$$

berechnen.

Dabei ist zu beachten, dass der hier verwendete Einzahlwert der Unsicherheit nicht automatisch identisch mit den Toleranzen sein muss. Schließlich stellen die Toleranzen nur eine Obergrenze bzw. die Rahmenbedingungen, welche mindestens erfüllt sein müssen, dar. In der Regel ist eine ausschließlich aus Toleranzen bestimmte Unsicherheit unnötig groß und führt dazu, dass die kombinierte Unsicherheit ebenfalls unnötig groß wird. Durch einfache Überlegungen und ingenieurmäßiges Abschätzen sollte es dennoch möglich sein, die Unsicherheit realistisch anzugeben.

## Terzband-Analysen

In der DIN EN 61260 „Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven“ sind die Filter für eine Terzband-Analyse in drei Klassen (0, 1 und 2) aufgeteilt. Dabei sind jedoch die Toleranzen selbst für die Klasse 0 (mit der höchsten Genauigkeit) noch relativ moderat gewählt und lassen viel Spielraum für mögliche Implementierungen. Die interne Realisierung der Filter (Charakteristik, Filtertopologie, ggf. Unterabtastung) ist dabei dem Hersteller überlassen und kann von Gerät zu Gerät stark variieren. Die Norm ist somit eher als Mindestanforderung zu verstehen.

Für die Berechnung der Unsicherheit wurden in anderen Publikationen zu diesem Thema [1, 2] insbesondere Toleranzen der relativen Dämpfung, der integrierten Filterantwort und des linearen Arbeitsbereiches herangezogen. Dabei zeigt sich jedoch, dass selten alle diese Toleranzen gleichzeitig voll ausgeschöpft werden, zumal es insbesondere zwischen der relativen Dämpfung und der integrierten Filterantwort einen Zusammenhang gibt.

Neben der Terzband-Analyse mittels diskreter Terzband-Filter findet man oft auch eine Implementierung mittels FFT. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Methode nicht

direkt in der DIN EN 61260 behandelt wird. Lediglich ein Umweg, bei dem die FFT zur Faltung diskreter Filter-Impulsantworten verwendet wird, ist vorstellbar.

Nichtsdestotrotz wird in der Praxis die Terzband-Analyse mittels FFT (mit Überlappung) häufig eingesetzt und soll daher auch in den folgenden Betrachtungen erwähnt werden.

## Bestimmung der Unsicherheiten

Da vom Hersteller selten Angaben zur Unsicherheit der Geräte angegeben werden, basiert die Bestimmung der Unsicherheiten ( $2\sigma$ ) auf Betrachtungen der Schwankungen. Diese ingenieurmäßige Herangehensweise wird dabei nach dem GUM Leitfaden bewusst zugelassen.

Für die Betrachtungen werden verschiedene Messsysteme bzw. Analyseprogramme, sowie verschiedene Einstellungen und Anregungssignale (z.B. Rauschen, Sinus) verglichen.

Sofern dies möglich ist wird das Anregungssignal dabei rein digital (z.B. in Form einer WAV-Datei) der Terzband-Analyse übergeben. Das hat den Vorteil, dass die Analyse wiederholbar ist und das so auch unterschiedliche Systeme verglichen werden können.

## Vergleich von Terzband-Analysen

Zur Evaluierung der verwendeten Terzband-Filter lassen sich diese mit einem reinen Sinussignal variabler Frequenz abscannen, indem der jeweilig angezeigte Pegel zur Frequenz aufgetragen wird. Mit hinreichend langsamer Veränderung der Frequenz ist es damit möglich, den Betragsfrequenzgang der verwendeten Terzband-Filter genau zu bestimmen.

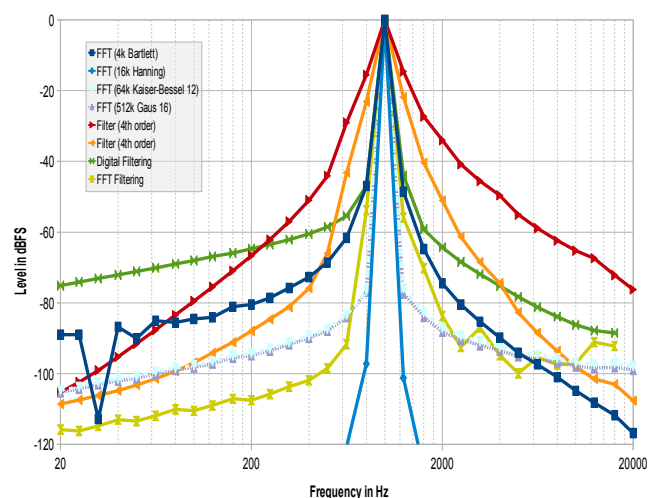
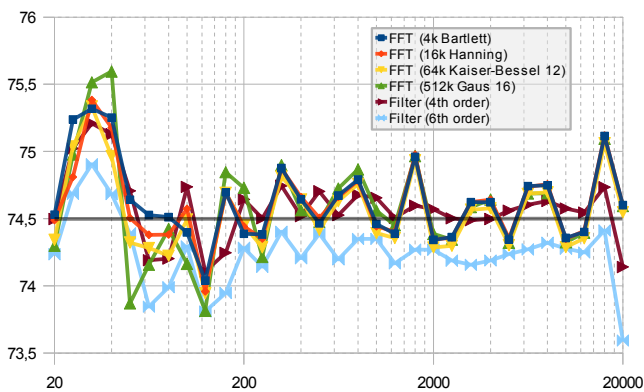


Abbildung 1: Terzband-Analyse eines 1 kHz Sinussignals für unterschiedliche Einstellungen der Analysesoftware

Ein einfacheres und schnelleres Verfahren verwendet lediglich einen Sinuston auf der Mittenfrequenz einer Terz. Dabei werden nun jedoch auch die benachbarten Bänder betrachtet. Basierend auf diesen diskreten Abtastwerten lässt sich so der Betragsfrequenzgang abschätzen. Wichtig bei dieser Methode ist jedoch, dass sich der quantisierte Betragsfrequenzgang um die Anregungsfrequenz gespiegelt darstellt, da höhere Terzbänder durch die Sperrbereichsdurchlässigkeit des Hochpassfilters entstehen und umgekehrt für tiefere Terzbänder durch die Sperrbereichsdurchlässigkeit des Tiefpassfilters.

In Abbildung 1 lässt sich für die Kurven der Filter erkennen, dass scheinbar eine Asymmetrie vorliegt, bei der der Tiefpassfilteranteil (links von der Anregungsfrequenz) scheinbar steiler abfällt als das Hochpassfilter (rechts). Dies ist damit zu begründen, dass Terzband-Analyse-Filterbanken oft kaskadiert arbeiten und das bereits für höhere Terzbänder Tiefpass-gefilterte Signal als Ausgangsbasis für tiefere Terzbänder nehmen (denen dann jeweils nur noch die Hochpassfilterung fehlt). Wie man bei der grünen Kurve für ein anderes Messsystem sieht, kann die Kaskadierung aber auch von tiefen Frequenzbändern zu hohen Frequenzbändern stattfinden, oder auch komplett entfallen.

Weiterhin lässt sich untersuchen, wie die Analyseprogramme mit Rauschen umgehen. Dazu wurde ein mittels FFT erzeugtes „perfektes“ weißes Rauschen verwendet. Innerhalb der FFT-Länge (ca. 6 Sekunden) ist dabei der Betragsfrequenzgang linear und die Phase zufällig. Aufgrund der Tatsache, dass die FFT aber nur für periodische Signale gültig ist, handelt es sich daher streng genommen um ein periodisches Signal, dessen Periodizität aber für diese Untersuchung keine Rolle spielt.



**Abbildung 2:** Terzband-Analyse von FFT-erzeugtem Rauschen für verschiedene Einstellungen der Analysesoftware.

Wie man der Abbildung 2 entnehmen kann liefern die FFT-basierten Verfahren mit unterschiedliche Einstellungen für hinreichend hohe Frequenzen nahezu identische Ergebnisse, wohingegen sich die Ergebnisse für unterschiedliche Filtereinstellungen um einen nahezu konstanten Offset unterscheiden. Dies resultiert daraus, dass sich bei der Implementierung mit Filtern niederer Ordnung ein stärkeres Übersprechen zwischen den Terzbändern einstellt und sich somit die Anteile der benachbarten Bänder zu höheren Lautstärken addieren.

Die unterschiedlichen Einstellungen bei den FFT-basierten Methoden zeigen sich insbesondere im tieffrequenten Bereich. Dabei erscheinen kürzere FFT-Längen spektral flacher.

Weiterhin zeigt sich, dass die Terzband-Analyse mittels Filter gegenüber FFT-basierten Methoden spektral glatter erscheint. Der konstante Betragsfrequenzgang des Anregungssignals wird aber mit keiner der verwendeten Methoden gemessen.

## Aussagen bezüglich der Unsicherheit

Wie sich gezeigt hat, sind die Unsicherheiten nicht nur abhängig von dem verwendeten Messsystem bzw. der Analysesoftware, sondern darüber hinaus auch noch von den Einstellungen sowie von dem Anregungssignal. Letzteres lässt sich sehr gut sehen, wenn man die Schwankungen im 1,25 kHz Band in den beiden Abbildungen vergleicht.

Da man in der Praxis aber selten rein tonale Signale im Zusammenhang mit Terzband-Analysen verwendet, darf dieser Fehler nicht überbewertet werden. Insbesondere bei relativen Messungen mit nahezu identischem Anregungssignal heben sich diese Fehler schnell weg.

Anders sieht es aber mitunter bei relativen Messungen aus, bei denen sich das Anregungssignal verändert. Als Beispiel hierfür kann die Schallleistungsbestimmung im Hallraum angeführt werden, bei der zunächst die rausch-ähnliche Referenzschallquelle gemessen wird und anschließend eine Schallquelle, die möglicherweise tonale Anteile enthält.

Allgemeingültige Aussagen über die Unsicherheit von Terzband-Analysen sind aufgrund dieser Abhängigkeiten nur schwer möglich, bzw. je nach Kontext können die Unsicherheiten fast beliebig groß werden.

Darüber hinaus muss man beachten, dass die Fehler bei der Terzband-Analyse grundsätzlich systematischer Natur sind. Aufgrund des unbekanntes und möglicherweise sehr komplexen Aufbaus des Terzanalysators ist es aber fast unmöglich, diese zu kompensieren. Da der GUM Leitfaden aber nur von stochastischen Fehlern ausgeht, bzw. jeden Fehler (selbst systematische) als stochastischen Fehler behandelt, muss man beim Einsetzen in Formel 1 mit zusätzlichen versteckten Unsicherheiten rechnen. Erst wenn viele Anregungssignale, Einstellungen und Mittlungen verwendet werden, kann man von einer stochastischen Verteilung des Fehlers ausgehen.

Die unzureichende Behandlung der systematischen Fehler ist der größte Kritikpunkt an dem GUM Leitfaden und einer der Gründe, warum die Vornorm bis heute noch nicht zur Norm erhoben wurde.

## Literatur

- [1] Wittstock, V, Bethke, C.: Zur Unsicherheit von Terz-Schalldruckpegeln. DAGA (2006)
- [2] Payne, R.: Uncertainties associated with the use of a sound level meter (2004)