

EIN AKUSTISCHES RESONANZVERFAHREN ZUR KLASSIFIKATION VON FÜLLSTÄNDEN

D. Hoppe

Forschungszentrum Rossendorf e.V. (FZR), PSF 510119, D-01314 Dresden

1. Einführung

Vorgestellt wird ein Resonanzverfahren zur Füllstandsbestimmung in Behältern, das auf der Ausnutzung von passivem Schall basiert, d.h. von Schall, der aus weitgehend unbestimmten und wechselnden Schallquellen stammen kann und der ohnehin ins Untersuchungsobjekt eindringt. Es läßt zu, daß die akustischen Eigenschaften dieses Schalls (insbesondere die Intensitätsverteilung über Frequenz und Zeit) weitgehend unbestimmt sind. Somit können alle Schallquellen akzeptiert werden, die im jeweiligen akustischen Umfeld des Untersuchungsobjektes gerade in Erscheinung treten. Unter solchen Bedingungen kann ggf. nicht unterschieden werden, ob eine Überhöhung im Amplitudenspektrum eines empfangenen Schallsignals von einer Resonanz im Untersuchungsobjekt oder bereits von der Schallquelle herrührt. Zur Lösung dieses Problems wird das folgende Resonanzverfahren vorgeschlagen [HG98]:

Unter der Voraussetzung, daß das Innere bzw. das Volumen des Untersuchungsobjektes meßtechnisch zugänglich ist, wird

- der Schall einmal im untersuchten Volumen und einmal in der Umgebung gemessen und
- durch die Bildung des Quotienten der Fourier-Transformierten beider Schallsignale der Einfluß der Schallquelle eliminiert.

Der spektrale Quotient entspricht einem Frequenzgang und repräsentiert nur noch das schallquellenunabhängige akustische Übertragungsverhalten zwischen dem Ort des Schallaufnehmers außerhalb des Volumens und demjenigen innerhalb. Dieses Übertragungsverhalten wird durch die Geometrie (Größe, Gestalt) des untersuchten Volumens geprägt. Weil sich die Geometrie eines Volumens nicht nur an einem einzigen, sondern an verschiedenen Merkmalen des Frequenzganges widerspiegelt, wird versucht, die darüber benötigte Information durch Klassifikation statt durch Messung zu gewinnen. Die Klassifikation besteht dabei darin, den zur unbekanntem Volumengeometrie gehörenden Frequenzgang verschiedenen vorklassifizierten Referenzfrequenzgängen zuzuordnen und so eine Erkennung des unbekanntem Volumens zu erreichen.

2. Verfahrensbeschreibung

Für ein Volumen, dessen Geometrie vom Füllstand eines darin enthaltenen flüssigen oder fließfähigen Mediums abhängt, gelten folgende Voraussetzungen:

- Das Volumen ist von seiner Umgebung physisch abgegrenzt (z.B. durch die Wandung eines Gefäßes), akustisch aber nicht entkoppelt.

- Aus der Umgebung in das Volumen eindringender Schall erfährt spektrale Veränderungen, die im wesentlichen von der Geometrie und insbesondere von den Eigenfrequenzen des Volumens abhängen.
- Eine akustische Rückwirkung vom Volumen zur Umgebung sowie eine Schall-emission im Volumen sind ausgeschlossen oder vernachlässigbar klein.

In der Umgebung und im Inneren des Volumens befinden sich identische Schall-aufnehmer S_U und S_V (z.B. Mikrofone); sie erzeugen die Schallsignale $S_U(t)$ und $S_V(t)$. Für die Modellierung dieses Systems gelten $S_U(t)$ als Ein- und $S_V(t)$ als Ausgangs-größen eines linearen dynamischen Übertragungsoperators G_{UV} . Dieser Operator ent-spricht im Zeitbereich einer Gewichtsfunktion (Impulsantwort) und im Frequenzbereich einem Frequenzgang. Demgemäß entsteht das Ausgangssignal durch Faltung oder Multiplikation dieses Operators mit dem Eingangssignal:

$$S_V(t) = G_{UV}(t) * S_U(t), \quad S_V(j\omega) = G_{UV}(j\omega) \times S_U(j\omega) \quad (1)$$

Fortan wird der Frequenzbereich bevorzugt, da er praktische Vorzüge bietet. Der Quoti-ent der beiden komplexen Signalspektren $S_V(j\omega)$ und $S_U(j\omega)$ ist der komplexe Fre-quenzgang

$$\frac{S_V(j\omega)}{S_U(j\omega)} = \frac{G_{UV}(j\omega) S_U(j\omega)}{S_U(j\omega)} = G_{UV}(j\omega). \quad (2)$$

Wie (2) zeigt, eliminiert die Division den Umgebungsschall. Folglich muß es mit dem empirischen Frequenzgang $G_{UV}(j\omega)$ formal möglich sein, die füllstandsrelevanten Ei-genschaften des Volumens V bei nahezu beliebigem Umgebungsschall zu bestimmen; Bedingung ist nur, daß $S_U(j\omega)$ und $S_V(j\omega)$ existieren, wenigstens im Bereich der niedrig-sten Eigenfrequenzen von V .

Für die Klassifikation werden von ausgewählten Volumengeometrien (Füllstände) die zugehörigen Realisierungen des Frequenzganges $G_{UV}(j\omega)$ als Referenzen festgehalten. Unbekannte Füllstände lassen sich dann dadurch bestimmen, daß ihre zugehörigen Frequenzgänge mit den Referenzen verglichen werden. Die Anzahl der Klassen, die Anzahl der Referenzen pro Klasse sowie die Anzahl und die Art der Merkmale des Fre-quenzganges richten sich nach der geforderten Auflösung und Trennschärfe bei der Klassifikation.

Praktisch ist mit Meßstörungen zu rechnen. Außerdem kann der räumliche Abstand zwi-schen den Schallaufnehmern S_U und S_V dazu führen, daß räumliche Inhomogenitäten in der Intensitätsverteilung des Umgebungsschalls sowie Laufzeiteffekte zwischen den Schallaufnehmern einen Anteil am Unterschied zwischen $S_U(t)$ und $S_V(t)$ haben. Um die Auswirkung solcher Störeinflüsse abzuschwächen, wird (2) wie folgt modifiziert: Zu-nächst werden von den beiden Signalspektren die Beträge $S_V(\omega) = |S_V(j\omega)|$ und $S_U(\omega) = |S_U(j\omega)|$ gebildet. Diese reellen Spektren werden über die Frequenz symmetrisch ge-glättet (Tiefpaß mit symmetrischer Impulsantwort) und erst dann gemäß (2) dividiert; das Ergebnis ist der reelle Frequenzgang

$$\frac{\bar{S}_V(\omega)}{\bar{S}_U(\omega)} = \bar{G}_{UV}(\omega). \quad (3)$$

3. Experimentelle Füllstandsbestimmung

Das Bild 1 zeigt eine Anwendungsmöglichkeit für das beschriebene Verfahren. Es handelt sich um ein oben offenes, teilweise mit Flüssigkeit gefülltes Gefäß. Das Volumen V ist dabei der Raum zwischen der inneren Gefäß- oder Rohrwand, der Flüssigkeitsoberfläche und der oberen Öffnung des Gefäßes oder Rohres. Zwar ist das Volumen wegen seiner unscharfen oberen Grenze nicht eindeutig bestimmt, doch hat dies für die Füllstandsklassifikation keine Bedeutung; wichtig dafür ist allein, daß die füllstandsabhängigen Eigenfrequenzen von V eindeutig auf die vorgegebenen Füllstandsintervalle (Klassen) schließen lassen.

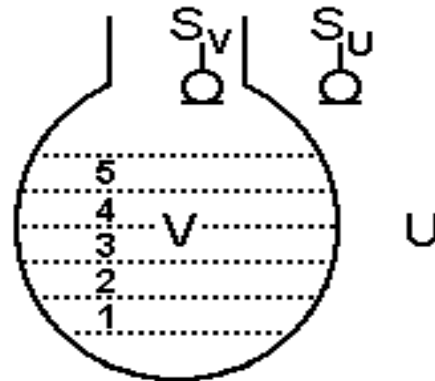


Bild 1 Gefäß mit einer enthaltenen Flüssigkeit, deren Füllstand in den angegebenen Intervallen zu klassifizieren ist

(V - Volumen, U - Umgebung, S_V , S_U - Aufnahme des Schalls aus dem Volumen/ der Umgebung)

Im Experiment wird eine Versuchsanordnung nach Variante a) verwendet, wobei Wasser in ein etwa 40 cm hohes Gefäß von unten her geräuscharm einströmt. Der Versuch erfolgt in einem Raum von der Größe eines gewöhnlichen Wohnzimmers, wobei in zwei getrennten Telexperimenten sehr unterschiedliche Schallquellen in Erscheinung treten:

- (I) Straßenlärm, der durch das offene Fenster eindringt
- (II) Stimmengewirr im Raum bei geschlossenem Fenster

Zur Bildung von Referenzen für die Klassifikation wird das Füllstandsintervall in fünf vorklassifizierte Teilintervalle unterteilt (Bild 1). Als Referenzen werden aus jedem Teilintervall sechs Realisierungen des reellen Frequenzganges $\bar{G}_{UV}(\omega)$ ausgewählt, jeweils sechs Referenzen pro Klasse und dies nur vom Telexperiment (Messung bei Straßenlärm). Die Frequenzgänge aus dem Telexperiment (Messung bei

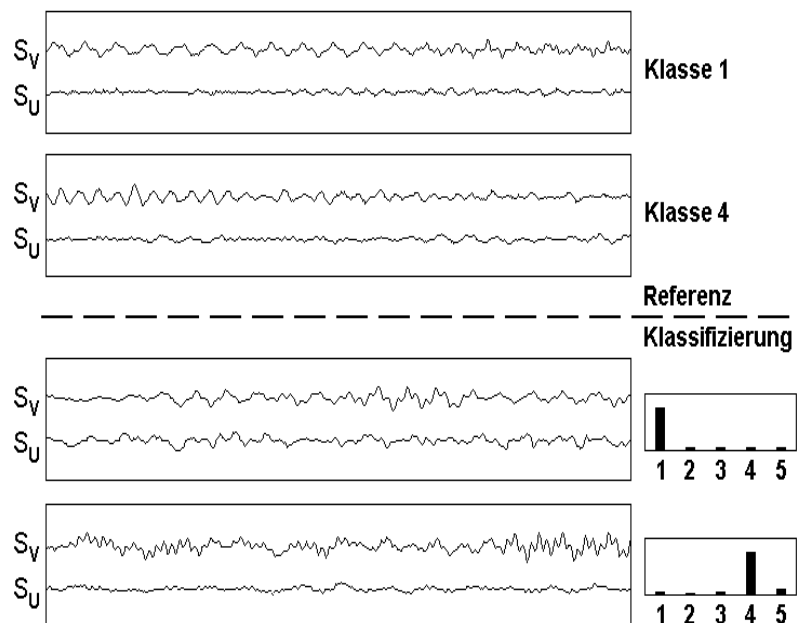


Bild 2 Schallsignale $S_V(t)$ und $S_U(t)$, Referenz: Straßenlärm, Klassifizierung: Stimmengewirr; jeweils oben: bei niedrigem Füllstand, jeweils unten: bei hohem Füllstand (s. Bild 1)

Stimmengewirr) gelten als unbekannt und werden klassifiziert. Der Klassifikator, auf den hier nicht näher eingegangen wird, vergleicht den jeweils unbekanntem Frequenzgang mit jeder einzelnen Referenz und bestimmt daraus die Klassenzugehörigkeit des unbekanntem Frequenzganges. Das Klassifizierungsergebnis zeigt das Bild 2 unten rechts.

Das Bild 2 zeigt weiterhin kurze Signalverläufe aus beiden Teilexperimenten. Deutlich sichtbar ist, daß $S_V(t)$ bei hohem Füllstand deutlich höherfrequente Anteile als bei niedrigem Füllstand enthält. Bei $S_U(t)$ gibt es einen entsprechenden Unterschied nicht. Das Signal aus der Umgebung unterscheidet sich vielmehr deutlich für die beiden Schallquellen. Obwohl sich die Signale, die zur Klassifizierung kommen, aus diesem Grund deutlich vom entsprechenden Referenzfall unterscheiden, findet eine richtige Klassifizierung statt. Verdeutlicht wird die Wirkungsweise der Methode durch die folgenden Spektrogramme.

Die Signale $S_U(t)$ und $S_V(t)$ wurden abschnittsweise für gleichlange disjunkte Zeitabschnitte verarbeitet. Bild 3a und b zeigen die Frequenz-Zeit-Diagramme (Spektrogramme) von den beiden noch ungefilterten reellen Signalspektren $S_V(\omega)$ und $S_U(\omega)$ sowie vom gefilterten reellen Frequenzgang $\bar{G}_{UV}(\omega)$, aufgenommen als Referenzmessung mit Straßenlärm und zur Klassifizierung mit Stimmengewirr als Schallquelle.

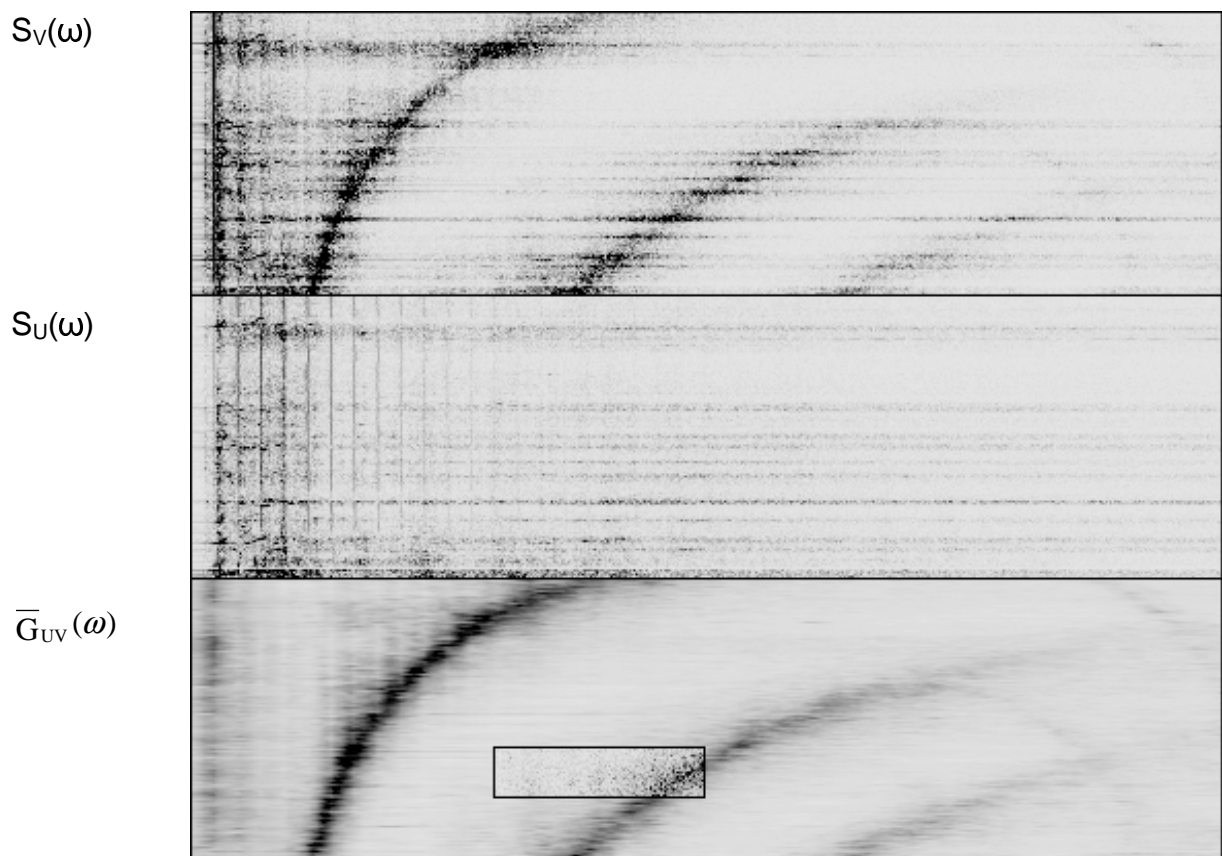


Bild 3a Spektrogramme aus der Referenzmessung (Straßenlärm) (waagrecht: Frequenz, senkrecht: Zeit, Schwärzungsgrad = spektraler Betrag). Zum Verdeutlichen der Filterwirkung zeigt ein kleiner Ausschnitt im $\bar{G}_{UV}(\omega)$ -Spektrogramm von (I) den ungefilterten Frequenzgang $S_V(\omega)/S_U(\omega)$.

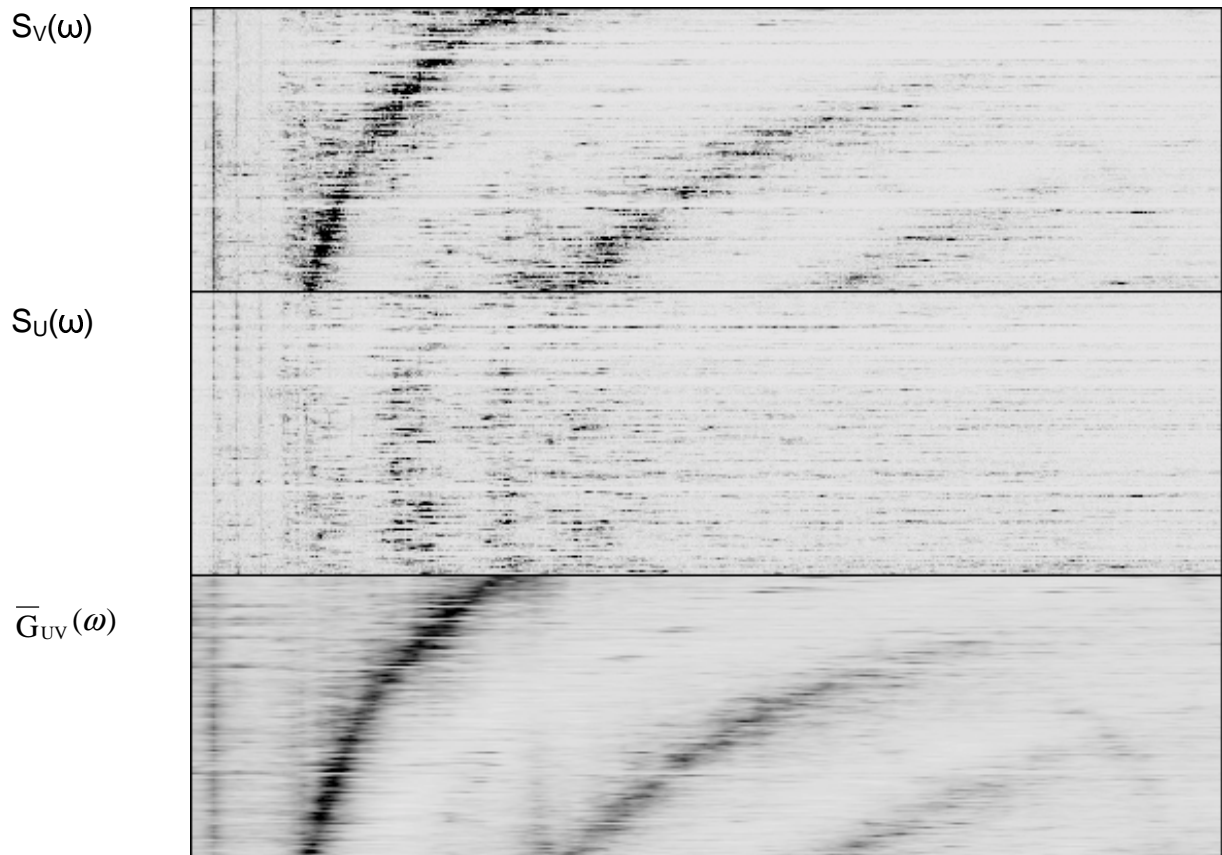


Bild 3b Spektrogramme aus dem zu klassifizierenden Fall (Stimmengewirr)
 (waagerecht:: Frequenz, senkrecht: Zeit, Schwärzungsgrad = spektraler Betrag)

Die Signalspektrogramme von $S_V(\omega)$ und $S_U(\omega)$ widerspiegeln die Verschiedenheit der Schallquellen: Während der Referenzmessung erscheinen zunächst mehrere vorüberfahrende Kraftfahrzeuge. Sie äußern sich durch schmale waagerechte Linien. Nach einer Pause zeigt sich das relativ langanhaltende Geräusch einer Straßenbahn. Zwischenzeitlich ist es zuweilen sehr leise. Bei der zu klassifizierenden Messung lassen sich durchgehend in schnellem (Wort-)Wechsel laute und leise Phasen erkennen.

Innerhalb des Volumens ($S_V(\omega)$, im Bild 3 jeweils oben) gibt es im Unterschied zur Umgebung ($S_U(\omega)$, im Bild 3 jeweils Mitte) deutliche zeit- bzw. füllstandsabhängige Resonanzerscheinungen. Ihre Ursache sind die vertikalen Eigenfrequenzen im Volumen (Grundfrequenz und deren ungerade Vielfache). Mit zunehmendem Füllstand wachsen die Resonanzfrequenzen etwa reziprok zur abnehmenden Volumenhöhe (Höhe über der Flüssigkeitsoberfläche).

Die zeitlichen Intensitätsschwankungen im Signalspektrum $S_V(\omega)$ sind so beträchtlich, daß die Intensität an einer Resonanzstelle z.T. geringer ist als zu anderen Zeitpunkten außerhalb der Resonanzstellen. Dies würde es schwierig und teilweise sogar unmöglich machen, allein aus $S_V(\omega)$ auf den Füllstand zu schließen. Die Division nach (3) erreicht aber, daß im Frequenzgang $\overline{G_{UV}}(\omega)$ (im Bild 4 jeweils unten) keine vergleichbar starken Schwankungen vorkommen. $\overline{G_{UV}}(\omega)$ eignet sich deswegen entschieden besser für die Klassifikation.

4. Zusammenfassung

Der Beitrag stellt ein sehr einfaches, passiv und indirekt arbeitendes akustisches Resonanzverfahren für die Volumenklassifikation vor und zeigt dessen Wirkungsweise bei der Füllstandsbestimmung. Das Grundanliegen des Verfahrens, durch die Bildung eines Frequenzganges den Einfluß der Schallquelle zu eliminieren und das Verfahren dadurch schallquellenunabhängig zu machen, wird vom experimentellen Ergebnis bestätigt. Ob das beschriebene Verfahren die Genauigkeiten aktiv oder direkt arbeitender Verfahren erreichen kann, wurde nicht untersucht. Sollten solche Genauigkeiten nicht erreicht werden, so eignet sich das beschriebene Verfahren zumindest für Reserve- oder Überwachungseinrichtungen. Wegen seiner Einfachheit, Robustheit und folglich Zuverlässigkeit besteht ein bevorzugtes Anwendungsgebiet des Verfahrens bei sicherheitsrelevanten Anlagen.

Literatur

- [BI94] Blumenauer, H.: Werkstoffprüfung. Deutscher Verlag der Grundstoffindustrie, Leipzig, Stuttgart, 1993

- [SK88] Stuart, H.; Klages, G.: Kurzes Lehrbuch der Physik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, u.a., 1988

- [[HG98] Hoppe, D., Giera, H.-D.: Anordnung und Verfahren zur akustischen Volumenbestimmung. Erfindungsanmeldung Nr. 198 30 442.0 beim Deutschen Patentamt, 1998