

## Abstract

Hydraulic systems and components are subject to increasing demands with respect to power density, versatility and durability. One key aspect is to reduce the risk of resonance, which has an adverse effect on the controllability and durability of the system. In order to assess the system behavior during the design process, simulation has become an indispensable tool. However, accurate modelling and simulation of fluid power systems requires a good knowledge of the fluid's properties and especially its compliance.

If undissolved air is present in the form of bubbles, dynamic effects may need to be considered during the analysis in addition to the well-known (quasi-)static effects. In this work, the compressibility for a fluid containing gas bubbles is derived using the Rayleigh-Plesset equation, which describes the bubble dynamics. The results suggest that dynamic effects can be taken into account by introducing a complex-valued bulk modulus, which implies that a pressure change and an associated change in the mixture's density do not necessarily have to occur simultaneously. Utilizing the complex-valued bulk modulus in frequency domain, it is shown that each bubble within the two-phase mixture can be modelled as a mass-spring-damper system – implying that every bubble possesses a natural frequency and an individual damping characteristics. Using the transmission line theory, the effect of the mixture dynamics on a pipe is demonstrated, emphasizing the need to improve current computational methods. With the help of the subsequently developed solution in the time domain, these effects can be implemented in modern simulation tools. A numerical realization of the model into a commercial simulation software utilizing the method of characteristics is also presented.

Finally, an experimental setup is presented which allows the demonstration of two different phenomena associated with bubble dynamics: A reduction of the speed of sound and an increase of pressure wave attenuation. The test setup allows both impulse and harmonic (sinusoidal) excitation. Bubbles are generated using a capillary principle and a parallel water flow. It is shown that a lognormal distribution accurately approximates real bubble distributions. By comparing the frequency response functions of a two-phase fluid and a single-phase fluid, cancellation effects are confirmed, proving the dynamic influence of bubbles in a liquid.

# Kurzfassung

An hydraulische Systeme und Komponenten werden immer höhere Anforderungen in Bezug auf Leistungsdichte, Flexibilität und Lebensdauer gestellt. Hinsichtlich des Betriebs gilt es dabei vor allem, die Gefahr von Resonanz zu reduzieren. Dabei können Druckschwingungen, die sich in fluidtechnischen Rohrleitungssystemen ausbreiten, zu Systemresonanz führen, was sich wiederum negativ auf die Steuerbarkeit und die Lebensdauer des Systems auswirkt. Um das Systemverhalten bereits während des Auslegungsprozesses beurteilen zu können, hat sich die Simulation als unverzichtbares Werkzeug etabliert. Eine akkurate Modellierung und Simulation von fluidtechnischen Systemen erfordert jedoch gute Kenntnisse über die Eigenschaften des Fluides und insbesondere ihrer Nachgiebigkeit oder Kompressibilität.

Wenn ungelöste Luft in Form von Blasen vorhanden ist, müssen unter bestimmten Bedingungen neben den bekannten (quasi-)statischen Effekten auch dynamische Effekte bei der Analyse berücksichtigt werden. In dieser Arbeit wird ein Modell für die Kompressibilität einer mit Gasblasen beladenen Flüssigkeit unter Verwendung der Rayleigh-Plesset-Gleichung aufgestellt, welche die Blasendynamik beschreibt. Dabei zeigt sich, dass dynamische Effekte durch die Einführung eines mathematisch komplexwertigen Kompressionsmoduls berücksichtigt werden können. Dies impliziert, dass eine Druckänderung und eine damit einhergehende Änderung der Dichte des Gemisches nicht notwendigerweise simultan erfolgen müssen. Unter Verwendung des hergeleiteten Kompressionsmoduls im Frequenzbereich wird gezeigt, dass jede Blase im zweiphasigen Gemisch als Masse-Feder-Dämpfer-System modelliert werden kann, sodass jede Blase eine Eigenfrequenz und Dämpfungseigenschaften besitzt. Mit Hilfe der Vierpoltheorie wird die Auswirkung der Gemischdynamik auf ein Rohr gezeigt, wodurch die Notwendigkeit einer Verbesserung der derzeitigen Berechnungsmethoden demonstriert wird. Auf Basis der anschließend entwickelten Lösung im Zeitbereich können diese Effekte in moderne Simulationstools implementiert werden. Eine numerische Umsetzung des Modells wird zudem durch Implementierung in das Charakteristikenverfahren vorgestellt.

Abschließend wird ein Versuchsaufbau präsentiert, der eine Validierung blasendynamischer Effekte auf Basis von zwei hierfür charakteristischen Phänomenen ermöglichen soll: Die Änderung der Schallgeschwindigkeit sowie der Dämpfung. Der Versuchsaufbau basiert auf einer Impulsanregung und einer harmonischen (sinusförmigen) Anregung. Die Blasen werden mit Hilfe eines Kapillarprinzips und einer parallelen Wasserströmung erzeugt. Es wird gezeigt, dass reale Blasenverteilungen durch eine logarithmische Normalverteilung akkurat wiedergegeben werden. Durch den Vergleich der Frequenzgänge eines zweiphasigen und eines einphasigen Fluids werden Auslöschungseffekte bestätigt, wodurch der dynamische Einfluss von Blasen in einer Flüssigkeit bewiesen wird.