

## Eingriffsfreie akustische Füllstandsmessung unter einem Fehlwinkel

Sebastian Wöckel<sup>1</sup>, Prof. Peter Holstein<sup>2</sup>, André Werner<sup>3</sup>, Dr.-Ing. Ulrike Steinmann<sup>1</sup>, Hendrik Arndt<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Institut für Automation und Kommunikation (ifak) e.V. Magdeburg, Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg, E-Mail: [sebastian.woeckel@ifak.eu](mailto:sebastian.woeckel@ifak.eu), Tel.: +49 391 9901 430, Fax: +49 391 9901 590

<sup>2</sup>SONOTEC Ultraschallsensorik Halle GmbH, Nauendorfer Straße 2, 06112 Halle

<sup>3</sup>AW-Systems GmbH, Moränenweg 90, 38228 Salzgitter

<sup>4</sup>Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Mikro- und Sensorsysteme (IMOS) Universitätsplatz 2, Fachgebiet Sensorik, 39106 Magdeburg

### Kurzfassung

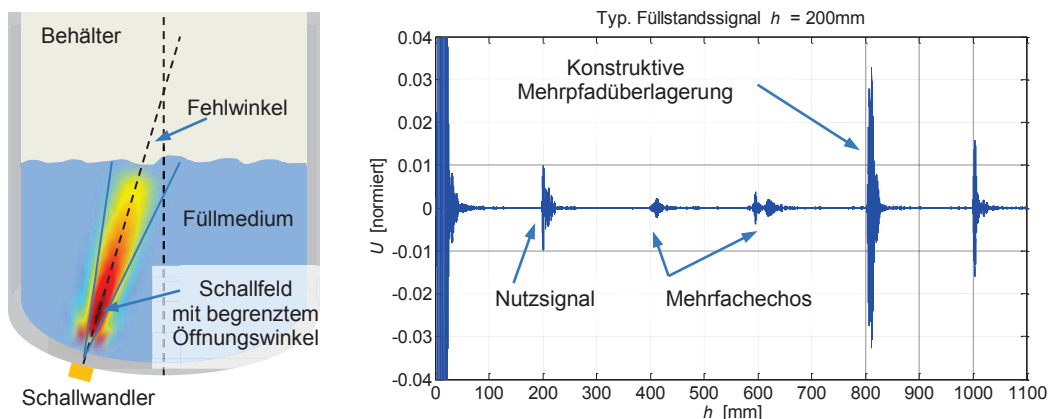
Der vorliegende Beitrag zeigt an einem ausgewählten Beispiel, wie die nicht invasive Ultra-schall-basierte Füllstandmessung unter einem Fehlwinkel durch Nutzung geeigneter Sensoren und dem selbstkalibrierenden Datenmanagement grundlegend verbessert werden kann.

### Motivation

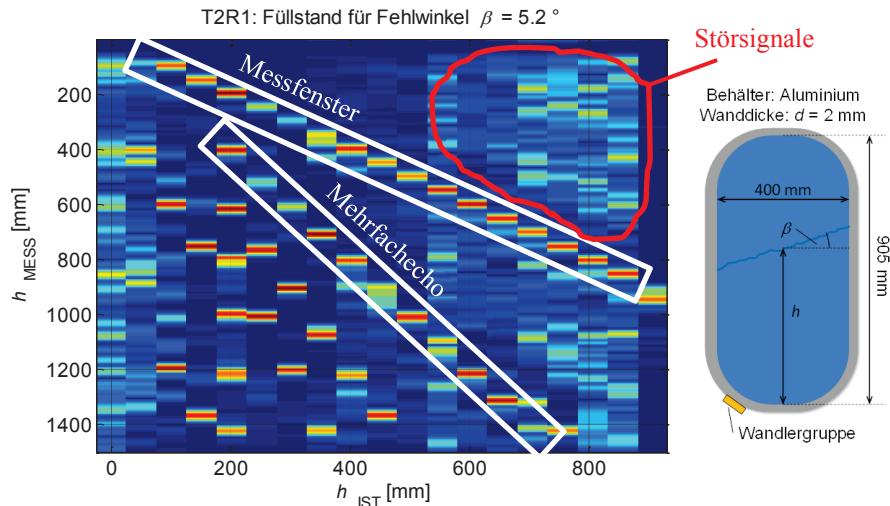
Bei der prozessnahen Erfassung von Füllständen gewinnen Ultraschall-basierte Messverfahren zunehmende Marktrelevanz. In Abgrenzung zur invasiv arbeitenden Methode bietet die reversible Ankopplung der Schallwandler von außen an die Prozesswand einzigartige Vorteile. Dennoch kann diese nicht-invasive Methode aufgrund anlagen- und verfahrensbedingter Probleme gegenwärtig nicht adäquat eingesetzt werden. Als praxisrelevant und gegenwärtig nicht zufriedenstellend gelöst sind u.a. die bautechnisch nicht lotrechte Einschallung unter einem Fehlwinkel (Bild 1 links, ca. 50% der Anwendungsfälle), die multimodale Anregung von Festkörper-, „Stör“-Schall in der Behälterwand und die Variation der akustisch relevanten Einsatzparameter bei wechselnden Medien- und Umweltbedingungen, z.B. zusätzliche Ablagerungen und Temperaturänderungen. Diese genannten Szenarien führen i.d.R. zu einem divergenten oder gestörten Schallfeld und dem Funktionsausfall des Sensors. Zudem erschweren bereits multiple Ausbreitungspfade im Füllmedium und der Behälterwand die Interpretation der Daten und Extraktion des gewünschten Nutzsignals (Bild 1 rechts).

### Nutzsignalextraktion

Auf Basis einer vereinfachten linearen Modellierung ausgehend von Punktquellen erfolgt die Bestimmung der zu erwartenden zeitlichen Zusammensetzung eines akustischen Signals unter Berücksichtigung der Schallausbreitung im Fluid (Füllmedium) und der Behälterwand. Hierdurch wird die apriori-Festlegung des Nutzsignal-Messfensters erleichtert. Für die Ableitung der Schallgeschwindigkeit als Kalibrierwert für die Berechnung des Füllstandes aus der Laufzeit wird ein (im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht beschriebenes) Signalflussgraphenmodell der Schallausbreitung in der Behälterwand mit einem Parameterschätzer kombiniert [1, 2]. Mit Hilfe der mathematischen Optimierung zwischen den realen Messdaten und dem Modell lässt sich die Schallgeschwindigkeit mit einem Fehler im einstelligen Prozentbereich bestimmen. In Bild 2 sind exemplarisch die Einhüllenden der Schallsignale in Abhängigkeit des Wasser-Füllstands  $h_{IST}$  für den Fall der Fehlankopplung des Sender-Empfängersystems von  $\beta = 5,2^\circ$  dargestellt. Das in dieser Darstellung deutlich erkennbare Füllstands-abhängige Nutzsignal kann mit einfachen Messmethoden (z.B. Schwellwerterkennung) nicht automatisiert für sämtliche Füllhöhen separiert werden. Ferner ist die Kenntnis der zu erwartenden Störsignale (Bild 2:  $h > 550$  mm) und des Messfensters notwendig. Kumulativ hängt der aus der Laufzeit abgeleitete Füllstand  $h_{MESS}$  vom Fehlwinkel und der Anordnung der Wandlergruppe ab.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Füllstandsmessung unter einem Fehlwinkel (links) mit einem ausgewählten typischen Messsignal (rechts) für eine Füllhöhe von  $h = 200$  mm im Versuchsbehälter nach Bild 2.

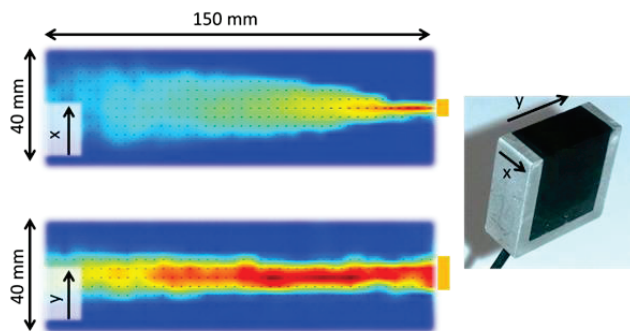


**Bild 2:** Einhüllende der Füllstands-abhängigen Messsignale (10er Sinusburst bei  $f=1$  MHz Mittenfrequenz) an einem Versuchsbehälter bei Fehlankopplung der Schallwandlergruppe: Signale zwischen Wandler 2 als Sender T2 und Wandler 1 als Empfänger R1 der Wandlergruppe mit mittlerem Wandlerabstand von  $dx = 7$  mm.

### Erkennung und Ausgleich von Fehlwinkeln

Der Einfluss einer Fehlankopplung unter einem Winkel bzw. einer geneigten Grenzfläche des Füllmediums lassen sich in diesem Kontext durch die modellgestützte Messung mit einem Mehrelementwandler - bestehend aus Einzelwandlern mit einem Öffnungswinkel des Schallfeldes in der Größenordnung des auszugleichenden maximalen Fehlwinkels - kompensieren. In Kombination mit intelligenten Algorithmen ist es möglich, den Fehlwinkel zu erkennen und die Signalverarbeitung oder das akustische Abstrahlverhalten automatisch anzupassen.

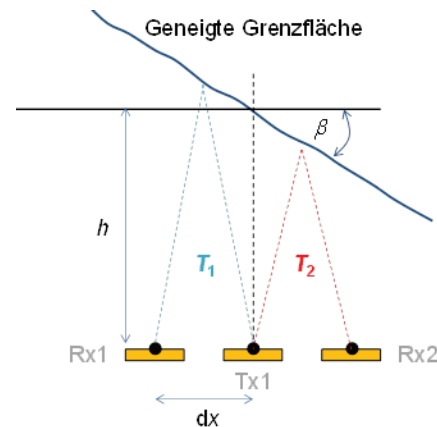
In der vorliegenden Umsetzung wird eine Wandlergruppe aus mindestens drei Einzelwandlern (Bild 3 rechts) mit rechteckförmiger aktiver Fläche und unsymmetrischen Öffnungswinkeln verwendet. Bild 3 links zeigt exemplarisch das stationäre Schallfeld in  $xz$ - und  $yz$ - Ebene senkrecht zur aktiven Wandlerfläche. Infolge der unterschiedlichen Öffnungswinkel des Schallfeldes lässt sich mit einer Wandlergruppe aus mindestens 3 Elementen eine Vorzugs- $(xz)$ -Ebene zum Ausgleich eines Fehlwinkels erzeugen. Gleichbedeutend verhindert die Fokussierung in der  $yz$ -Ebene die Querempfindlichkeit zu sekundären Reflexionen im Behälter.



**Bild 3:** Einzelwandler [3] inklusive des Hintergrund-Schlierenbilds des stationären Schallfelds in Wasser (bei Mittenfrequenz  $f = 1,052$  MHz) der Einzelwandler mit aktiven Kantenlängen von  $x = 6$  mm und  $y = 11$  mm; Öffnungswinkel:  $x: 20^\circ$  und  $y: 8^\circ$ .

### Triangulationsansatz

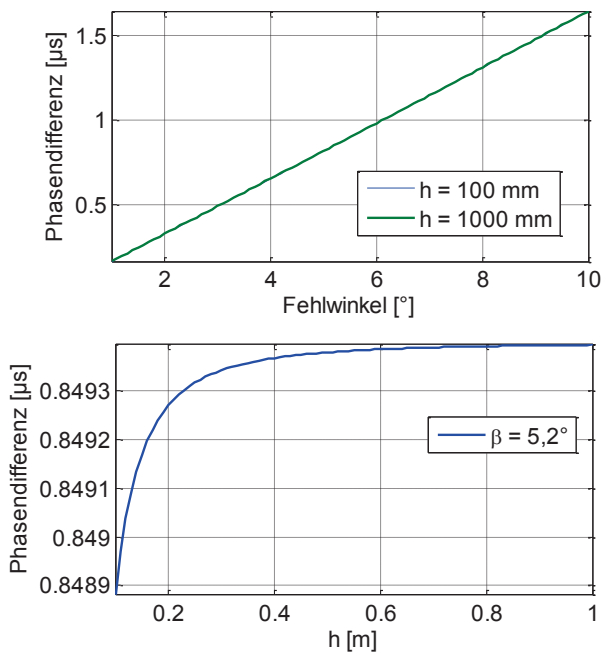
Die Messung in einer Vorzugsebene begünstigt die Verwendung eines vereinfachten 2D-Triangulationsverfahrens (Bild 4) zur Fehlwinkelerkennung aus den Phasenlaufzeiten (1) und Amplituden zwischen den Einzelwandlern.



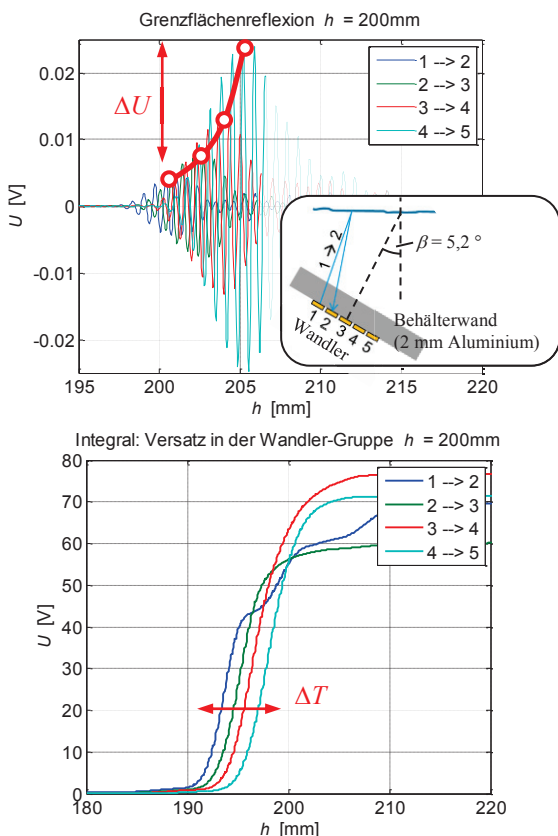
**Bild 4:** Triangulationsansatz für eine Wandlergruppe aus drei Einzellementen mit Darstellung einer vereinfachten Laufzeitdifferenz  $\Delta T$  (1) zwischen zwei benachbarten Empfängern  $Rx$ .

$$\frac{Rx1}{Rx2} \Delta T = \frac{2}{c_0} \left[ \frac{\sqrt{(h + dx/2 \cdot \tan\beta)^2 + (dx/2)^2}}{-\sqrt{(h - dx/2 \cdot \tan\beta)^2 + (dx/2)^2}} \right] \quad (1)$$

Die Analyse der Gleichung (1) (Bild 5) und die Verifizierung mit realen Messdaten (Bild 6) zeigen, dass die zwischen zwei Wandlerpaaren messbare Phasendifferenz  $\Delta T$  maßgeblich vom Fehlwinkel  $\beta$  zwischen der Sensorebene der Wandlergruppe und der zu detektierenden Grenzfläche abhängt (Bild 5 oben). Hingegen kann die Abhängigkeit vom Füllstand  $h_{IST}$  vernachlässigt werden (Bild 5 unten). Ergänzend lässt sich aus dem Gradient der Amplituden  $\Delta U$  innerhalb der Wandlergruppe die Kipprichtung eindeutig bestimmen (Bild 6 oben).



**Bild 5:** Phasendifferenz nach Gleichung (1) zwischen zwei benachbarten Schallpfaden der Wandlergruppe (Bild 3) in Abhängigkeit des Fehlwinkels  $\beta$  und der Füllhöhe  $h$ .



**Bild 6:** Messsignal: Signalauschnitte der Reflexionen an einer Wasser-Luft-Grenzfläche (Füllhöhe  $h = 200 \text{ mm}$ ) erfasst mit einer Wandlergruppe aus fünf Einzelelementen bei Ankopplung an der äußeren Behälterwand unter einem Fehlwinkel von  $\beta = 5,2^\circ$  und Versatz zur Behältermitte von  $100 \text{ mm}$ .

Mit diesen Parametern (Amplitudengradient  $\Delta U$  und Phasendifferenz  $\Delta T$ ) sind die Korrektur des Fehlwinkels und die Ableitung des realen Füllstandes  $h_{\text{IST}}$  (bei bekannter Schallgeschwindigkeit) mit hinreichender Genauigkeit möglich.

### Zusammenfassung und Ausblick

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass eine Anzahl von 3 bis 5 Einzelwandler in einer akustischen Wandlergruppe hinreichend ist, um eine – bei der nicht-invasiven Füllstandsmessung durch Fehlankopplung oder Verkippung des Behälters – geneigte Grenzfläche bzw. den Fehlwinkel und die Neigungsrichtung zu erkennen. Die Nutzung eines klassischen Gruppenstrahlers und damit die Phasensteuerung sind nicht zwingend notwendig. Zur Erhöhung des Informationsgehalts werden sämtliche akustischen Pfadkombinationen  $A_{ij}$  zwischen den einzelnen Sensorknoten des Mehrwandlersystems in einer Informationsmatrix  $A$  gespeichert. Aus der sequentiellen Datenerfassung lässt sich unter variierenden Bedingungen (Kippwinkel, Füllhöhe, Störsignale, Fehlankopplung) bereits mit geringem Elektronikaufwand ein auswertbares Signal extrahieren (Bild 2). Die Signalverzerrung infolge der Mehrfachreflexionen in der Behälterwand wird bisher durch ein separates Signalflussgraphen-Modell [2] berechnet.

Zur Überprüfung der Umsetzbarkeit des vereinfachten Triangulationsverfahrens und der Plausibilisierung ausgewählter Problemfälle bzw. Modelldaten wurde ein Versuchsstand aufgebaut, der die nicht-invasive akustische Füllstandsmessung an geschlossenen metallischen Behältern bis  $400 \text{ mm}$  Durchmesser und  $900 \text{ mm}$  Gesamthöhe erlaubt. Die empirischen Untersuchungen zeigen, dass mit den angepassten Wandlergruppen ein – entweder durch Fehlankopplung am gerundeten Behälterboden oder Verkippung der Grenzfläche – Fehlwinkel von bis zu  $20^\circ$  ausgeglichen werden kann. In den Rohdaten ist die Reflexion an der geeigneten Grenzfläche für Fehlwinkel von bis zu  $15^\circ$  separierbar (vgl. Bsp.  $\beta = 5,2^\circ$  / Bild 6) und die Auswertung des Phasenunterschieds zwischen benachbarten Wandlerelementen für den algorithmenbasierten Fehlwinkelausgleich möglich.

Ausblickend ist dieses Verfahren geeignet, neben dem Fehlwinkel zusätzlich die Art der Ankopplung erkennen zu können und die Störanfälligkeit gegenüber wechselnden Medien und Körperschallsignalen zu reduzieren. Dazu können die einzelnen Sensoren perspektivisch auch IP-basiert mit einem zentralen Datenserver verknüpft werden, der kontinuierlich wesentliche Sensoreigenschaften, Prozessinformationen und zyklische Messdaten in einer Datenbankstruktur erfasst. Bei Fehlermeldungen, schwierigen Inbetriebnahme-/Betriebsbedingungen werden sämtliche dieser Messstellen-spezifischen Metadaten abgerufen. Eine externe Erfahrungsinstanz (z.B. Hersteller-Support, ext. Dienstleister) kann eine Interpretation und Bewertung unter Zuhilfenahme der beschriebenen Algorithmen leisten und

Handlungsstrategien zum Abfangen von Fehlfunktionen ableiten (Re-Parametrierung des Sensors).

Mit der serverseitigen Datenbank kann zudem der Aufbau einer Wissensbasis von charakteristischen Fehlersignaturen in den Roh- oder Vorverarbeiteten Messdaten erfolgen. Eine zunehmende Abstrahierfähigkeit und Übertragbarkeit auf weitere, zu interpretierende

Fehlzustände in anderen Füllstands-Anwendungen wird möglich. Die daraus resultierenden deutlich variableren Einbaumöglichkeiten der neuartigen Sensortechnologie gepaart mit großer Flexibilität ermöglichen zukünftig eine erheblich größere Einsatzvielfalt.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter den Förderkennzeichen 02PK2342, 02PK2343 und 02PK2344 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

## **Literatur**

- [1] Chen, H.: The Matrix Expression of Signal Flow Graph and its application in system analysis software, Chinese Journal of Electronics 11 (2002), Nr. 3, S. 361-364
- [2] S. Wöckel, U. Steinmann, J. Auge.: Signalanalyse für Ultraschall-Clamp-on-Systeme, Technisches Messen, Volume 81, Issue 2, p.86-92 (2014)
- [3] Sonotec Ultraschallsensorik Halle GmbH