



Doctoral Thesis

Multi-Frequency Phase Control of a Torsional Oscillator for Applications in Dynamic Fluid Sensing

Author(s):

Brack, Tobias

Publication Date:

2017

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010867290> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 23952

Multi-Frequency Phase Control of a Torsional Oscillator for Applications in Dynamic Fluid Sensing

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

TOBIAS BRACK

Dipl.-Ing., Karlsruher Institut für Technologie
born on 12.05.1984
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. Dual, examiner
Prof. Dr. R. D'Andrea, co-examiner

2017

Abstract

When an oscillating mechanical structure comes into contact with a fluid, frequency and damping of the vibration change depending on the physical properties of the surrounding medium. This principle is applied in dynamic fluid sensing, where feedback control is used to hold the oscillation at resonance, thus providing continuous measurement output of the fluid parameters. Currently numerous applications exist in research and industry, such as process devices, portable hand-held systems or lab-on-a-chip applications, where usually one single frequency is controlled, mainly to determine the viscosity and density of simple Newtonian fluids. However, often non-Newtonian fluids, especially viscoelastic fluids, are the subject of interest. In this case, the dependence of the fluid parameters on the frequency is of particular importance hence the fluid characterization requires the use and interpretation of various frequencies.

The present thesis is concerned with the development of a measurement system that uses various resonance frequencies of an oscillator. In order to obtain continuous measurement output, the corresponding natural vibrations are to be excited and controlled simultaneously. Alongside the improvement of common resonance-based viscometers in terms of robustness and accuracy, the development of a process rheometer is considered as the main goal of this thesis. Furthermore, the analysis and design of appropriate control concepts shall be emphasized. The thesis is structured in three parts: design and model of the oscillator, analysis of the vibration control and applications in fluid sensing.

The design of the oscillator is based on a commercially available process viscometer which uses torsional oscillations of a rod-like structure. In order to obtain as many torsional resonance frequencies as possible in an accessible frequency range, the design is adapted accordingly using a mechanical model of the structure. An analytical description of the relationship between measurement parameters and physical fluid parameters is presented that is valid both for Newtonian and linear viscoelastic fluids. Simple, explicit equations can be derived for weakly elastic fluids, while implicit equations represent the interaction between structure and strongly elastic fluids. Further, the analytical model is used to investigate the influence of the immersion level of the sensor as well as temperature effects.

The second part of the thesis presents the control concept that is used to evaluate multiple resonance frequencies and modal damping values of an oscillator. The central part of the control is a phase-locked loop (PLL), which stabilizes the phase shift between excitation and response of the oscillator by adapting the excitation frequency. First, phase controlled systems with one degree of freedom are investigated. Since the stability and dynamics of the control loop strongly influences the measurement quality, an analytical

description of the phase/frequency behavior of the control loop is sought. However, the classical oscillator turns into a highly nonlinear system when it is formulated in terms of phase signals. This work presents a universally valid description in state space form such that standard methods of nonlinear system theory can be applied. A linearization is applied in order to formulate the transfer functions, which enable to effectively design the controller. Since the analysis identifies the unknown damping ratio as crucial parameter for the closed loop dynamics, two concepts are presented to overcome this issue, including a continuous adaptation of the controller parameters and a harmonic variation of the control signal. Simulations with the nonlinear system as well as experiments with the torsional oscillator validate the nonlinear and linear description.

In order to simultaneously control different resonance frequencies, multiple independent PLLs are used of which each subsystem is responsible for one natural vibration. Since the response signal of the oscillator contains all excited frequencies, each subsystem uses an averaging phase detector in order to identify the phase shift at one defined frequency. It is shown that the influence of interactions between the subsystems can be minimized using the analytic system description.

The last part presents applications of the multi-frequency tracking as applied to fluid characterization. A calibration of the sensor with Newtonian fluids confirms the excellent analytical description of the fluid influence. The simultaneous evaluation of four damping values enables the determination of the dynamic viscosity with a relative error of less than 1%.

Since the fluid characterization requires the unloaded oscillator as a reference, one natural mode of the oscillator can be used to correct potential temperature shifts of the reference frequency, even if the sensor is immersed in the fluid. This greatly improves the accuracy of the viscosity measurement for situations of varying temperature conditions. Further, the use of multiple frequencies in order to determine the immersion level of the sensor is demonstrated.

Finally, different viscoelastic fluids are investigated at five frequencies between 2 kHz and 20 kHz. Since the theoretical description of the fluid-structure interaction proves to accurately model the reality, no further calibration of the sensor is required. Polymer-, surfactant- and polysaccharide solutions are used as test fluids, which are additionally characterized by means of a classical rotational rheometer (low frequency range) and diffusing-wave spectroscopy (high frequency range). The comparison of all three methods shows very good agreement and validates the application of resonant sensors as resonant rheometer for viscoelastic fluids for the first time. The simplified, explicit sensor equations are validated for weakly elastic fluids thus enabling a measurement with very low computational effort.

Zusammenfassung

Kommt eine in Resonanz schwingende Struktur mit einer Flüssigkeit in Kontakt, ändert sich die Frequenz und Dämpfung der Schwingung als Funktion der physikalischen Eigenschaften der umgebenden Flüssigkeit. Diese Eigenschaft wird in der dynamischen Fluidcharakterisierung genutzt, bei der die Schwingung mittels geeigneter Regelung ständig bei Resonanz gehalten wird, so dass ein kontinuierliches Messsignal zur Verfügung steht. Heutzutage kann dieses Prinzip in Prozessgeräten, tragbaren Messinstrumenten bis hin zu Lab-on-a-Chip Anwendungen gefunden werden. In der Regel wird dabei eine einzige Resonanzfrequenz überwacht und die Viskosität oder Dichte von Newtonschen Flüssigkeiten erfasst. Oft ist jedoch auch das Verhalten von nicht-Newtonschen Fluiden, insbesondere viskoelastischer Fluide, Gegenstand von Forschung und Entwicklung. Dabei ist vor allem die Abhängigkeit der Fluideigenschaften von der Schwingungsfrequenz von Bedeutung, was die Verwendung und Auswertung von unterschiedlichen Frequenzen erfordert.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Messsystems, bei dem mehrere Resonanzfrequenzen derselben Struktur verwendet werden. Dabei sollen die dazugehörigen Eigenschwingungen gleichzeitig und kontinuierlich angeregt und ausgewertet werden. Neben der Verbesserung von Genauigkeit und Robustheit klassischer Resonanz-Viskosimeter ist die Entwicklung eines Prozess-Rheometers Ziel dieser Arbeit. Ein Fokus wird ausserdem auf die Analyse und das Design geeigneter Regelkonzepte gelegt. Die Arbeit ist in drei Teile gegliedert: Design und Modellierung des Schwingers, Regelkonzepte und –auslegung sowie verschiedene Anwendungen in der Fluidcharakterisierung.

Das Design des Schwingers basiert auf einem kommerziell verfügbaren Prozess Viskosimeter, welches Torsionsschwingungen einer stabförmigen Struktur verwendet. Ein mechanisches Modell des Schwingers wird verwendet um das Design so anzupassen, dass möglichst viele Torsionsschwingungen in einem messbaren Frequenzbereich auftreten. Eine analytische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen Messgrößen und Fluidparametern wird formuliert. Explizite Gleichungen können für Newtonsche und schwach elastische Fluide hergeleitet werden, wohingegen die Zusammenhänge für stark elastische Fluide implizit gegeben sind. Mithilfe der analytischen Beschreibung kann zudem der Einfluss der Eintauchtiefe des Sensors sowie der Einfluss der Temperatur beschrieben werden.

Der zweite Teil der Arbeit stellt das Regelungskonzept vor, um Frequenz und Dämpfung mehrerer Resonanzen eines Schwingers gleichzeitig zu messen. Es beruht auf der Verwendung eines Phasenregelkreises, welcher die Phasenverschiebung zwischen Anregungs- und Antwortsignal mittels Anpassung der Anregungsfrequenz stabilisiert. Zunächst werden phasengeregelte Systeme mit einem Freiheitsgrad analysiert. Da die Stabilität und Dynamik des gesamten Regelkreises einen entscheidenden Einfluss auf die Messqualität

hat, ist eine analytische Beschreibung des Regelkreises in Form von Phasensignalen notwendig. Allerdings ergibt sich in dieser Form eine stark nichtlineare Beschreibung des Schwingers. Diese Arbeit präsentiert eine universell gültige, vollständige Beschreibung des Regelkreises in Zustandsraumdarstellung, die die Verwendung von klassischen Methoden der nichtlinearen Systemtheorie ermöglicht. Mittels Linearisierung werden die Übertragungsfunktionen des Regelkreises formuliert und Vorgaben für die Regelparameter hergeleitet, um die Resonanzfrequenz- und Dämpfungsmessung zu optimieren. Simulationen des nichtlinearen Systems sowie experimentelle Untersuchungen validieren die nichtlineare und lineare Beschreibung des Regelkreises. Da die unbekannte Dämpfung des Schwingers als entscheidender Parameter für die Dynamik des geschlossenen Regelkreises identifiziert werden kann, werden eine laufende Adaption der Regelparameter sowie eine harmonische Änderung der Zielphase als alternative Regelkonzepte vorgestellt.

Zur simultanen Regelung unterschiedlicher Resonanzfrequenzen werden mehrere unabhängige Phasenregelkreise verwendet, wobei jeder Regelkreis für eine Resonanzfrequenz verantwortlich ist. Da das Antwortsignal des Schwingers alle angeregten Frequenzen enthält, wird das Prinzip des klassischen analogen Multiplikators verwendet, welcher die Detektion der Phasendifferenz bei nur einer definierten Frequenz ermöglicht. Es wird gezeigt, dass der Einfluss von Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Subsystemen auf Dynamik und Stabilität mithilfe der optimierten Regelparameter minimiert werden kann.

Im letzten Teil der Arbeit werden Anwendungen der Multi-Frequenz Regelung in Bezug auf die Messung von Fluideigenschaften vorgestellt. Eine Kalibration des Sensors mit Newtonschen Fluiden bestätigt die sehr gute analytische Beschreibung des Fluideinflusses. Durch die gleichzeitige Auswertung von vier Dämpfungswerten kann die Viskosität mit einem relativen Fehler unter 1% bestimmt werden.

Da sich die Referenzwerte, d.h. die Eigenschaften des Schwingers in Luft, durch Temperatureinflüsse ändern können, kann eine Schwingungsmoden verwendet werden um die Referenzwerte während des Messbetriebes zu korrigieren. Das führt zu einer deutlichen Verbesserung der Messqualität.

Schliesslich werden verschiedene viskoelastische Fluide bei fünf Frequenzen im Bereich von 2 kHz bis 20 kHz charakterisiert. Dank des analytischen Sensormodelles ist die Fluid-Struktur Wechselwirkung so gut beschrieben, dass keine zusätzliche Kalibration nötig ist. Als Testfluide werden Polymer-, Tensid- sowie Polysaccharidlösungen verwendet, die zusätzlich mit einem klassischen Rheometer (niedriger Frequenzbereich) und mit Diffusing-Wave Spectroscopy Mikrorheologie (hoher Frequenzbereich) charakterisiert werden. Der Vergleich zwischen den Ergebnissen des Torsionsschwingers und den alternativen Methoden zeigt sehr gute Übereinstimmung und bestätigt die Anwendbarkeit des Sensors zur Messung linear viskoelastischer Flüssigkeiten. Die vereinfachten, expliziten Sensorgleichungen können für schwach elastisches Verhalten validiert werden und ermöglichen eine Messung mit geringem Rechenaufwand.