Otto KRASTEL, Lahr

Messung von Frequenz-Schwankungen

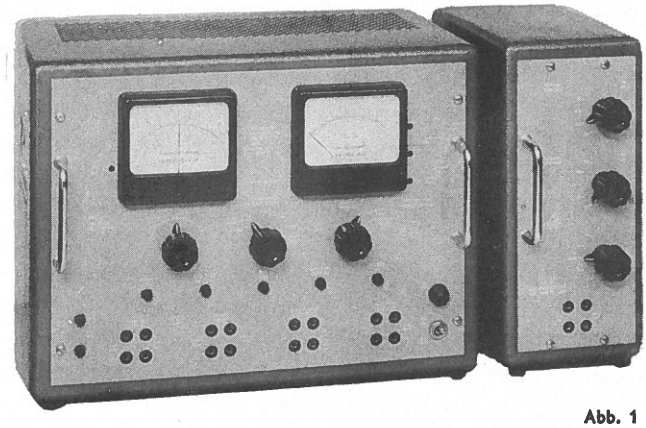


Abb. 1

Bei der Bandaufnahme und Wiedergabe werden z.B. infolge begrenzter Präzision der mechanischen Antriebselemente Frequenz-Schwankungen und damit Schwankungen der Tonhöhe erzeugt, die die Übertragung über Band bezüglich der Qualität beeinträchtigen. Es soll im Folgenden gezeigt werden, welcher Art diese hier als Störmodulation zu bezeichnende Frequenz-Schwankung (abgekürzt: FS) sein kann, mit welchen Mitteln sie sich zweckmäßig messen läßt und wie man durch die Messung Fehlerursachen erkennen und zu einer Qualitätsangabe des verwendeten Bandgerätes gelangen kann.

Verfahren.

Eine auf Band aufgezeichnete und als konstant angenommene Wellenlänge λ ergibt bei idealen Antriebselementen und damit konstanter Bandgeschwindigkeit v_o die Wiedergabetonhöhe der Frequenz f_o nach der Beziehung

$$f_o = v_o/\lambda$$

Weicht die Bandgeschwindigkeit v_o durch ungleichförmige Winkelgeschwindigkeit irgend eines der Antriebselemente um Δv ab, so entspricht dieser Geschwindigkeitsänderung eine Frequenzänderung Δf der konstanten Frequenz f_o und erzeugt dadurch eine Änderung der Tonhöhe

$$f_o + \Delta f = (v_o + \Delta v)/\lambda$$

Betrachtet man den einfachsten Fall einer periodischen FS, verursacht etwa durch exzentrischen Lauf einer Antriebswelle, welche sich mit der konstanten Winkelgeschwindigkeit ω_n dreht, und deren prozentuale Exzentrizität a angegeben werden kann, so ist die Momentangeschwindigkeit gegeben durch

$$v = v_o (1 + a \sin \omega_n t)$$

und der Momentanwert der Wiedergabefrequenz

$$f = f_o (1 + a \sin \omega_n t)$$

Dieser Vorgang stellt eine Frequenzmodulation des Trägers der Frequenz f_o mit der Frequenz f_n bei einem Modulationsgrad a dar, wobei

$$f_n = \omega_n/2\pi$$

ist. Der Hub Δf dieser Frequenzmodulation, der ein Maß für die wahrnehmbare Schwankung der Tonhöhe ist, ergibt sich zu

$$\Delta f = f_o \cdot a$$

Die Messung des Hubes Δf einer auf Band aufgezeichneten Test- oder Pilotfrequenz f_o ist die gebräuchlichste Methode, da sie mit den bekannten Mitteln der Frequenzmodulation zu einer direkten Anzeige der FS führt. Angezeigt und abgelesen wird die FS als relativer Frequenzhub (Modulationsgrad)

$$a = \pm\Delta f/f_o \cdot 100\ [\%]$$

Die Verhältnisse in der Praxis liegen aber durchaus nicht so einfach wie in dem angeführten Beispiel. Es können von den verschiedensten Elementen des Antriebes gleichzeitig Störmodulationen verursacht werden, z.B. Antriebswelle des Motors, Riemenübertragung, Antriebswelle für das Band, Schlupf zwischen Band und Welle. Auch elastische Längendehnungen und Schwingungen des Bandes selbst führen zu FS. Dadurch werden Störmodulationen mit verschiedener Frequenz und unterschiedlichem zeitlichen Verlauf hervorgerufen.

Experimentell wurde ermittelt, daß Störfrequenzen im Bereich von 0,2 Hz bis 200 Hz das für eine Beurteilung der Klangqualität einer akustischen Übertragung wichtige Frequenzband darstellen. Das Maximum der empfundenen Störung fällt in die Gegend von 4 Hz. Frequenzschwankungen

um 4 Hz werden ganz deutlich als "Jaulen" (WOW), höherfrequente Anteile als Rauhigkeit des Tons (FLUTTER) empfunden. Da das Ohr diese Störungen je nach Frequenz unterschiedlich bewertet, wird in dem Entwurf DIN 45507 versucht, zu einer einheitlichen Bewertung der Störfrequenzen nach einer Bewertungskurve zu gelangen. Darüberhinaus wird die Art der Gleichrichtung zur Instrumentenanzeige als "angenäherte Spitzengleichrichtung" festgelegt. Der Sollwert der Pilotfrequenz beträgt 3,15 kHz $\pm$ 2 % und entspricht damit der Norm DIN 45401 bezw. der ISO-Empfehlung 402 für Vorzugsfrequenzen für akustische Messungen. Wesentlich für den Wert der Messungen ist allerdings die Festlegung der Pilotfrequenz nicht.

Zur weiteren Beurteilung der Qualität eines Bandgerätes gehört die Messung des Schlupfes (DRIFT). Schlupf des Bandes entsteht durch unterschiedlichen Bandzug (Durchmesser) am Anfang und Ende eines vollen Bandwickels und erzeugt unterschiedliche Bandgeschwindigkeit am Anfang v_A und am Ende v_E. Zu großer Schlupf macht sich in all den Fällen störend bemerkbar, in denen beim cuttern Teile des Bandendes an den Anfang des Bandes verlegt werden oder umgekehrt. Die Übergänge der Schnittstellen werden u.U. durch die verschiedenerlei Bandgeschwindigkeit und die dadurch verursachte Verwerfung der relativen Tonhöhe störend wahrgenommen. Die Größe des relativen Bandschlupfes S ergibt sich aus

$$S = (V_E - V_A)/V_A \cdot 100\ [\%]$$

Auch diese Messung kann nach dem Verfahren der Aufzeichnung einer Pilotfrequenz auf Band durchgeführt werden und wird von DIN 45507 verlangt.

Gerät.

Ein Gerät, das die Forderungen von DIN 45507 erfüllt, wurde von der Firma Elektromesstechnik Wilhelm Franz KG, Lahr entwickelt. Abb. 1 zeigt das Gerät EMT 420 mit dem Sonderzubehör Filter EMT 421, das zur Analyse der Störmodulationen dienen kann.
Abb. 2 zeigt das Block-Diagramm, das im Folgenden kurz erläutert werden soll.

Zur Aufnahme der Pilotfrequenz 3150 Hz auf Band enthält das Gerät einen eingebauten Generator der Genauigkeit $\pm$ 1 x 10^{-3} (kurzzeitig $\pm$ 1 . 10^{-4}), die der Praxis der Messung genügt. Zwei Ausgänge erlauben den Anschluß an Studio- und an Heimtongeräte. Der Generator ist um $\pm$ 10 Hz fest verstimmbar und ermöglicht dadurch eine Eichung des Gerätes ohne äußere Hilfsmittel.

Die vom Band wiedergegebene Pilotfrequenz gelangt über zwei Eingänge (hochohmig und niederohmig für transistorisierte Geräte) auf den Amplitudenbegrenzer. Es wird eine Begrenzung der Amplitudenschwankungen von 40 : 1 erreicht, die vor allem für den empfindlichsten Bereich der meßbaren Frequenzschwankungen $\pm$ 0,10 % nützlich erscheint.
Der sich anschließende Phasendiskriminator mit kritischer Kopplung $\frac{k}{d} = 1$ ergibt eine angenähert geradlinige Umwandlerkennlinie im Bereich 3150 $\pm$ 400 Hz. Die Notwendigkeit einer relativ breiten Umwandlerkennlinie ergibt sich aus der Überlegung der in dem Gerät bei FM zu verarbeitenden Seitenbänder.
Mit Rücksicht auf Diktiergeräte, bei welchen aus ökonomischen Gründen vielfach höhere Frequenzschwankungen gegenüber Geräten für Tonwiedergabe in Kauf genommen werden, ohne dadurch an Silbenverständlichkeit zu verlieren, erlaubt der Bereichsteiler einen max. Bereich von $\pm$ 10 % FS zur Messung heranzuziehen. Für die Anzahl der zu übertragenden Seitenbänder ergibt sich hier als Beispiel:

Aus dem Quotienten des max. Hubes

$$\Delta f = f_o \cdot \alpha = 3150 \cdot 10/100 = 315\ Hz$$

und der höchsten Störfrequenz f_n = 200 Hz ergibt sich ein Modulationsindex m nach der Beziehung

$$m = \Delta f / f_n = 315/200 = 1{,}5$$

Man kann aus der grafischen Darstellung der Zylinderfunktion entnehmen, daß für m = 1,5 zumindest die Seitenbänder 1. und 2. Ordnung zur F-Demodulation berücksichtigt sein wollen und daß weitere Seitenbänder 3. und höherer Ordnung fortgelassen werden können, ohne daß dadurch zu große Fehler bei der Messung erhalten werden. Aus der Übertragung der Seitenbänder 2. Ordnung, die bei

$$f_o \pm 2 \cdot f_n = 3150 \pm 400\ Hz$$

liegen, ergibt sich die notwendige Breite der Umwandlerkennlinie. Für die empfindlichen Bereiche 0,1 ... 1 % geht bei gleicher Modulations-Frequenz f_n = 200 Hz der Modulations-Index auf Werte m $\leq$ 0,1 zurück, wobei nur die beiden Seitenbänder 1. Ordnung den Modulations-Inhalt tragen, d.h. daß in Richtung empfindlicherer Meßbereiche die Meßgenauigkeit steigt, was einer Qualitätsbeurteilung entgegenkommt.

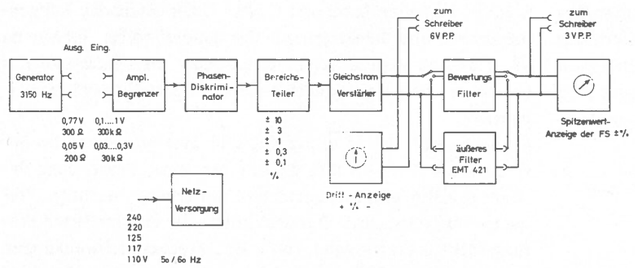


Abb. 2 Block-Diagramm EMT 420

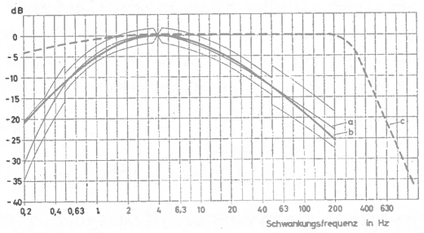


Abb. 3 Relatives Dämpfungsmaß des Bewertungsfilters

Es folgt der Bereichsteiler zur Messung der Frequenzschwankungen in 5 Bereichen von $\pm$ 0,1 % ... $\pm$ 10 % mit anschliessendem Gleichstromverstärker. Der Ausgang dieses Gleichstromverstärkers ist in Kathodenfolgeschaltung ausgeführt, wobei die Kathoden zweier Trioden auf Null-Potential liegen. Das hat den Vorteil, daß an diesem Ausgang technische Schnellschreiber, die sehr vorteilhaft der Analyse und Registrierung der FS dienen, ohne Berührungsgefahr der Zuleitungen angeschlossen werden können. Über den um $\pm$ 10 Hz verstimmbaren Generator können auf dem Registrierpapier 2 Eichmarken geschrieben werden, die den Endwerten der 5 Meßbereiche entsprechen. Ein eingebautes Meßwerk dient an diesem Ausgang der Schlupf-Messung. Der über einen Umschalter folgende 4-Pol enthält das Bewertungsfilter Abb. 3 (Sollkurve mit Toleranzen nach DIN 45507 Kurve a, Ist-Kurve b), außerdem einen linearen Frequenzgangteil Kurve c. Die Messung über "linearen" Frequenzgang ist nicht normgerecht, doch wird sie vorteilhaft zur deutlichen Erkennung von fehlerhaften Laufwerken verwendet, da vielfach 2- bis 3-fach so große Werte der FS gegenüber "bewertet" gemessen werden. Die Umschaltung erlaubt ferner, äußere Filter mit 6.000 Ohm Anpassung zur Analyse der FS hier anzuschließen. Das Filter EMT 421 besitzt 5 umschaltbare Tief- und 5 Hochpässe in Oktav-Abstand in dem Frequenzbereich von 6 bis 200 Hz mit einer Flankendämpfung von < 30 dB pro Oktav. Am Ausgang der Filter ist ein zweiter Anschluß für Schreiber oder Oszillograf vorgesehen, der die Registrierung hinter den Filtern ermöglicht.
Es folgt ein zweites Meßwerk, an dem die FS direkt in % abgelesen wird. Bei schwankender Anzeige ist der Maximalwert abzulesen. Die Gleichrichtung erfolgt nach DIN 45507 in Greinacher-Schaltung, die die F-Modulation von Spitze zu Spitze auswertet. Die Beschriftung enthält jedoch den einfachen Spitzenwert mit Angabe des $\pm$ Zeichens davor, analog der Definition des Hubes bei UKW, dessen Wert der Frequenzabweichung nach einer Richtung entspricht. Die Eichung bezieht sich auf sinus-förmige Frequenzmodulation. Außerdem werden nach DIN 45507 bestimmte Anzeigewerte verlangt, die bei Impulsen bestimmter Länge und Folgezeit erreicht werden müssen. Den Impulsen entsprechen bestimmte einseitige Frequenzabweichungen. Diese letztgenannte Festlegung des DIN-Entwurfs erscheint besonders deshalb wichtig, da FS nur in speziellen Fällen nach der Sinus-Funktion auftreten und bei Geräten hoher Präzision nur noch eine Reststörmodulation beobachtet wird, deren Frequenzen statistisch verteilt sind.

Messung.

Durch die getrennte elektrische Herausführung des Generator-Ausgangs und des Meßgeräte-Eingangs ist es möglich, die FS unmittelbar bei der Bandaufnahme durch gleichzeitigen Anschluß des Meßgeräte-Eingangs "hinter Band" zu messen. Hier besteht die Gefahr der Auslöschung von Störmodulationen, deren Wellenlänge gleich, oder 1/n (mit n = = 2; 3; 4 ...) des Abstandes zwischen Sprechkopf und Hörkopf ist. Meistens wird zunächst eine Testaufnahme gemacht und diese anschließend bei der Wiedergabe auf demselben Bandgerät zur Messung von FS benutzt. Der Betrag der so ermittelten FS entspricht dann der Vektorsumme der bei der Aufnahme und Wiedergabe auftretenden Störungen.

Für die Qualitätsbeurteilung von Bandgeräten gibt DIN 45511 folgende Grenzwerte der FS an, die nicht überschritten werden sollen.

	Studiogeräte			Heimgeräte			
Bandgeschwindigkeit cm/sec	76	38	19	19	9,5	4,75	2,4
kurzzeitige Geschwindigkeitsschwankungen mit Frequenzen über 0,1 Hz höchstens %	$\pm$ 0,15	$\pm$ 0,15	$\pm$ 0,25	$\pm$ 0,3	$\pm$ 0,5	$\pm$ 0,9	$\pm$ 1,5

Nach praktisch durchgeführten Messungen wird vielfach die Hälfte der o.a. Werte erreicht.

Zur Bestimmung des Schlupfes wird zu Beginn einer vollen Bandspule eine kurze Aufnahme der Pilotfrequenz durchgeführt. Bei Vollspurgeräten tauscht man dann beide Bandteller aus, wodurch die Aufnahme an das Ende der Bandspule zu liegen kommt. Bei der anschließenden Wiedergabe zeigt das Gerät direkt den max. möglichen Schlupf in Prozenten an, der sich aus dem Frequenzunterschied zwischen Aufnahme und Wiedergabe ergibt. Als Anhaltswerte für eine Beurteilung der Qualität können etwa folgende Werte gelten:

Studiogeräte: S $\leq$ 0,2 %
Heimtongeräte: S $\leq$ 1 %

Zum Schluß sei in Abb. 4 ein Bild registrierter FS gezeigt. Die Aufnahme wurde an einem Bandgerät bei 9,5 cm/sec Bandgeschwindigkeit mit dem Gerät EMT 420 und einem nachfolgenden Schreiber gewonnen. Der Papiertransport betrug 10 mm/sec. Die beiden Eichmarken zu Beginn der Registrierung wurden über das Meßgerät durch den Schreiber aufgezeichnet und entsprechen den Endwerten des verwendeten Meßbereiches $\pm$ 1 %.

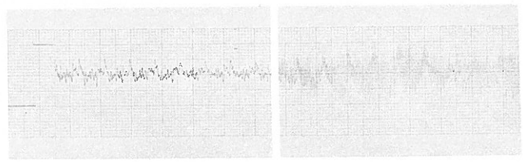


Abb. 4a zeigt die hinter dem Bewertungsfilter (DIN 45507) registrierten FS. Das Spitzenwert-Meßwerk in EMT 420 ergab während der Registrierung eine max. Anzeige von $\pm$ 0,35 %. Aus dem Verlauf der Registrierung erkennt man in erster Linie ausgeprägte Spitzen der Frequenzabweichung, die periodisch nach 8 mm auftreten. Aus dem o.a. Papiertransport errechnet sich daraus eine Frequenz von 1,25 Hz. Diese Schwankungsfrequenz ergab sich aus der Umdrehungs-

zahl der Tonrolle mit ca. 75 U/min. Das Durchmesserverhältnis Tonrolle-Tonmotorwelle betrug ca. 9 : 1, woraus sich die Umdrehungen des 8-poligen Tonmotors (asynchron unter Last) zu 675 U/min. errechnen läßt. Den 675 U/min. entspricht eine zweite mögliche Schwankungsfrequenz in der Gegend um 11 Hz. Auch diese Schwankungsfrequenz erscheint in Abb. 4 a mit etwa einer ausgeprägten Spitze pro Millimeter.

Abb. 4 b zeigt dieselbe Registrierung aber über linearen Frequenzgang. Die Anzeige des Spitzenwert-Meßwerks betrug dabei ± 0,8 %. Dem größeren Anzeigewert entspricht hier die breitere Aufzeichnung der FS in Form dicht beieinander liegender Linienzüge. Eine Analyse der hohen Schwankungsfrequenz war nur über Registrierung bei 100 mm/sec Papiervorschub möglich. Sie ergab etwa eine ausgeprägte Spitze auf 1 mm und damit eine Schwankungsfrequenz von 100 Hz. Diese läßt auf Erschütterungen des Motorrotors in seiner Lagerung schließen, verursacht durch die magnetische Wechselkraft, die mit doppelter Netzfrequenz auftritt. Die Abbildung dieser Aufzeichnung mußte aus Gründen der schlechten Reproduzierbarkeit fortgelassen werden.

Literatur.

E. BELGER "Zur Messung von Tonhöhenschwankungen" Rundfunktechn. Mitteilungen 1958, S. 168 ff.

DIN 45507 Entw. Februar 1961, "Meßgerät für Frequenzschwankungen bei Schallspeichergeräten, Richtlinien" - Beuth-Vertrieb GmbH., Berlin-W 15.

H. VOLLMER "Messen von Tonhöhenschwankungen" - Funk und Ton 1952 - S. 169 - 175.

DIN 45511 Entw. November 1960 "Magnetbandgeräte, Richtlinien". Beuth-Vertrieb GmbH, Berlin-W 15.

SONDERDRUCK AUS „das elektron„ 1961

HEFT 18/19, SEITEN 359-362

LINZ/DONAU, GRABEN 9

Überreicht durch:

ELEKTROMESSTECHNIK WILHELM FRANZ KG

LAHR/SCHWARZWALD