

Höhenprofilmessung einer offenen Kanalströmung mit Blick auf das Flüssigmetalltarget in DONES

Measuring the Surface Profile of a Free Surface Water Flow Regarding the Liquid Lithium Target in DONES

B. Brenneis¹, S. Gordeev¹, S. Ruck¹, L. Stoppel²

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik¹
(Institut für Thermische Energietechnik und Sicherheit²),
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Stabile Wellenstrukturen (Wake), Höhenprofilmessung, Kanalströmung, DONES
Wake, surface profile measurements, channel flow, DONES

Zusammenfassung

Das Neutronenproduktionstarget der Bestrahlungsanlage DONES (DEMO oriented neutron source) ist eine Lithiumströmung mit freier Oberfläche. Auf diese trifft ein Deuteronen Beschleunigerstrahl und erzeugt energiereiche Neutronenstrahlung, die der Untersuchung von Materialien zur Anwendung im Fusionsreaktor dient. Die Einhaltung der Schichtdicke der Lithiumströmung ist nicht nur für die Neutronenproduktion wichtig, sondern aufgrund des Abtransports der durch den Beschleunigerstrahl eingebrachten Wärme auch sicherheitsrelevant. Insbesondere stabile Wellenstrukturen, die sich infolge von angesammelten Verunreinigungen an der Düsenkante bilden, können zu relevanten Schichtdickenänderungen führen und folglich für einen uneingeschränkten Betrieb der Anlage problematisch sein. Bei einer Schichtdickenreduktion von über 1 mm im Auftrittsbereich des Beschleunigerstrahls wird der Beschleunigerstrahl zum Schutz der Anlage abgeschaltet.

Zur Untersuchung stabiler Wellenstrukturen stromab einer Störstelle an der Düsenkante, wurden Experimente an einem zu DONES ähnlichen Wasserkreislauf durchgeführt. Das Hauptziel war es den Einfluss einer bekannten Störstelle auf die Schichtdicke stromab der Düse zu ermitteln, um somit eine Abschätzung über die sicherheitsrelevante Größe von Ablagerungen an der Düsenkante treffen zu können. Darüber hinaus sollte der Verlauf der Höhenprofile entlang des Kanals untersucht werden, um von gemessenen Oberflächenprofilen an einer Kanalposition auf Profile stromauf und stromab schließen zu können.

Die untersuchte Strömung ist eine offene Kanalströmung entlang einer konkaven Rückwand mit konstantem Krümmungsradius. Das zweidimensionale Oberflächenprofil der Wasserströmung wurde optisch mittels Triangulation gemessen. Die Position der Wellentäler und Wellenberge wurde mit analytischen Lösungen verglichen. Zur Variation der Störstellengröße wurden Metallzylinder mit drei unterschiedlichen Durchmessern verwendet, dessen Eindringtiefe in die Strömung stufenweise variiert werden konnte. Sowohl die Vergrößerung der Eindringtiefe als auch die des Störstellendurchmessers führte zu tieferen Wellentälern. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die Tiefe der Wellentäler bei konstanter Störstellengröße in Strömungsrichtung abnahm und im betrachteten Bereich unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit war. So wurde beispielsweise die kritische Tiefe von mehr als einem Millimeter 45° stromab der Düse bei einem Störstellendurchmesser von 1,2 mm für eine Eindringtiefe im Bereich von 1,5 – 2 mm erreicht.

Einleitung

Das Neutronenproduktionstarget der Bestrahlungsanlage DONES (DEMO oriented neutron source) ist eine Lithiumströmung mit freier Oberfläche (Abb. 1). Auf diese trifft ein Deuteronen Beschleunigerstrahl und erzeugt energiereiche Neutronenstrahlung, die der Untersuchung von Materialien zur Anwendung im Fusionsreaktor dient [Knaster et al. 2016]. Die Einhaltung der Schichtdicke der Lithiumströmung ist nicht nur für die Neutronenproduktion wichtig, sondern aufgrund des Abtransports der durch den Beschleunigerstrahl eingebrachten Wärme auch sicherheitsrelevant. Aus diesem Grund ist die Überwachung der Lithiumschichtdicke im Bereich des Targets für den sicheren Betrieb der Bestrahlungsanlage zwingend erforderlich. Oberflächenwellen beeinflussen die Strömungskonfiguration des Lithiumfilms. Ablagerungen von Verunreinigungen am Düsenaustritt führen stromab zur Ausbildung stabiler Wellenstrukturen, so genannter Wakes [Kondo et al. 2004]. Diese Wakes liegen im Bereich des Aufttrittspunktes des Beschleunigerstrahls. Aufgrund der möglichen Unterschreitung der minimalen Schichtdicke durch Wakes ist deren nähere Untersuchung für den sicheren Betrieb der Anlage von besonderer Wichtigkeit.

In der Vergangenheit wurden einige Untersuchungen zur Oberfläche der Flüssigmetallströmung durchgeführt. Kondo et al. 2004 untersuchten die Form stabiler Wellenstrukturen in einer Lithiumströmung durch Digitalaufnahmen der Lithiumoberfläche. Der in den Experimenten verwendete horizontale Kanal war 70 mm breit und konnte mit einer Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 15 m/s durchströmt werden. Die beobachteten Wellenstrukturen waren zeitlich und räumlich stabil und ließen sich mit den analytisch ermittelten Lösungen von Lamb [Lamb 1916] unter Vernachlässigung der Schwerkraft beschreiben. Diese von der Oberflächenspannung (Kapillarwellen) dominierten Wakes hatten ihren Ursprung an Lithiumtropfen an der Düsenkante. Der experimentell beobachtete Bereich reichte bis 50 mm stromab der Düse. In einer weiterführenden Arbeit von Kondo et al. 2007 wurde ein Streifenprojektionsverfahren zur Messung des Höhenprofils der Wakes in der Lithiumströmung verwendet. Der aufgenommene Bereich ging auf einer Breite von 5 mm bis 3 mm stromab der Düse. Bis 6 m/s zeigte sich eine relativ glatte Oberfläche. Für größere Geschwindigkeiten wurden die Minima und Maxima des Wakes größer. Auch diese Messungen wurden mit den analytischen Lösungen für die Wake Form verglichen.

Neben Kapillarwellen lassen sich mit den analytischen Gleichungen von Lamb auch Schwerkwellen beschreiben. Diese werden durch die Erdbeschleunigung dominiert und finden sich hauptsächlich in den Wellenstrukturen hinter Schiffen [Rabaud und Moisy 2013]. Hier sind sie insbesondere aufgrund des Wellenwiderstands von Interesse. Häufig wird die Form der Wellenstruktur hinter einem Schiff über den Öffnungswinkel der Wellenfront mit maximaler Amplitude beschrieben. Dabei zeigte sich bei großen Froude-Zahlen ($Fr = u/\sqrt{gL}$), gebildet mit der Störstellengeschwindigkeit u , der Erdbeschleunigung g und der charakteristischen Länge L , eine Abhängigkeit des Öffnungswinkels von der Froude-Zahl [Rabaud und Moisy 2013, Moisy und Rabaud 2014, Darmon et al. 2014]. Zur Messung der Wellenform wurde von Moisy und Rabaud 2014 auf eine Bildauswertung zurückgegriffen. Eine weitere Möglichkeit zur näheren Untersuchung der Wellen ist, wie bei PIV (partial image velocimetry) Messungen, die Projektion einer Lichtebene in den Messbereich. Neben der Geschwindigkeit konnte dabei über die Verzerrung des Bildes durch die Oberflächenwellen das Oberflächenprofil bestimmt werden [Gomit et al. 2013].

Statt eines Schiffmodells kann die Quelle der Wellen auch auf einen senkrecht teilweise eingetauchten Zylinder runtergebrochen werden. Von Moisy und Rabaud 2014 wurden dabei systematisch verschiedene Zylinderdurchmesser untersucht, welche bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durch Wasser bewegt wurden. Die Ergebnisse der Winkelmessungen wurden mit der minimalen Phasengeschwindigkeit, der Froude-Zahl und der Bond-Zahl ($Bo = L/\lambda_c$)

beschrieben. Letztere ist von der Kapillaren Länge λ_c abhängig, welche sich aus den Materialeigenschaften des Fluids ergibt. Untersuchungen zu teilweise eingetauchten Zylindern in einer Strömung beschäftigten sich auch mit der Deformation der Wasseroberfläche direkt am Zylinder, dem Aufstauen stromauf, der Vertiefung und dem Lufteintrag stromab [Ageorges et al. 2019, Chaplin und Teigen 2003].

In den für diese Arbeit durchgeführten Experimenten wurde die Form und das Höhenprofil von stabilen Wellenstrukturen (Wakes) stromab einer Störstelle an der Düse eines zu DONES ähnlichen Wasserkreislaufs untersucht. Die Wellenform ist als die Position der maximalen Amplitude der stabilen Oberflächenwellen im Kanal definiert und wurde mit den analytischen Lösungen von Lamb verglichen. Neben der räumlichen Ausdehnung wurde auch das Höhenprofil der Wellen mittels eines selbst entwickelten Triangulationssensors gemessen. Das Ziel war es abschätzen zu können wie groß eine Störstelle am Düsenaustritt sein muss um kritische Wakes, welche die Oberfläche um über einen Millimeter einschneiden, zu erzeugen. Zusätzlich wurde der Verlauf des Höhenprofils entlang des Umfangs untersucht, um von gemessenen Oberflächenprofilen an einer Umfangsposition auf Profile stromauf und stromab schließen zu können.

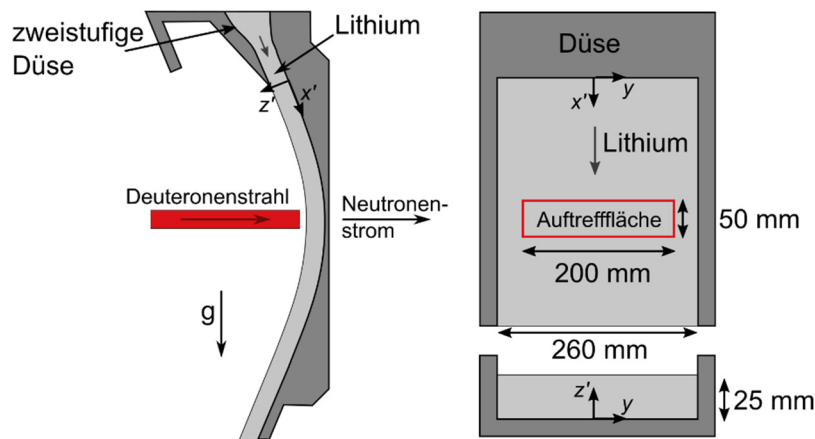


Abb. 1: Skizze des Lithiumtargets in DONES. Seitenansicht (links), Vorderansicht und Kanalquerschnitt (rechts).

Analytische Lösung der Wake Form

Nach Lamb lassen sich Wellen gleicher Phase infolge einer sich bewegenden Störstelle durch ruhiges Wasser bzw. einer stehenden Störstelle in einer stationären Strömung durch folgende Gleichungen beschreiben

$$\begin{aligned} x' &= p \cdot \cos(\theta) - dp/d\theta \cdot \sin(\theta), \\ y &= p \cdot \sin(\theta) - dp/d\theta \cdot \cos(\theta). \end{aligned} \quad (1)$$

Die Störstelle bewegt sich mit der Geschwindigkeit u auf der x' -Achse in negative x' -Richtung. Die Linie p verbindet den Ursprung der Störung mit Punkten auf der Welle unter dem Winkel θ . Diese Punkte mit gleicher Phase haben die Position (x', y) . Die Phasengeschwindigkeit $c = u \cdot \cos(\theta)$ wird auch über das Dispersionsverhältnis definiert [Bestehorn 2006],

$$c = \sqrt{\left(\frac{\lambda g}{2\pi} + \frac{2\pi h}{\lambda \rho}\right) \cdot \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}. \quad (2)$$

Die Wellenlänge wird mit $\lambda = p/n$ definiert. Die Variable n kann als vielfaches von 0,5 gewählt werden. Für positive ganze Zahlen n beschreibt die Lösungskurve die Lage der Wellentäler. Im anderen Fall wird die Position der Wellenberge beschrieben.

In Bezug auf die zu untersuchende Strömung in DONES wird angenommen, dass die Wellenlänge viel kleiner als die Schichtdicke $h_s = 25$ mm der Strömung ist. Damit kann der Ausdruck $\tanh(2\pi/\lambda) \approx 1$ angenommen werden, welcher bis $\lambda < 3,6 \cdot h_s$ einen Fehler von $< 3\%$ verursacht [Lighthill 1978]. Aufgrund der senkrechten Strömung über die gekrümmte Rückwand mit dem Radius $R = 250$ mm und der Strömungsgeschwindigkeit u im Bereich von $15 - 20$ m/s wurde statt der Erdbeschleunigung $g \approx 10$ m/s² die Beschleunigung der Zentrifugalkraft $u^2/R \approx 10^3$ m/s² eingesetzt [Kondo et al. 2004]. Die Zentrifugalkraft ist in diesem Fall ungefähr eine Größenordnung größer als die Gravitation, da letztere aufgrund des senkrechten konkaven Kanals überwiegend in Strömungsrichtung zeigt.

Ohne weitere Annahmen zu den dominierenden Kräften (Oberflächenspannung oder Fliehkräfte), ergeben sich zwei Lösungen für das Gleichungssystem (1) und (2). Diese sind abhängig von dem Krümmungsradius des Kanals R , der Weber-Zahl $We = u\sqrt{\rho L/\sigma}$ und der Froude-Zahl $Fr = \sqrt{R/L}$. Als charakteristische Länge L wird die Austrittshöhe der Düse h bzw. bei vorhandener zylindrischer Störstelle der Zylinderdurchmesser D verwendet. Für unterschiedliche Anlagen mit gleichem Krümmungsradius ergeben sich mit diesen Gleichungen bei konstantem Produkt von $We \cdot Fr$ identische Kurven.

Die allgemeine Lösung der Wellengleichung für $n = 0,5$ und $u = 15$ m/s ist in Abbildung 2 (a) dargestellt. Die gestrichelte Linie gibt die Kapillarwellen wieder, welche durch die Oberflächenspannung dominiert sind. Die durchgezogene Linie ist die durch die Schwerkraft bzw. Fliehkraft dominierte Schwerewelle. In Abbildung 2 (b) wurde für die Kurve der Schwerewelle die Wirkung der Oberflächenspannung vernachlässigt.

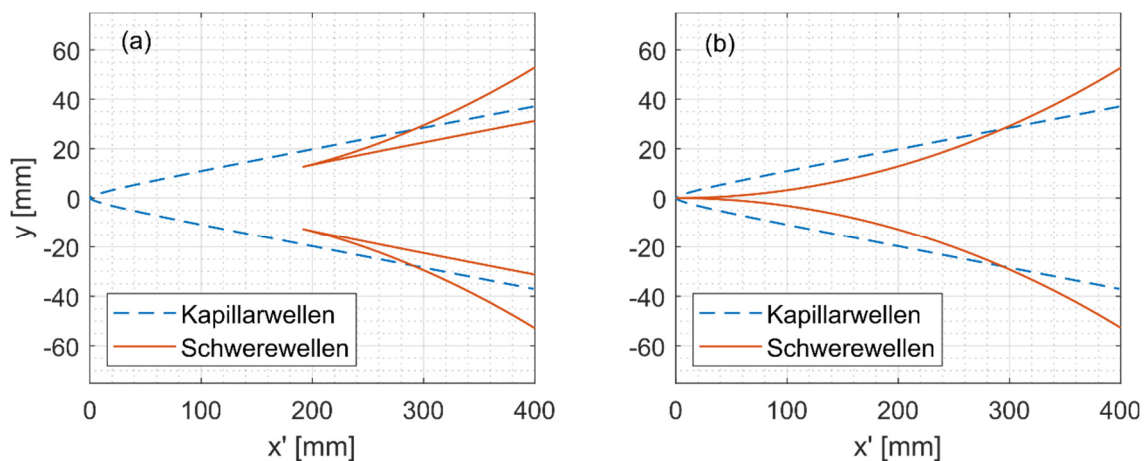


Abb. 2: Lösungen der Wellengleichungen nach Lamb 1916 mit $n = 0,5$ für die DONES Randbedingungen bei einer Lithiumströmung von $u = 15$ m/s ($R = 250$ mm). Allgemeine Lösung der Gleichungen (a) und Lösung unter Vernachlässigung der Oberflächenspannung im Fall der Schwerewellen (b).

Experimenteller Aufbau und Messtechnik

Die zur Untersuchung der Oberflächenwellen verwendete Testanlage war der Wasserkreislauf FIDES („facility for experimental investigation of a 3D free surface flow“) im KALLA Labor im Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Der grobe Aufbau der Anlage war eine Pumpe welche das Wasser über einen magnetisch-induktiven Durchflussmesser zur Teststrecke fördert. Die eigentliche Teststrecke ist ähnlich dem Lithium Target von DONES. Das Wasser strömt nach dem Durchlaufen des Strömungsgleichrichters aus der zweistufigen Düse mit einem Austrittsquerschnitt von 100×10 mm². Die Strömungsgeschwindigkeit am Düsenaustritt konnte im Bereich von $1 - 20$ m/s verändert werden. Stromab der Düse wird der senkrechte konkave Kanal mit einem Krümmungsradius von $R = 250$ mm durchströmt.

Zum Erzeugen von Wakes stromab der Düse wurde eine künstliche Störstelle am Düsenaustritt montiert (Abb. 3). Diese Störstelle war ein Metallzylinder mit verschiedenen Durchmessern D (1,2 mm, 2 mm, 3 mm), dessen Eindringtiefe in die Strömung mit Hilfe einer Linearbühne eingestellt werden konnte. Durchmesser und Eindringtiefe definieren die Größe der Störstelle. Die Wellenstrukturen stromab dieser Störstelle wurden mit einer Kamera („Basler ac2040-55uc“ 3.2 MP mit „KOWA LM16JC3M2“ Objektiv) auf Höhe der senkrechten Kanalposition aufgenommen. Damit ließ sich die räumliche Ausdehnung des Wakes in y -Richtung bestimmen. Zur Messung der Filmdicke der Strömung wurde eine Laserlinie in den Sichtbereich der Kamera projiziert. Die Kamera nahm mit einer Belichtungszeit von 1 s drei reflektierte Linien auf. Diese waren wie in Abbildung 3 gezeigt die Reflexion auf der Kanalaußenwand (I1), die Reflexion am Kanalboden (I2) und zuletzt die Reflexion an der Wasseroberfläche (I3). Die Skizze in Abbildung 3 zeigt außerdem die Anordnung der Störstelle, der Kamera und des Lasers, sowie den Blick auf die Rückwand des Kanals mit den drei reflektierten Laserlinien. Zur Messung unterschiedlicher Positionen stromab der Düse konnte die Kamera und der Laser mit konstantem Rückwandabstand auf verschiedene Umfangspositionen positioniert werden. Dabei blieb die relative Position von Laser und Kamera konstant. Die bei den Messungen angefahrenen Umfangspositionen lagen $\beta = 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ und 50° stromab der Düse. Die Auswertung der aufgenommenen Bilder erfolgte in MATLAB. Zunächst wurden im Bild drei Bereiche definiert, in denen die Laserlinie erwartet wurde. Diese Bildbereiche wurden außerdem in Segmente der Breite unterteilt. Mit Hilfe von definierten Schwellenwerten der Intensität wurden die Pixelpositionen der Linien im Bild ausgelesen. Zur Übertragung der Pixelwerte auf die Umfangsposition an der Kanalaußenwand bzw. die Breitenposition in Millimeter wurden sowohl am Kanalboden als auch auf der Kanalaußenwand Maßbänder aufgenommen. Die Schichtdicke der Strömung ließ sich aus den Umfangskoordinaten der Laserlinien an der Kanalaußenwand, der Kameraposition, der Brechungsindizes und der Kanalarückwanddicke von 20 mm berechnen. Zur Validierung des Messsystems wurde die Schichtdicke der ungestörten Strömung im Bereich 0 – 2 mm stromab der Düse gemessen, wo kein großer Unterschied zur Düsenaustrittshöhe von 10 mm erwartet wurde. Über die Kanalbreite gemittelt ergaben die Messungen eine Dicke von 9,99 mm mit einer Standardabweichung $< 0,09$ mm.

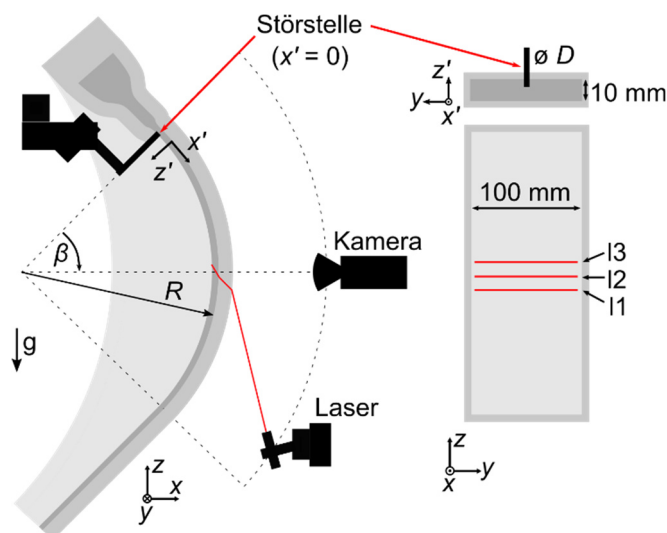


Abb. 3: Skizze der FIDES Teststrecke mit der Position der Störstelle und des Messsystems.

Auswertung des ungestörten Oberflächenprofils

Im ersten Schritt wurde das Oberflächenprofil der Strömung ohne eingebrachte Störstelle als Referenzmessung untersucht. Zur Übertragung der Ergebnisse des Wasserprüfstands auf die Lithiumströmung in DONES wurden die beschriebenen analytischen Lösungen herangezogen. Mit der Voraussetzung für gleiche Wellenformen bei $Fr \cdot We = \text{konstant}$ ergibt sich für den Geschwindigkeitsbereich von 15 – 20 m/s in Lithium (250 °C) ein Geschwindigkeitsbereich von 4,7 – 6,2 m/s in FIDES (20 °C). Demnach wurde angenommen, dass die Wake Form in FIDES identisch zur Wake Form in einer Lithiumströmung mit konstantem Krümmungsradius von $R = 250 \text{ mm}$ war.

Abbildung 4 zeigt zunächst das gemessene mittlere Höhenprofil bei 5 m/s, 45° stromab der Düse. In den aufgenommenen Bildern in denen die Laserlinie detektiert wurde entspricht 1 px einer Höhenänderung von 0,043 mm. Die Standardabweichung des gemessenen ungestörten Profils war 0,11 mm. Zusätzlich wurde der systematische Fehler, welcher auf der Messung der absoluten Schichtdicke liegt mit 0,13 mm abgeschätzt. Dies beinhaltet die Unsicherheit auf dem Kameraabstand, dem Umfangsmaßstab und der Unsicherheit des Detektionsalgorithmus der Laserlinie. In y-Richtung betrug der Abstand der Messpunkte 0,729 mm. Die ermittelten Werte wurden über diese Breitenabschnitte gemittelt.

Das Profil der ungestörten Strömung in Abbildung 4 zeigt ein leichtes Aufwölben in der Kanalmitte. Die von den Düsenkanten ausgehenden Wakes konnten im Profil auf beiden Seiten als Minima und Maxima gemessen werden. Die gemessenen Maxima lagen bei der hier beschriebenen Messposition um die 11,82 mm von der Kanalwand entfernt, was der Position des ersten Maximums der Schwerewellen aus den analytischen Lösungen entspricht. Die mittlere Schichtdicke der Strömung lag hier bei 9,88 mm.

Abbildung 5 zeigt die gemessenen ungestörten Profile bei Variation der Strömungsgeschwindigkeit und der Umfangsposition. Für die mittlere Schichtdicke zeigte sich eine deutlich positive Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit. Bei allen Geschwindigkeiten wurden die Randwakes gemessen. Dabei blieb die y-Position und die Amplitude der äußersten Maxima konstant. Das darauffolgende Minimum wanderte für steigende Strömungsgeschwindigkeiten leicht nach außen. Im Vergleich dazu nahm die mittlere Schichtdicke an den verschiedenen gemessenen Umfangspositionen bei gleichbleibender Strömungsgeschwindigkeit nur leicht ab. Dafür nahm der Seitenwandabstand des Randwakes mit steigender Umfangsposition zu. Diese Änderung der Wake Position entlang der Umfangsposition im Kanal wurde auch von den analytischen Lösungen wiedergegeben, genauso wie der gleichbleibende Wandabstand bei Variation der Strömungsgeschwindigkeit.

Zusätzlich wurde die Wasserströmung in FIDES auch numerisch mit Star CCM+ [2020] simuliert. Dabei wurde eine „Two Phase flow Volume of Fluid“ Methode [Brackbill 1992] mit einem SST (Shear Stress Transport) Turbulenzmodell [Menter 1994] verwendet. Das Rechennetz mit $7,84 \cdot 10^6$ Zellen umfasste die halbe Kanalbreite mit einer Symmetrierandbedingung in der Kanalmitte. Die Stoffeigenschaften von Wasser wurden für 20°C als konstant angenommen und der Kontaktwinkel wurde zu 10° festgelegt.

Das aus den Simulationen erhaltene Profil ist in Abbildung 4 neben dem gemessenen Profil dargestellt. Zwischen den Randwakes spiegelt das simulierte Profil das gemessene mit einer maximalen Abweichung von 0,08 mm wieder. Auch die Position der inneren Minima und Maxima war vergleichbar. Die Amplitude der Minima war in den Messungen stärker ausgeprägt. Die größten Abweichungen zwischen Messungen und Simulation traten im Bereich zwischen dem Randwake und der Kanalwand auf. In beiden Fällen kam es aufgrund der Benetzung der Seitenwand zu einem Anstieg der Filmdicke direkt an der Wand. Dieser Anstieg war in den Simulationen stetig, wohingegen die Experimente auf ein weiteres Minimum hindeuten. Das

Höhenprofil im Wand nahen Bereich konnte aufgrund von starkem Streulicht in der Nähe der Kanalwände nicht aufgenommen.

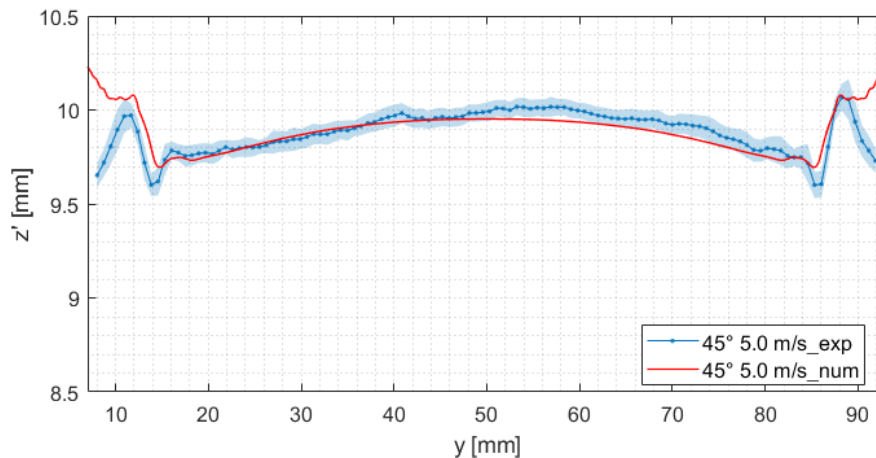


Abb. 4: Vergleich des gemessenen mittleren Höhenprofils der ungestörten Schichtdicke 45° stromab des Düsenaustritts bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s mit der simulierten Schichtdicke. Die Fläche um die Kurve gibt die Standardabweichung der Messungen wieder.

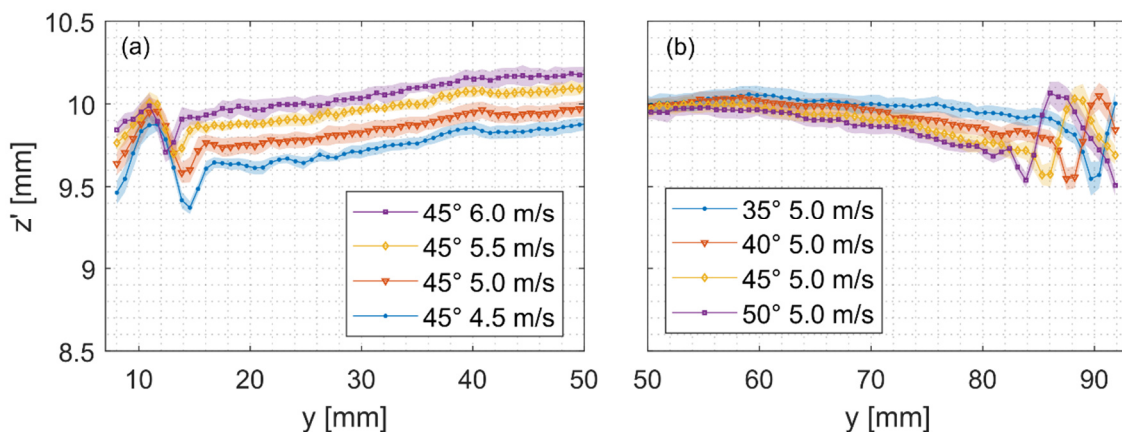


Abb. 5: (a) Profil an der senkrechten Kanalposition (45°) bei variierender Strömungsgeschwindigkeit. (b) Profile bei 5 m/s entlang des Kanals.

Auswertung des Profils stromab der Störstelle

Die untersuchten Eindringtiefen waren 0,75 mm, 1,25 mm, 1,5 mm und 2 mm. Diese Eindringtiefen wurden ab dem Punkt gemessen an dem die Störstellenspitze die Wasseroberfläche berührte. Der Störstellendurchmesser D wurde zu 1,2 mm, 2 mm und 3 mm gewählt. Neben dieser Variation der Parameter der Störstelle wurde auch die Strömungsgeschwindigkeit und die Umfangskoordinate wie schon im ungestörten Fall variiert. Im Folgenden wurden statt der absoluten Profile die relativen Höhenprofile betrachtet, welche die Differenz zum ungestörten Profil an der entsprechenden Umfangskoordinate und Strömungsgeschwindigkeit sind.

Im ersten Schritt wurde untersucht ab welcher Eindringtiefe der Störstelle die kritische Wake-tiefe von 1 mm im senkrechten Abschnitt des Kanals erreicht. Abbildung 6 stellt das Höhenprofil 45° stromab der Störstelle mit einem 1,2 mm Durchmesser bei verschiedenen Eindringtiefen und einer konstanten Strömungsgeschwindigkeit von 5 m/s dar. Das Höhenprofil wurde dabei relativ zum ungestörten Profil dargestellt. Die Störstelle befand sich etwas rechts der Kanalmitte im Bereich von $50 < y < 51$ mm.

Bis zu einer Eindringtiefe von $< 0,75$ mm wurde keine deutliche Änderung des Profils im Vergleich zum ungestörten Fall gemessen. Mit steigender Eindringtiefe bildeten sich rechts und links der Störstelle ein deutlicher Wellenberg und ein Wellental aus. Deren Amplitude nahm mit steigender Eindringtiefe zu. Ab 1,25 mm Eindringtiefe blieb die Amplitude der Maxima konstant. Die Tiefe der Minima nahm mit steigender Eindringtiefe weiter zu. Die kritische Wake Tiefe von 1 mm wurde in diesem Fall bei der Eindringtiefe von 2 mm überschritten. Im Fall der 2 mm Eindringtiefe bildete sich genau stromab der Störstelle außerdem ein weiteres Minimum aus. Allerdings stieg im Fall der größten gemessenen Eindringtiefen und Strömungsgeschwindigkeiten in dem Bereich zwischen den größten gemessenen Minima die Standardabweichung an. Eine wahrscheinliche Ursache waren Wassertropfen welche sich von der Störstelle lösten und für Streulicht in diesem Bereich sorgten.

Der Vergleich mit den analytischen Lösungen zeigte, dass die beiden am stärksten ausgeprägten Wellentäler zwischen dem äußersten Wellenberg der Schwerewellen und dem innersten Wellenberg der Kapillarwellen lagen. Die Lösung für $n = 0,5$ der Schwerewellen ließ sich den beiden auftretenden Maxima zuordnen. Die weiteren analytischen Lösungen für größere n fanden kein eindeutiges Äquivalent in den gemessenen Profilen.

Abbildung 7 zeigt das relative Oberflächenprofil bei 5 m/s an der Kanalposition 45° stromab der Düse für die verschiedenen Störstellendurchmesser. Die Eindringtiefe der Störstelle war 1,25 mm. Im Fall der schon vorher untersuchten 1,2 mm Störstellendurchmesser lag die maximale Wake Tiefe von 0,6 mm noch unterhalb der kritischen Tiefe. Mit steigendem Störstellendurchmesser stieg die Breite und Tiefe der Minima an. Der größte Sprung wurde dabei von 1,2 mm zu 2 mm Durchmesser gemessen. Der Unterschied zwischen den Profilen der beiden größeren Störstellendurchmesser war deutlich kleiner.

Mit der festgestellten kritischen Eindringtiefe der Störstelle zum Erreichen der kritischen Wake Tiefe an der senkrechten Kanalposition war zudem die Frage wie sich das Höhenprofil stromauf und stromab dieser Stelle ändert. In Abbildung 8 wurden hierfür die relativen Oberflächenprofile bei 5 m/s an den untersuchten Umfangskoordinaten dargestellt. Die Störstelle hatte dabei einen Durchmesser von 1,2 mm und eine Eindringtiefe von 1,5 mm. Die Profile zeigten ein deutliches Abflachen der Wake Tiefe in Strömungsrichtung. Außerdem wurde der Abstand der Minima zueinander mit steigender Umfangskoordinate größer. Auch die beiden Maxima wanderten nach außen und steigerten ihre Amplitude etwas entlang des Umfangs. Dieser stromab breiter werdende Wake wurde auch von den analytischen Lösungen beschrieben.

Zuletzt wurde der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit auf die Oberflächenprofile stromab der Störstelle untersucht. Die gemessenen Profile ließen keinen Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit im untersuchten Geschwindigkeitsbereich von 4,5 – 6 m/s erkennen. Die Lage und Tiefe der beiden größten Minima blieb bei allen Geschwindigkeiten gleich. Wie schon bei der ungestörten Strömung beschrieben war auch in den analytischen Lösungen keine Wirkung der Geschwindigkeit auf die Wake Position zu erkennen.

In den gemessenen Profilen war eine Asymmetrie zwischen den Wake Amplituden der Minima links und rechts der Störstelle zu erkennen. Der Unterschied der maximalen Wake Tiefe auf beiden Seiten lag in der Größenordnung von 0,25 mm. Im Fall der ungestörten Strömung trat diese Asymmetrie im Fall der Randwake Maxima auf, wobei die Amplitude der Maxima der rechten Seite größer waren. Mögliche Einflussfaktoren waren das Messsystem und die Strömungsrandbedingungen an der Düse. Versuche die Asymmetrie auf das Messsystem zu beziehen ergaben keinen Einfluss.

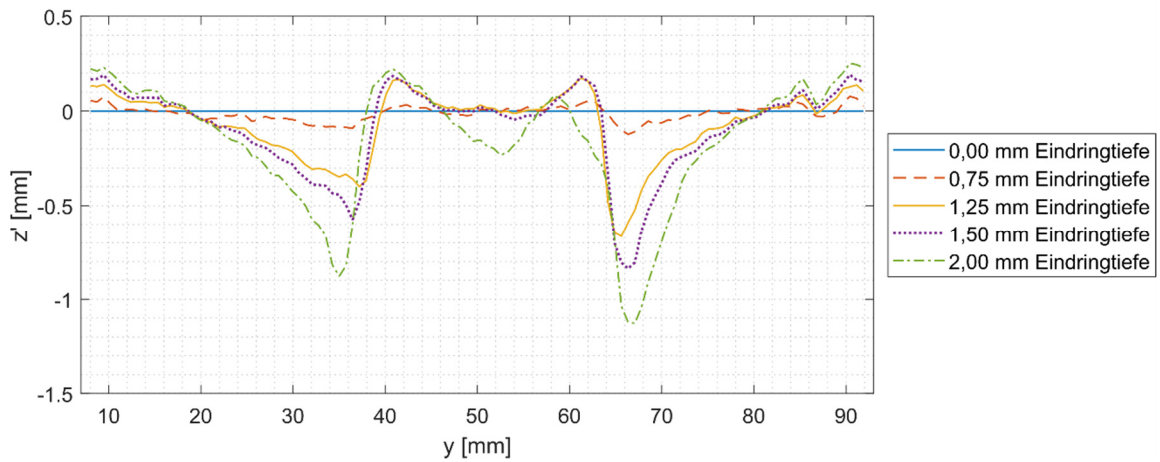


Abb. 6: Relative Oberflächenprofile bei 5 m/s, 45° stromab des Düsenaustritts bei unterschiedlichen Eindringtiefen der Störstelle mit 1,2 mm Durchmesser.

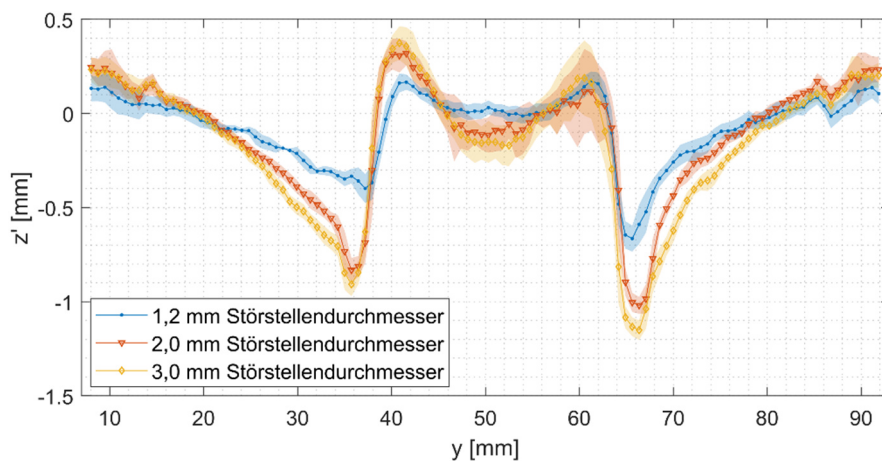


Abb. 7: Relatives Oberflächenprofil bei 5 m/s, 45° stromab des Düsenaustritts bei einer Eindringtiefe der Störstelle von 1,25 mm. Störstellendurchmesser wurde bei 1,2 mm, 2 mm und 3 mm untersucht.

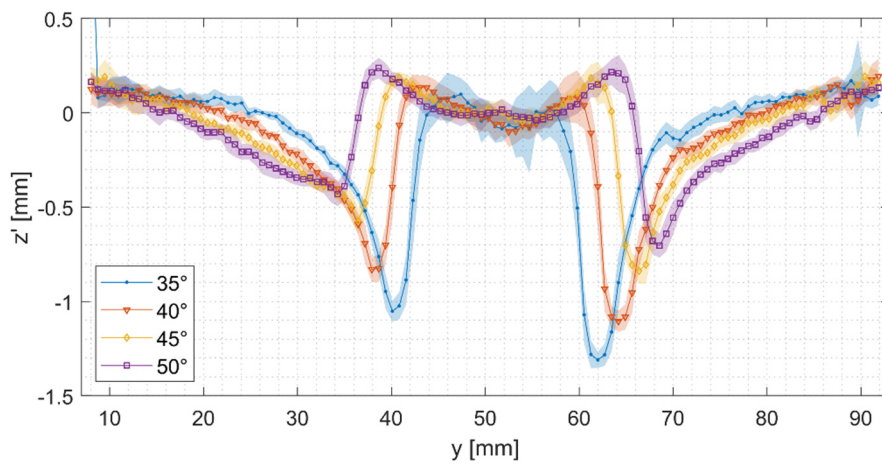


Abb. 8: Relatives Oberflächenprofil bei 5 m/s und den vier untersuchten Umfangskoordinaten. Die verwendete Störstelle hatte einen Durchmesser von 1,2 mm und eine Eindringtiefe von 1,5 mm.

Fazit

Ziel der Messungen an dem zu DONES ähnlichen Wasserkreislauf war die Untersuchung des Einflusses einer Störstelle am Düsenaustritt auf das Höhenprofil stromab der Düse. Hierfür wurde zunächst ein auf Triangulation basierendes Messsystem entwickelt, mit dem die Schichtdicke der Wasserströmung aufgenommen werden konnte. Die Messungen der ungestörten Strömung zeigten sowohl den von den analytischen als auch von den numerischen Lösungen vorhergesagten Randwake. Dabei konnte auch der stromab steigende Wandabstand gemessen werden.

Die Messungen des Höhenprofils stromab der Düsenkante zeigten ab einer ausreichend großen Störstelle symmetrisch um die Störstelle auftretende Minima. Sowohl ein größerer Störstellendurchmesser als auch eine größere Eindringtiefe korrelierten positiv mit der Tiefe der Minima. Je nach Durchmesser wurde ein Einfluss der Störstelle erst ab einer bestimmten Eindringtiefe deutlich. Dieser Schwellwert wurde bei größeren Störstellendurchmessern schon bei kleineren Eindringtiefen erreicht. Somit war auch das Erreichen der kritischen Wake Tiefe stark von diesen beiden Parametern abhängig. Neben der Abmessung der Störstelle beeinflusste auch die Umfangskoordinate die Wake Tiefe. Entlang des Umfangs nahm die Wake Tiefe ab. Dieser Zusammenhang wird wichtig, wenn aus Messungen an einer Kanalposition auf das Profil stromauf oder stromab geschlossen werden soll. Mögliche Ursachen für die auftretende Asymmetrie der Profile werden in zukünftigen Experimenten näher untersucht.

Dankesworte

Diese Arbeit wurde im Rahmen des EUROfusion-Konsortiums durchgeführt und unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 633053 durch die Euratom-Forschungs- und Ausbildungsprogramme 2014-2018 und 2019-2020 finanziert. Die hier geäußerten Ansichten und Meinungen spiegeln nicht unbedingt die der Europäischen Kommission wider.

Literatur

- Ageorges, V., Peixinho, J., Perret, G., 2019:** Flow and air-entrainment around partially submerged vertical cylinders, *Phys. Rev. Fluids*, Volume 4
- Bestehorn, M., 2006:** *Hydrodynamik und Strukturbildung*, Springer-Verlag
- Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992:** A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, Volume 100, Issue 2
- Chaplin, J.R., Teigen, P., 2003:** Steady flow past a vertical surface-piercing circular cylinder, *Journal of Fluids and Structures*, Volume 18, Issues 3–4
- Darmon, A., Benzaquen, M., Raphaël, E., 2014:** Kelvin wake pattern at large Froude numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, 738
- Knaster, J., Moeslang, A., Muroga, T., 2016:** Materials research for fusion, *Nature Phys.* 12
- Kondo, H., Fujisato, A., Yamaoka, N., Inoue, S., Miyamoto, S., Sato, F., Iida, T., Horiike, H., Matushita, I., Ida, M., Nakamura, Hideo, Nakamura, Hiroo, Muroga, T., 2004:** High speed lithium flow experiments for IFMIF target, *Journal of nuclear materials*, Volumes 329–333, Part A
- Kondo, H., Kanemura, T., Yamaoka, N., Miyamoto, S., Ida, M., Nakamura, H., Matushita, I., Muroga, T., Horiike, H., 2007:** Measurement of free surface of liquid metal lithium jet for IFMIF target, *Fusion Engineering and Design*, Volume 82, Issue 15-24
- Lamb, H., 1916:** *Hydrodynamics*, Cambridge University Press
- Lighthill, J., 1978:** *Waves in Fluids*, Cambridge University Press
- Menter, F.R., 1994:** Two-equation eddy-viscosity turbulence modeling for engineering applications, *AIAA Journal*, 32(8), pp. 1598-1605.
- Moisy, F., Rabaud, M., 2014:** Mach-like capillary-gravity wakes, *Phys. Rev.* E90
- Rabaud, M., Moisy, F., 2013:** Ship Wakes: Kelvin or Mach Angle?, *Phys. Rev. Lett.* 110
- 2020:** Siemens Digital Industries Software, User Guide, Version 2020.3.