

Schwingungsdynamik akustisch angeregter Tropfen

MATTHIAS RÜGGERBERG und JOACHIM HOLZFUSS

Institut für Angewandte Physik, Technische Hochschule Darmstadt, Schloßgartenstr. 7, 64289 Darmstadt

Einleitung

In stehenden Schallwellen hoher Intensität können in den Druckknoten Objekte kontaktlos zum Schweben gebracht und festgehalten werden. Dieses als akustische Levitation bezeichnete Phänomen eignet sich insbesondere zur Untersuchung der Dynamik von Tropfen und Blasen und findet Anwendung beim Positionieren und Fixieren von kleinen Gegenständen in der Schwerelosigkeit und in der Metallurgie zur Herstellung von kontaktfrei erstarrten Metallegierungen.

Die theoretische Beschreibung der nichtlinearen Schwingungen von Tropfen und Blasen¹ erweist sich als außerordentlich schwierig. Für zahlreiche Spezialfälle der nichtlinearen Tropfendynamik sind jedoch in den letzten Jahren theoretische Modelle entwickelt und experimentell bestätigt worden [1,2,3].

Versuchsaufbau

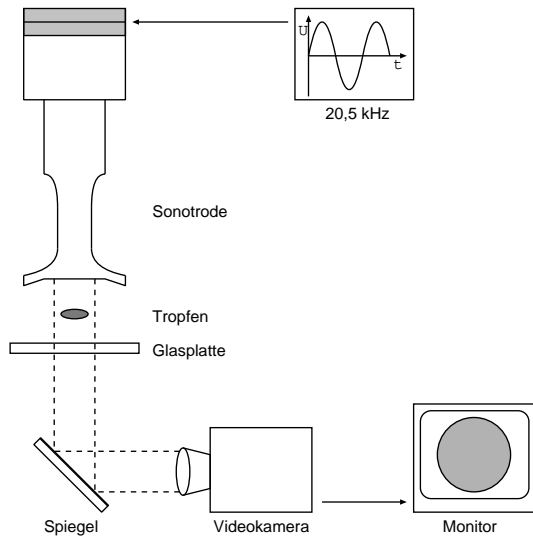


Abb. 1 Versuchsaufbau

Ein Ultraschallhorn wird mit einer sinusförmigen Wechselspannung von 20,5 kHz in Resonanz betrieben. Die vom piezokeramischen Wandler an der Sonotrode erzeugten Schallwellen werden von einer Glasplatte reflektiert und bilden ein Stehwellenfeld halber Wellenlänge (ca. 9 mm) von bis zu 180 dB. Die Glasplatte ist auf einem Hebeblock montiert, um den Abstand zum Schwinger im Mikrometerbereich genau einstellen zu können. Im Druckknoten werden Flüssigkeitstropfen mit Durchmessern von bis zu 4 mm injiziert und zum Schweben gebracht. Der Tropfen wird durch die Glasplatte mit einer Videokamera aufgezeichnet und auf einem Monitor dargestellt (Abb. 1)[4].

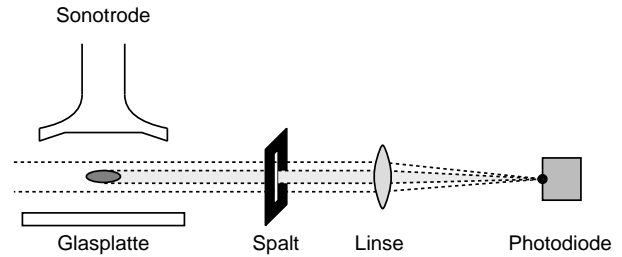


Abb. 2 Erfassung der Tropfenhöhe

Zur Aufzeichnung der Höhe des Tropfens wird dessen Schatten auf einen Spalt projiziert und auf eine Photodiode fokussiert (Abb. 2). Der Photodiodenstrom wird mit abflachender Tropfenform immer größer und kann somit als Maß für die Amplitude dienen.

Resonanzkurven

Zur Untersuchung des Resonanzverhaltens der Tropfen wird die Amplitude der Ultraschallwelle sinusförmig moduliert, wobei die Modulationsfrequenz innerhalb von 50 s in einem Intervall von 30 Hz bis 110 Hz stetig erhöht bzw. erniedrigt wird.

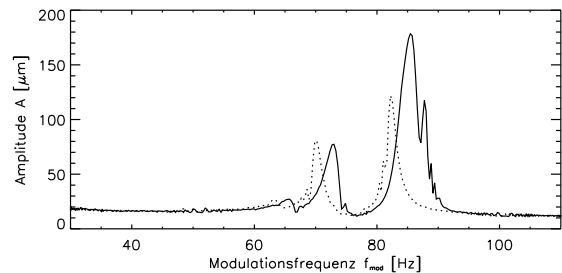
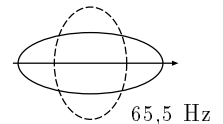
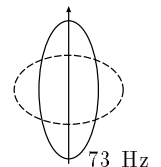


Abb. 3 Resonanzkurve eines Wassertropfens ($R_0 = 1,35 \text{ mm}$, $f_{lin} = 76,9 \text{ Hz}$). Die Modulationsamplitude beträgt 4% der Ultraschallamplitude. Durchgezogene und unterbrochene Linie repräsentieren auf- und absteigende Frequenzänderungen.

Bemerkenswert ist das Auftreten von drei Resonanzen: bei 65,5 Hz, 73 Hz und 85 Hz. Videoaufnahmen zeigen, daß lediglich der 2. Mode angeregt wird.

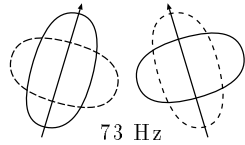


Die Entartung zwischen den verschiedenen räumlichen Ausrichtungen dieses Modes ist jedoch wegen der abgeflachten Ruheform aufgehoben. Die Seitenansicht der jeweiligen Schwingungszustände sind in den nebenstehenden Skizzen veranschaulicht. Erwartungsgemäß liegen diese Eigenfrequenzen aufgrund der abgeflachten Gleichgewichtsform und der relativ großen Amplituden deutlich unter der linearen Eigenfrequenz von $f_{lin} = 76,9 \text{ Hz}$.



¹Tropfen- und Blasenschwingungen liegen die gleichen Differentialgleichungen jedoch mit unterschiedlichen Randbedingungen zugrunde.

Die dritte Resonanz bei 85 Hz nimmt eine Sonderstellung ein. Der Tropfen scheint umlaufende Schwingung auszuführen, die sich als phasenverschobene Überlagerung zweier oder mehrerer Schwingungen mit verkippter Symmetrieachse darstellen läßt.



Die deutlichen Oszillationen an der abfallenden Flanke der Resonanzen werden durch ein Überlagerung der angeregten mit der nur langsam abklingenden Eigenschwingung verursacht.

Parametrische Tropfenschwingungen

Die umlaufenden Schwingungen der dritten Resonanz können bei höherem Schalldruck (bzw. verringerterem Sonotroden-Reflektor Abstand) spontan entstehen und sind über lange Zeiträume hinweg stabil. Eine rückgekoppelte Wechselwirkung mit dem Schallfeld führt dem Tropfen Schwingungsenergie zu: Einerseits stellt der Tropfen im Schallfeld einen Streukörper dar, der die stehende Welle in Abhängigkeit seiner Form stört, andererseits bestimmt der einwirkende Schallstrahlungsdruck die Tropfenform. Eine theoretische Beschreibung dieser Wechselwirkung ist bisher noch nicht gelungen.

Abb. 4 zeigt die Entstehung dieser Oszillationen bei abnehmendem Reflektorabstand anhand des Leistungsspektrogramms und der fraktalen (Korrelations-)Dimension der Attraktoren, auf denen die Systemdynamik im Phasenraum abläuft. Sie ist ein Maß für die Anzahl der linear unabhängigen Moden, die im Tropfen bei festen Parameterwerten aktiv sind [5].

Bis 9,44 mm ist demnach lediglich eine Mode aktiv (2. Mode, 50 Hz), wobei aus dem Spektrogramm hervorgeht, daß sich nacheinander verschiedene räumliche Ausrichtungen dieses Modes ausbilden.

Anschließend verstärkt sich die 1. Oberschwingung der Grundmode; Damit einher beginnt der stark abgeflachte Tropfen in der 3. Mode zu schwingen. Weitere niederfrequente Translationsschwingungen und Rotationen führen zu der hohen Dimension. Dieser Ablauf wiederholt sich ab 9,35 mm mit der 2. Oberschwingung und der 4. Mode. Die Frequenzauflösung (9,33-9,30 mm, 95 Hz) ist vermutlich durch das Meßprinzip der Schattenprojektion und einer Rotation des Tropfens verursacht.

Im letzten Abschnitt (ab 9,27 mm) ist der Tropfen extrem abgeflacht und befindet sich kurzzeitig im 6. Mode. Das einsetzende Breitbandrauschen ist mit einer hohen Dimension und irregulären Tropfenformen verbunden, die schließlich zum Aufreißen des Tropfenrandes führen.

Schlußbemerkung

Die Moden höherer Ordnung entwickeln sich oftmals aus einer Oberschwingung des Grundmodes und stellen somit eine Zwischenstufe beim Übergang von stabilem zu instabilem Tropfenrand dar. Die Dynamik selbstangeregter Tropfenschwingungen zeigt eine Systematik in der Ausbildung von Oberschwingungen, Moden höherer Ordnung und Bereichen irregulären Zeitverhaltens.

Literatur

- [1] E. Becker, W. J. Hiller, T. A. Kowalewski, *J. Fluid Mech.*, **258**, 191, 1994.
- [2] E. H. Trinh, R. G. Holt, D. B. Thiessen, *Phys. Fluids*, **8**(1), 43, 1996
- [3] C. P. Lee, A. V. Anilkumar, T. G. Wang, *Phys. Fluids A* **3** (11), 2497, 1991.
- [4] M. Rüggeberg, J. Holzfuß, W. Lauterborn, DA-GA 95, Bad Honnef, DPG GmbH, 743, 1995.
- [5] P. Grassberger, I. Procaccia, *Phys. Rev. Lett.* **50**, 346, 1983.

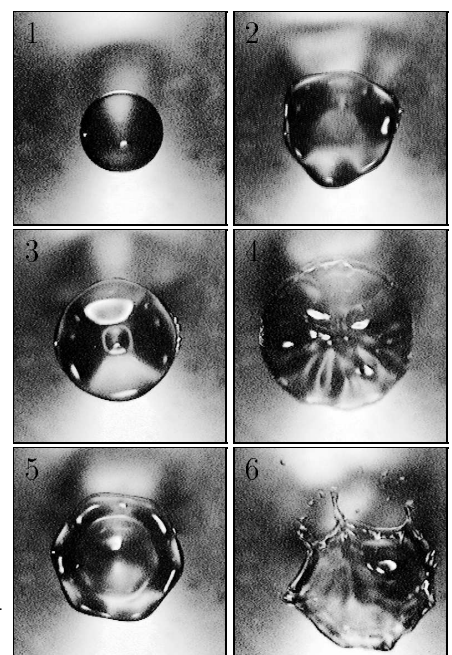
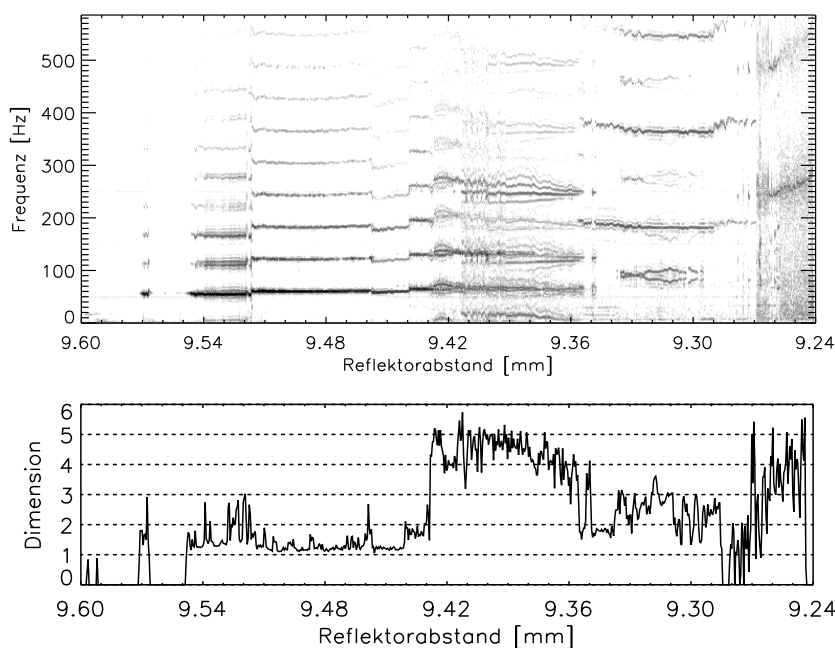



Abb. 4 Links: Spektrogramm und Dimension eines parametrisch oszillierenden Wassertropfens mit reduzierter Oberflächenspannung. Der Reflektorabstand wurde in 10 s Intervallen um 0,02 mm reduziert. Rechts: Tropfenformen des Schwingungsverlaufs (1; 9,53 mm), (2; 9,42 mm), (3; 9,33 mm), (4; 9,28 mm), (5; 9,26 mm), (6; 9,24 mm).  2 mm