

Betriebs-TPA zur Trennung von körper- und wasserschallinduzierten Eigenbootgeräuschen in Antennen

Stephan Schulze

ATLAS ELEKTRONIK GmbH, 28309 Bremen, E-Mail: stephan.schulze@atlas-elektronik.com

Einleitung

Für die Entwicklung hydroakustischer Empfangsantennen ist die Erzielung einer maximalen akustischen Entkopplung gegenüber dem emittierten Eigengeräusch der Trägerplattform ein entscheidendes Designkriterium. Insbesondere im Bereich niederfrequenter Sonaranwendungen ($\leq 500\text{Hz}$) stellt das in die Antennen eingekoppelte Eigenbootgeräusch eine limitierende Größe für die realisierbare Detektionsleistung dar. Die Kenntnis pegeldominanter Schallübertragungspfade ist hinsichtlich der Erzielbarkeit einer wirkungsvollen Störschallentkopplung daher von immensem Interesse. Eine essentielle Fragestellung ist die spektrale Verteilung des von den Antennen empfangenen Eigenbootgeräusches in seine körper- und wasserschallinduzierten Anteile.

Möglichkeiten zur Beantwortung bieten die verschiedenen Methoden der Transferpfadanalyse (TPA). „Klassische“ TPA-Methoden setzen die messtechnische Ermittlung von Übertragungsfunktionen voraus. Für Unterwasseranwendungen ist dieser Ansatz messtechnisch nicht praktikabel.

Ein Verfahren, welches die messtechnischen Einschränkungen der „klassischen“ TPA umgeht, ist die Betriebs-TPA. Der Hauptunterschied zur „klassischen“ TPA liegt darin, dass sie auf eine Berechnung von Betriebsgrößen an den Schalleinleitungsstellen verzichtet und somit nicht auf einer messtechnischen Ermittlung von Übertragungsfunktionen basiert. Alle benötigten Messungen werden ohne zwischenzeitlichen Teileausbau oder sonstige bauliche Veränderungen durchgeführt.

Die Betriebs-TPA wurde hinsichtlich der Trennbarkeit von körper- und wasserschallinduzierten Geräuschanteilen in Antennen anhand von Prinzipversuchen an einem Flank Array (FA), montiert auf einer miniaturisierten Nachbildung einer Sektion eines U-Boot-Druckkörpers (Minisektion), validiert. Das Verfahren, der Messaufbau und die Untersuchungsergebnisse werden erläutert und hinsichtlich der Einsatzfähigkeit bei Störschalluntersuchungen auf Plattformen bewertet.

Algorithmus der Betriebs-TPA

Die Methode der Betriebs-TPA (oft bezeichnet als Operationelle Transferpfadanalyse, OTPA) wurde ursprünglich zur Identifikation einzelner Geräuschbeiträge des Fahrzeug-Innengeräusches entwickelt [1] und unter anderem in [2] und [3] angewendet und detailliert beschrieben. Sie ermöglicht eine sehr schnelle Analyse pegeldominanter Schallbeiträge an einem (Stör-)Geräusch auf Basis weniger Betriebsmessungen.

Ihre mathematische Theorie basiert auf der sogenannten Hauptkomponentenanalyse (PCA – Principal Component

Analysis). Mit Hilfe dieses Verfahrens werden die Beziehungen $H(\omega)$ zwischen den M Pfadeingängen $X(\omega)$ und einem Empfangspunkt $Y(\omega)$ auf statistische Weise ermittelt:

$$\begin{pmatrix} H_1(\omega) \\ \vdots \\ H_M(\omega) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11}(\omega) & X_{12}(\omega) & \cdots & X_{1M}(\omega) \\ X_{21}(\omega) & X_{22}(\omega) & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ X_{N1}(\omega) & \cdots & \cdots & X_{NM}(\omega) \end{pmatrix}^+ \times \begin{pmatrix} Y_1(\omega) \\ \vdots \\ Y_N(\omega) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Diese Beziehungen $H(\omega)$, in der Literatur präziser bezeichnet als Transferkoeffizienten oder Durchlässigkeiten, werden mittels PCA aus einer großen Anzahl N möglichst unkorrelierter Betriebszustände erzeugt (Richtwert für die Überbestimmung: $N > 3 \cdot M$). Durch abschließende Multiplikation der in (1) berechneten Transferkoeffizienten $H(\omega)$ mit den im zu analysierenden Betriebszustand i an den M verschiedenen Übertragungspfaden gemessenen Signalen $X_{i1}(\omega)$ ergibt sich die am Empfangspunkt entstehende Betriebsgröße $Y_{\text{synth},i}(\omega)$:

$$Y_{\text{synth},i}(\omega) = \begin{pmatrix} X_{i1}(\omega) & \cdots & X_{iM}(\omega) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} H_1(\omega) \\ \vdots \\ H_M(\omega) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Die Synthetisierung eines Empfangssignals $Y_{\text{synth},i}(\omega)$ aus einer Summation an Quellbeiträgen wird bezeichnet als Transferpfadsynthese (TPS). Zur Überprüfung der Qualität der TPS können die Einzelbeiträge zu einem Gesamtsignal $Y_{\text{synth},i}(\omega)$ aufsummiert und mit dem gemessenen Gesamtbeitrag $Y_{\text{mess},i}(\omega)$ verglichen werden.

Durch die der PCA innewohnenden Dekorrelation der Daten ist es möglich, körper- und wasserschallinduzierte Schallbeiträge sauber voneinander zu trennen. Durch sorgfältige Selektion und Positionierung der Referenzsensoren können so die Beiträge der M einzelnen Übertragungspfade einer Schallquelle an einem Empfangssignal $Y_i(\omega)$ ermittelt werden.

Messaufbau und Ergebnisse

Abb. 1 zeigt eine schematische Darstellung des realisierten Messaufbaus. An unterschiedlichen Orten in einer U-Boots-Minisektion wurden Shaker positioniert, die breitbandige Dauerausgangssignale in die Struktur einleiten. Diese breiten sich über verschiedene Körper- und Wasserschallpfade aus und überlagern sich an den Empfangshydrophonen einer auf der Sektion montierten FA-Antenne zu einem Gesamtgeräusch. Dieses ist mittels dort positionierter Referenzsensoren und der oben beschriebenen OTPA-Methodik aufzutrennen in körper- und wasserschallinduzierte Signalanteile.

Der über Wasserschalltransferpfade in ein Empfangshydrophon eingekoppelte Geräuschanteil wird dabei von den Signalen eines Referenzhydrophons repräsentiert, welches ohne mechanische Verbindung zum Untersuchungsobjekt frei vor

diesem positioniert wurde. Ein Übersprechen von Körperschallanteilen auf das Referenzhydrophon ist auf diese Weise weitgehend ausgeschlossen. Die über Körperschall in das FA-Empfangshydrophon eingekoppelten Geräuschanteile werden von den Signalen eines Beschleunigungsaufnehmers repräsentiert. Durch die Auswahl eines triaxialen Beschleunigungssensors ist sichergestellt, dass in der Analyse alle 3 translatorischen Schwingungskomponenten berücksichtigt wurden.

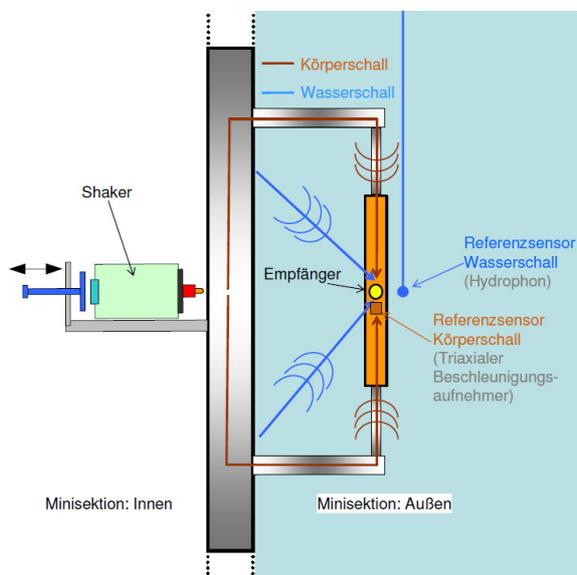


Abbildung 1: Messaufbau zur Trennung von körper- und wasserschallinduzierten Geräuschen eines Staves einer FA-Empfangsantenne.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse der Betriebs-TPA im relevanten Frequenzbereich ≤ 500 Hz. Dies ist erfahrungsgemäß der Bereich in dem sich Eigenbootgeräusche in Antennen abbilden und die Detektionsleistung negativ beeinflussen. Der Frequenzbereich < 100 Hz ist nicht dargestellt, da mit den eingesetzten Shakern dort kein ausreichendes Signal-/Rausch-Verhältnis (SNR) erzielt werden konnte.

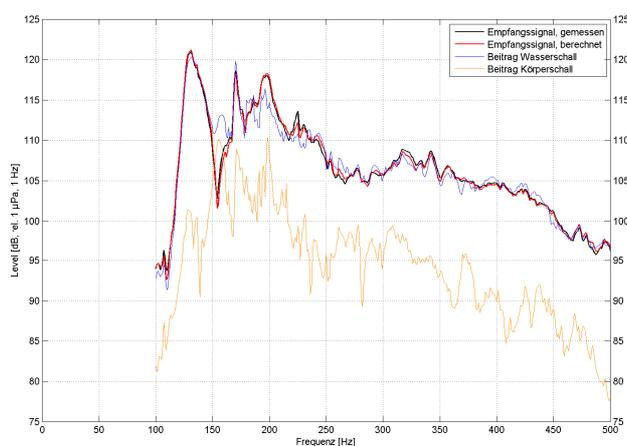


Abbildung 1: Vergleich gemessener und berechneter Schalldruckpegel und Aufteilung in körper- und wasserschallinduzierte Anteile.

Zu erkennen ist, dass der an einem FA-Staff gemessene Schalldruckpegel (schwarze Kurve) und der aus den Messdaten der Referenzsensoren synthetisierte Schalldruckpegel (rote Kurve) nahezu identisch sind. Die Betrachtung der

prognostizierten Partialbeiträge ergibt, dass der an einem FA-Staff gemessene Schalldruckpegel dominiert ist von Wasserschall, der von den schwingenden Strukturen der umgebenden Minisektion und den darauf montierten FA-Komponenten abgestrahlt wird. Körperschalleinkopplungen über die Anbindungspunkte der FA-Staffe haben im betrachteten Frequenzbereich einen vernachlässigbaren Einfluss auf den gemessenen Schalldruckpegel.

Übertragen auf die Ergebnisse von Eigenstörerschalluntersuchungen auf U-Booten, führt dies zu dem Schluss, dass sich der am FA gemessene Eigenstörpegel maßgeblich aus abgestrahltem Wasserschall der Bootsstrukturen und Strömungsgeräuschen zusammensetzt. Die Körperschallentkopplung des FA ist im Frequenzbereich > 100 Hz als äußerst wirksam zu bewerten und gibt diesbezüglich keinen Anlass für konstruktive Modifikationen.

Fazit / Ausblick

Die Betriebs-TPA stellt ein effektives akustisches Analysewerkzeug dar, das unter Kenntnis und sorgfamer Berücksichtigung der messtechnischen und signalanalytischen Randbedingungen in der Praxis schnell und vielseitig einsetzbar ist und bei sorgfältiger Anwendung qualitative Ergebnisse von hoher Genauigkeit liefert. Voraussetzung hierfür ist, dass alle relevanten Schallpfade vorab zu identifizieren und mit geeigneten Referenzsensoren auszustatten sind, dessen Messsignale in vernachlässigbarem Ausmaß von Anteilen benachbarter Schallpfade überlagert sind.

Die ATLAS ELEKTRONIK GmbH ist spezialisiert auf die Entwicklung von maritimen Produkten für den Einsatz in akustisch sensibler Umgebung. Speziell im Bereich der U-Boote und Marinewaffen stellen bereits minimale Schallemissionen wichtige Eigenschaften dar, an deren Beseitigung kundenseitig höchste Anforderungen gestellt werden. Die Betriebs-TPA kann in diesem Zusammenhang wertvolle Erkenntnisse liefern. Frequenzselektiv können pegeldominante Schallbeiträge/-übertragungswege eines Störgeräusches identifiziert werden, woraus gezielt konstruktive Maßnahmen zur wirkungsvollen Reduktion der Störschallemission abgeleitet werden können. Primäre Einsatzgebiete bei der ATLAS ELEKTRONIK GmbH sind Anwendungen zur Analyse und Optimierung der Schallübertragungswege bei allgemeinen Störerschalluntersuchungen auf Plattformen als auch an Laufkörpern, Windensystemen und tieffrequenten Empfangsantennen.

Literatur

- [1] Noumura, K., Yoshida, J.: Method of transfer path analysis for vehicle interior sound with no excitation experiment. FISITA (2006) World Automotive Congress, JASE, 2006
- [2] Lohrmann, M.: Beitragsanalyse am Beispiel der simulierten Vorbeifahrt mit Hilfe der TPA. 6. Magdeburger Symposium Motor- und Aggregate-Akustik 2011, Magdeburg, 2011
- [3] De Klerk, D., Ossipov, A.: Operational Transfer Path Analysis: Theory, Guidelines & Tire Noise Application. MSSP 24, p. 1950-1962, Delft, 2010