



Akustische Messtechnik

Messung von Schalldruck-, Terz- und Oktavpegeln und anderen wichtigen Größen

Akustik-Serie Teil 16

Die allerersten akustischen Messgeräte waren rein mechanische Instrumente, wie z. B. der Helmholtz-Resonator zur Klanganalyse unter Zuhilfenahme des menschlichen Ohres als Indikator, das Kundtsche Rohr zur Wellenlängenbestimmung mittels Staubfiguren oder die Rayleigh-Scheibe zur Messung der Schallschnelle etc. Unsere heutige moderne akustische Messtechnik bedient sich elektroakustischer Mittel.

Die am häufigsten gemessene Größe in der Akustik ist auch heute noch der Schalldruck p bzw. der Schalldruckpegel L_p . Dafür gibt es heutzutage eine große Auswahl an Schallpegel-Messgeräten. Darüber hat der Autor dieser Beitragsserie schon vor Jahren [1] sehr ausführlich in Beiträgen im ELVjournal berichtet. Der erste nachfolgende Abschnitt mit der Überschrift

Schalldruckpegel-Messung befasst sich daher nur mit einigen ergänzenden Ausführungen zu den seinerzeit schon behandelten Dingen.

Neben dem Schalldruck bzw. dem Schalldruckpegel gibt es in der Akustik weitere messbare Größen, deren Kenntnis für die Beurteilung akustischer Sachverhalte von großer Bedeutung ist. Auf diese Größen und deren messtechnische Bestimmung sowie über weitere in der Praxis übliche Messverfahren wird nachfolgend eingegangen.

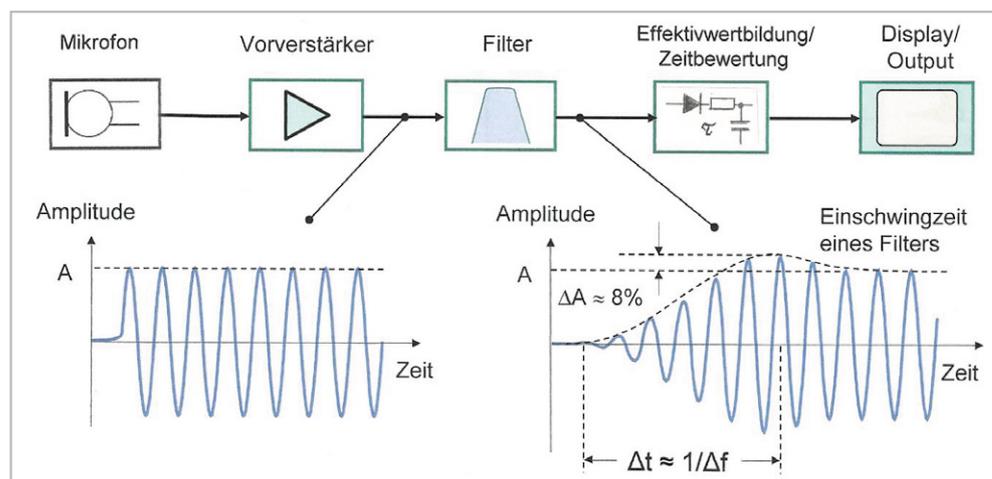


Bild 1: Vereinfachtes Blockschaltbild eines Schallpegelmessers und Veranschaulichung des Einschwingvorgangs eines Bewertungsfilters. In diesem Beispiel ist das Filter nach etwa sechs vollen Schwingungen eingeschwingen. Das Kästchen „Effektivwertbildung und Zeitbewertung“ beinhaltet a) die Signalgleichrichtung mit Effektivwertbildung und b) die RC-Glieder für die Zeitbewertung S (Slow), F (Fast) und I (Impulse).



Zur Information:

In leicht verständlicher Form vermitteln wir eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik.**

Themengebiete:

- Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren (2/2019)
- Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption (3/2019)
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder (4/2019)
- Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze (5/2019)
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon (6/2019)
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer (1/2020)
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox (2/2020)
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler (4/2020)
- Raum- und Bauakustik – Sabine'sches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche (4/2020)
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie (5/2020)
- Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“ (6/2020)
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Impedanz-Messrohre und Hallräume (1/2021)
- Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker (2/2021)
- Wasserschall – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks (3/2021)
- Infraschall und Ultraschall – natürliche und industrielle Quellen (4/2021)
- **Akustische Messtechnik – Terz- und Oktavpegel, Intensitätsmessung, Korrelationsanalyse, Cepstrumanalyse und akustische Peilung**
- Hörgeräte-Elektronik – Rückblick auf den Beginn der Hörgeräte-Entwicklung: von der Elektronenröhre bis zum integrierten Schaltkreis und zur Digitaltechnik

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

Schalldruckpegel-Messung, Terz- und Oktavpegel

Schallpegelmesser sind im Prinzip so aufgebaut, dass neben dem Messmikrofon zur Schallaufnahme, dem nachfolgenden Vorverstärker, der Frequenzbewertung (Filter-Einheit) und dem quadratischen Effektivwert-Gleichrichter einschließlich Zeitbewertung letztlich der Anzeigeteil (analog oder digital) folgt, siehe **Bild 1 und [1] (Teil 2)**. Soweit zum grundsätzlichen Aufbau eines jeden Schallpegelmessers.

Neben den eingebauten Bewertungsfiltern (A, B und C) findet man bei vielen Schallpegelmessern zusätzlich die Möglichkeit, von außen weitere externe Filter hinzuzufügen. Das können z. B. Oktavfilter, Terzfilter (= 1/3-Oktavfilter) oder ähnliche Filter sein, mit denen man neben der reinen Pegelmessung auch Frequenzanalysen durchführen kann. Als Ergebnis derartiger Messungen erhält man, je nach gewähltem Filter, z. B. Oktavpegel bzw. Terzpegel. Für besonders schmalbandige Analysen gibt es sogar 1/6, 1/12- oder sogar 1/24-Oktavband-Filter. In aller Regel sind das alles Bandpassfilter. Sowohl Terz- als auch Oktavfilter sind Bandpassfilter mit genormten Band-Mittenfrequenzen (gemäß DIN EN 61260), siehe **Bild 2**.

Betrachten wir dazu einen einzelnen Bandpass und seine Durchlasskurve, siehe **Bild 3**. Die obere Darstellung zeigt die Durchlasskurve eines idealen Filters mit „unendlich“ steilen Flanken. Die Durchlasskurve eines realen Filters mit einer Mittenfrequenz f_m ist im Bild darunter dargestellt. Ein Abfall der Durchlasskurve um je -3 dB zu beiden Seiten definiert die untere und die obere Grenzfrequenz f_t und f_h eines jeden Filters.

Der Bereich zwischen beiden Grenzfrequenzen gibt definitionsgemäß die absolute Filterbandbreite $\Delta f = f_h - f_t$ an. Daneben gibt es auch noch die relative Bandbreite

$$\frac{\Delta f}{f_m} = \frac{f_h - f_t}{f_m} \quad [x 100; \text{in \%}] \quad (1)$$

Während man früher, insbesondere zu jener Zeit, als es noch keine FFT-Messtechnik (FFT = Fast-Fourier-Transformation) gab, nahezu ausschließlich mit Filtern konstanter relativer Bandbreite ($\Delta f/f_m = \text{const.}$) gearbeitet hat, z. B. mit Oktavband- oder mit Terzband-Filtern, arbeitet man heute bei der spektralen Analyse von Geräuschen oft mithilfe der FFT sowie der Schmalband-Analyse, und zwar mit konstanten absoluten Bandbreiten ($\Delta f = \text{const.}$).

Oktavbänder f_i/Hz	Terzbänder f_i/Hz	Oktavbänder f_i/Hz	Terzbänder f_i/Hz
	25		800
31,5	31,5	1000	1000
	40		1250
	50		1600
63	63	2000	2000
	80		2500
	100		3150
125	125	4000	4000
	160		5000
	200		6300
250	250	8000	8000
	315		10.000
	400		12.500
500	500	16.000	16.000
	630		20.000

Bild 2: Genormte Mittenfrequenzen von Oktav- und Terzfiltern (gemäß DIN 61260)

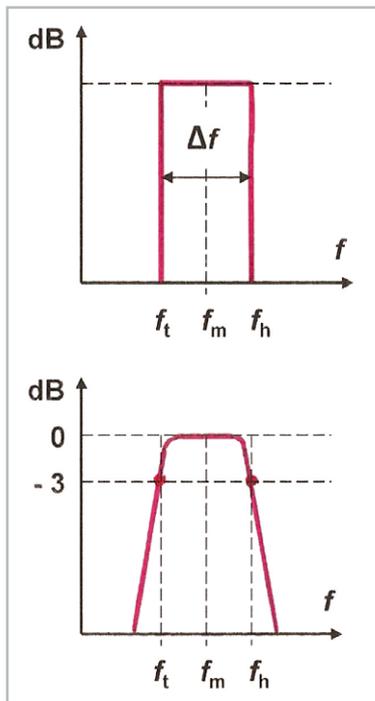


Bild 3: Bandpassfilter – oberes Bild: Durchlasskurve eines idealen Filters mit „unendlich“ steilen Flanken; unteres Bild: Durchlasskurve eines realen Filters, bei dem die Grenzfrequenzen f_t und f_h durch einen 3-dB-Abfall gekennzeichnet sind.

Den Unterschied zwischen beiden erkennt man auch schon rein äußerlich an der grafischen Darstellung der Messergebnisse. Früher war die Frequenzachse stets logarithmisch geteilt in Oktav- bzw. Terzbändern, während man bei der Darstellung von FFT-Spektren stets eine lineare Achsteilung vorfindet. Bleiben wir noch etwas bei den Filtern mit konstanter relativer Bandbreite. Die Bandmittenfrequenz ergibt sich bei dieser Filterart rechnerisch aus dem geometrischen Mittel der beiden Grenzfrequenzen f_h und f_t , nämlich zu: $f_m = \sqrt{f_h \cdot f_t}$.

Bei Oktavfiltern war das Verhältnis der oberen zur unteren Grenzfrequenz durch den Faktor 2 beschrieben. Im Vergleich dazu wird das Verhältnis der beiden Grenzfrequenzen bei Terzfiltern durch den Faktor $\sqrt[3]{2} \approx 1,26$ bestimmt. Ein Terzfilter mit einer Bandmittenfrequenz von beispielsweise 1000 Hz und den dazugehörigen Grenzfrequenzen $f_t = 891$ Hz und $f_h = 1120$ Hz besitzt somit eine relative Bandbreite von

$$\frac{\Delta f}{f_m} = \frac{1120 - 891}{1000} = 0,229 \quad (2)$$

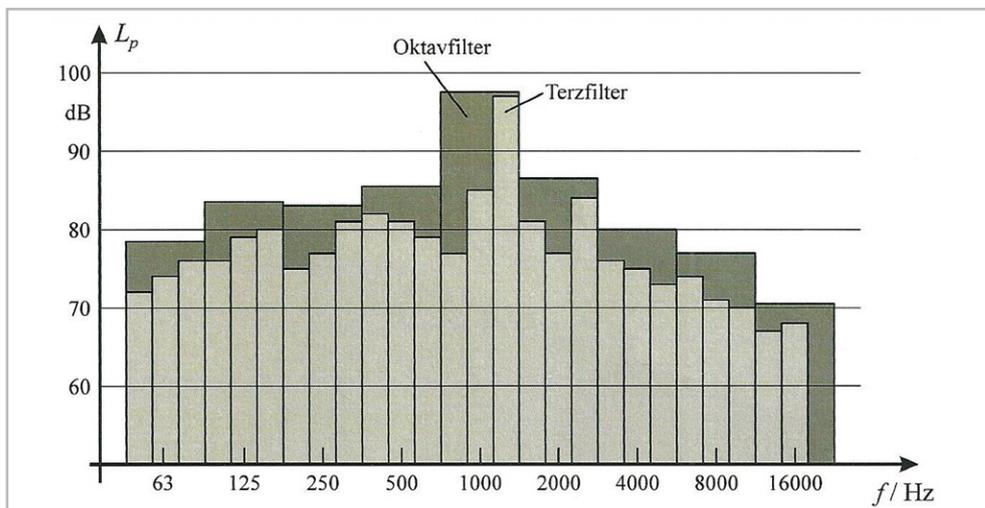


Bild 4: Vergleich von Terz- und Oktavpegeln z. B. für ein gemessenes Maschinengeräusch. Der höchste Terzpegel ist stets bestimmend für den jeweiligen Oktavpegel, siehe dazu das Oktavband mit der Bandmittenfrequenz 1000 Hz. Sind alle drei Terzpegel gleich groß, so ist der dazu gehörende Oktavpegel stets um 4,8 dB höher als jeder der einzelnen Terzpegel.

entsprechend rund 23 Prozent. Mit ca. 20 Prozent hat die relative Bandbreite der Frequenzgruppen unseres Gehörs eine bemerkenswert große Ähnlichkeit zur relativen Bandbreite von Terzfiltern. Nicht zuletzt deswegen werden die grundlegenden Untersuchungen in der Psycho-Akustik auch mit Terzfiltern vorgenommen.

Übrigens, je schmaler die absolute Bandbreite Δf eines Filters ist, desto länger dauert die Zeit Δt , die vergeht, bis so ein Filter „eingeschwungen“ ist. Es gilt hier die Unschärferelation $\Delta f \cdot \Delta t \approx 1$; betrachtet man z. B. ein Terzfilter mit einer relativen Bandbreite von 23 Prozent, so ist das Filter erst nach 100 Prozent/23 Prozent $\approx 4,35$ Schwingungen eingeschwungen.

Die in der akustischen Messtechnik häufig verwendeten Oktav- und Terzfilter besitzen genormte Mittenfrequenzen f_m , die man in der DIN EN 61260 nachlesen kann (siehe Bild 2); weiter oben war schon die Rede davon. Nun ist aber zu beachten, dass bei der Darstellung von Filterkurven die Frequenzachse normalerweise logarithmisch geteilt ist. Bei einer linear geteilten Frequenzachse würden Oktav- und Terzbänder mit steigender Frequenz immer breiter werden. Mit anderen Worten: Die spektrale Leistungsdichte steigt kontinuierlich mit der Frequenz an; in jedem Frequenzband entfällt mit steigender Frequenz immer mehr Leistung. Für Hörversuche verwendet man daher häufig statt weißem Rauschen, „rosa Rauschen“, bei dem die Intensität mit $1/f$, entsprechend -3 dB/Oktave abnimmt.

Beachtenswert ist auch noch ein Vergleich von Terz- und Oktavband-Schalldruckpegeln miteinander. Ein Oktavband enthält drei Terzbänder, wobei der jeweils höchste Terzpegel maßgebend den dazugehörigen Oktavbandpegel bestimmt, siehe Bild 4. Drei gleich hohe Terzpegel ergeben immer einen um 4,8 dB höheren Oktavpegel, gleichgültig welche Mittenfrequenz das Oktavband hat. Neben der frequenzmäßigen Beurteilung (Kurven A, B und C) des gemessenen Schallaufkommens besitzen Schallpegelmesser auch noch eine zeitliche Bewertungsmöglichkeit, und zwar mit den Bezeichnungen S (Slow), F (Fast) und I (Impulse).

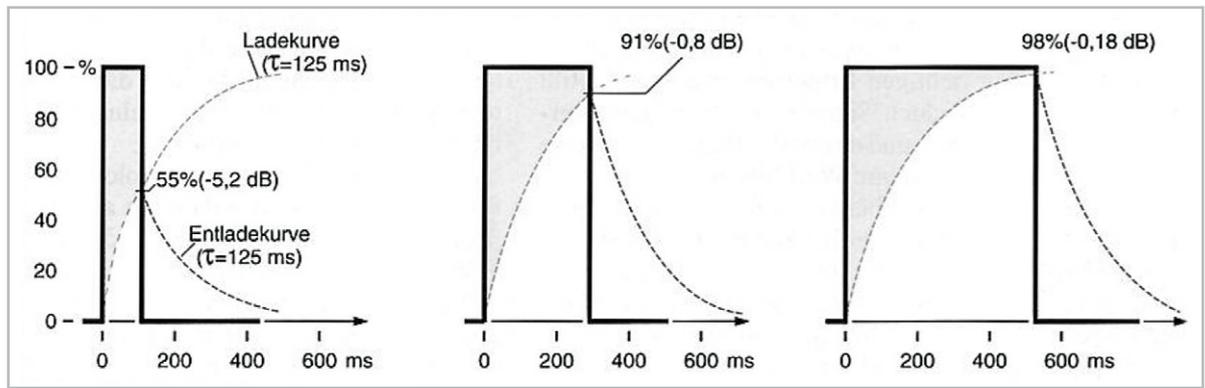
Das dafür zuständige Kästchen im Blockschaltbild (Bild 1) trägt die Bezeichnung „Effektivwertbildung/Zeitbewertung“. Die Wahl der richtigen Zeitbewertung ist sehr wichtig bei der Messung von zeitlich schnell veränderlichen Vorgängen. Das Bild 5 veranschaulicht das anhand eines sehr einfachen Beispiels, und zwar bei der Messung von Tonimpulsen mit einer Dauer von 100 ms, 300 ms und 500 ms. Bei der Zeitbewertung S erfolgen Signalanstieg und -abfall in 1000 ms, bei der Zeitbewertung F geschieht das in 125 ms, und bei I erfolgt der Signalanstieg in 35 ms und der Signalabfall in 1500 ms.

Schallschnelle und Schalldruckgradient

Neben dem Schalldruck p ist die Schallschnelle v die zweite und wichtigste Grundgröße zur Beschreibung akustischer Vorgänge. Der Schalldruck ist eine skalare, d. h. ungerichtete Größe, die Schallschnelle da-



Bild 5: Zeitlicher Verlauf der Pegelanzeige bei der Messung von Tonimpulsen mit einer Dauer von 100, 300 und 500 ms bei einer Zeitbewertung Fast (F) mit einer Zeitkonstanten τ von 125 ms, sowohl für den Signalanstieg als auch für den Signalabfall



gegen ist eine vektorielle und somit gerichtete Größe. Im Gegensatz zum Schalldruck war die Schallschnelle über viele Jahre hinweg eine mit praxisüblichen Geräten nicht messbare Größe. Erst nach der Schaffung von Schallintensitäts-Messgeräten konnte auch die Schallschnelle leicht und einfach gemessen werden. Der Quotient aus Schalldruck und Schallschnelle ergibt die spezifische Impedanz Z_s (im kugelförmigen Schallfeld) bzw. die Schallkennimpedanz Z_o (im ebenen Schallfeld), beide mit der Einheit: Ns/m^3 : Das Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle ergibt die Schallintensität I (Einheit: W/m^2), und die Intensität ergibt, multipliziert mit der durchschallten Fläche, die Schalleistung P_{ak} bzw. W_{ak} mit der Einheit Watt. Da die Symbole p bzw. P bei flüchtiger Schreibweise leicht miteinander verwechselt werden können, benutzt man für die Leistung auch das großgeschriebene Symbol W . Für den Schalleistungspegel wird der Index ohnehin mit einem großen W geschrieben: L_w .

Eine weitere, für die Akustik und ihre Messtechnik wichtige Größe ist der Schalldruckgradient $grad p$ (Einheit: N/m), eine ebenfalls gerichtete, vektorielle Größe. Sie gibt das „Druckgefälle“ in allen drei Raumrichtungen (x, y und z) an. Bei der Betrachtung der Schallausbreitung in nur einer Raumrichtung vereinfacht sich dieser Ausdruck zu $\Delta p/\Delta x$ bzw. zu $\Delta p/\Delta r$. Ohne die Mathematik tiefergehend zu bemühen, sei hier nur noch so viel festgehalten, dass der Schalldruckgradient stets direkt proportional mit der Frequenz ansteigt und die physikalische Grundlage bildet für alle Richtmikrofone, siehe auch: Gradientenmikrofone, mit Achtercharakteristik. Mikrofone dieser Art eignen sich z. B. auch zu Ortungszwecken. Später mehr darüber.

Schalldruckpegel:	$L_p = 20 \cdot \lg p/p_0$; $p_0 = 20 [\mu Pa]$
Schallschnellepegel:	$L_v = 20 \cdot \lg v/v_0$; $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} [m/s]$
Schallintensitätspegel:	$L_I = 10 \cdot \lg I/I_0$; $I_0 = 10^{-12} [W/m^2]$
Schalleistungspegel:	$L_w = 10 \cdot \lg W_{ak}/W_{ak0}$; $W_{ak0} = 10^{-12} [W]$

Bild 6: Die gebräuchlichsten und am meisten gemessenen Pegel in der Akustik und ihre Definition

ristik. Mikrofone dieser Art eignen sich z. B. auch zu Ortungszwecken. Später mehr darüber.

Intensitäts- und Schalleistungsmessung

Auch bei der Schallintensität und Schalleistung arbeitet man mit Pegeln (Bild 6), d. h. mit logarithmierten Größen, so wie wir das auch von den Schalldruckpegeln her kennen. Nur haben wir es hier mit quadratischen Beziehungen zu tun ($I \sim p^2$ bzw. $W_{ak} \sim p^2$). Das hat zur Folge, dass sowohl beim Schallintensitätspegel L_I als auch beim Schalleistungspegel L_w keine 20, sondern nur eine 10 vor dem Logarithmuszeichen steht. Für die direkte Messung der Schallintensität gibt es heute eine eigens dafür geschaffene Intensitäts-Messsonde, sie besteht aus zwei Schalldruckmessmikrofonen, die sich in einem ganz bestimmten Abstand Δx bzw. Δr , „face-to-face“ gegenüberstehen, siehe Bild 7.

Zwischen den beiden Mikrophonkapseln befinden sich Distanzstücke unterschiedlicher Länge (abhängig vom zu messenden Frequenzbereich), deren Aufgabe darin besteht, die Ausbildung von Resonanzen zwischen beiden Kapseln zu vermeiden. Das Richtdiagramm einer solchen Schallintensitäts-Messsonde hat die Form der Ziffer „8“ (Bild 8). Man spricht daher auch von einem „Achterdiagramm“, mit zwei ausgeprägten Empfindlichkeitsminima bei 90° und bei 270° . Damit ist die Intensitäts-Messsonde auch besonders gut zu Ortungszwecken von unbekanntem Schallquellen geeignet.

Die der Sonde nachgeschaltete Elektronik sorgt dafür, dass aus den von beiden Mikrofonen abgegebenen Signalen ein einziges Signal gebildet wird, das der Schallintensität genau entspricht. Das Bild 9 zeigt zwei Schaltungsbeispiele aus der Anfangszeit zur direkten Messung und Anzeige der Schallintensitäts-

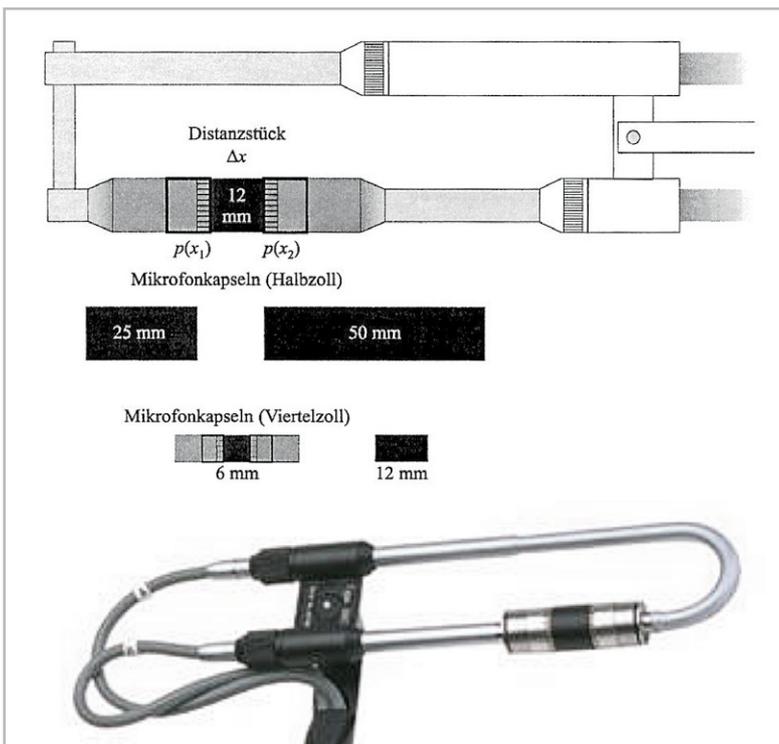


Bild 7: Aufbau einer Schallintensitäts-Messsonde (Zweimikrofon-Technik) mit Distanzstücken. Obere Darstellung: Prinzip-Zeichnung, untere Darstellung: praktische Ausführung

tät a) nach dem Summen- und Differenzverfahren mit anschließender FFT und b) nach dem Verfahren mit unmittelbar nachfolgender FFT.

Mit der Schallintensitäts-Messsonde können auch Schallleistungsmessungen durchgeführt werden. Ungeachtet dessen wird die Schallleistung auch heute noch nach der bisher üblichen Methode, entweder im reflexionsarmen Messraum oder auch im Hallraum gemessen. Bild 10 zeigt die Vorgehensweise bei der Leistungsbestimmung in einem reflexionsarmen Raum, und zwar nach dem Hüllflächen-Verfahren, z. B. nach DIN EN ISO 3745.

Danach erfolgt die Messung an mindestens zehn verschiedenen Messorten auf einer halbkugelförmig gedachten Messfläche über einem schallhart reflektierenden Boden. Die Messpunkte sind so verteilt, dass der Winkel zwischen je zwei benachbarten Messpunkten für alle Messorte gleich groß ist. Aus der Mittelung aller zehn auf diese Weise gewonnenen Messwerte kann auf die Schallleistung der untersuchten Schallquelle geschlossen werden. Übrigens, bei einem Hüllflächenradius von $r = 0,4 \text{ m}$ ist die Oberfläche der Halbkugel $2\pi r^2 = 1 \text{ m}^2$ und der gemessene und gemittelte Schalldruckpegel L_p zahlenmäßig, und (nur!) zahlenmäßig, gleich dem Schallleistungspegel L_w .

Korrelationsanalyse

Bei der Lösung von akustischen und schwingungstechnischen Aufgaben kann die Korrelationsmesstechnik eine sehr wertvolle Hilfe sein, sei es bei der Messung und Analyse von nichtperiodischen Signalen, die bereits weit unterhalb des Rauschpegels liegen (Autokorrelation), oder aber bei der Detektion und Lokalisation von (Stör-)Schallquellen (Kreuzkorrelation). Die Korrelationsanalyse ermöglicht es, eine Aussage über den Grad einer strukturellen Verwandtschaft oder Ähnlichkeit zwischen zwei stationären Signalen $s_1(t)$ und $s_2(t)$ zu machen, die als Zeitfunktion vorliegen. Es wird dabei festgestellt, in welchem Maße das Signal $s_1(t)$ mit dem um eine bestimmte Zeit τ verzögerten Signal $s_2(t+\tau)$ noch korreliert. Als Ergebnis be-

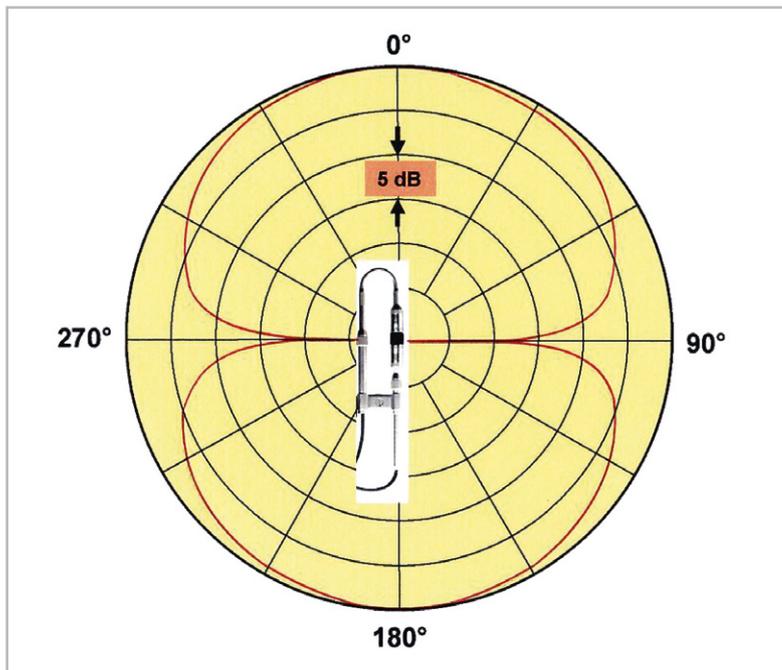


Bild 8: Richtdiagramm der Schallintensitäts-Messsonde („Achtercharakteristik“) mit Empfindlichkeitsmaxima bei 0° und 180° bei einer Frequenz von $1,0 \text{ kHz}$. Infolge der beiden sehr scharf ausgeprägten Minima bei 90° und 270° eignet sich die Sonde besonders gut auch zur Ortung von unbekanntem Schallquellen.

kommt man die verzögerungszeitabhängige Korrelationsfunktion $k_{12}(\tau)$. Die Einheit der Korrelationsfunktion ist die einer quadratischen Größe, z. B. V^2 , Pa^2 o. ä. Die gesamte Korrelationsanalyse besteht aus den drei Operationen: a) Zeitverschiebung, b) Produktbildung und c) zeitliche Mittelwertbildung, nichts anderes beinhaltet die Formel (Bild 11).

Wiederholt man diese Rechenoperation für beliebig viele, voneinander verschiedene Zeitverschiebungswerte τ , so kann man die Funktion $k_{12}(\tau)$ durch einen zusammenhängenden Kurvenzug darstellen. Da hier die korrespondierenden Eigenschaften von zwei verschiedenen Signalen untersucht werden, bezeichnet man $k_{12}(\tau)$ als Kreuzkorrelationsfunktion. In analoger Weise kann man auch nur ein einziges Signal analysieren, indem man seine strukturelle Ähnlichkeit mit „sich selbst“ bei verschiedenen Verzögerungszeiten τ feststellt. Von der Zielsetzung her mutet das zunächst sonderbar an, ist aber für die Praxis eine wichtige Messgröße. Die sich dabei ergebende Korrelationsfunktion $k_{11}(\tau)$ bezeichnet man als

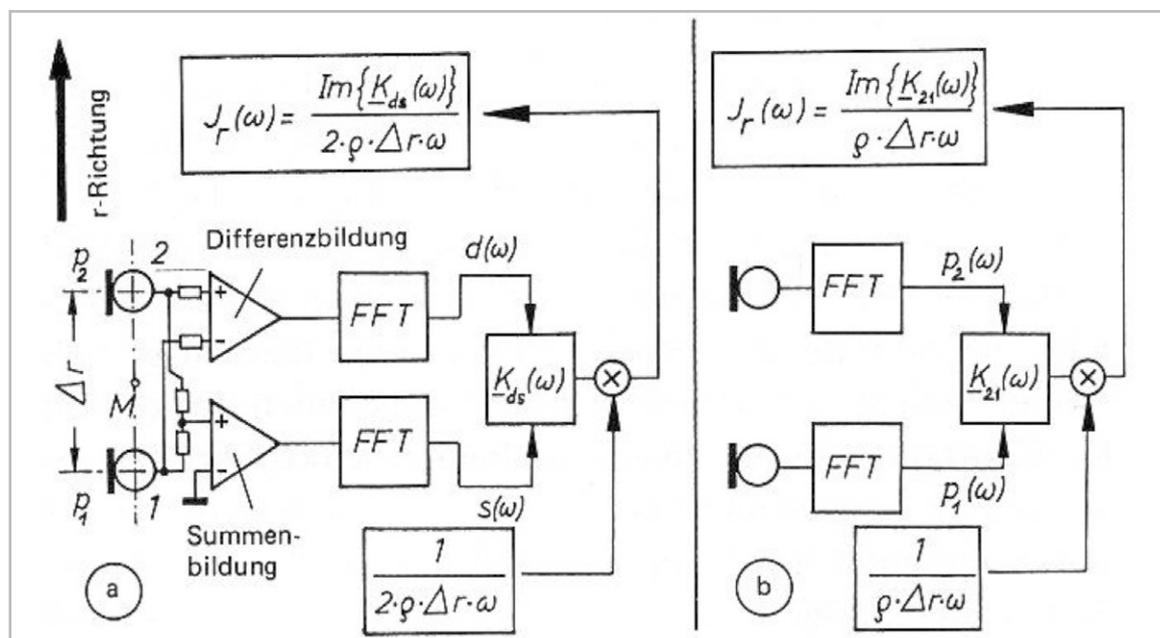


Bild 9: Blockschaltbilder zweier Methoden aus der Anfangszeit der direkten Messung der Schallintensität mittels einer Zweimikrofon-Intensitätssonde gemäß Bild 8. a) Summen- und Differenzverfahren mit anschließender FFT b) Verfahren mit sofort folgender FFT



Autokorrelationsfunktion. Ihre grafische Darstellung ergibt an der Stelle $\tau = 0$, d. h. für $k_{11}(0)$, unabhängig vom zeitlichen Verlauf des zu analysierenden Signals, stets ein positives Maximum. D. h. zwischen beiden Signalen $s_1(t)$ und $s_1(t+0)$ besteht Identität und somit ein Höchstmaß an Ähnlichkeit. Physikalisch von Bedeutung ist die Funktion $k_{11}(0)$ noch insofern, als sie der (Auto-)Signalleistung proportional ist.

Für die praktische Durchführung von Korrelationsanalysen gibt es sehr leistungsfähige und relativ einfach zu bedienende Messgeräte, bei denen die Infinitesimalrechnung durch eine endliche Reihenbildung approximiert wird. Aus der Korrelationsfunktion $k_{12}(\tau)$ kann man mithilfe der Fourier-Transformation (= Übergang vom Zeitbereich in den Frequenzbereich) die spektrale Kreuz-Leistungsdichte des zu analysierenden Signals $K_{12}(\omega)$ bekommen.

Das Bild 12 zeigt als Beispiel für die praktische Anwendung der Korrelationsanalyse die Bestimmung der verschiedenen Schallausbreitungswege in einem geschlossenen Raum mithilfe von breitbandigem Rauschen. Beschallt man einen Raum z. B. mit breitbandigem Rauschen $s_1(t)$ und führt man mit dem nach einer bestimmten Laufzeit wieder empfangenen Signal $s_2(t)$ eine Kreuzkorrelation durch, so erscheint im Korrelogramm ein Maximum an einer Stelle τ , die der Laufzeit des Signals entspricht. Auf diese Weise kann man die Entfernung und die Richtung einer Geräuschquelle sehr genau bestimmen. Bei mehreren Signalübertragungswegen erscheinen im Kreuzkorrelogramm entsprechend viele Maxima (Bild 12).

Weitere Anwendungsbeispiele für die Korrelationsanalyse in der Akustik sind neben der Schallquellenlokalisierung, die Leckortung bei Wasserleitungsnetzen, die Messung der Impulsantwort δ in der Raumakustik bei Anregung mit weißem Rauschen, die Messung der Schallabsorption α bei schrägem Schalleinfall [2], die Ermittlung verschiedener Signalübertragungswege u. v. m.

Cepstrum

Zunächst zum Begriff: Der Name Cepstrum ist ein Kunstwort, entstanden aus der Vertauschung der ersten vier Buchstaben des Wortes Spectrum. Das Messfahren und das Wort Cepstrum wurden erstmals 1963 von Bogert, Healy und Tukey [3] vorgestellt. Das Cepstrum wird seitdem in der Praxis dazu verwendet, um periodische Strukturen von Frequenzspektren zu analysieren. Derartige Strukturen können in harmonischen Frequenzgängen auftreten, z. B. bei Obertönen. Die mathematische Behandlung dieses Themas würde an dieser Stelle zu weit führen. Zum einfacheren Verständnis dieses Analyseverfahrens sei nur so viel gesagt, dass es sich beim Cepstrum um eine inverse Faltung (Dekonvolution) von Signalen im Frequenzbereich handelt.

Bild 13 veranschaulicht das.

Hierbei werden periodisch wiederkehrende Veränderungen im Frequenzspektrum so behandelt, als seien sie periodische Schwingungen im Zeitbereich. Das ist die Kernidee der Cepstrumanalyse. Als Ergebnis be-

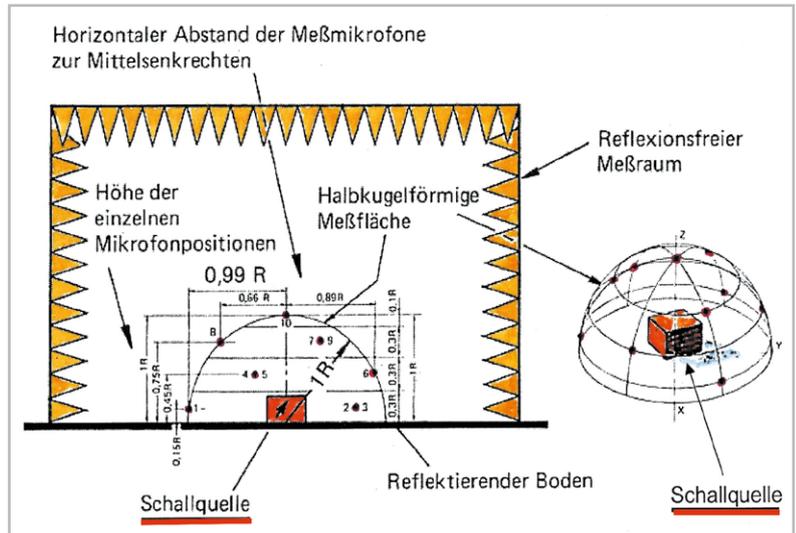


Bild 10: Messung der Schalleistung W_{ak} einer Schallquelle nach dem Hüllflächen-Verfahren im freien Schallfeld eines reflexionsarmen Messraums. Bei Schalleistungsmessungen nach DIN EN ISO 3745 und Güteklasse 1 sind mindestens zehn Messpunkte erforderlich. Die obige Darstellung zeigt so eine Anordnung (schematisch) mit zehn Mikrofonen an zehn Messorten auf einer halbkugelförmigen Messfläche über einem schallhart reflektierenden Boden. Die Mikrofonpositionen sind so verteilt, dass der Winkel zwischen je zwei benachbarten Messpunkten für alle Messorte gleich groß ist.

$$k_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \cdot \int_{-T}^{+T} s_1(t) \cdot s_2(t + \tau) dt$$

$$= s_1(t) \cdot s_2(t + \tau)$$

τ = Verzögerungszeit oder Zeitverschiebungsparameter
 T = Integrations- oder Beobachtungszeit

a) Zeitverschiebung um τ
 b) Produktbildung
 c) Zeitliche Mittelwertbildung

Bild 11: Die Kreuzkorrelationsfunktion $k_{12}(\tau)$ und ihr Inhalt – verständlich erklärt

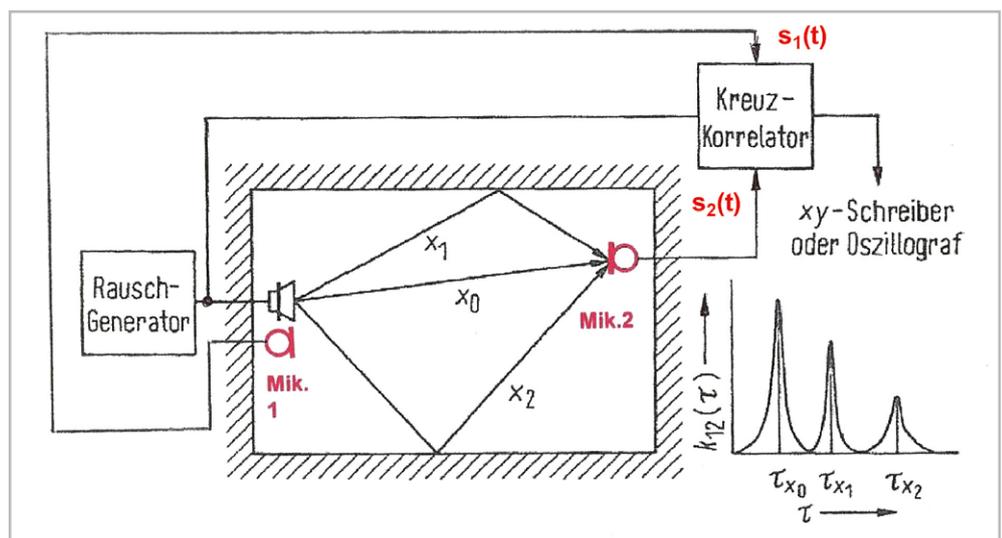


Bild 12: Darstellung mehrerer Schallübertragungswege innerhalb eines geschlossenen Raums durch ein Kreuzkorrelogramm. Existieren mehrere Ausbreitungswege (hier z. B. 0,1, 2), so ergeben sich im Kreuzkorrelogramm $k_{12}(\tau)$ entsprechend viele Maxima, deren τ -Werte ein Maß für die Laufzeiten sind.

kommt man das schon erwähnte Cepstrum, und zwar als Funktion der sogenannten Quefrequency, ebenfalls ein Kunstwort (gebildet aus dem Wort „fre-que-ncy“), mit der Dimension „einer Zeit“.

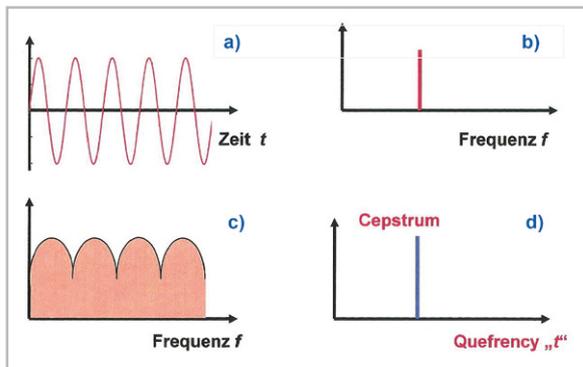


Bild 13: Veranschaulichung des Begriffs „Cepstrum“. Die obere Bildreihe zeigt eine sinusförmige Schwingung a) im Zeitbereich, die nach der Transformation in den Frequenzbereich dort als einzelne Spektrallinie b) erscheint. Etwas Analoges geschieht mit periodischen Schwankungen im Frequenzbereich c), wie das z. B. bei Sprachsignalen der Fall ist. Dort gelangt man durch eine inverse Faltung zum Cepstrum d), und zwar als Funktion der sogenannten „Quefrequency“ mit der Dimension einer „Zeit“. Der Sinn dieser zunächst befremdlichen Operation wird durch das Beispiel in Bild 14 verständlicher.

Den Sinn dieser zunächst befremdlich anmutenden Operation veranschaulicht das Bild 14 anhand eines leicht verständlichen Beispiels aus der Praxis. Es handelt sich hier um einen gesprochenen Vokal, quasi als „Generatorsignal“, und dem davor befindlichen Stimmkanal, quasi als „Übertragungsstrecke“. Beide zusammen ergeben das „Ausgangssignal“, das den Mund verlässt. Aus dem davon gebildeten Cepstrum kann man umgekehrt die beiden Anteile, Generator und Übertragungsstrecke, getrennt voneinander zurückbestimmen, was sonst, ohne Kenntnis einer der beteiligten Teile nicht möglich ist.

Übrigens, die „Väter“ der Cepstrumanalyse [3] hatten neben ihrem Fachwissen zweifellos Humor, siehe dazu auch die weiteren Fachausdrücke [4]:

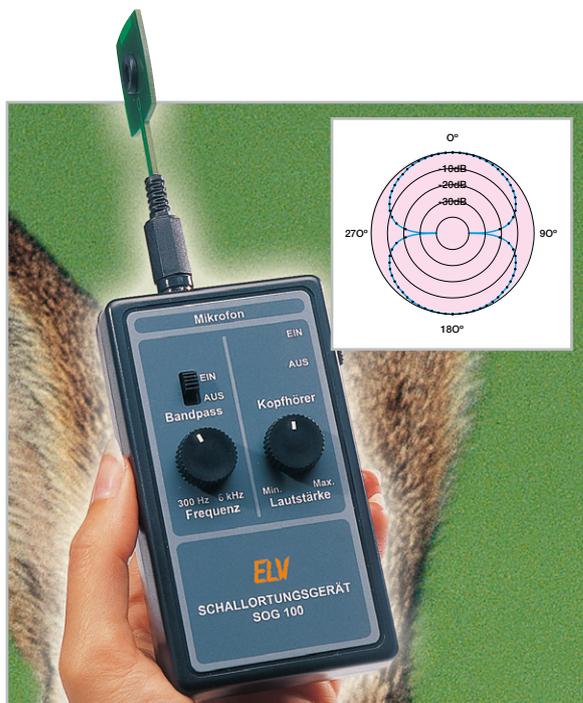


Bild 15: Schallortungsgerät SOG 100 (ELVjournal 4/2003, S. 61–67), ausgerüstet mit einem Gradientenmikrofon, das dank seiner völlig symmetrischen Achtercharakteristik Geräuschquellen sehr genau orten kann, und zwar durch Minimumpeilung von zwei verschiedenen Orten aus.

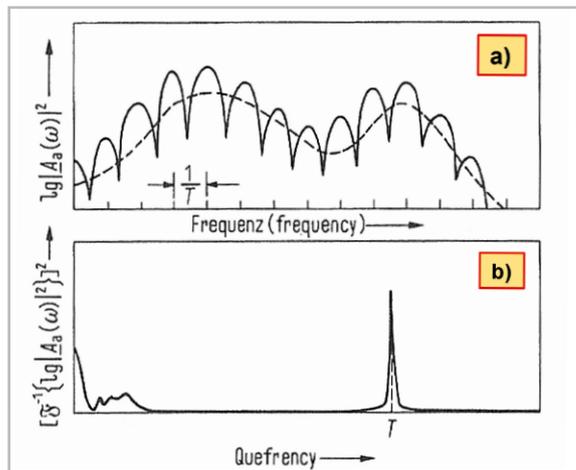


Bild 14: Cepstrum (Kunstwort, gebildet aus dem Wort „spec-trum“) a) Logarithmiertes Leistungsspektrum eines gesprochenen Vokals
 — Vokalbildung ($1/T =$ spektrale Periodizität)
 - - - Stimmkanal
 b) Dazugehöriges Cepstrum mit scharf ausgeprägter Spitze bei T , die die Vokalbildung beschreibt.

Quefrequency von fre-que-ncy
 Lifter von fil-ter
 Gamnitude von mag-nitude (amplitude)
 Saphe von ph-as-e
 Rahmonics von har-monics usw.

Akustische Peilung

Zum Abschluss noch eine Anmerkung zum Thema akustische Peilung. Das kann mit sehr scharf bündelnden Richtmikrofonen o. Ä. geschehen. Die effektivste Methode zur Ortung von Schallquellen ist die „Minimumpeilung“, und zwar unter Ausnutzung der extrem scharfen Minima von Gradienten- oder Achtermikrofonen. Ein derartiges Richtdiagramm wurde schon bei der Behandlung der Schallintensitäts-Messsonde (Bild 8) vorgestellt. Mit einem solchen Achtermikrofon kann man jede störende Schallquelle von zwei verschiedenen Orten aus anpeilen, indem man die Richtungen feststellt, aus denen das Signal einfällt, und zwar mit minimalster Lautstärke. Der Schnittpunkt dieser Richtungslinien ergibt den Ort der gesuchten Quelle. Der „sicherste“ Indikator zur Anzeige der gesuchten Minima ist im Übrigen immer noch unser Gehör. Über ein komplettes Schallortungsgerät nach diesem Prinzip wurde vom Autor dieses Beitrages bereits in einer früheren Ausgabe des ELVjournals [5] berichtet, siehe auch Bild 15. ELV



Weitere Infos:

- [1] Veit, I.: „Der Schallpegelmessger – ein unentbehrliches Messgerät für den Umweltschutz“, ELVjournal 1998
 Teil 1 – Artikel-Nr. 202259; Teil 2 – Artikel-Nr. 202277;
 Teil 3 – Artikel-Nr. 202303
- [2] Veit, I.: „Anwendung der Korrelationsmesstechnik in der Akustik und Schwingungstechnik“: Acustica 35 (1976), S. 219–231
- [3] Bogert, B. P., Healy, W. J. R., Tukey, J. W.: „The Quefrequency Analysis of Time Series for Echoes: Cepstrum, Pseudo-Autocovariance, Cross-Cepstrum and Saphe Cracking“. Published in: Proceedings of Symposium on Time Series Analysis by Rosenblatt, M., (Ed.), Wiley, N. Y., 1963, pp. 209–243.
- [4] Hesselmann, N.: „Digitale Signalverarbeitung“, Vogel-Buchverlag Würzburg, 2. Auflage, 1987, S. 163–170
- [5] Veit, I.: „Schallortungsgerät SOG 100“, ELVjournal 4/2003 (S. 61–67) – Artikel-Nr. 201330