

Körperschalloptimierung eines militärischen Echolotes für U-Boote

Sten Böhme¹

¹ Wartsilä ELAC Nautik GmbH, 24118 Kiel, E-Mail: sten.boehme@elac-wartsila.de

Einleitung

In den letzten Jahrzehnten ist die Leistungsfähigkeit der SONAR- Anlagen (engl. Abk.: **s**ound **n**avigation **a**nd **r**anging) für die U-Boot-Jagd gestiegen. Dies führt wiederum zu erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Reduktion von Geräuschsignaturen bei U-Booten. Unter anderem sind dabei technische Anlagen betroffen, die Körperschall in die U-Boot Struktur einbringen. Durch unterschiedliche Übertragungswege kann dieser als abgestrahlter Wasserschall zu der Geräuschsignatur beitragen. Deshalb werden für die meisten technischen Geräte Körperschallgrenzkurven definiert, die nicht überschritten werden sollen. Solche Grenzwerte gelten auch für militärische Echolot-Anlagen. Ein typisches System für U-Boote besteht aus elektroakustischen Wandlern, Druckkörperdurchführungen, Anschlusskästen und einer Sende- Empfangs- und Bedieneinheit (SEB), siehe Abbildung 1. In der hier vorgestellten SEB sind mehrere Lüfter im Netzteil und im Gehäuse verbaut. Sie sind die einzigen Körperschallerzeuger. In diesem Beitrag wird die Optimierung einer bestehenden Bedieneinheit hinsichtlich Körperschall erläutert, dabei wird unter anderem auf die getroffenen Entkopplungsmaßnahmen für das Netzteil und die damit erzielten Körperschallreduktionen eingegangen.



Abbildung 1: Sende- Empfangs- und Bedieneinheit SEB 5900 für militärisches Echolot auf Feder-Dämpfer-Elementen (Hutelemente)

Körperschallanforderungen im U-Boot-Bau

Die für den Luftschall, Wasserschall und Körperschall maßgebende nationale Vorschrift für den militärischen Schiffbau fordert, dass die Anregung der U-Boot Struktur zu begrenzen ist, um unzulässig hohe Wasserschallabstrahlung zu vermeiden [1]. Solche Forderungen bestehen auch auf

internationaler Ebene. Die damit verlangte Signaturreduktion führt zu entsprechenden Vorgaben gegenüber der Werft, welche die U-Boote baut. Daraus abgeleitet werden Körperschallgrenzwerte, die an Zulieferer von z.B. elektrischen Anlagen weitergeben werden. Der damit verbundene Leistungsnachweis kann auf dem Schiff, auf einem Prüffeldfundament oder durch die Vermessung der Körperschallquellenpegel erfolgen. Da die Verfügbarkeit von geeigneten Prüffeldfundamenten oft nicht gegeben ist, wird vor dem Einbau in das U-Boot eine Vermessung der Körperschallquellenpegel favorisiert. Dazu wird das zu testende Gerät mittels geeigneter Feder-Dämpfer-Elemente von der Umgebung (massives Fundament) entkoppelt, siehe auch [2]. Die Lagerungsfrequenz muss dabei deutlich unterhalb der niedrigsten Erregerfrequenz des zu vermessenden Gerätes liegen. Die Körperschallpegel werden oberhalb der Feder-Dämpfer-Elemente in der Nähe der Aufnahmepunkte vermessen und entsprechend der Vorgaben ausgewertet. In Abbildung 2 werden exemplarisch mögliche Körperschallgrenzkurven als Schnellepegel gezeigt, diese sind in der Regel als geheim eingestuft. Deshalb werden hier nur charakteristische Verläufe der Pegel ohne Referenz dargestellt. Für militärische Vorschriften nach amerikanischem Vorbild [2], siehe Referenz MIL-STD in Abbildung 2, entspricht die Vorgabe für ähnliches Gerät einer Linie mit einem Abfall von 6 dB/Oktave. Andere Spezifikationen beinhalten Bereiche konstanter Schnelle im tieferen Frequenzbereich mit einem Abfall zu höheren Frequenzen. Zusätzliche Anforderungen für schmalbandige (1Hz) Pegel treten ebenfalls auf. Die Grenzkurven können für jede Richtung und für jeden Messpunkt gelten oder auf das Energetische Mittel bezogen sein.

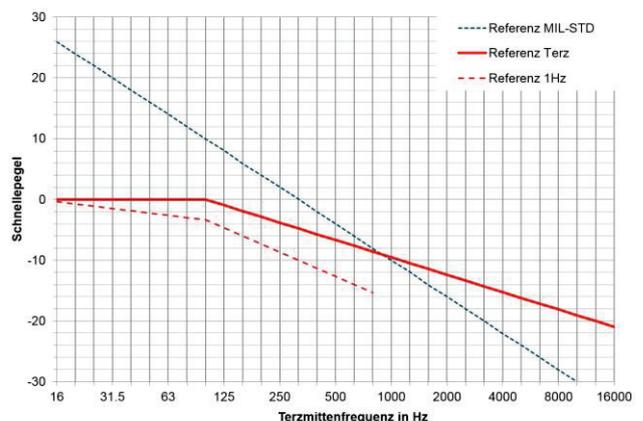


Abbildung 2: Beispiele für Körperschallgrenzkurven

Die in Abbildung 2 dargestellte rote Linie wird im Fortlauf dieses Beitrages als mögliche Vorgabe für die Körperschallgrenzwerte angenommen.

Istzustand vor der Optimierung

Als Erstes wird eine SEB 5900 exemplarisch vermessen, um den Istzustand aufzunehmen. Dazu wird das Gerät auf geeigneten Feder-Dämpfer-Elementen gelagert. Eine Skizze des Gerätes mit den Elementen und den daraus resultierenden Messpunkten (MP) ist in Abbildung 3 zu sehen.

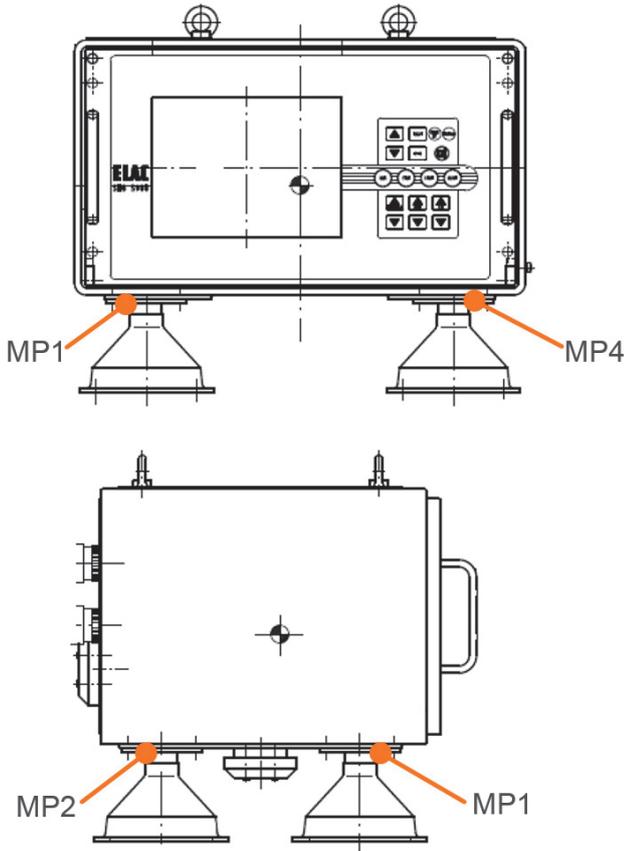


Abbildung 3: SEB 5900 mit Feder-Dämpfer-Elementen (Hutelemente) und Messpunkten 1-4

Für die Vermessung wird ein 4-kanaliges Front End der Firma Brüel & Kjør zusammen mit einem triaxialen Beschleunigungsaufnehmer verwendet, siehe Abbildung 4. Die Resonanzfrequenz des Aufnehmers liegt bei 8 kHz. Trotz des dadurch eingeschränkten Messbereiches werden die Ergebnisse bis 16 kHz dargestellt. Der Aufnehmer wird mit Bienenwachs an der Montageplatte der Feder-Dämpfer-Elemente befestigt. Die Schnellepegel werden in drei unabhängige Raumrichtungen an jedem Messpunkt mit einer Terzbandanalyse vermessen. Das Energetische Mittel $\bar{L}(f)$ über 4 Messpunkte und 3 Raumrichtungen für die jeweilige Terzbandmittelfrequenz f kann für die Auswertung aus den Pegeln $L_i(f)$ der Einzelmessungen nach folgender Gleichung berechnet werden [3]:

$$\bar{L}(f) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} 10^{0,1L_i(f)/dB} \right) \text{dB} \quad (1)$$

Das Ergebnis der Vermessung ist in Abbildung 5 zu sehen. Der maximale Pegel bei 250 Hz liegt etwa 25 dB über der angenommenen Grenzkurve. Die Frequenz entspricht der Grundschiwingung, die sich aus der Drehzahl der

Netzteil Lüfter ergibt. Ein Nebenmaximum, mit 12 dB niedrigeren Pegel, bildet sich bei der 2. Harmonischen aus.



Abbildung 4: Messplatz mit SEB 5900, unten links Detail Befestigung des 3D Beschleunigungsaufnehmers

Es fällt auf, dass erst wieder bei der 5. Harmonischen ein Nebenmaximum zu finden ist. Die entsprechende Frequenz von 1250 Hz entspricht der Blattfolgefrequenz der Lüfter (5 Blätter). Weitere Untersuchungen zeigten, dass dieses Maximum nicht durch Lüftervibrationen entsteht, sondern durch Schwingungen, welche durch die zyklisch von den Lüftern beschleunigte Luft induziert werden.

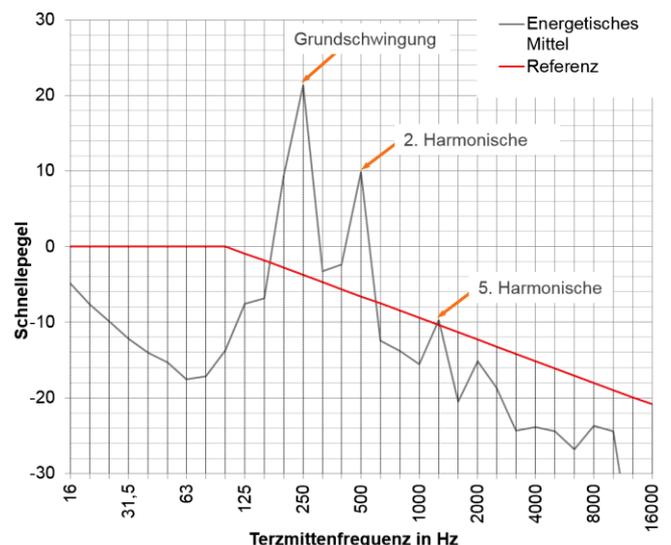


Abbildung 5: Istzustand, Energetisches Mittel der Schnellepegel, gemittelt über alle Raumrichtungen und Messpunkte

Die notwendige Körperschalloptimierung soll ohne Eingriffe in die einsatzerprobte mechanische und elektrische Struktur der SEB 5900 realisiert werden. Die Lage des Netzteils mit den Lüftern als dominante Körperschallquellen ist in Abbildung 6 dargestellt.

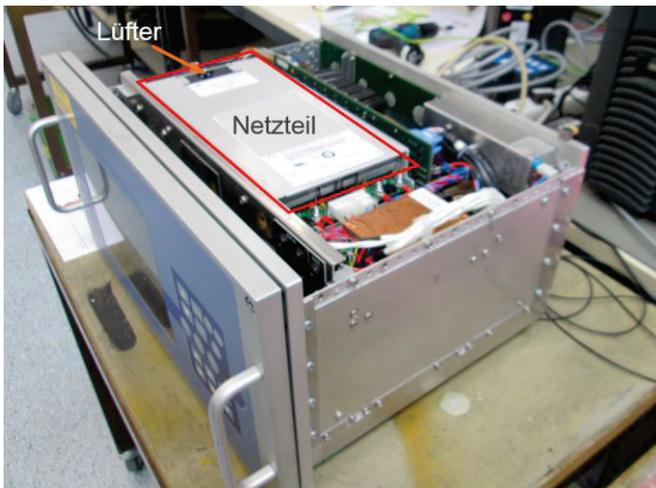


Abbildung 6: Lage des Netzteils in der SEB 5900

Optimierung der Netzteil Lüfter

Im nächsten Schritt wird untersucht inwieweit durch die Verwendung alternativer Lüfter die Körperschallpegel gesenkt werden können. Mehrere Lüftertypen werden dazu unter vergleichbaren Bedingungen vermessen. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 7 gezeigt. Mit einem Labornetzteil werden die Lüfter entsprechend der nominalen Betriebsspannung versorgt. Die Lüfter sind über 2 Schaumstoffstreifen vom Labortisch entkoppelt. Der 3D-Beschleunigungsaufnehmer wird mit Bienenwachs, wie dargestellt, auf dem Lüfter befestigt.

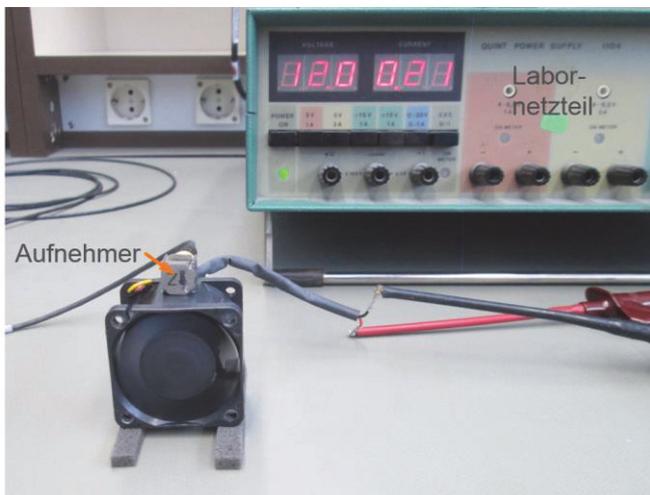


Abbildung 7: Versuchsaufbau für den Lüftertest

Die so gemessenen maximalen Schnellepegel in der Hochachse für 3 unterschiedliche Lüftertypen sind in Abbildung 8 dargestellt. Typ 1 entspricht den Original-Netzteillüftern, die Pegel sind über 10 dB höher als bei den beiden anderen Lüftertypen. Typ 2 ist ein Lüfter gleicher Bauart eines deutschen Herstellers mit vergleichbarem Luftstrom. Bei weiteren Untersuchungen unter realen Einbaubedingungen, die nicht hier dokumentiert sind, zeigt sich jedoch, dass bei der Blattfolgefrequenz nicht tolerierbare Körperschallpegel auftreten, die ebenfalls durch zyklische Luftbewegungen verursacht werden. Typ 3 erzeugt im Vergleich zu Typ 1 auch deutlich niedrigere Schnellepegel. Er hat eine niedrigere Drehzahl und damit einhergehend einen etwas niedrigeren Luftdurchsatz. Dieser

Lüfter wird vom Netzteilersteller als Nachrüstvariante angeboten und wird auch deshalb in der weiteren Optimierung verwendet.

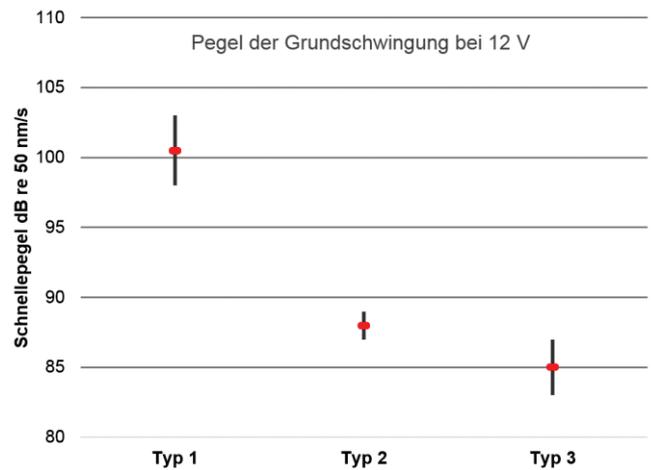


Abbildung 8: Schnellepegel in der Hochachse, Mittelwert und Konfidenzintervall, für verschiedene Lüftertypen

Das Ergebnis für das Energetische Mittel der Schnellepegel nach der Umrüstung des Netzteils mit Lüftern vom Typ 3 ist in Abbildung 9 gezeigt. Der Spitzenpegel ist um etwa 10 dB gesunken und liegt damit in der erwarteten Größenordnung aufgrund der Lüftervermessung, siehe Abbildung 8. Des Weiteren sind keine deutlichen Maxima bei der 2. Harmonischen und der Blattfolgefrequenz zu sehen. Das lokale Maximum bei 63 Hz wird durch weitere Gehäuselüfter verursacht, die bei der Messung zugeschaltet sind. Diese Lüfter sind keine dominanten Lärmquellen und werden deshalb bei der Optimierung nicht betrachtet.

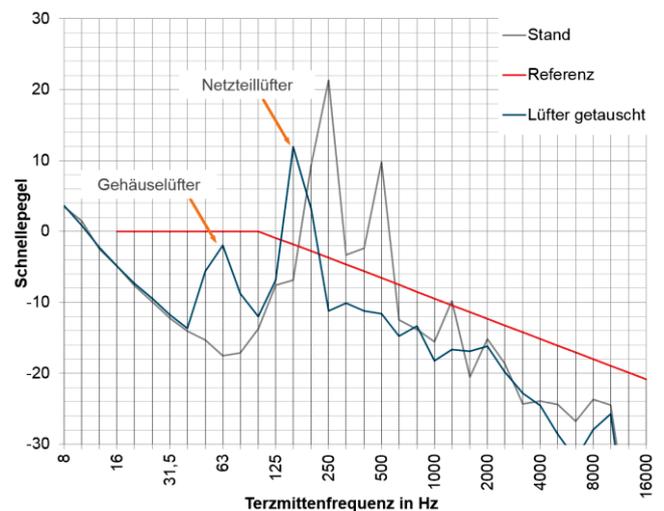


Abbildung 9: Tausch der Netzteillüfter, Energetisches Mittel der Schnellepegel an der SEB5900, gemittelt über alle Raumrichtungen und Messpunkte

Es wird deutlich, dass weitere Schritte unternommen werden müssen, um die Körperschallpegel auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

Schwingungsentkopplung des Netzteils

Für eine weitere Reduktion der Körperschallpegel ohne massiven Eingriff in die mechanische und elektrische Struktur der SEB 5900 kommt eine Entkopplung des Netzteils durch Feder-Dämpfer-Elemente in Frage. Diese

Entkopplung muss allerdings so ausgeführt sein, dass unter Schockeinwirkung auf die SEB 5900 die mechanische Integrität gewahrt bleibt und die Funktion des Netzteils nicht beeinträchtigt wird.

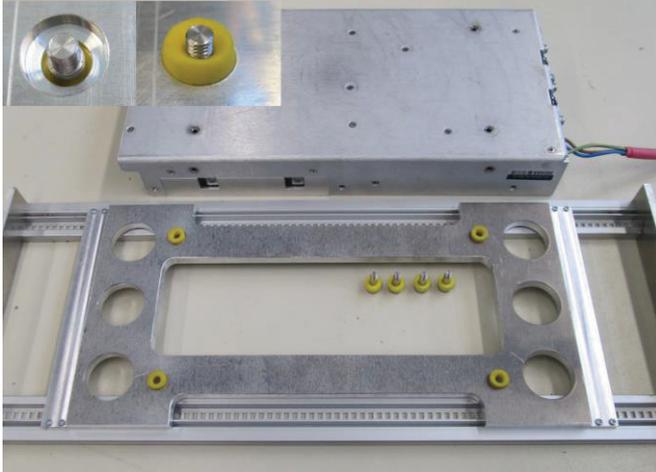


Abbildung 10: Feder-Dämpfer-Elemente (gelb), Montageplatte und Netzteil

Für die Fertigung der Feder-Dämpfer-Elemente ist ein Material auf Basis von Polyetherurethan ausgewählt worden. Dieser Werkstoff kann in einem Temperaturbereich von -35°C bis 70°C eingesetzt werden und weist kaum temperaturabhängige Alterungserscheinungen auf. Er ist damit sehr gut für den Einsatz in einer eher warmen Umgebung geeignet. Aus diesem Material werden ringförmige Elemente hergestellt. Die Ringe werden dann in gefräste Vertiefungen ober- und unterhalb einer Montageplatte eingesetzt, siehe Abbildung 10. Mit Hilfe von Stehbolzen kann dann das Netzteil auf der Montagplatte installiert werden. Die Länge der Stehbolzen ist so bestimmt, dass die daraus resultierende Vorspannung der Elemente eine optimale Entkopplung garantiert. Des Weiteren wird der maximale Federweg in der Hochachse so eingeschränkt, dass umliegende Bauteile unter Schockeinwirkung nicht gefährdet werden. Die Wegbegrenzung in der horizontalen Ebene wird durch die gefrästen Sitze der Elemente in der Montageplatte realisiert.

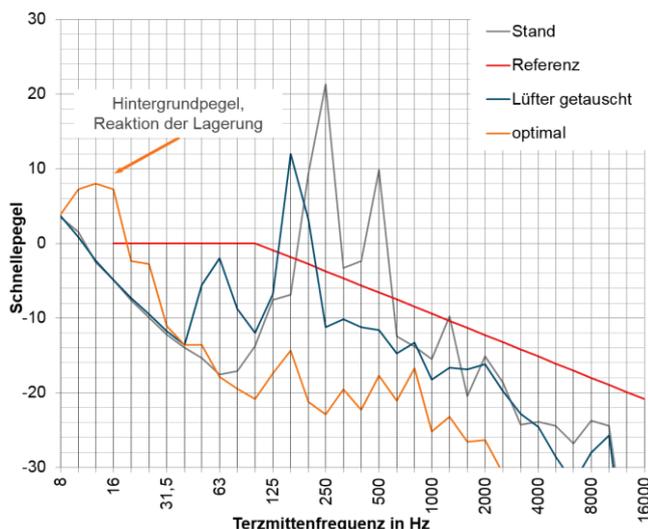


Abbildung 11: SEB 5900 mit entkoppeltem Netzteil, Energetisches Mittel der Schnellepegel

Das resultierende Energetische Mittel der Körperschallpegel wird in Abbildung 11 gezeigt. Das Maximum wird durch die Schwingungsentkopplung nochmals um etwa 25 dB gesenkt. Die gesamte erzielte Reduktion ausgehend vom ursprünglichen Istzustand ergibt somit ungefähr 35 dB. Die Körperschallpegel im gesamten Frequenzbereich liegen mindestens 8 dB unter der angenommenen Grenzkurve. Die Überschreitung bei 16 Hz wird durch eine externe Anregung der Lagerungsresonanz von SEB 5900 und den Feder-Dämpfer-Elementen (Hutelemente) verursacht. Nach der erfolgreichen Optimierung muss die SEB 5900 entsprechend der Umweltauflagen im Militäreinsatz nachqualifiziert werden. Abbildung 12 zeigt exemplarisch die SEB 5900 in der Klimakammer während den durchzuführenden Umwelttests.



Abbildung 12: SEB5900 in der Klima-kammer

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird die Körperschalloptimierung einer Bedieneinheit eines militärischen Echolotes beschrieben. Die Anwendung von Körperschallgrenzkurven auf Geräte in U-Booten und die daraus resultierenden notwendigen Änderungen für die einsatzerprobte SEB 5900 werden erläutert. Die dominante Körperschallquelle sind Lüfter im Netzteil der Anlage. Durch die Verwendung alternativer Lüfter und einer zusätzlichen Schwingungsisolierung des Netzteils konnte eine Reduktion des maximalen energetisch gemittelten Körperschallpegels um 35 dB erzielt werden.

Literatur

- [1] Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung: Bauvorschrift für Schiffe der Deutschen Marine 0450, Geräuschminderung und Sonar-Eigenstörpegel. Ausgabestand Juli 2003
- [2] Department of Defense, United States of America: Military-Standard MIL-STD-740-2 Structureborne Vibratory Acceleration Measurements and Acceptance Criteria of Shipboard Equipment. 30 December 1986
- [3] Schirmer, W.: Technischer Lärmschutz. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006