

Erkennung und Ortung von akustischen Strömungsgeräuschen an Leckstellen

Robert Werner^{1,2}, Wolfgang Klippel^{1,2}

¹ Klippel GmbH, r.werner@klippel.de

² TU Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation

Einleitung

Die messtechnische Erkennung und Ortung von Leckstellen in Materialstrukturen spielt in vielen Industriezweigen eine wichtige Rolle und bedient sich dabei sehr unterschiedlicher Methoden [1]. Häufig werden dazu sekundäre Effekte, wie Druckabfall oder akustische Emissionen ausgenutzt. Für den Spezialfall der Qualitätsüberprüfung von Lautsprechersystemen ergeben sich besondere Rahmenbedingungen. Zur Integration in spezialisierte Messsysteme für elektro-akustische Geräte, wie dem KLIPPEL QC, stehen in der Regel lediglich akustische und elektrische Messgrößen zur Messung der Systemantwort zu Verfügung. Messverfahren für die akustische Defekterkennung entsprechend dem Stand der Technik analysieren in der Regel harmonische Verzerrungen höherer Ordnung [2] und bilden durch Leckstellen verursachte Strömungsgeräusche nur unzureichend ab. Diese wirken sich jedoch negativ auf das Wiedergabeverhalten aus und müssen sicher detektiert werden.

Charakterisierung & Modellierung

Die physikalische Modellierung der zeitabhängigen, turbulenten Strömungsverhältnisse an einem Leck in Lautsprechermembran oder -gehäuse ist allgemeingültig nicht möglich, da diese in großem Maß von der Geometrie der Leckstelle abhängig sind und stark mit dem Anregungssignal des Lautsprechertreibers verkoppelt sind. Abbildung 1 stellt das Spektrogramm des Schalldrucksignals aus einer Nahfeldmessung bei harmonischer Anregung beispielhaft dar. Die Strömungsgeräusche äußern sich in

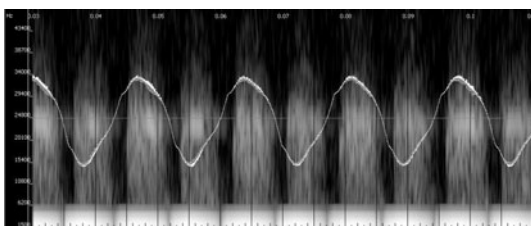


Abbildung 1: Spektrogramm und Zeitsignal des gemessenen Schalldrucksignals eines präparierten Lautsprechers mit einem Gehäuseleck für $f_{\text{stim}} = 60\text{Hz}$

breitbandigem Rauschen und treten periodisch und nahezu symmetrisch im Bereich der Schalldruckmaxima bzw. -minima mit der doppelten Stimulusfrequenz auf.

Zur Modellierung und Analyse der entstehenden Verzerrungen wurde ein signalbezogener Ansatz gewählt, der von einem amplitudenmodulierten, bandbegrenzten Rauschprozess ausgeht. Obwohl es sich um ein stochastisches Signal handelt, beinhaltet die zeitliche Hüllkurve

quasi-deterministische Informationen. Diese stehen über die Auslenkung des Lautsprechertreibers in direkter Beziehung zum elektrischen Anregungssignal. Bei sinusförmiger Anregung wird die Hüllkurve als periodisch angenommen und kann durch eine FOURIER-Reihe

$$x_{\text{env}}(t) = \sum_{k=0}^K A_k \cos(k2\pi f_{\text{stim}}t + \varphi_k) \quad (1)$$

aus Harmonischen der Anregungsfrequenz bis zur Ordnung K beschrieben werden.

Analyse

Die messtechnische Charakterisierung von Strömungsgeräuschen an präparierten Lautsprechern hat gezeigt, dass diese vor allem bei tiefen Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz des Systems stimuliert werden und in diesem Bereich relativ frequenzunabhängig sind. In diesem Fall ist die Auslenkung des Treibers und der Spitzenschalldruck im Gehäuse maximal. Dieses Verhalten begünstigt die Signalanalyse, da ein stationärer Sinuston zur Anregung des betrachteten Defekts genügt. Unter Verwendung der Langzeitspektralanalyse können Mittelungseffekte und eine zeiteffiziente Signalverarbeitung im Frequenzbereich genutzt werden [3].

Die Signalanalyse des Schalldrucksignals beruht auf der Modellierung der Strömungsgeräusche als amplitudenmoduliertes Rauschen. Durch einfache inkohärente Demodulation kann die Hüllkurve geschätzt und deren Amplitude zum Bilden eines Pegelmaßes für die Bewertung von Leckdefekten verwendet werden. Abbildung 2 stellt die Signalverarbeitungskette für das gemessene Schalldrucksignal vereinfacht dar. Vor der quadratischen De-

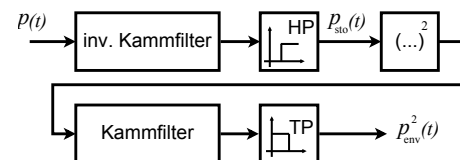


Abbildung 2: vereinfachte schematische Darstellung der Signalverarbeitung zum Bestimmen der Modulationshüllkurve aus dem Schalldrucksignal

modulation muss das Signal zunächst vorgefiltert werden. Ein inverses Kammfilter unterdrückt die Grundwelle und die regulären harmonischen Verzerrungen des Lautsprechers sowie eventuelle höhere harmonische Verzerrungen durch andere mechanische Lautsprecherdefekte. Damit sind jegliche harmonischen Komponenten der Anregungsfrequenz aus dem Signal entfernt. Ein zusätzliches Hochpassfilter (HP) unterdrückt tieffrequente Störungen.

Nach dem Quadrieren des gefilterten Zeitsignals spiegeln sich die periodischen Anteile der Hüllkurve gemäß (1) in den Harmonischen der Anregungsfrequenz wider. Das heißt, dass sich die Frequenzmischprodukte im Falle eines messbaren Leckdefekts durch die Demodulation akkumulieren und erneut Frequenzkomponenten mit dem vielfachen der Anregungsfrequenz herausbilden. Abbildung 3 verdeutlicht dies anhand einer Beispielmessung mit Gehäuseleck. Zur Extraktion der relevan-

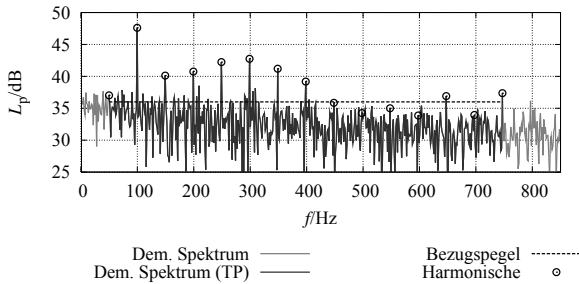


Abbildung 3: Signalspektrum nach der Demodulation, Harmonische repräsentieren die periodischen Anteile der Hüllkurve

ten Komponenten bedarf es einer Filterung mit einem Kammfilter $H_{det}(j\omega)$ und einer Bandbegrenzung durch ein Tiefpassfilter. Wird das resultierende verteilte Spektrum dezimiert, kann die geschätzte mittlere quadratische Hüllkurve im Zeitbereich entsprechend Abb. 4 dargestellt werden.

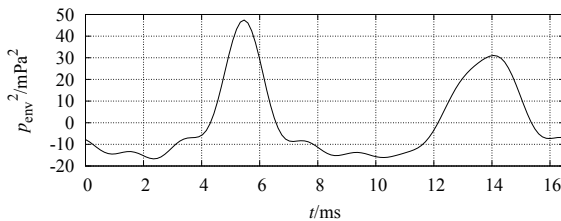


Abbildung 4: mittlere geschätzte Hüllkurve des Strömungsrauschens aus einer Beispielmessung über eine Periode der Anregungsfrequenz $f_0 = 60$ Hz

Aus der Amplitude der Hüllkurve \hat{p}_{env} und der Ruheschwelle p_0 kann ein absolutes Pegelmaß

$$L_{MOD} = 10 \log_{10} \left(\frac{\hat{p}_{env}^2}{p_0^2} \right) \text{ dB}, \quad (2)$$

vergleichbar zum Schalldruckpegel abgeleitet werden. Zur Bewertung der Modulationsstärke wird ein weiteres Maß

$$L_{RMOD} = 10 \log_{10} \left(\frac{\hat{p}_{env}^2}{p_{ref}^2} \right) \text{ dB} \quad (3)$$

eingeführt. Dieses relative Maß setzt die Amplitude der Hüllkurve ins Verhältnis zum mittleren Grundpegel des demodulierten Spektrums im betrachteten Frequenzband. Nur Werte deutlich über 0 dB deuten auf einen modulierte Prozesse hin, die mit der Anregungsfrequenz in Beziehung stehen. Im Gegensatz zum Absolutpegel können somit Aussagen unabhängig von Referenzwerten getroffen werden.

Lokalisierung

Aufgrund der breitbandigen und hochfrequenten spektralen Komponenten des stochastischen Strömungsrauschens ist ein Laufzeit-Differenz-Verfahren zur Lokalisierung von Leckstellen geeignet. Dazu kann die ursprünglich einkanalige Modulationsanalyse für zwei räumlich verteilte Messpunkte in eine kreuzweise Demodulation mit variabler Zeitverschiebung τ überführt werden.

Die gemessenen Schalldrucksignale an den Aufpunkten \vec{r}_i und \vec{r}_j werden gemäß Abb. 2 zunächst ebenfalls vor-gefiltert, um irrelevante Frequenzkomponenten zu unterdrücken. Die quadratische Demodulation der einzelnen Kanäle wird durch eine Produktbildung der gefilterten Schalldrucksignale $p'_{sto}(t, \vec{r}_i)$ und $p'_{sto}(t + \tau, \vec{r}_j)$ ersetzt. Dabei gilt die Annahme $p(t, \vec{r}_j) = a \cdot p(t - \tau_{ij}, \vec{r}_i)$. Somit ergibt sich die mittlere quadratische Hüllkurve

$$p_{env}^2(t, \tau) = h_{det}(t) * [p'_{sto}(t, \vec{r}_i) \cdot p'_{sto}(t + \tau, \vec{r}_j)], \quad (4)$$

in Abhängigkeit von der Laufzeitverschiebung τ . Die Suche nach der maximalen Amplitude der laufzeitabhängigen Hüllkurve liefert die geschätzte Laufzeitdifferenz

$$\tau_{ij} = \arg \max_{\tau} p_{env}^2(\tau) \quad (5)$$

zwischen den Messpunkten in Bezug auf die Quelle des modulierten Rauschens und kann zur geometrischen Lokalisierung verwendet werden.

Ergebnisse und Zusammenfassung

Der gewählte Ansatz zur Analyse amplitudenmodulierter Strömungsgeräusche erweist sich als zweckmäßig für die Detektion und Bewertung von Lecks in Lautsprecher-systemen und gewährleistet eine höhere Empfindlichkeit als bisherige Ansätze zur Defekterkennung in der Lautsprecher-messtechnik. Mit den abgeleiteten Pegelmaßen können die Intensität und die Modulationsstärke effektiv beurteilt werden. Durch die Unterdrückung deterministischer Signalkomponenten kann die Orthogonalität zu anderen Defektverzerrungen mit Einschränkungen gewährleistet werden. Die laufzeitabhängige, kreuzweise Demodulation ermöglicht die gezielte Ortung von Leckstellen durch Anwendung von Laufzeit-Differenz-Verfahren.

Literatur

- [1] Knarr, O.M.: Industrial Gaseous Leak Detection Manual. McGraw-Hill, New York, 1998
- [2] W. Klippel, S. Irrgang, U. Seidel: Loudspeaker Testing at the Production Line. 120th Convention of the Audio Engineering Society, Paris, 20.-23. Mai 2006
- [3] Werner, R.: Erkennung und Ortung von Strömungsgeräuschen und anderen impulsiven Verzerrungen im Rahmen der Qualitätsüberprüfung von Lautsprecher-systemen. Diplomarbeit, TU Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, 2009