

Simultane Kalibrierung der drei Komponenten des Schnellesensors einer pv-Sonde mit Hilfe eines schwingenden Kolbens

Jochen Metzger¹, Manfred Kaltenbacher²

¹ Technische Universität Wien, 1040 Wien, Österreich, Email: jochen.metzger@tuwien.ac.at

² Technische Universität Wien, 1040 Wien, Österreich, Email: manfred.kaltenbacher@tuwien.ac.at

Einleitung

Mit Hilfe der Microflown Ultimate Sound Probe (USP) ist es möglich, gleichzeitig den Schalldruck und die Schallschnelle am selben Ort zu messen. Der Schnellesensor der USP besteht aus drei Komponenten, welche die Schallschnelle in drei orthogonalen Richtungen bestimmt. Jeder dieser Komponenten besteht aus zwei Platindrähten über deren Widerstandsänderung unter Schalleinfluss die Schallschnelle ermittelt wird. Eine Herausforderung bei diesem Sensor ist die Kalibrierung. Es ist keine Vergleichskalibrierung möglich, da es keinen weiteren Sensor gibt, welcher die Schallschnelle direkt misst. Eine Möglichkeit, die pv-Sonde zu kalibrieren stellt der Piston-on-a-sphere-Kalibrator (POS) dar[1]. Bei dieser Kalibrierungsmethode wird die USP zusammen mit einem Referenzmikrofon in das bekannte Schallfeld eines speziellen Lautsprechers gebracht, welcher als schwingender Kolben auf einer Kugel modelliert wird. Hierfür kann die spezifische Schallimpedanz auf der Mittelachse des Lautsprechers analytisch berechnet werden[2]. Nachteilig an dieser Art der Kalibrierung ist, dass der hörbare Frequenzbereich in zwei Kalibrierungsschritten abgedeckt wird und zudem jede einzelne Komponente des Schnellesensors sequentiell kalibriert werden muss. Der Kalibrierungsprozess besteht demnach aus insgesamt sechs Einzelschritten. Zusätzlich stellt die POS-Kalibrierung keine direkte Art der Kalibrierung dar, da die Schallschnelle bei Kenntnis der Schallimpedanz und des Schalldrucks berechnet wird. Das in diesem Beitrag vorgestellte direkte simultane Kalibrierungsverfahren wird charakterisiert und hinsichtlich der Messfehler untersucht.

Simultane Kalibrierung

Die drei Komponenten des Schnellesensors werden simultan mit Hilfe eines Referenzgeschwindigkeitsfelds kalibriert. Dieses Referenzgeschwindigkeitsfeld wird durch einen schwingenden Kolben erzeugt, welcher auf einen elektrodynamischen Schwingerreger montiert ist[3]. Bei der Annahme einer lokalen homogenen Geschwindigkeitsverteilung im Nahfeld des Kolbens wird die pv-Sonde unter beliebiger Ausrichtung dem Referenzgeschwindigkeitsfeld ausgesetzt. Durch dieses Verfahren können bei Kenntnis der anteiligen Schallschnelle an jeder Komponente des Schnellesensors die drei Komponenten simultan kalibriert werden. Darüber hinaus kann die Kalibrierung in einem gewöhnlichen Labor ohne besondere akustische Freifeldbedingungen durchgeführt werden.

Das Messsystem ACCMF

Um den Anteil der Partikelgeschwindigkeit an jeder Komponente zu ermitteln, ist die USP mit einem 3D-Beschleunigungssensor kombiniert (**ACC**eleration **MicroFlow**n), um mit Hilfe des Gravitationsfelds die Ausrichtung der pv-Sonde bezüglich des Referenzgeschwindigkeitsfelds zu bestimmen. Unter den folgenden idealen Annahmen, dass

- das homogene Referenzgeschwindigkeitsfeld parallel zum lokalen Gravitationsfeld ausgerichtet ist,
- die drei Komponenten der beiden Sensoren (Beschleunigungssensor, Schnellesensor der pv-Sonde) orthogonal zueinander angeordnet sind
- und kein Rotationswinkel zwischen den durch die Achsen der Sensoren aufgespannten Koordinatensystemen besteht,

kann die Schallschnelle v_i an jeder Komponente ($i = 1, 2, 3$) über

$$\frac{a_i}{|\vec{g}|} = -\frac{v_i}{|\vec{v}_r|} \quad (1)$$

bestimmt werden. Hierbei ist \vec{g} die Erdbeschleunigung, a_i die anteilige Beschleunigung an Komponente i des Beschleunigungssensors und \vec{v}_r der Vektor des Referenzgeschwindigkeitsfelds.

Kalibrierungsergebnisse

Die durch das Messsystem ACCMF ermittelte Empfindlichkeit in Amplitude und Phase ist in Abb. 1 dargestellt. Es bestehen Abweichungen bezüglich der Angaben des Herstellers. Deutliche Abweichung von den Herstellerangaben im unteren Frequenzbereich sind vor allem in der Phase der Empfindlichkeit zu sehen. Es lässt sich allerdings eine gute Übereinstimmung über einen großen Frequenzbereich zu den Herstellerangaben erkennen.

Charakterisierung des Messsystems

Um die Abweichungen bei der Kalibrierung zu untersuchen, wird das Messsystem charakterisiert. Im Zuge dessen werden die oben angeführten idealen Annahmen überprüft.

Ausrichtung der beiden Referenzfelder

Die Annahme der Parallelität der beiden Referenzfelder wird untersucht, indem der Beschleunigungssensor auf

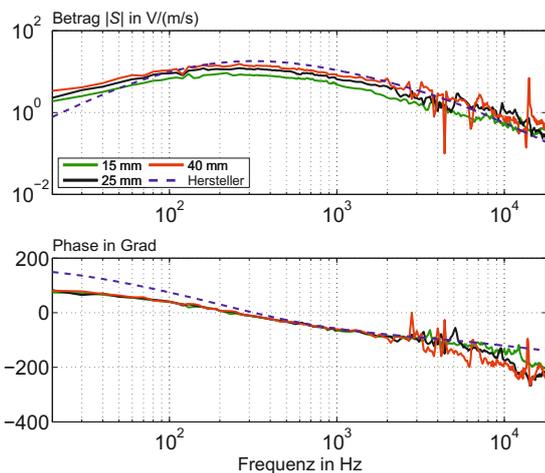


Abbildung 1: Ermittelte Empfindlichkeit der Komponente 1 des Schnellesensors in Betrag und Phase bei unterschiedlichen Kolbenradien im Vergleich zu den Herstellerangaben.

den schwingenden Kolben montiert wird und der Winkel zwischen statischer Beschleunigung (aufgrund der Erdbeschleunigung) und dynamischer Beschleunigung (resultierend aus der Bewegung des Kolbens) analysiert wird. Die Abweichung ergab Werte kleiner 1° und ist damit vernachlässigbar klein.

Orthogonalitätsprüfung

Um die Orthogonalität der drei Komponenten der beiden Sensoren zu überprüfen, werden die Sensoren in ihrem Referenzfeld um jeweils eine Achse gedreht und die Signale der beiden anderen Richtungen aufgezeichnet. Der Phasenversatz zwischen diesen beiden Signalen entspricht dem Winkel zwischen den jeweiligen Achsen. Durch Sinuseinpassung dieser zwei Signale ist es möglich, den Phasenversatz mit einer höheren Auflösung als die Winkelauflösung der Messung zu bestimmen.

Die Abweichung von der Orthogonalität beim Beschleunigungssensor sind mit weniger als $0,1^\circ$ vernachlässigbar klein. Die Abweichungen beim Sensor für Schallschnelle sind stark unterschiedlich und nicht vernachlässigbar. Allerdings ist die Drehung um die Querachse der pv-Sonde nur um maximal 180° möglich, weshalb die Einpassung in ein sinusförmiges Signal erschwert ist. Zudem ergibt sich kein optimal sinusförmiger Verlauf, was mehrere Ursachen haben kann. Zum einen ist es möglich, dass das Geschwindigkeitsfeld nicht homogen genug ist, bzw. der Sensor außerhalb der Drehachse rotiert ist. Zum anderen wäre es möglich, dass die Drähte einer Komponente des Schnellesensors nicht parallel sondern leicht windschief angeordnet sind.

Rotationsfreiheitsgrade der beiden Sensoren

Bei der Bestimmung der Rotationsfreiheitsgrade der beiden Sensoren wird das Messsystem ACCMF in den beiden homogenen Referenzfeldern um jeweils eine Achse gedreht und der Phasenversatz zwischen den interessierenden Achsen bestimmt. Das Problem, dass das ACCMF um die Querachse der pv-Sonde nur um einen maximalen Winkel von 180° gedreht werden kann, besteht auch hier.

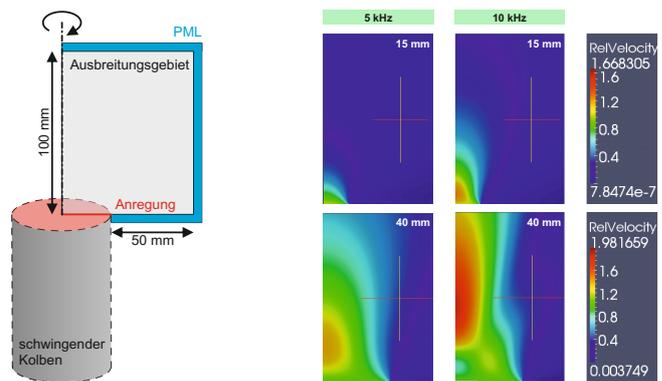


Abbildung 2: Rotations-symmetrische Simulationsanordnung (links) und relative Geschwindigkeit bei 5 kHz und 10 kHz bezogen auf die Anregungsamplitude bei 15 mm und 40 mm Kolbenradius (rechts).

Die Untersuchungen zeigen eine Verkipfung der jeweiligen Achsenpaare um bis zu 5° .

Numerische Untersuchungen des Referenzgeschwindigkeitsfelds

In Abb. 2 ist die relative Geschwindigkeiten bezogen auf die Anregungsamplitude zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass vor allem bei höheren Frequenzen nicht mehr von einem homogenen Schallfeld ausgegangen werden kann. Bezogen auf den Querschnitt des pv-Sensors ($5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$) allerdings, kann annähernd von einer zumindest lokalen homogenen Geschwindigkeitsverteilung ausgegangen werden. Zudem zeigt die Simulation, dass die Geschwindigkeit vor dem Kolben höher als auf der Kolbenoberfläche ist (relative Geschwindigkeit größer 1), was eine deutliche Auswirkung auf das Kalibrierungsergebnis zur Folge hat.

Zusammenfassung & Ausblick

Mit der vorgestellten Kalibrierungsmethode lassen sich die drei Komponenten des Schnellesensors simultan kalibrieren. Das aufgebaute Messsystem wurde hinsichtlich der idealen Annahmen charakterisiert, wobei sich zum Teil vernachlässigbare Abweichungen von diesen idealen Annahmen, allerdings auch Abweichungen, welche in folgenden Kalibrierungen berücksichtigt werden müssen, zeigten.

Literatur

- [1] T. Basten, H.-E. de Bree: Full bandwidth calibration procedure for acoustic probes containing a pressure and particle velocity sensor, J. Acoust. Soc. Am. 127(1) (2010), 264-270
- [2] E.G. Williams: Fourier Acoustics: Sound Radiation and Nearfield Acoustical Holography, Academic Press, London, 1999
- [3] J. Metzger, M. Kaltenbacher: Simultaneous calibration of all three acoustic particle velocity components of a pressure-velocity probe, Proceedings of Internoise 2013, Innsbruck, 2013