

Terzanalyse mit Normterzreihe: Eine hinreichende Meßmethode?

Manfred Zollner

Institut für Elektroakustik, Technische Universität München

Bei der spektralen Analyse der Übertragungseigenschaften eines elektrischen oder elektroakustischen Zweitores sind zwei Meßverfahren gebräuchlich: Die Bestimmung des Amplituden- (und ggf. Phasen-) frequenzganges mit Gleitsinus oder FM-Ton und die Schmalbandanalyse mit Rauschsignalen. Mit der Gleitsinussmessung werden die genaueren Ergebnisse erzielt; Voraussetzung ist allerdings, daß das zu analysierende System hinreichend einschwingen kann. Bei Übertragungssystemen mit Polen hoher Güte - wie z.B. Lautsprecherübertragung in einem wenig gedämpften Raum - erfordert dieses Einschwingen jedoch eine lange Zeit. Weil darüberhinaus mehr das globale Verhalten und nicht jede einzelne Raumresonanz interessieren, werden bei elektroakustischen Übertragungssystemen in der Regel Rauschmessungen bevorzugt. Ähnliches gilt z.T. bei Mikrofonmessungen (z.B. Bündelungsgrad) und bei Absorptions- und Transmissionsmessungen in Hallräumen.

Als Rauschsignal wird üblicherweise Rosa Rauschen verwendet, dessen Dichtepegel zu hohen Frequenzen hin mit 10 dB/Dek abnimmt. Die Analyse erfolgt mit Schmalbandfiltern konstanter relativer Bandbreite, z.B. Terz- oder Oktavfilter. Da bei einer Erhöhung der Filtermittelfrequenz auf das n-fache die Filterbandbreite auch auf das n-fache zunimmt, während die Rauschleistungsichte auf das 1/n-fache abnimmt, ergibt die Analyse eines linear und nichtlinear unverzerrten Systems einen frequenzunabhängigen Terz- (oder Oktav-) Pegel. Die folgenden Überlegungen werden am Beispiel der Terzanalyse diskutiert. Sie gelten sinngemäß für andere Bandbreiten.

Die Mittenfrequenzen der Normterzreihe sind international genormt:

$$f_m = (1, 1.25, 1.6, 2, 2.5, 3.16, 4, 5, 6.3, 8) \times 10^i \text{ Hz.}$$

Die einzelnen Terzfilter können über einen Schalter durchgeschaltet werden.

Obwohl dieses Durchschalten eine "spektrale Quantisierung" darstellt, die - wie jede Quantisierung - zu verringerter Auflösung und damit zu Meßfehlern führen kann, wird die Terzanalyse dennoch häufig als alleinige Messung mit hohem Genauigkeitsanspruch eingesetzt. So wird beispielsweise in Tonregieräumen das Terzpegeldiagramm mit Terzequalizern optimiert, wobei versucht wird, die Abweichungen kleiner ± 1 dB zu halten. Diese Optimierung ist immer problematisch, wenn resonanzartige Frequenzgangfehler auftreten, deren Resonanzfrequenzen neben den Mittenfrequenzen der Normterzreihe liegen. Abb. 1 zeigt die Analyse eines kammerfilter-ähnlichen Rauschsignals. Fallen die Mittenfrequenzen der (steiflankig gefilterten) Schmalbandrauschen mit den Mittenfrequenzen der Terzfilter zusammen (a), so

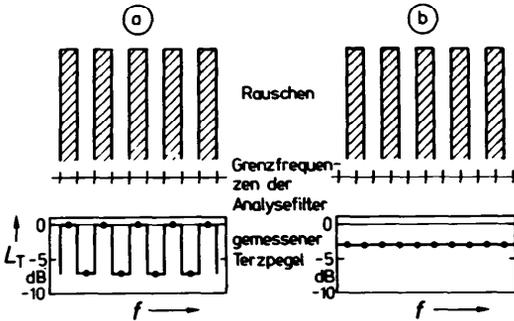


Fig. 1 Terzpegelanalyse von steilflankig gefiltertem Rauschen
 a) Die Mittenfrequenz der Terzfilter entspricht der Mittenfrequenz der Rauschbänder
 c) Die Mittenfrequenz der Terzfilter ist gegenüber der Mittenfrequenz der Rauschbänder um $1/2$ Terz verschoben

entsteht ein mäanderförmiges Terzpegeldiagramm. Bei handelsüblichen Terzfiltern (DIN 45 652) liegen wegen der endlichen Flankensteilheit die Minima etwa 7 dB unter den Maxima. Liegt jedoch zwischen den Mittenfrequenzen der Schmalbandrauschen und denjenigen der Filter ein Frequenzversatz von $1/2$ Terz, so ergibt sich ein frequenzunabhängiger Terzpegel (b). Dies bedeutet, daß (I) steilflankige Sprünge im Frequenzgang quantitativ falsch wiedergegeben werden, und daß (II) manche Frequenzgänge sogar qualitativ falsch wiedergegeben werden. Im Falle (b) kann die schraffiert skizzierte Übertragungsfunktion nicht von einem ebenen, unverzerrten Frequenzgang unterschieden werden.

Abb. 2 zeigt das mit einem Normterzfilter analysierte Terzpegeldiagramm eines Breitbandlautsprechers (a). Nach "Optimierung" mit einem Normterzequalizer ergibt sich Kurve (b). Eine Kontrollmessung mit einem Terzfiltersatz, dessen Mittenfrequenzen gegenüber der Normterzreihe um $1/2$ Terz verstimmt sind (Nebenterzreihe), ergibt jedoch nach wie vor Pegelsprünge von bis zu 6 dB (c). Die Optimierung eines einzigen Terzpegeldiagramms stellt somit eine zwar notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für eine unverfälschte Übertragung dar. Streng genommen müßte mit einer Vielzahl von Terzfiltersätzen analysiert werden. In praxi stellt aber bereits eine Ergänzungsmessung mit einem Terzfiltersatz der Nebenterzreihe eine wesentliche Verbesserung der Meßgenauigkeit dar. Wenn kein Terzfiltersatz der Nebenterzreihe vorhanden ist, kann das zu analysierende Signal auch auf ein Tonbandgerät aufgenommen werden. Die (Normterz-) Analyse des mit 13 % höherer oder niedrigerer Geschwindigkeit wiedergegebenen Signals entspricht dann einer Nebenterzanalyse. Bei Verwendung eines Echtzeit-Terzanalysators und langsamer Änderung der Wiedergabegeschwindigkeit um maximal 1 Terz ($1:1.26 = 4$ Halbtonen) ist bereits eine hohe Auflösungsgenauigkeit erreichbar. Gleichzeitig kann durch Vergleich des untransponierten und des um eine volle Terz transponierten Signals untersucht werden, ob das Tonbandgerät durch die Geschwindigkeits-

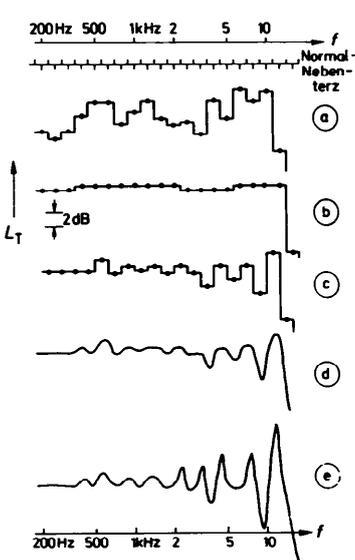


Fig. 2 Terzpegel L_T eines Breitbandlautsprechers

- a) Lautsprecher ohne Equalizer, Normterzreihe
- b) Lautsprecher mit Equalizer, Normterzreihe
- c) Lautsprecher mit Equalizer, Nebenterzreihe
- d) Lautsprecher mit Equalizer, Gleitterzanalyse
- e) Lautsprecher mit Equalizer, Bandbreite 5-16 % (siehe Text).

änderung zusätzliche Fehler verursacht. Bei hochwertigen Spulentonbandgeräten wird dies kaum der Fall sein, wenn eine hohe Bandgeschwindigkeit (38 cm/s) verwendet und auf den Einsatz von Kompondern verzichtet wird.

Eine alternative Meßmethode stellt der Einsatz von kontinuierlich durchstimmbaren SCFs (Switched Capacitor Filters) dar. Bei ihnen ist die relative Bandbreite (Oktav, Halboktav, Terz) fest vorgegeben. Die Mittenfrequenz ist über einen externen Taktoszillator steuerbar. Wenn durch zusätzliche Tiefpässe für die Einhaltung des Abtasttheorems gesorgt wird und Taktfrequenzen ausgefiltert werden, kann damit eine Gleitterzanalyse durchgeführt werden (Abb. 2d).

Ebenfalls anwendbar ist das Durchstimmen eines Überlagerungsfilters mit bereichsweise konstanter absoluter Bandbreite. Da bei tiefen Frequenzen eine kleine, bei hohen Frequenzen jedoch eine große Bandbreite erwünscht ist, wird bei handelsüblichen Geräten die Bandbreite automatisch umgeschaltet. Gleichzeitig wird mit zunehmender Bandbreite die Verstärkung des Meßverstärkers reduziert. Bei der in Abb. 2e gezeigten Messung wurde für $f_m < 630$ Hz eine Bandbreite von $\Delta f = 31,6$ Hz verwendet. Für die Bereiche $630 \text{ Hz} \leq f_m < 2 \text{ kHz}$, $2 \text{ kHz} \leq f_m < 6,3 \text{ kHz}$ und $f_m \geq 6,3 \text{ kHz}$ werden Bandbreiten von $\Delta f = 100 \text{ Hz}$ bzw. 316 Hz bzw. 1 kHz verwendet. Als Testsignal diente Weißes Rauschen. Die relative Bandbreite ändert sich also zwischen $\Delta f/f_m = 5 \dots 16 \%$, und ist damit deutlich schmalbandiger als eine Terz (23 %). (Größere Bandbreiten waren bei automatischem Meßab-

lauf an diesem Gerät nicht einschaltbar). Generell ergeben Filter mit geringerer Bandbreite eine bessere spektrale Auflösung, erfordern aber eine langsamere Frequenzänderung und eine größere Glättungszeitkonstante. Terzbreite Filter werden in der Regel bevorzugt, weil die Terzbreite im Bereich $f > 500$ Hz in guter Näherung der Breite der Frequenzgruppe des Gehörs entspricht. Nicht gehörbezogen ist hingegen die Festlegung der Terzmittenfrequenzen auf die Normterzreihe. Das Gehör bildet die zur Frequenzauflösung eingesetzten Filter signalbezogen und nicht nach festen Mittenfrequenzen. Die Normterzreihe sichert lediglich internationale Vergleichbarkeit.

Durch die nicht gehörbezogene Messung können Übertragungsanlagen trotz gleicher Terzpegeldiagramme unterschiedlich klingen. Den Grenzfall stellt Bild 1b dar: Beim Hinzuschalten jeder zweiten (fehlenden) Terz wird nur die Lage des Terzpegeldiagrammes um 3 dB nach oben verschoben; eine Formänderung tritt nicht auf. Das Fehlen jeder zweiten Terz ist gehörmäßig - insbesondere bei kleiner Lautstärke - jedoch sehr deutlich wahrnehmbar.

Als Konsequenz dieser Überlegungen bleibt festzuhalten:

1. Bei der Terzanalyse ist die Filterflankensteilheit zu berücksichtigen. Pegelunterschiede zwischen benachbarten Terzpegeln, die größer als etwa 5 dB sind, können mit einem großen Meßfehler behaftet sein.
2. Der Normterzanalyse ist eine Gleitterzanalyse vorzuziehen. Ist diese nicht durchführbar, sollte wenigstens eine Nebenterzanalyse als Ergänzungsmessung vorgenommen werden.
3. Bei hohen Anforderungen an die Übertragungsqualität kann neben einem Terzequalizer ein parametrischer Equalizer nötig werden, dessen Filterparameter Mittenfrequenz, Bandbreite und Verstärkung getrennt einstellbar sind.