Ultraschallbasierte Messung und tomographische Rekonstruktion von Temperaturverteilungen

Michael Schwarz[1], Michael Reisinger[1], Daniel Eder[1], Bernhard G. Zagar[1]
[1] *Institut für Elektrische Messtechnik, Johannes Kepler Universität Linz, 4040 Linz, Österreich,*
Email: michael.schwarz@jku.at

Einleitung

Die ultraschallbasierte Messung der Temperatur von Flüssigkeiten ermöglicht es, Ergebnisse mit einer Auflösung im Bereich einiger Tausendstel °C zu erzielen. Allerdings ist nur eine Aussage über die mittlere Temperatur entlang des Ausbreitungspfads des Schalls möglich. Messungen über mehrere verschiedene Pfade ermöglichen grundsätzlich die tomographische Rekonstruktion der Temperaturverteilung im Messgebiet. Dies ist beispielsweise für das Auffinden von Hotspots in Bioreaktoren von Interesse. Im Folgenden wird zuerst der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur in Wasser betrachtet. Anschließend wird ein Aufbau zur Messung der Temperatur über mehrere parallele Schallpfade präsentiert. Abschließend wird auf die Möglichkeit der Rekonstruktion einer Temperaturverteilung genauer eingegangen.

Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit in Fluiden ist unter anderem abhängig von der Temperatur und dem Druck. Unter der Annahme, dass die anderen Einflussfaktoren annähernd konstant bleiben, kann der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur genutzt werden, um die Temperatur eines Mediums zu messen. Dazu muss die Ausbreitungszeit t des Schalls über eine Strecke bekannter Länge l gemessen werden. Daraus ergibt sich die mittlere Schallgeschwindigkeit $\bar{c} = l/t$ entlang des Messpfads, woraus wiederum die mittlere Temperatur $\bar{\vartheta}$ entlang des Pfads bestimmt werden kann.

Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Schallgeschwindigkeit ist für Wasser nichtlinear und nicht exakt bekannt. Es existieren aber verschiedene Näherungen, die auf experimentell bestimmten Werten beruhen. Bilaniuk und Wong [1] haben aus 148 Werten das Polynom

$$c(\vartheta) = c_0 + \sum_{i=1}^{5} a_i \cdot \vartheta^i \tag{1}$$

mit den Koeffizienten in Tabelle 1 ermittelt. In Abbildung 1 ist der Zusammenhang nach Gleichung 1 graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich bei 74 °C ein Maximum der Schallgeschwindigkeit ergibt und sie darüber wieder abnimmt. Dies bedeutet eine Einschränkung des Messbereichs, in dem man aus einer gemessenen Schallgeschwindigkeit auf einen eindeutigen Wert der Temperatur schließen kann. Die Berechnung der Temperatur aus einer gemessenen mittleren Schallgeschwindigkeit erfolgt iterativ. Da der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Temperatur nichtlinear ist, wird im Allgemeinen die aus der mittleren Schallgeschwindigkeit berechnete Temperatur von der tatsächlichen mittleren Temperatur abweichen.

Tabelle 1: Werte der Koeffizienten in Gleichung 1 [1].

Koeffizient	Wert	Einheit
c_0	$1{,}402\,387\,44 \cdot 10^{3}$	m/s
a_1	$5{,}038\,361\,71$	m/(s °C)
a_2	$-5{,}811\,729\,16 \cdot 10^{-2}$	m/(s °C^2)
a_3	$3{,}346\,381\,17 \cdot 10^{-4}$	m/(s °C^3)
a_4	$-1{,}482\,596\,72 \cdot 10^{-6}$	m/(s °C^4)
a_5	$3{,}165\,850\,20 \cdot 10^{-9}$	m/(s °C^5)

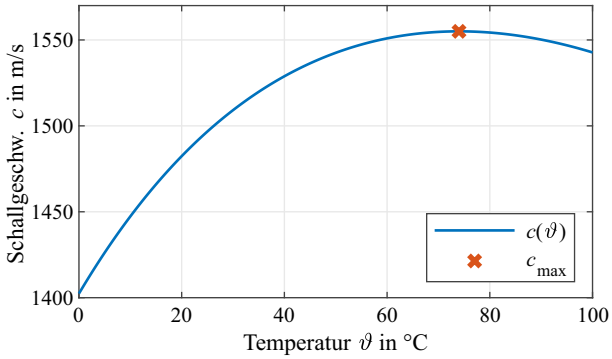

Abbildung 1: Schallgeschwindigkeit in reinem Wasser in Abhängigkeit der Temperatur nach Gleichung 1.

Messaufbau mit parallelen Messpfaden

Das Prinzip der ultraschallbasierten Temperaturmessung veranschaulicht Abbildung 2. Zwei gegenüberliegende piezoelektrische Ultraschallwandler senden und empfangen abwechselnd Schallwellen. Für die beiden Richtungen ergeben sich die beiden Laufzeiten t_{12} und t_{21}. Daraus lässt sich mit der bekannten Länge l die Schallgeschwindigkeit nach

$$c(\vartheta) = \frac{2l}{t_{12} + t_{21}} \tag{2}$$

berechnen. Grundsätzlich ist es für die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit ausreichend, die Laufzeit in nur einer Richtung zu messen. Allerdings wirken beispielsweise Strömungseinflüsse in den zwei Richtungen jeweils mit umgekehrtem Vorzeichen. Unter der Annahme, dass diese sich während der beiden Messungen nicht ändern, haben sie somit keinen Einfluss auf die berechnete Schallgeschwindigkeit.

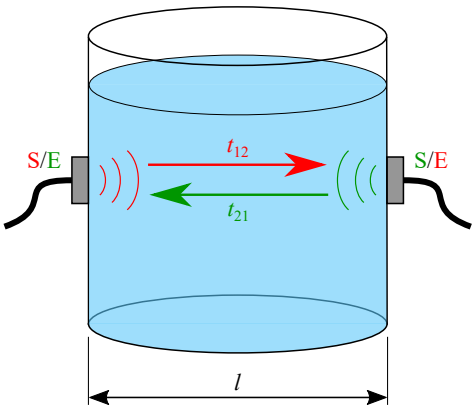

Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau zur ultraschallbasierten Messung der Temperatur [2].

Abbildung 3 zeigt einen Aufbau mit mehreren übereinander, jeweils diametral in einem PVC-Rohr angebrachten Transducer-Paaren. Das Rohr ist mit deionisiertem Wasser gefüllt. Die Länge der Messstrecken beträgt jeweils $l = 150\,\mathrm{mm}$. Daraus ergibt sich bei $\vartheta = 20\,^{\circ}\mathrm{C}$ eine Empfindlichkeit der Zeitmessung in Abhängigkeit der Temperatur von

$$\left.\frac{\partial t(\vartheta, l)}{\partial \vartheta}\right|_{\substack{\vartheta=20\,^{\circ}\mathrm{C} \\ l=150\,\mathrm{mm}}} = -209{,}6\,\frac{\mathrm{ns}}{^{\circ}\mathrm{C}}. \tag{3}$$

Abbildung 3: Messaufbau mit mehreren übereinanderliegenden, parallelen Messpfaden. Auf der gegenüberliegenden Seite befindet sich die gleiche Transducer-Anordnung.

Für eine hochaufgelöste Temperaturmessung ist somit eine sehr hochauflösende Messung der Laufzeit notwendig. Dazu wird das Evaluierungsboard EVM430-FR6047 von *Texas Instruments* verwendet. Dieses beinhaltet die benötigte Hardware zur Erzeugung und Detektion der Signale der Transducer sowie für die Zeitmessung mit einer Auflösung laut Datenblatt von 5 ps [3]. Die aus 1000 Messungen der Schalllaufzeit ermittelte Standardabweichung beträgt 355 ps. Um zwischen den Transducer-Paaren wechseln zu können, sind diese über 16-Kanal Multiplexer mit dem Evaluierungsboard verbunden. Die verwendeten Ultraschallwandler haben eine Resonanzfrequenz von 1 MHz.

Um mit dem Messaufbau die Temperatur entsprechend hochaufgelöst messen zu können, ist eine Kalibrierung des Systems notwendig. Dabei werden der exakte Abstand l sowie die durch Signallaufzeiten verursachten Totzeiten, die in den gemessenen Zeiten enthalten sind, ermittelt. Die gemessenen Zeiten werden bei jeder Messung entsprechend korrigiert [2].

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse einer Messung der Temperatur mit vier der übereinanderliegenden Transducer-Paaren. Für diese Messung wird in einem unterhalb der Transducer-Paare angebrachten Widerstandsdraht für 1 s Strom eingeprägt, um einen Wärmepuls im Wasser einzubringen. In Abbildung 4 lässt sich das Aufsteigen des Wassers höherer Temperatur gut zeitlich nachvollziehen. Der Abfall der maximalen Temperatur mit zunehmender Höhe ist dadurch begründet, dass die Wärme in das gesamte Volumen diffundiert und die Temperatur dadurch sinkt.

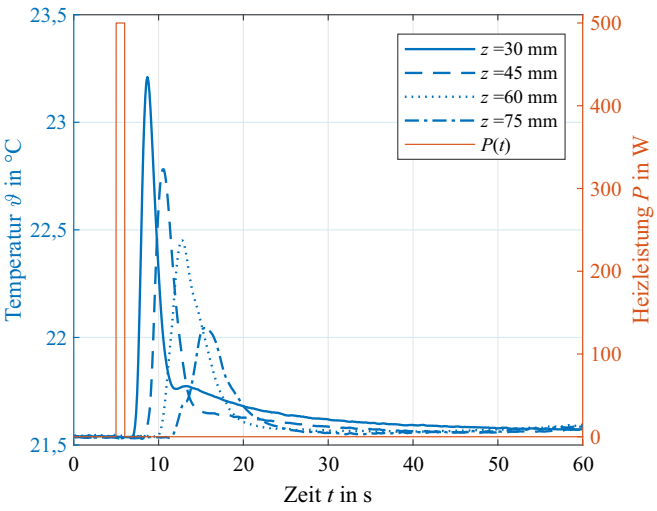

Abbildung 4: Gemessener zeitlicher Verlauf der Temperatur in verschiedenen Höhen über einem kurz von Strom durchflossenen Widerstandsdraht.

Verwendet man anstelle zweier gegenüberliegender Ultraschallwandler in einer Höhe zwei, die axial versetzt zueinander angebracht sind, ist neben der Messung der Temperatur auch die Messung der Geschwindigkeit v von Strömungen in Richtung der Mittelachse des Rohrs möglich. Diese erhält man aus der Laufzeitdifferenz der beiden Richtungen nach

$$v = \frac{t_{21} - t_{12}}{t_{12} t_{21}} \cdot \frac{l}{2\cos\alpha}, \tag{4}$$

wobei α den Winkel zwischen Messpfad und Strömungsrichtung bezeichnet [4, 5].

Möglichkeit der tomographischen Rekonstruktion

Wird die Temperatur über mehrere Pfade in einer Ebene gemessen, ermöglicht dies die tomographische Rekonstruktion der Temperaturverteilung in dieser Ebene. Im Vergleich zur Verwendung von Tomographie in der Medizin stehen für industrielle Anwendungen allerdings üblicherweise wesentlich weniger Messpfade und damit weniger Daten für die Rekonstruktion zur Verfügung. Dies hat zur Folge, dass eine Temperaturverteilung nur vergleichsweise grob bestimmt werden kann. Zusätzlich verringert sich die Zahl der möglichen Messpfade bei steigender Schallfrequenz durch die zunehmend gerichtete Abstrahlung. Bei der Verwendung von Frequenzen im niedrigen hörbaren Bereich in Luft, wie sie beispielsweise in Kraftwerken [6] oder Silos [7] Anwendung finden können, ist die Abstrahlung vergleichsweise ungerichtet. Bei einem rechteckigen Messgebiet, bei dem an jeder Wand vier Transducer angebracht sind, erreicht der ausgesendete Schall jedes Transducers alle an den übrigen drei Wänden positionierten auf direktem Weg. Dadurch ergeben sich für die 16 Transducer insgesamt 96 Messpfade [7].

Bei den im Rahmen dieses Beitrags verwendeten Ultraschallwandlern mit einer Resonanzfrequenz von 1 MHz ist die Abstrahlcharakteristik dagegen stark gerichtet. Dies veranschaulicht schematisch Abbildung 5. Ab der Nahfeldlänge $N = 16{,}86\,\mathrm{mm}$ beträgt der 3 dB-Öffnungswinkel des Schallfelds $\gamma_0 = 7{,}41°$ [8]. Der Transducer-Durchmesser beträgt $D = 10\,\mathrm{mm}$. Somit liegen nur wenige der über den Kreisumfang verteilten Wandler im Bereich des Schallfelds des sendenden Transducers.

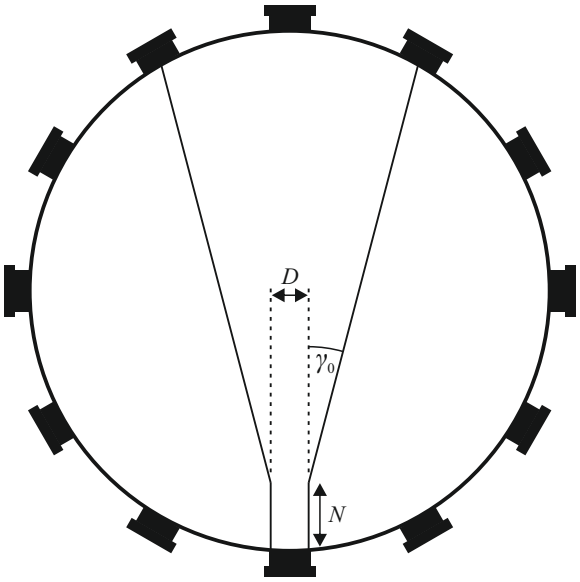

Abbildung 5: Über den Umfang eines Rohrs verteilte Transducer und theoretische Geometrie des Schallfelds eines dieser Transducer.

In Abbildung 6 ist das gemessene Schallfeld der verwendeten Transducer dargestellt. Für die Messung wird ein Drahtreflektor in lateraler Richtung und in Tiefenrichtung in äquidistanten Schritten durch das Schallfeld des Wandlers bewegt. Für jede Drahtposition wird der Maximalwert der Einhüllenden des Echosignals bestimmt. Diese Werte werden dann relativ zum Maximum in dB dargestellt.

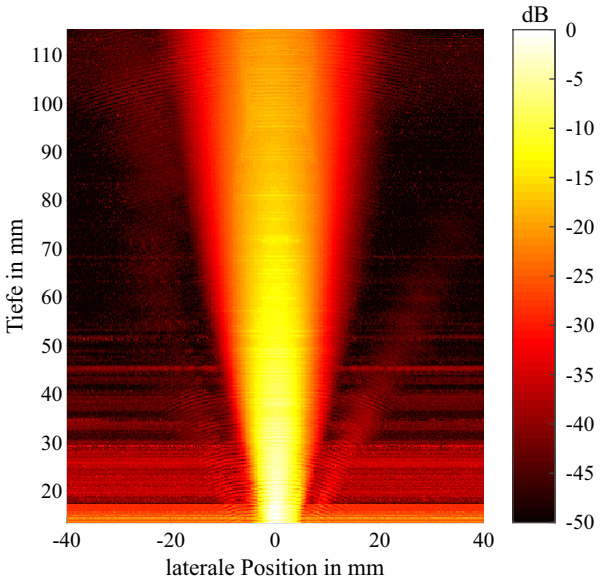

Abbildung 6: Schallfeld des verwendeten Ultraschallwandlers gemessen durch Reflexion an einem Drahtreflektor. Die Werte sind in dB relativ zum Maximum dargestellt.

Die Messung der Laufzeit entspricht der Integration entlang des Ausbreitungswegs über mit der lokalen Schallgeschwindigkeit gewichteten Wegelementen ds, wobei die bei der Ausbreitung über inhomogene Temperaturfelder zu erwartenden Beugungseffekte vernachlässigt sind. Die lokalen Schallgeschwindigkeiten ergeben sich aus der Temperaturverteilung. Für den Fall eines Senders und mehrerer Empfänger lässt sich dies über die sogenannte Fan-Beam-Transformation beschreiben. Diese ist eine Abwandlung der Radon-Transformation und heute Standard bei der Computertomographie. Die Rekonstruktion erfolgt meist mittels der gefilterten Rückprojektion [9].

Abbildung 7 zeigt das Prinzip der Fan-Beam-Transformation. Ein Sender und mehrere Empfänger werden um einen Messbereich rotiert und es werden mit verschiedenen Rotationswinkeln Messungen durchgeführt. Aus den erhaltenen Daten kann die Verteilung im Messgebiet rekonstruiert werden. Allerdings ergibt sich für die Größe des Messbereichs die Einschränkung, dass dieses vollständig von dem durch die Messpfade aufgespannten Fächer abgedeckt werden muss.

In Abbildung 8 oben ist eine angenommene Verteilung der Schallgeschwindigkeit zu sehen. Entlang bestimmter Pfade durch die Verteilung wird integriert, um die jeweiligen Laufzeiten zu erhalten. Aus diesen Daten kann dann mit der gefilterten Rückprojektion die Verteilung, wie in Abbildung 8 unten zu sehen, rekonstruiert werden. Die Rekonstruktion entspricht gut der ursprünglichen Verteilung, allerdings werden dafür 41 Empfangswandler und Messungen unter 12 Rotationswinkeln benötigt. Mit weniger Daten wird das Ergebnis der Rekonstruktion ent-

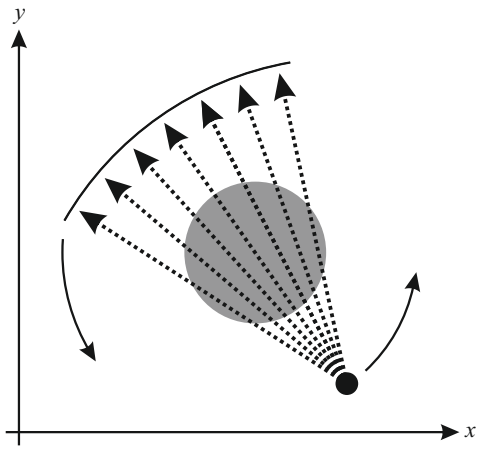

Abbildung 7: Prinzip der Fan-Beam-Transformation [9].

sprechend gröber.

Mit der Rekonstruktion entsprechend der Fan-Beam-Transformation lassen sich gute Ergebnisse erzielen, allerdings erscheint sie für eine Transducer-Anordnung wie in Abbildung 5 nur bedingt geeignet. Im nächsten Schritt wird deshalb ein geeigneteres Verfahren zur Rekonstruktion gesucht. Außerdem wird versucht, durch Beeinflussung des Schallfelds der Transducer mehr Messpfade bei gleichbleibender Anzahl an Wandlern zu ermöglichen.

Zusammenfassung

Die hochaufgelöste Messung der Laufzeit von Ultraschall ermöglicht bei bekannter Länge des Ausbreitungspfads die genaue Messung der mittleren Temperatur entlang des Pfads. Es wurde gezeigt, wie mit mehreren parallelen Messpfaden aufsteigendes Wasser höherer Temperatur zeitlich verfolgt werden kann. Des Weiteren wurde die Möglichkeit der tomographischen Rekonstruktion von Temperaturverteilungen bei mehreren Messpfaden in einer Ebene betrachtet.

Literatur

[1] National Physical Laboratory (Hrsg.): Underwater Acoustics - Technical Guides - Speed of Sound in Pure Water (2000), URL: `http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundpurewater/speedpw.pdf`, Abruf: 30.03.2020

[2] Reisinger, M.; Schwarz, M.; Zagar, B. G.: Ultrasonic Temperature Measurement. Proceedings of the 5th International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances (2019), 261 - 264

[3] Texas Instruments (Hrsg.): EVM430-FR6047 Datenblatt (2017), URL: `http://www.ti.com/lit/ds/slaseb7c/slaseb7c.pdf`, Abruf: 30.03.2020

[4] Schwarz, M.; Uhl, B.; Zagar, B. G.; Stur, M.: Ultraschallbasierte Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Flüssigkeiten und Gasen für den Einsatz in Drainageleitungen in Tunneln. tm - Technisches Messen 86(2) (2019), 93 - 103

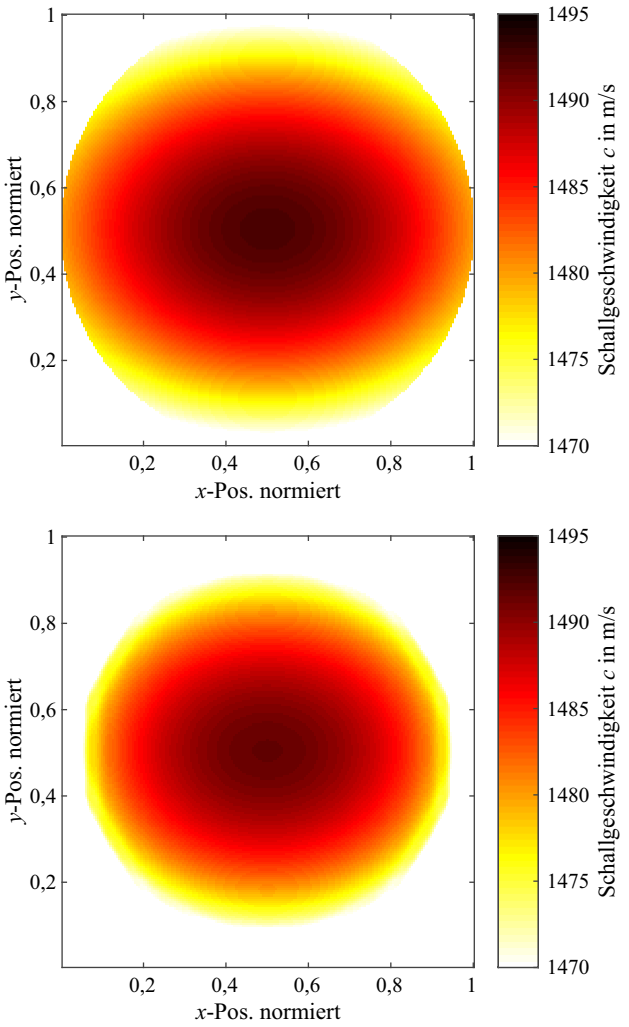

Abbildung 8: Schallgeschwindigkeits-Verteilung (oben) und aus Laufzeiten mit gefilterter Rückprojektion rekonstruierte Verteilung (unten).

[5] Gätke, J.: Akustische Strömungs- und Durchflussmessung. Akademie-Verlag Berlin, 1991

[6] Sielschott, H.; Derichs, W.: Tomography with few data: Use of collocation methods in acoustic pyrometry. ECMI'94: Student Proceedings (1994), 251 - 263

[7] Yan, H.; Chen, G.; Zhou, Y.; Liu, L.: Primary study of temperature distribution measurement in stored grain based on acoustic tomography. Experimental Thermal and Fluid Science (2012), 55-63

[8] Lerch, R.; Sessler, G.; Wolf, D.: Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen. Springer-Verlag, 2009

[9] Gonzalez, R. C.; Woods, R. E.: Digital image processing. Pearson Prentice Hall New Jersey, 2008