

BESTIMMUNG DER PHASENGRENZE IN EINEM ROTIERENDEN SYSTEM DURCH LIF UND RÖNTGEN-CT

A. Zucht, G. Böhme

Institut für Mechanik, Professur für Strömungslehre,
Helmut-Schmidt-Universität, Universität der Bundeswehr Hamburg
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Rotierende Flüssigkeiten mit freien Oberflächen, reibungsbehaftete Zweiphasenströmung
rimming flow, rotating liquid, free surface, two phase flow

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Grenzfläche zwischen zwei nicht miteinander mischbaren Fluiden in einem horizontal ausgerichteten, rotierenden Zylinder mit einer im Inneren feststehenden, abschabenden Platte untersucht. Die beiden dazu verwendeten Phasen bestehen aus einer hochviskosen Flüssigkeit (Silikonöl) und einem niederviskosen Gas (Luft). Aufgrund der Haftung an den rotierenden Wänden zirkuliert die Flüssigkeit und umschließt dabei die Gasblase mit einem dünnen Film. Bei Variation der Füllmenge, der Rotationsgeschwindigkeit und der Stoffeigenschaften der Flüssigkeit stellen sich unterschiedliche Phänomene im System ein. Für typische stationäre Strömungszustände wird die Form der eingeschlossenen Gasblase betrachtet. Dabei wird die Phasengrenze durch zwei berührungslose Verfahren mit LIF und Röntgen-CT detektiert und dreidimensional visualisiert. Anhand der dargestellten Ergebnisse werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Messmethode diskutiert.

1 Einleitung

Die Strömungsprozesse der Hochviskostechnik sind in der Regel durch relativ niedrige Reynoldszahlen gekennzeichnet, und die Apparate sind oft nur teilweise mit der zu verarbeitenden zähen Flüssigkeit gefüllt. Diese grenzt dann naturgemäß nur teilweise an die Ränder des Strömungsraums, teilweise aber an eine Gasphase und besitzt deshalb auch eine freie Oberfläche, die a priori unbekannt ist. Ihre Form und ihre Lage stellen sich im komplexen Zusammenspiel der relevanten Kräfte (Reibung, Trägheit, Schwere, Kapillarität) frei ein, und zwar i. Allg. weder in der Nähe eines hydrostatischen Ruhezustands noch in der Nähe eines Zustands starrer Rotation.

Reibungsbehaftete Strömungen mit Phasengrenzflächen, die durch rotierende Systemkomponenten geprägt werden, sind bei verschiedenen Anwendungen von Interesse, z. B. bei der Produktion spannungsfreier Hohlkörper aus Kunststoffschmelzen durch Rotationsformen, beim drucklosen Mischen hochviskoser Stoffe in teilgefüllten Trommelmischern oder beim Entgasen von Schmelzen innerhalb teilgefüllter Zonen in Extrusionsmaschinen, wo freie Oberflächen zur Stimulation von Stoffübergangsprozessen benötigt werden. Um die Funktion derartiger Geräte bewerten und gezielt beeinflussen zu können, sind grundsätzliche Kenntnisse über mögliche Strömungszustände, ihre Existenzbereiche in einem vieldimensionalen Parameterraum und die damit verbundene Verteilung der Gasphase erforderlich.

Um die Verteilung der Gasphase und weiterer strömungsmechanischer Größen (Druck, Geschwindigkeit usw.) in einem teilgefüllten rotierenden System zu untersuchen, wurde ein Versuchsstand aufgebaut. Obwohl er eine einfache Geometrie besitzt, kann mit ihm durch Variation der einstellbaren Parameter eine Vielfalt an Strömungsphänomenen erforscht werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt mit dem Ziel, die Phasengrenze zu bestimmen und zu visualisieren.

2 Experimenteller Aufbau

Technische Apparate, in denen hochviskose Stoffe unter Teilfüllung kontrolliert verarbeitet werden sollen, besitzen in der Regel rotierende und feststehende Bauteile. Das zu untersuchende, geometrisch einfache System besteht aus einer horizontal ausgerichteten, im Uhrzeigersinn rotierenden, kreiszylindrischen Trommel (Rotor) und einer im Inneren vertikal feststehenden, abschabenden Platte (Stator). Durch die Platte wird das Trommelvolumen in zwei gleich große Kammern aufgeteilt. Die beiden Kammern werden teilweise mit einer zähen, newtonschen, optisch durchlässigen, schweren Flüssigkeit (Silikonöl) und einem niederviskosen Gas (Luft) gefüllt, s. Abb. 1. Dichtungen zwischen der Platte und der Trommel gewährleisten, dass die Flüssigkeitsmengen in den jeweiligen Kammern verbleiben.

Für die Erforschung der Strömungsvorgänge in den Kammern sind insgesamt folgende Parameter zu berücksichtigen: der Innenradius R , die Länge L und die Winkelgeschwindigkeit Ω der Trommel, die Dicke der Platte 2δ , die Masendichte ρ , die dynamische Viskosität η und das Volumen der zähen Flüssigkeit, die Schwerebeschleunigung g sowie die Grenzflächenspannung σ zwischen den beiden fluiden Phasen. Die Stoffwerte des Gases sind irrelevant, weil das leichte, niederviskose Gas der schweren, hochviskosen Flüssigkeit gleichsam passiv ohne signifikante Eigendynamik folgt. Sinnvollerweise werden dimensionslose Kennzahlen verwendet. Bei Strömungsvorgängen mit freien Oberflächen sind die Reynolds-Zahl $Re := \rho \Omega R^2 / \eta$, die Froude-Zahl $Fr := R \Omega^2 / g$ und die Kapillar-Zahl $Ca := \eta \Omega R / \sigma$ gebräuchlich. Hier spielen die Trägheitskräfte in der Flüssigkeit in Relation zu den Reibungskräften und zur Schwerkraft eine untergeordnete Rolle. Deshalb ist es zweckmäßig, eine dimensionslose Kennzahl $\Lambda := Re / Fr$ zu verwenden, die als Maß für das Verhältnis der Schwerkraft zu den Reibungskräften verstanden werden kann und sich als wichtiger Ähnlichkeitsparameter erweist. Hinzu kommt der volumetrische Füllgrad, d. h. der relative Volumenanteil der Flüssigkeit in der Kammer $F := V_{\text{Flüssig}} / V_{\text{Gesamt}}$. Die geometrischen Abmessungen des Systems für die experimentellen Untersuchungen sind: $R = 50 \text{ mm}$; $L/R = 2$ und $\delta/R = 0,2$.

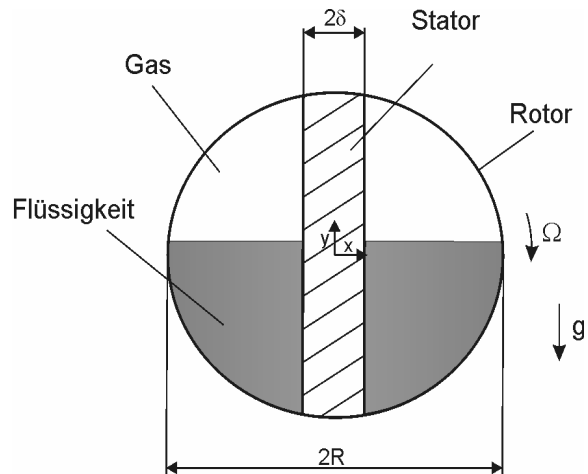
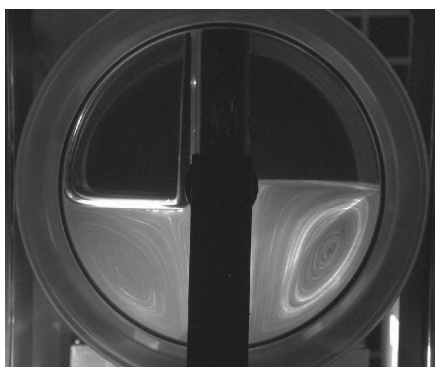


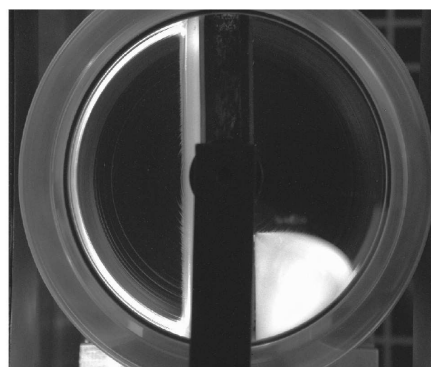
Abb. 1 Modell eines teilgefüllten Rotor-Stator-Systems

Mit diesem System sind unter verschiedenen Betriebsbedingungen (verschiedene Füllgrade F , verschiedene Kennzahlen Λ) unterschiedliche Strömungszustände entdeckt und in der Literatur beschrieben worden (Böhme et al 2006). In der rechten Kammer wird die Flüssigkeit von der rotierenden Trommel in Richtung der Schwerkraft mitgenommen. Demzufolge befindet sie sich stets im unteren Bereich der Kammer und zirkuliert dort infolge der Schleppwirkung der bewegten Wand. Je schneller die Trommel rotiert, umso stärker ist die Phasengrenzfläche gekrümmt.

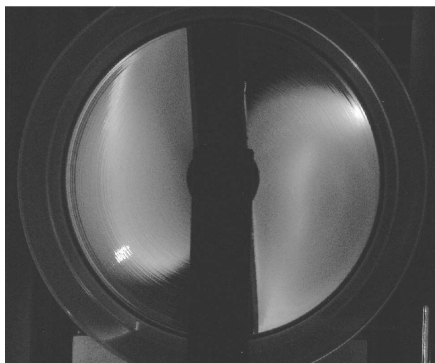
In der linken Kammer kann eine Vielfalt komplexer Zustände beobachtet werden. Bei relativ geringen Drehzahlen (großes Λ) nimmt aufgrund der Wandhaftung die rotierende Zylinderwand nur wenig Flüssigkeit gegen die Schwerkraft nach oben mit. Sie trifft auf die feststehende Wand und fließt an ihr als Film nach unten ab. Die überschüssige Flüssigkeitsmenge zirkuliert im unteren Bereich der Kammer, s. Abb. 2a. Mit zunehmender Drehzahl der Trommel (Verkleinerung von Λ) wird mehr Flüssigkeit von der rotierenden Zylinderwand nach oben mitgenommen. Ein zweiter Grundzustand ist dadurch gekennzeichnet, dass die gesamte Flüssigkeitsmenge umläuft, s. Abb. 2b. Dieser Zustand ist aber nur bedingt stabil. Bei weiterer Steigerung der Drehzahl genügt eine geringere Kontaktfläche mit dem Rotor, um die flüssige Masse zu tragen. Diese liegt dann kompakt im oberen Bereich der linken Kammer, s. Abb. 2c. Dabei spielt dann die Schwerkraft nur noch eine untergeordnete Rolle. Der Übergang zwischen den Strömungszuständen I und II ist durch eine Spitze in der Phasengrenzfläche gekennzeichnet, s. Abb. 2d, die in der englischsprachigen Literatur als „cusp“ bezeichnet wird (Jeong 1999, Joseph 1992).



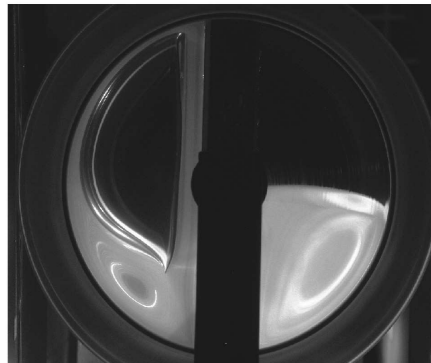
a) Strömungszustand I mit Glyzerin, $F=0,5$; $\Lambda \approx 1960$



b) Strömungszustand II mit Silikonöl, $F=0,25$; $\Lambda \approx 60$



c) Strömungszustand III mit Silikonöl, $F=0,75$; $\Lambda \approx 2,2$



d) Übergang zwischen den Strömungszuständen I und II mit Silikonöl, $F=0,75$; $\Lambda \approx 157$

Abb. 2: Qualitativ unterschiedliche stationäre Strömungszustände (Böhme et al 2006)

3 Messmethoden

LIF-basierte optische Methode: Zur Bestimmung und Visualisierung der Phasengrenze werden zwei berührungslose Methoden verwendet. Für die erste optische Methode wurde das zu untersuchende Rotor-Stator-System mit einem Nd:YAG Laser, einer Lichtschnittoptik, einer Traverse und einer CCD-Kamera ausgestattet, s. Abb. 3. Dabei wird das pulsierende Laserlicht durch die Laserschnittoptik in einer Ebene aufgefächert und in das Innere der Kammer geführt. Die Lichtschnitte werden in Tiefenrichtung zwischen der Symmetrieebene und der vorderen, mitrotierenden Stirnwand parallel angeordnet und können längs der Rota-

tionsachse der Trommel mit Hilfe der Traverse kontrolliert verschoben werden. Um Schäden am CCD-Chip durch das an der freien Oberfläche gespiegelte energiereiche Laserlicht zu verhindern, wurde die verwendete Flüssigkeit (Silikonöl mit $\rho=970 \text{ kg/m}^3$, $\eta=1 \text{ Pas}$, $\sigma=22 \text{ mN/m}$) mit einem Farbstoff *Rhodamin 6G* nach Vorschrift (Saeki et al 2001) präpariert. Die Absorption in diesem Farbstoff findet bei der Wellenlänge des Laserlichts von 532 nm statt, und das Emissionsmaximum liegt bei 552 nm . Um bei den Aufnahmen den CCD-Chip nur mit dem Emissionslicht zu belichten, wurde ein Hochpassfilter für eine Wellenlänge von 545 nm vor dem Objektiv angebracht.

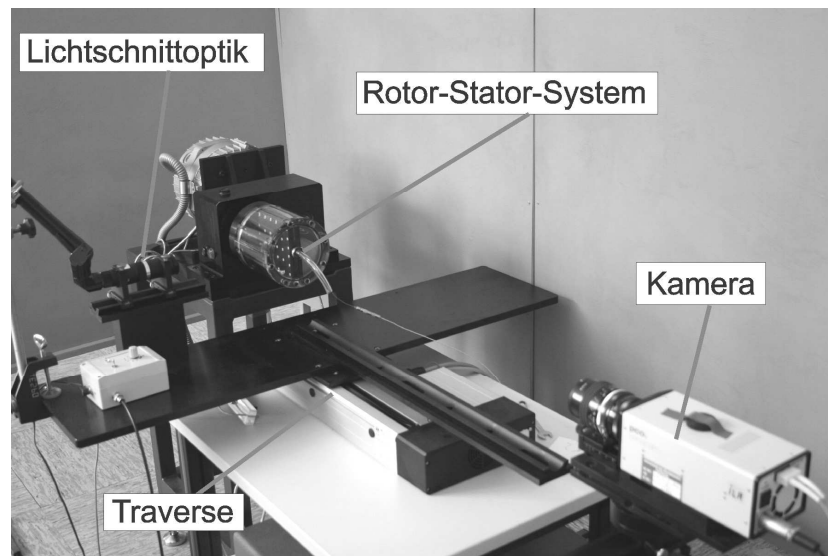


Abb. 3: Aufbau des LIF-basierten Messsystems

Zur Vergleichbarkeit der später folgenden Ergebnisse und zur Gewinnung allgemeiner Aussagen für die zu untersuchenden Strömungszustände ist es zweckmäßig, die Geometrie des Strömungsraumes mit dem Innenradius R zu normieren: $X:=x/R$; $Y:=y/R$; $Z:=z/R$.

Die Analyse der Messdaten erfolgt mit der kommerziellen Software MATLAB. Diese beinhaltet die Toolbox *Image Processing* zur Bildverarbeitung, mit deren Hilfe etablierte Methoden zur Analyse der erstellten Aufnahmen angewandt werden können (Gonzalez et al 2004). Die Hauptaufgabe besteht darin, die optischen Aufnahmen bezüglich der Phasengrenze auszuwerten. Die dabei nötigen Schritte werden exemplarisch anhand der Abb. 4 erläutert.

Im linken Teilbild wird zunächst die ursprüngliche Fotoaufnahme, hier in der Symmetrieebene $Z=0$, betrachtet. Aus der Aufnahme können der Innendurchmesser der Rotorwand, die Statorwand und die Phasengrenze zwischen der Flüssigkeit und der Luft bestimmt werden. Dabei werden aus den Bilddaten die entsprechenden Pixelkoordinaten mit dem Programm MATLAB herausgelesen. Als Indikator für die Phasengrenze wurde die äußere Linie beim Übergang zwischen der beleuchteten Flüssigkeit und der im Inneren schwarz erscheinenden Luft gewählt. Diese Kontur weist sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen weiterer Untersuchungen auf. Die herausgelesenen Konturen werden als Pixelkoordinaten in der Aufnahme abgespeichert und in das eingeführte kartesische Koordinatensystem transformiert. Anschließend werden alle Konturlinien relativ zum normierten Innenradius der Rotorwand im rechten Teilbild dargestellt.

Aus dem Ensemble gestaffelter Aufnahmen wird dann die dreidimensionale Form der Gasblase, die so genannte Vakuole mit Methoden der Bildverarbeitung rekonstruiert.

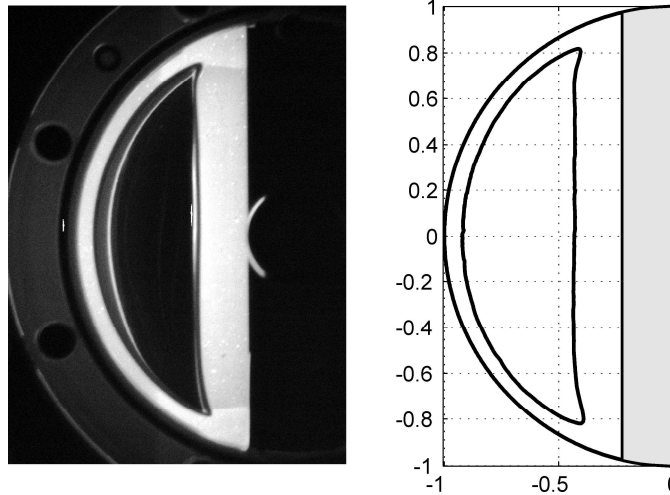


Abb. 4: Analyse der zweidimensionalen Kontur bei $F=0,5$; $\Lambda=60$; $Z=0$

Röntgen-Computertomographie (CT): Mit diesem Schnittbildverfahren kann das Innere eines geschlossenen Volumens zerstörungsfrei visualisiert werden. Das Verfahren hat sich in der Medizin und der Materialprüfung bewährt, wurde bisher aber erst selten in der Strömungsmesstechnik eingesetzt. Daher ist es beachtenswert, wenn hier gezeigt wird, dass dynamische Prozesse mit Mehrphasenfluiden damit untersucht werden können.

Der Aufbau und die Funktionsweise eines Röntgen-CT Geräts werden in der Literatur beschrieben (Hsieh 2003; Kalender 2005; Morneburg 1995). Die Messungen wurden an einem Gerät *Brilliance 40* der Firma Philips durchgeführt. Es handelt sich um einen Spiral-CT mit 40 Detektorreihen. Das zu untersuchende Rotor-Stator-System wurde mit Schichtdicken von $0,8\text{ mm}$ entlang der z-Achse gescannt. Anschließend wurden die Daten rechnerisch bearbeitet und dabei weitere Zwischenschichten erzeugt. Damit liegen die Rohdaten für eine Symmetriehälfte des Systems bei $0 \leq z \leq 50\text{ mm}$ in 125 Schichten vor. Aufgrund der Datenmenge liefert diese Messmethode eine deutlich höhere Auflösung für die z-Richtung als das zuvor beschriebene optische Verfahren. In Abb. 5 wird exemplarisch ein zweidimensionaler Schnitt aus der Röntgen-CT Messung gezeigt.

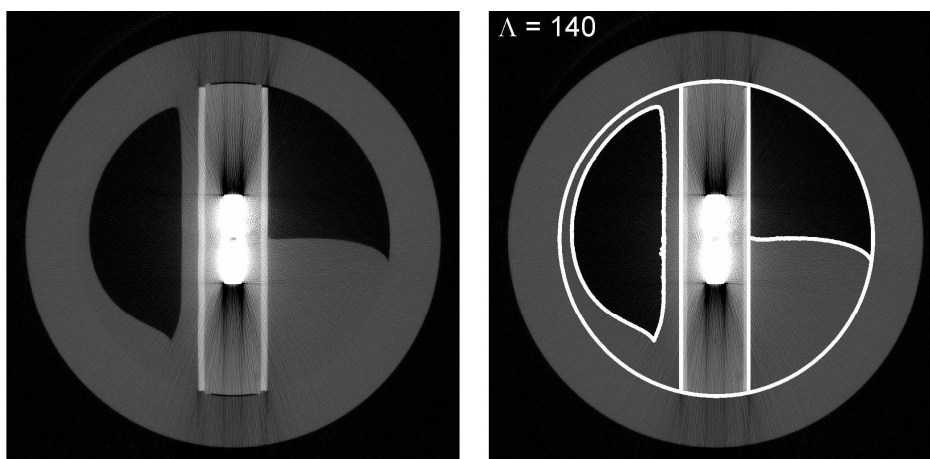


Abb. 5: Auswertung der Rohdaten bei $F=0,5$; $\Lambda=140$; $z=4,8\text{ mm}$

Bereits in den Rohdaten (linkes Teilbild) ist die Phasengrenze am Übergang zwischen der grau dargestellten Flüssigkeit und der im Inneren eingeschlossenen, schwarz erscheinenden Gasblase deutlich zu erkennen. Der Phasenübergang zwischen der Flüssigkeit und den Ro-

torwänden ist jedoch kaum sichtbar. Zur Auswertung der Position der Rotorwand werden die Graustufenwerte im Bild durch die hier eingesetzte Software MATLAB analysiert. Das rechte Teilbild zeigt das Ergebnis der Auswertung der Rohdaten. Hier wurden der Innendurchmesser der Rotorwand, die Statorwand und die Phasengrenze zwischen Luft und Flüssigkeit in beiden Kammern durch weiße Linien gekennzeichnet.

Aus diesen Daten kann mit Hilfe der Software MATLAB die dreidimensionale Geometrie der Grenzfläche zwischen Flüssigkeit und Gas digital visualisiert werden.

4 Ergebnisse

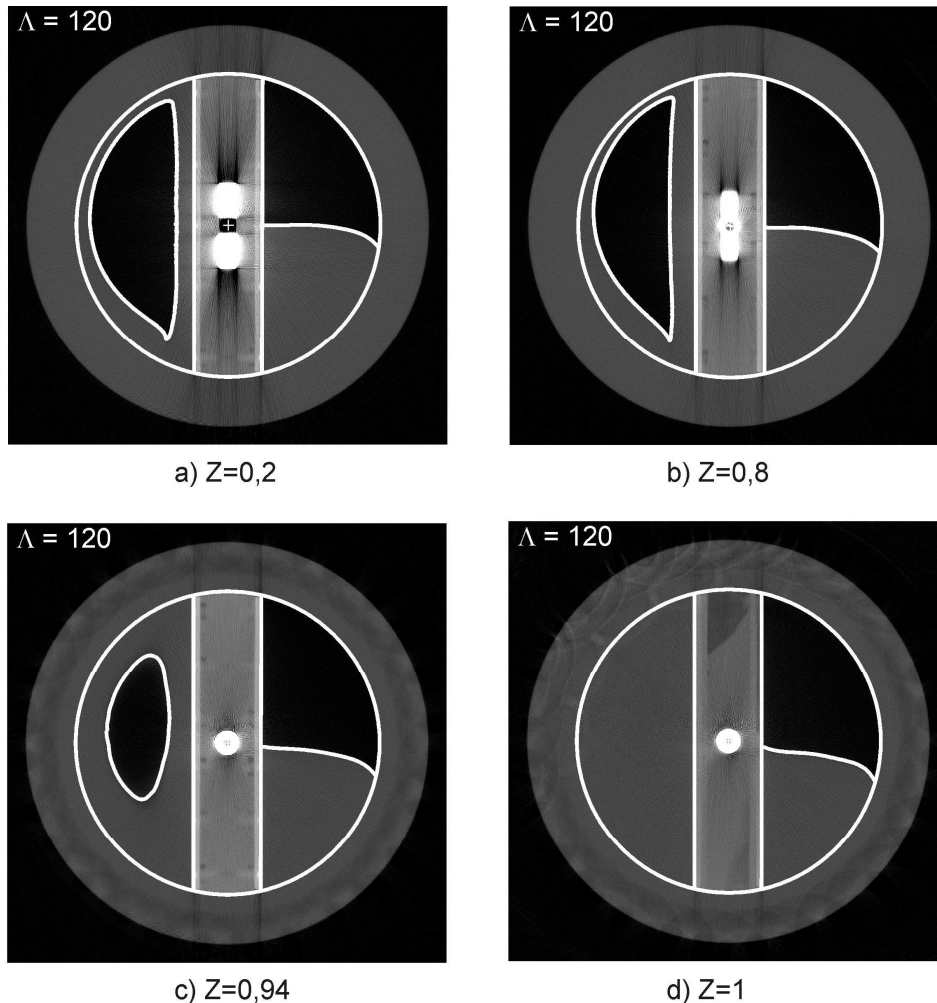


Abb. 6: Variation der Z-Koordinate bei $F=0,5$ und $\Lambda=120$

In Abb. 6 sind ausgewählte Schnittbilder aus der Röntgen-CT Methode dargestellt. Sie zeigen die Phasengrenzen entlang der Rotationsachse bei diskreten Werten der Z-Koordinate. Dabei ist in der linken Kammer zu beobachten, dass zwischen der Symmetrieebene bei $Z=0$ und der Ebene $Z=0,8$ die Gasphase ihre Form nur wenig ändert. Die kleinen Differenzen sind anhand der Filmdicken entlang der Statorwand und im lokalen Umkreis der Flächenspitze zu erkennen. Die experimentellen Beobachtungen bei den eingestellten F - und Λ -Parametern zeigen in der Nähe zur Statorwand eine stark gekrümmte Phasengrenze. Die Gasphase ist in der Flüssigkeit vollkommen eingeschlossen, und es existiert ein Flüssigkeitsfilm in der Nähe zur Stirnwand. Abb. 6c zeigt den Bereich, in dem sich die Vakuole mit stark gekrümmter

Fläche schließt. In Abb. 6d ist zu erkennen, dass die rotierende Stirnwand komplett benetzt ist und ein Flüssigkeitsfilm zwischen ihr und der Gasphase existiert.

Zur Rekonstruktion der 3d Vakuolengeometrie werden alle Aufnahmen einer Messreihe durch die zuvor beschriebene zweidimensionale Auswertung analysiert und mit der zugehörigen Z-Koordinate gespeichert. Dadurch entsteht zunächst ein Gerüst der dreidimensionalen Phasengrenzfläche. Zwischen den ausgewerteten Schnittebenen wird interpoliert. Damit entsteht ein engmaschiges Gitter, das die Oberfläche der Vakuole approximiert.

In Abb. 7 ist beispielhaft eine so rekonstruierte Oberfläche mit Daten der LIF-basierten optischen Methode dargestellt. Allerdings ist die gezeigte Oberfläche im vorderen Bereich (nahe der Stirnwand) nicht in sich geschlossen dargestellt, da sich dort eine optische Messung und deren genaue Analyse als schwierig erweist. Aufgrund der dort auftretenden Reflexion und einer endlichen Lichtschnittdicke (ca. 1 mm) kann die Phasengrenze aus den Bilddaten in dieser Region nicht bestimmt werden. Bei der Röntgen-CT Messmethode werden die Strahlen nicht gebeugt und die Schnittbildebenen sind deutlich dünner, sodass die gesamte Geometrie der Phasengrenze digital rekonstruiert werden kann.

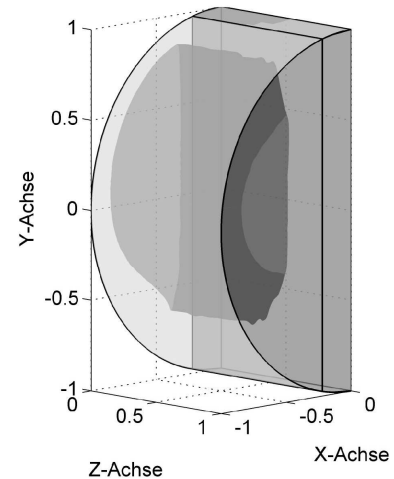


Abb. 7 Rekonstruierte Kontur der Vakuole bei $F=0,5$; $\Lambda=140$

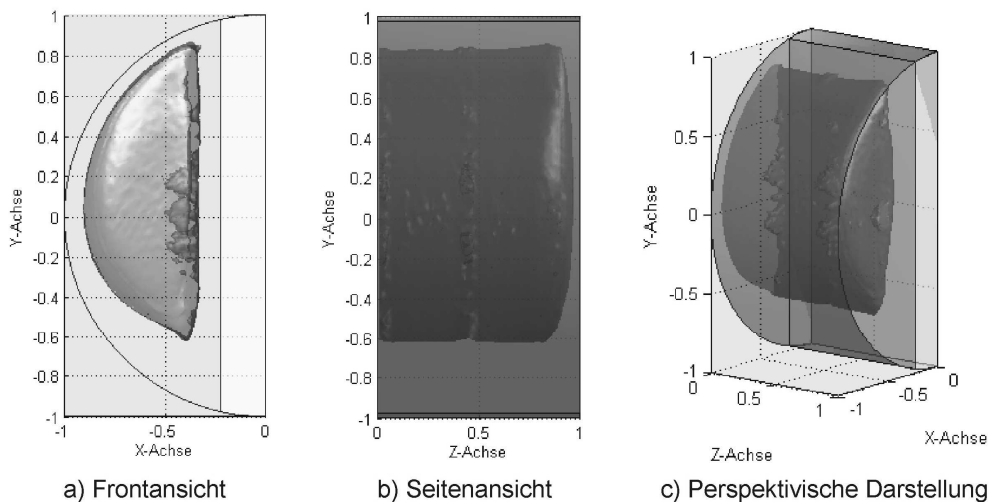


Abb. 8: Rekonstruierte 3d Geometrie der Phasengrenze bei $F=0,5$ und $\Lambda=140$

In Abb. 8 ist das Ergebnis einer Auswertung aus der Röntgen-CT Messung für verschiedene Perspektiven dargestellt. Das linke Teilbild zeigt aus der Frontansicht, dass die Gasblase von der Flüssigkeit eingeschlossen ist. Am Stator kann ein Flüssigkeitsfilm mit nahezu konstanter Dicke beobachtet werden. Im mittleren Teilbild ist der Verlauf des Flüssigkeitsfilms zwischen der Stirnwand ($Z=1$) und der Vakuole zu erkennen. Insgesamt kann gezeigt werden, dass die Vakuole im Abschnitt $0 \leq Z \leq 0,75$ eine schlauchförmige Gestalt besitzt. Erst nahe der Stirnwand findet eine Abrundung der Vakuole statt, die zu einem geschlossenen Volumen führt. Das rechte Teilbild stellt perspektivisch die gesamte Form der freien Oberfläche innerhalb einer Kammer dar. In allen Teilbildern können so genannte Schatteneffekte

beobachtet werden. Diese sind durch konstruktionsbedingte Metallteile in der Statorwand, welche einen hohen Absorptionskoeffizienten für Röntgenstrahlen besitzen, entstanden.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die hier vorgestellten experimentellen Untersuchungen zeigen, dass es mit der Röntgen-Computertomographie (CT) und dem LIF-basierten optischen Verfahren möglich ist, eine Phasengrenze zu visualisieren. Im Weiteren zeigt die Untersuchung, dass die optische Methode (LIF) bei stark gekrümmten Phasengrenzflächen an Grenzen stößt. Quantitativ deutlich bessere Ergebnisse liefert die Röntgen-CT Messung. Aufgrund der hohen Auflösung längs der Rotationsachse und der eindeutigen Bestimmung der Phasengrenze kann die dreidimensionale Geometrie der freien Oberfläche vollständig rekonstruiert werden. Der Zeitaufwand zur Beschaffung der Messdaten sowie deren numerische Verarbeitung zur Erzeugung der dreidimensionalen Form der Phasengrenze mit der Software MATLAB war bei Anwendung der Röntgen-CT deutlich geringer als bei der optischen Messmethode. Jedoch ist das Röntgen-CT Verfahren nur für stationäre Strömungsprozesse und für nicht metallische Werkstoffe geeignet.

Hochviskose Flüssigkeiten besitzen in der Regel nichtnewtonsche, insbesondere viskoelastische Stoffeigenschaften. Zukünftig soll das Rotor-Stator-System deshalb mit rheologisch komplexen Versuchsflüssigkeiten befüllt werden, um den Einfluss solcher Stoffeigenschaften auf die Phasengrenzfläche vorzugsweise mit der Röntgen-CT zu studieren. Schon bei inelastischen Flüssigkeiten mit scherabhängiger Viskosität können qualitative Änderungen erwartet werden (Fomin 2006). Eigene Vorversuche zeigen im Übrigen, dass mit makromolekularen Flüssigkeiten sogar qualitativ neuartige Phänomene auftreten. Zur Messung strömungsmechanischer Feldgrößen im Inneren der Flüssigkeit empfiehlt es sich, bewährte Lasermethoden wie PIV oder LDV einzusetzen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung in diesem Forschungsprojekt.

Literatur

- Böhme, G., Pokriefke, G., Müller, A., 2006: "Viscous flow phenomena in a partially filled rotor-stator system", *Archive of Applied Mechanics* 75, pp. 619-634
- Fomin, S., 2006: „Three regimes of non-Newtonian rimming flow“, *J. Fluids Engineering* 128, pp. 107-112
- Gonzalez, R.C., Woods, R.E., Eddins, S.L., 2004: "Digital Image Processing Using Matlab", Pearson, Prentice Hall, New Jersey
- Hsieh, J., 2003: "Computed Tomography", SPIE-The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington
- Jeong, J.T., 1999: "Formation of cusp on the free surface at low Reynolds number flow", *Physics of Fluids* 11, pp. 521-526
- Joseph, D.D., 1992: "Understanding cusped interfaces", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 44, pp. 127-148
- Kalender, W., 2005: "Computed Tomography", Publicis Corporate Publishing, Erlangen
- Morneburg, H., 1995: "Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik", 3. Auflage, Publicis-MCD-Verlag, München
- Saeki, S., Hart, D.P., 2001: "Investigation on YAG(532) laser dyes for oil film thickness and temperature measurement", *Proceedings of the 3rd Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-3)*, pp. 1-19