

Parameterstudie zur Terzfilterung mittels der Fast-Fourier-Transformation

Schmidt, A.; Jeschke, D.

Ausgangspunkt dieser Studie war die Suche der Autoren nach einem preisgünstigen Akustikmodul zur Durchführung einer offline Terzanalyse an gemessenen Körperschall- und Luftschallsignalen. Die wenigen am Markt erhältlichen Programme sprengten im allgemeinen den zur Verfügung stehenden finanziellen Rahmen, so daß man sich für die Entwicklung einer eigenen Lösung entschied. Mittelpunkt des generierten Lösungsalgorithmus ist die Fast-Fourier-Transformation (FFT) mit dem Problem einer geeigneten Fensterung der gemessenen Zeitsignale.

Searching for a praiseworthy acoustic module to issue an offline 1/3-octave analysis of measured structure-born and air-born time signals the authors figured that most available software exceeds the available financial budget. Therefore the decision was made to develop a separate solution. The centre of the generated mathematical algorithm is built by the Fast-Fourier-Transformation (FFT) and the application of an appropriate window technique to the measured signals.

1 Einleitung

In den letzten Jahren setzen sich zunehmend Meßkarten für den Rechnereinbau durch, die eine Frequenzanalyse von Signalen basierend auf der Fast-Fourier-Transformation (FFT) erlauben. Derartige Systeme sind in hohem Maße flexibel und verursachen nur einen Bruchteil der bislang üblichen Anschaffungskosten. Auf den Gebieten der Körperschall- und Luftschallanalyse hat sich über die Jahre die Terzanalyse als sinnvolles Auswertungsverfahren von Schallereignissen durchgesetzt. Die Durchführung einer Terzmessung mittels kommerzieller Analysatoren erforderte früher den Einsatz analoger Filtertechnik, und war somit ausschließlich hardwareorientiert. Ein zu analysierendes Signal wurde zu diesem Zweck einer analogen Bandpaßfilterung mit anschließender Effektivwertbildung unterzogen. Eine derartige Analyse ist durch die Einführung der digitalen Filtertechnik im Zusammenhang mit immer leistungsfähigeren Rechenan-

lagen und Meßkarten mittlerweile auch softwaretechnisch realisierbar. Ein nicht zu vernachlässigendes Problem stellt in diesem Zusammenhang eine für die digitale Filterung notwendige Fensterfunktion dar. Im folgenden wird eine Möglichkeit der digitalen Terzanalyse ausgehend von den Pegelwerten einer FFT eines vorliegenden Schallereignisses vorgestellt, und der Einfluß der Fensterfunktion auf die Signalauswertung diskutiert.

2 Grundlegende Betrachtungen

Als Testsignal diente ein zeitveränderliches Signal in Form einer Rechteckschwingung mit 1000 Hz, welches über einen Lautsprecher ausgegeben wurde. Die Signalerfassung erfolgte über ein Mikrofon, das sowohl mit einem B&K Verstärker vom Typ 2636 mit extern eingeschliffenem Terzfilter 1618 als auch einem Meßrechner mit einer digitalen Meßwerterfassungskarte vom Typ DAP 2400e/6 verbunden wurde. Dabei bietet die B&K Analytoreinheit die Möglichkeit einer manuellen On-line-Signalfilterung in Terzbändern zwischen 20 Hz und 20 kHz. Ein Vergleich der Terzanalysen für das aufgezeichnete Testsignal mittels der B&K Meßkette einerseits und dem eingesetzten softwareorientierten Auswertungsalgorithmus andererseits ermöglicht Aussagen über die Genauigkeit einer Off-line-Terzberechnung auf der Grundlage der Fouriertransformation.

Der hier behandelte Algorithmus der digitalen Terzanalyse geht aus von dem errechneten in Pegelwerten vorliegendem FFT-Schmalbandspektrum für ein in üblicher Weise gemessenes Schallsignal. Die mathematische Grundlage der Frequenztransformation basiert auf der Theorie der Fourier-Reihen bzw. des Fourier-Integrals. Die Fast-Fourier-Transformation (FFT) setzt die Existenz eines unendlichen periodischen Zeitsignals voraus. Durch Einsatz einer Fensterfunktion wird ein endliches und somit für den Rechner quasi nicht periodisches Signal in den Bereich des Unendlichen erweitert und einer Behandlung durch die Fouriertransforma-

tion zugänglich gemacht. Damit wird auch die Verarbeitung nicht periodischer Signal ermöglicht.

Der bei der FFT eingesetzte Fenstertyp beeinflusst nicht unerheblich das Frequenzspektrum des zu analysierenden Signals, vgl **Abb. 1** und **Abb. 2**. Negative Schalldruckpegel bedeuten, daß der Effektivwert des gemessenen Schalldruckpegels kleiner als der Effektivwert des Bezugsschalldrucks ist. Um die Effektivwerte der FFT einem Schalldruckpegel zuordnen zu können, wurde eine Kalibrierung durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde bei unterschiedlichen Schalldruckpegeln der an der Meßwerterfassungskarte anliegende Effektivwert des Signals bestimmt und der am Mikrofonverstärker angezeigte zugehörige Pegelwert notiert. Man erhält eine Kalibrierkurve mit logarithmischem Verlauf. Aus den FFT-Spektren gehen zwei Gruppen von Fenstern hervor. Die eine Gruppe trennt die Peaks scharf ab, hat aber den Nachteil einer höheren Signaldämpfung von ca. 6 dB und einen insgesamt verrauschteren Verlauf (**Abb. 1**).

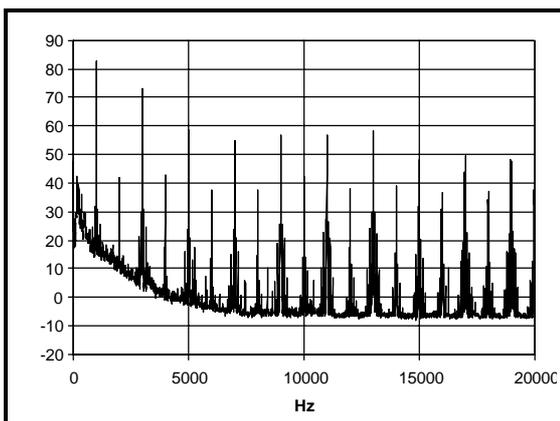


Abb.1: FFT eines Rechtecksignals, berechnet mit einem Hanningfenster

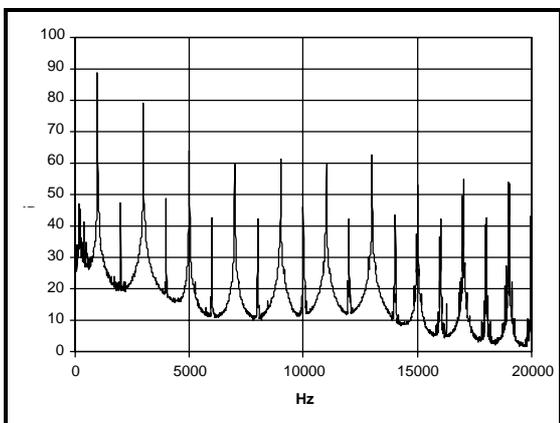


Abb.2: FFT eines Rechtecksignals, berechnet mit einem Rechteckfenster

Die andere Fenstergruppe hat einen weicheren und Kurvenverlauf, kann dafür aber die Peaks nicht so

gut abgrenzen. Innerhalb der Untersuchungen wurde der Einfluß einer Vielzahl unterschiedlicher Fenstertypen (Rechteck, Cauchy, Cos^X, Gauss, Poisson, Blackman, Hamming, Hanning und Tucky) auf die Frequenztransformation und dabei insbesondere auf das Terzspektrum analysiert.

3 Terzanalyse im Vergleich

Die FFT-Analyse wird oft bevorzugt zur hochauflösenden Frequenzanalyse benutzt, bei der die Amplitude in der jeweiligen physikalischen Einheit dargestellt wird. Eine Pegelmaß wie sie in der Terz- oder Oktavdarstellungen üblich ist, wird seltener gemacht. Eine Umwandlung der FFT in eine Terz ist schon aus diesem Grund nicht ohne weiteres möglich. Für eine Terzberechnung (konstante relative Bandbreite) aus einer Schmalbandanalyse (konstante absolute Bandbreite) ist die Summierung über konstante relative Frequenzbereiche erforderlich. Um aus Einzelpegeln einen energieäquivalenten Summenpegel zu ermitteln, nutzt man folgende Beziehung:

$$L_{Gesamt} = 10 \cdot \log \sum_1^i 10^{0,1 \cdot L_i}$$

Eine derartige Vorgehensweise summiert alle Pegel, die in das entsprechende Terzband fallen auf. Benachbarte Frequenzbänder werden hier im Gegensatz zu einer analogen Terzfilterung nicht berücksichtigt.

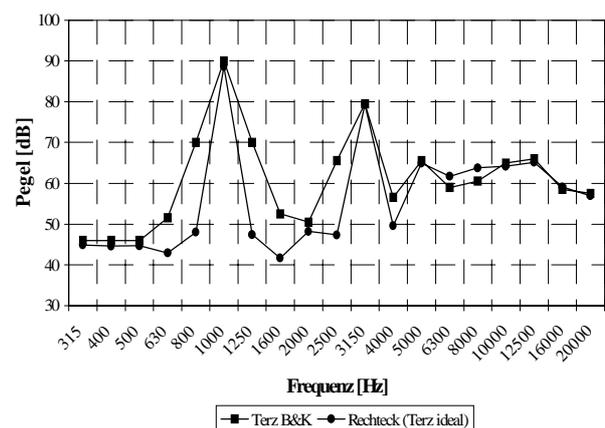


Abb 3: Vergleich einer gemessenen Terz (B&K) mit einer gerechneten Terz von einem Rechtecksignal

Vergleiche mit einer Terzmessungen nach DIN IEC 651 Klasse 0 zeigten nicht zu vernachlässigende Unterschiede der Absolutpegel in den Terzbändern (siehe **Abb. 3**).

Die qualitative Aussage ist vom Kurvenverlauf her richtig, jedoch hängt die Übereinstimmung der Spitzenpegel von der verwendeten Fensterung ab.

Darüber hinaus ist der Verlauf der idealen Terzbe-
rechnung durch eine deutlich größere Flankenstei-
heit gekennzeichnet. Eine deutlich bessere Über-
einstimmung der analog und. digital ermittelten
Terzen bringt die Berücksichtigung der Filtercha-
rakteristik des genormten Analogfilters nach DIN
45652, wie es in kommerziellen Systemen für Pegel-
messungen im Terzband eingesetzt wird, bei der
berechnung der Terz. Ausgehend vom Ideal des
Rechtecks werden durch das analoge Filter „nur“
Filterantworten gemäß **Abb. 4** erreicht.

Die Hauptcharakteristik des Filters ist geprägt durch
eine 3 dB Dämpfung an den Eckfrequenzen sowie
einer maximalen Welligkeit von ± 0.5 dB im Durch-
laßbereich. Darüber hinaus beeinflusst die endlichen
Flankensteilheit den Terzbandpegel. Durch einen
geeigneten Algorithmus kann der Einfluß benach-
barter Frequenzbänder („Pegelwerte bandfremder
Frequenzen“) auf das jeweilige Terzband infolge
der nur endlichen Flankensteilheit des genormten
Filters bei der Addition von Pegelwerten nachemp-
funden werden. Zu diesem Zweck wurde die Funk-
tion der Filterkurve ermittelt, welche als Grundlage
zur Bestimmung der Dämpfung bei der Addition der
Amplituden im Terzband diente. Der Bereich der
eigentlichen Terz (vgl. 1/3 Oktave in **Abb. 4**) geht
ohne Bewertung in die Addition ein.

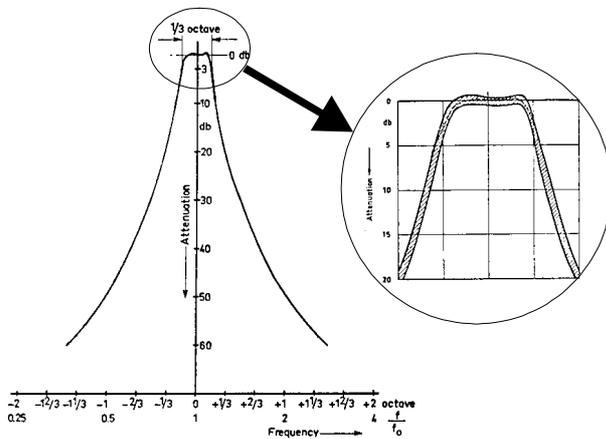


Abb. 4: Verlauf eines realen Terzfilters nach DIN 45652

Bei Anwendung auf das gleiche Zeitsignal sind nur
noch sehr geringfügige Unterschiede im Pegelver-
lauf feststellbar, **Abb. 5**. Diese sind auf Ablesefeh-
ler am Analogpegelmessers und leichte Schwankun-
gen an der Schallquelle selbst zurückzuführen.

Abb. 6 zeigt exemplarisch den Einfluß der Fenster-
ung in Form eines Hanning-Fensters bei der
Terzberechnung. Die durch die Fensterung verur-
sachte Dämpfung äußert sich in der Terzdarstel-
lung durch eine Verschiebung der Kurve entlang

der Ordinate. Es wird deutlich, daß durch die Be-
rücksichtigung des genormten Filters lediglich die
Flankensteilheit beeinflusst wird, der Spitzenpegel
hingegen nur von dem angewendeten Fenstertyp
abhängig ist.

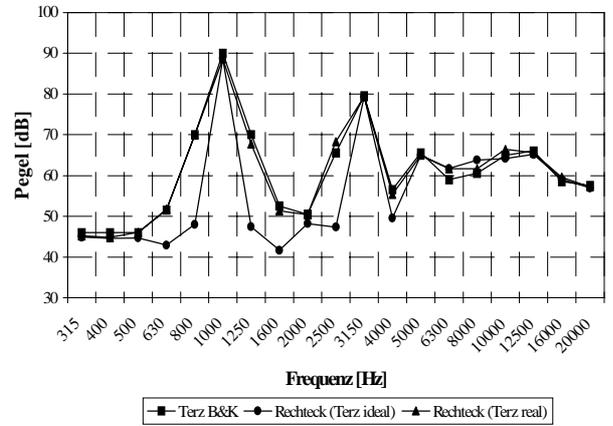


Abb. 5: Terz eines Rechtecksignals im Vergleich

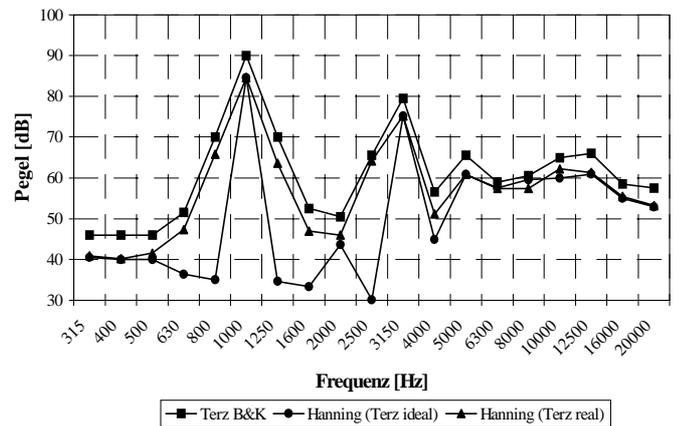


Abb. 6: Einfluß der Fensterung bei der Terzberechnung

Während die ideale Terzberechnung eine durch-
schnittliche Abweichung von $-4,9$ dB bei einer
Standardabweichung von 8 dB aufweist liegt die
durchschnittliche Abweichung der „realen“ Terzbe-
rechnung bei 0 dB bei einer Standardabweichung
von 1,32 dB. Diese Standardabweichung von 1,32
dB liegt im Bereich der Ablesegenauigkeit bzw. den
geringfügigen Schwankungen des zugrunde lie-
genden Signals.

Am exaktesten werden Terzberechnungen, die auf
Filterungen mit den Fenstertypen Cauchy, Cos^X ,
Gauss, Poisson oder Rechteck basieren. Die Fen-
stertypen Blackman, Hamming, Hanning und Tucky
liefern rein qualitativ das gleiche Bild, allerdings
muß mit einer Dämpfung von bis zu 5 dB gerechnet
werden.

Filter	Durchschnittsfehler [dB]	Standardabweichung [dB]	Dämpfung
Blackman	-5,12	1,36	Ja
Cauchy	-0,02	1,32	Nein
Cos ^X	-0,02	1,32	Nein
Gauss	-0,02	1,32	Nein
Hamming	-4,02	1,35	Ja
Hanning	-4,26	1,36	Ja
Poisson	-0,02	1,32	Nein
Rechteck	-0,02	1,32	Nein
Tucky	-4,26	1,36	Ja

Tab. 1: *Einfluß der Filterung auf die Terzberechnung*

Am exaktesten werden Terzberechnungen, die auf Filterungen mit den Fenstertypen Cauchy, Cos^X, Gauss, Poisson oder Rechteck basieren. Die Fenstertypen Blackman, Hamming, Hanning und Tucky liefern rein qualitativ das gleiche Bild, allerdings muß mit einer Dämpfung von bis zu 5 dB gerechnet werden.

4 Ausblick

Damit ist gezeigt, daß die Berechnung von Terzbändern aus einer FFT ohne weiteres möglich ist, wenn man die Filterkurve der bislang üblichen und genormten Terzen zugrunde legt und die Pegeldämpfung der Fensterfunktion bei der Terzberechnung berücksichtigt bzw. im Ergebnis ausweist. Die durchschnittliche Abweichung der „realen“ Terzberechnung von 0 dB bei einer Standardabweichung von 1,32 dB kann in diesem Sinne als durchaus befriedigend angesehen werden. Ein entscheidender Vorteil des vorgestellten Verfahrens liegt in der Möglichkeit auch umfangreichere Messungen zusätzlich zur FFT-Analyse einer Terzbewertung unterziehen zu können, ohne auf in aller Regel recht teure Akustik-analysatoren zurückgreifen zu müssen. Darüber hinaus stellt sich die Frage, in wie weit die ideale Terzberechnung, die keine bandfremden Frequenzen berücksichtigt, die besseren Ergebnisse liefert. Im Sinne der strengen Definition der Terzbänder liefert sie, rein formal betrachtet, die exaktere Beschreibung. Als generell falsch kann eine Addition auf dieser Grundlage demnach nicht abgetan werden.