Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik"
5. – 7. September 2017, Karlsruhe

Untersuchung eines Hochdruck-Wasserstrahls für Bohranwendungen in der Geothermie mittels laseroptischer Verfahren

Investigation of the structure of a high pressure water jet for drilling applications in the field of geothermal energy by means of laser optical techniques

Sarah Jasper[1], Jeanette Hussong[2] und Ralph Lindken[1]
[1]Institut für Thermo- und Fluiddynamik, Hochschule Bochum, Lennershofstr. 140, 44801 Bochum
[2]AG Lasermesstechnik der Mehrphasenströmungen, Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

Visualisierung, Schattenverfahren, PIV, LIF, Turbulenter Strahl, Sprayanalyse
visualisation, shadowgraphy, PIV, LIF, turbulent jet, spray analysis

Zusammenfassung

Hochdruck-Wasserstrahlen werden schon seit langem in der Industrie angewandt, z.B. in der Reinigungstechnik oder beim Wasserstrahlschneiden. Diese Technologie kann zur Erschließung von tiefen geothermischen Reservoirs auf die Bohrtechnik übertragen werden, um ein effizientes und kostengünstiges Bohrverfahren zu entwickeln. Für einen erfolgreichen Prozesstransfer muss jedoch zunächst ein breites Prozessverständnis des Wasserstrahlschneidens von Gestein zusammengetragen werden. Die Herausforderungen bei der optischen Prozessanalyse sind dabei die hohen Geschwindigkeiten des Hochdruck-Wasserstrahls von mehreren hundert Metern pro Sekunde und die sehr kleinen Dimensionen des Bildfelds zwischen Düsenaustritt und Gesteinsoberfläche von wenigen Zentimetern. In diesem Beitrag werden dafür bereits bekannte laseroptische Verfahren auf die Anwendung der Analyse von Hochdruck-Wasserstrahlen mit Reynolds-Zahlen in der Größenordnung 10^4 geprüft. Neben Hochgeschwindigkeitsfotografie mit Beleuchtung im Durchlicht-Schattenverfahren werden kombinierte Particle Image Velocimetry (PIV) und Laser Induced Fluorescence (LIF) Versuche durchgeführt, um eine Analyse des Hochdruck-Wasserstrahls in Wasser durchzuführen.

Einleitung

Die Nutzung von Geothermie zur Wärme- und Stromerzeugung kann zu einer nachhaltigen und klimafreundlichen Energieversorgung in Deutschland beitragen. Der Geothermie kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie anders als z.B. Wind- oder Solarenergie grundlastfähig, vielfältig und ganzjährig nutzbar ist. In Deutschland liegt das theoretisch nutzbare geothermische Potential mit ca. 85% vor allem in petrothermalen Lagerstätten (Brauer et al. 2014). Unter petrothermalen Lagerstätten wird heißes Tiefengestein in ca. 3000 Metern Tiefe mit Durchschnittstemperaturen von 100 °C verstanden, das jedoch nur eine geringe Durchlässigkeit besitzt und keine natürlichen Thermalwässer führt (Brauer et al. 2014). In dieses wenig durchlässige Tiefengestein wird für die geothermische Nutzung durch geeignete Stimulationstechniken ein künstlicher Wärmetauscher gebaut, ein Enhanced Geothermal System (EGS). Ausgehend von einer vertikalen Injektionsbohrung werden dazu mehrere horizontale Bohrungen getätigt.

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3

Ein Hindernis für den weiteren Ausbau der Nutzung von Geothermie, z.B. durch EGS, stellen momentan hohe Kosten für Tiefbohrungen dar, die durch die Entwicklung einer geeigneten Tiefbohrtechnologie gesenkt werden können. In der oberflächennahen Bohrtechnik werden bereits druckwassergestützte Bohrsysteme in weichem Gestein zur Ertragserhöhung in Öl- und Gasfeldern eingesetzt. Dieses Jetting-Verfahren ist im Vergleich zu anderen konventionellen Bohrverfahren schneller, verschleißärmer und umweltverträglicher. Für die Tiefbohrtechnik ist die Jetting-Technologie jedoch bisher noch nicht anwendbar, da dort vor allem harte und oft kristalline Gesteine vorliegen. Eine Optimierung der Jetting-Technologie ist daher notwendig, um diese Technologie für die Tiefbohrtechnik nutzen zu können. Für eine erfolgreiche Prozessoptimierung muss jedoch zunächst ein breites Prozessverständnis des Wasserstrahlschneidens von Gestein zusammengetragen werden. Bereits seit den 1960er Jahren wird auf dem Gebiet des Wasserstrahlschneidens von Gestein geforscht, der Prozess selbst ist jedoch noch nicht hinreichend verstanden (Farmer und Attewell 1965, Brook und Summers 1969, Hood et al. 1990).

Ziel dieses Forschungsprojekts ist daher die Erweiterung des Prozessverständnisses mit einem Schwerpunkt auf der Interaktion von Wasserstrahl und Gesteinsoberfläche unter realistischen Bedingungen mit Hilfe von optischer Messtechnik. Diese Interaktion kann z.B. mit Hilfe des Energieeintrags des Wasserstrahls auf die Gesteinsoberfläche untersucht werden. Der Energieeintrag wird dabei durch die Geschwindigkeit des Wasserstrahls sowie seine geometrische Form bestimmt. Daher kann durch Visualisierung und Geschwindigkeitsanalyse experimentell der Energieeintrag bestimmt werden. Für Wasserstrahlen mit hohen Reynolds-Zahlen wird zur Visualisierung häufig das Schattenverfahren verwendet (z.B. Donald und Singer 1959, Soyama et al. 1996). Das Schattenverfahren mit kombinierter PIV Auswertung wurde von Zelenak et al. 2015 bereits auf die Untersuchung eines dünnen Wasserstrahls bei hohen Reynolds-Zahlen erfolgreich angewendet. Nachteile zeigte das Verfahren im Düsennahbereich, wo der Wasserstrahl sehr dicht ist. Für die Geschwindigkeitsanalyse ist die PIV Technik ein bereits etabliertes Verfahren und wird auch für die Analyse von Wasserstrahlen eingesetzt (z.B. Or et al. 2011, Lacagnina und Romano 2015). Fukushima et al. 2000 und Webster et al. 2001 haben für die Analyse von Wasserstrahlen mit Reynolds-Zahlen von 2000-3000 eine kombinierte PIV und LIF Technik angewendet. Durch diese Kombination ist die simultane Analyse von Struktur sowie Geschwindigkeitsverteilung des Wasserstrahls möglich.

In diesem Beitrag wird die Anwendbarkeit von zwei unterschiedlichen laseroptischen Verfahren für die Analyse des Wasserstrahls für die Bohrtechnik getestet und validiert. Die Verfahren müssen für die Analyse eines dichten Wasserstrahls mit hohen Reynolds-Zahlen von momentan bis zu $1{,}23 \times 10^5$ in unterschiedlichen Umgebungsfluiden geeignet sein. Das erste getestete Verfahren ist das Schattenverfahren mit einer doppelt gepulsten, diffusen Hintergrundbeleuchtung in Kombination mit einer PIV Auswertung der Strukturen auf der Strahloberfläche basierend auf dem Kreuzkorrelationsalgorithmus. Das zweite Verfahren ist ein kombiniertes PIV und LIF Verfahren.

Experimenteller Aufbau

Der Wasserstrahl wird mit einer Hochdruckpumpe (max. Volumenstrom 15 l/min, max. Betriebsdruck 15 MPa) und einer Vollstrahldüse mit Saphireinsatz erzeugt. Die Versuche werden mit drei verschiedenen Düsenaustrittsdurchmessern d_D durchgeführt, die einen maximalen Düsenaustrittsdruck p_D von 10 MPa und einen maximalen Volumenstrom Q von 14 l/min zulassen. Eine Übersicht über alle Versuchsparameter ist in Tabelle 1 gegeben. Der Durchfluss Q wird mit einem magnetisch-induktivem Durchflusssensor (Optiflux 1300, Krohne) gemessen. Mit einem Drucksensor (BSP00JP, Balluff) 30 mm vor dem Düsenaustritt wird der Druck an der Düse p_D gemessen.

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3

Die Versuche werden sowohl mit einem Wasserstrahl in Luft als auch in Wasser durchgeführt. Die Ergebnisse der Messung in Luft erlauben einen einfachen Vergleich mit der Literatur, die Versuche in Wasser entsprechen eher den realen Bedingungen im Bohrloch. Das Bildfeld hat sowohl bei den Schattenaufnahmen als auch bei den kombinierten PIV und LIF Aufnahmen eine Größe von 20x23 mm, da dieser Bereich in etwa dem Abstand zwischen Bohrkopf und Gesteinsoberfläche während des Bohrvorgangs entspricht. In den hier durchgeführten Versuchen werden der erhöhte Druck von bis zu 3000 Metern Wassersäule, Gesteinsdrücken bis zu 120 MPa und die Begrenzung im Bohrloch noch nicht abgebildet.

Tab. 1: Übersicht der Versuchsparameter

Parameter		Dimension	Wert
Düsenaustrittsdurchmesser	d_D	mm	1,8, 2,0, 2,3
Düsenaustrittsdruck	p_D	MPa	0,1 - 10
Volumenstrom	Q	l/min	2,0 – 14,0
Strahlgeschwindigkeit	u_S	m/s	8,0 – 130,0
Düsen Reynolds-Zahl	Re_D	-	$1{,}2x10^4$ – $12{,}3x10^4$

Die Visualisierung des Wasserstrahls in Luft wird mit dem Schattenverfahren realisiert. Abbildung 1 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau. Das System besteht aus einer 16 bit sCMOS Kamera mit einem Zeiss Yashica Makro-Objektiv, einem Nd:YAG Doppelpuls-Laser (max. Frequenz 15 Hz, Wellenlänge 532 nm, Pulslänge 5 ns, max. Ausgangsenergie 200 mJ pro Puls) und einem Lichtführungsarm, der mit einem optischen Diffusor gekoppelt ist. Der Laser ist außerdem mit einem Laserabschwächer gekoppelt, um einen stabilen Betrieb des Lasers bei hoher Ausgangsleistung, aber einem Diffusor mit maximaler Eingangsleistung von 50 mJ sicher zu stellen. Die maximale Eingangsleistung ist durch die mit Fluoreszenzstoff beschichtete Kunststoffplatte im Diffusor selbst limitiert. Über eine programmierbare Steuerungseinheit werden Laser und Kamera für die Aufnahmen synchronisiert.

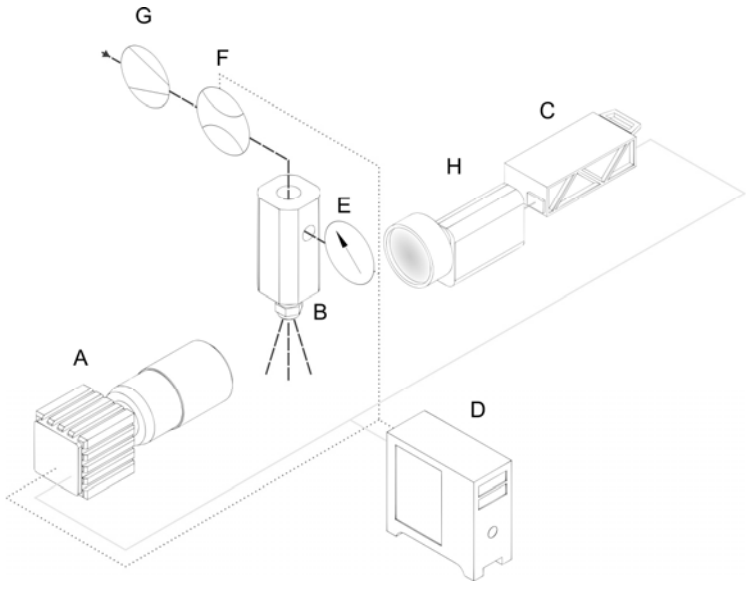

Abb. 1: Versuchsaufbau für die Schattenaufnahmen mittels Durchlichtbeleuchtung mit Kamera (A), Düse (B), Laser (C) und Diffusor (H) sowie Computer (D), Druck- (E) und Durchflusssensor (F) und Hochdruckpumpe (G).

Der Diffusor wandelt einen 5 ns Laserpuls in einen nicht-kohärenten, frequenzverschobenen Puls mit einer Dauer von etwa 23 ns. Mit dieser kurzen pulsierenden Beleuchtung können

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3

die Randstrukturen des Freistrahls bei hoher Geschwindigkeit und Auflösung mit einer Bewegungsunschärfe von 1-2 Pixeln abgebildet werden. Mit den Schattenaufnahmen ist so neben der Strukturanalyse eine Auswertung der Geschwindigkeiten am Rand des Hochdruck-Wasserstrahls möglich.

Neben den Schattenaufnahmen des Hochdruck-Wasserstrahls in Luft werden für die Analyse des Hochdruck-Wasserstrahls in Wasser Versuche mit kombinierter PIV und LIF Technik durchgeführt. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 2. Die Verwendung von fluoreszierenden Tracern ermöglicht eine Visualisierung und Untersuchung des dichten Wasserstrahls. Die Kamera wird dazu mit einem Langpassfilter mit einer Transmission größer 95% ab einer Wellenlänge von 540 nm ausgestattet, um ungewünschte Reflektionen der Laserwellenlänge auszuschließen. Als Fluoreszenzmittel wird wasserlösliche Vinylfarbe verwendet, die Rhodamin B mit einem Emissionspeak bei 565 nm enthält. Beim dispergieren der Farbe löst sich ein Teil im Wasser und kann für die Visualisierung der Wasserstrahlkontur genutzt werden. Die Partikel in der wässrigen Lösung könne für die für die PIV Analyse als Tracerpartikel genutzt werden. Durch die Verwendung dieser Farbe ist eine simultane PIV und LIF Analyse des Wasserstrahls möglich.

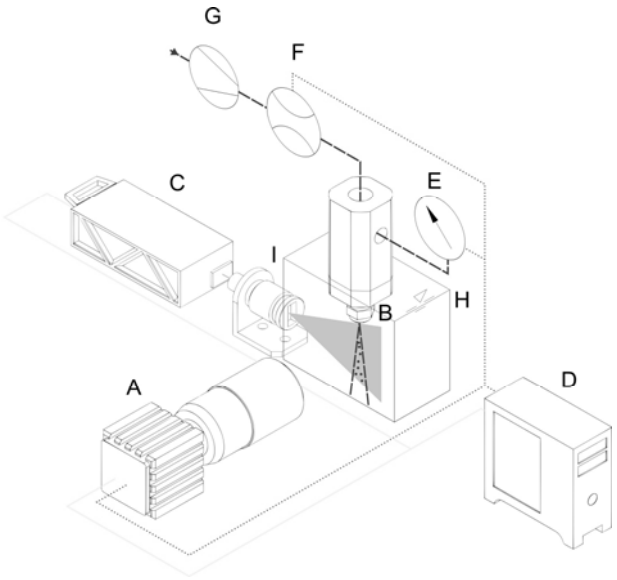

Abb. 2: Versuchsaufbau für die kombinierte PIV und LIV Analyse mit Kamera mit optischem Filter (A), Düse (B) im Wassertank (H), Laser (C) und Lichtschnittoptik (I) sowie Computer (D), Druck- (E) und Durchflusssensor (F) und Hochdruckpumpe (G).

Auswertung der Schattenbilder sowie der kombinierten PIV und LIF Bilder

Das Prinzip der Kreuzkorrelationsauswertung auf den Randstrukturen des Wasserstrahls zeigt Abbildung 3. Für jeden Messpunkt werden 1000 Doppelbilder aufgenommen. Für die Geschwindigkeitsauswertung werden Bildausschnitte von Randstrukturen verwendet, da eine zuverlässige Korrelation nur dort möglich ist. Dazu wird durch Mittelwertbildung die Größe der Randstrukturen bestimmt und so anschließend ein Bereich für die Korrelation festgelegt. In jedem einzelnen Bildpaar werden die Randstrukturen dadurch ausreichend abgebildet. Der ausmaskierte Bildausschnitt beinhaltet nach der Korrelation zehn Auswertefenster. Zusätzlich zu den Geschwindigkeiten an der Strahloberfläche kann eine geometrische Analyse des Strahls durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Strahlparameter, wie z.B. dem Strahlwinkel, sind weitere Bildverarbeitungsschritte notwendig. Das Bild wird dafür zunächst invertiert, anschließend wird ein geeigneter Grenzwert für die Bestimmung der Phasengrenze gesetzt und das Bild abschließend binarisiert.

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3

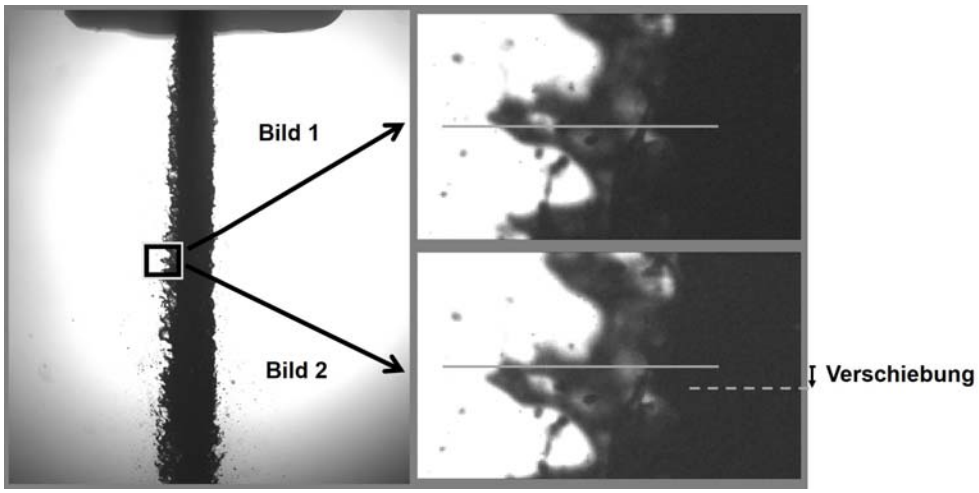

Abb. 3: Darstellung der Korrelation auf den Randstrukturen des Hochdruck-Wasserstrahls in Luft (d_D = 1,8 mm, p_D = 6 MPa, Q = 11 l/min, Re_D = 9,9x104). Die Detailbilder auf der rechten Seite zeigen je ein Einzelbild der Doppelbildaufnahme in der Größe 1 x 2 mm.

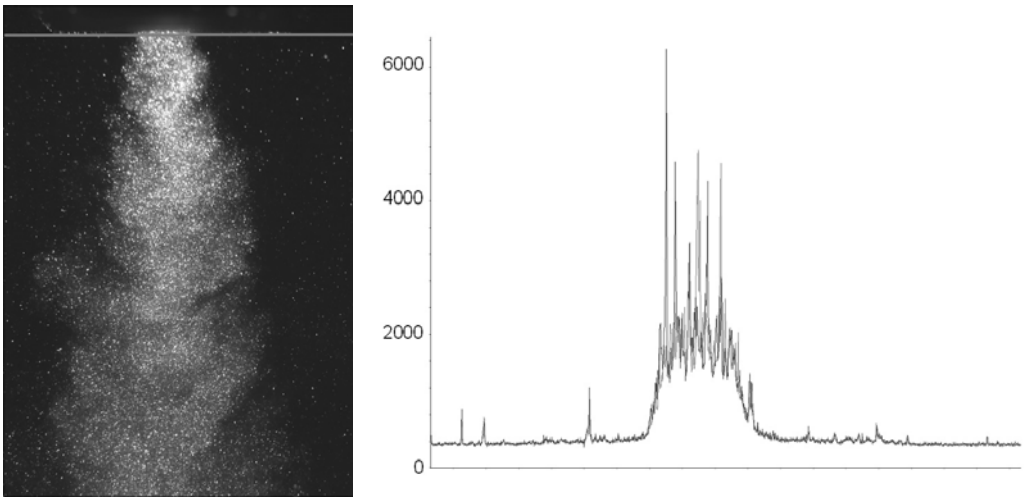

Abb. 4: Beispiel einer kombinierten PIV und LIF Aufnahme des Hochdruck-Wasserstrahls in Wasser (d_D = 1,8 mm, p_D = 0,1 MPa, Q = 2,3 l/min, Re_D = 1,5x10^4) mit unterschiedlichen Grauwertbereichen. Auf der rechten Seite ist die Grauwertverteilung entlang der grauen Linie im linken Bild dargestellt. Der mit Fluoreszenzfarbe geimpfte Wasserstrahl zeigt Grauwerte im Bereich von 1500. Im Gegensatz dazu hat der Hintergrund Grauwerte im Bereich von 300. Die fluoreszierenden Tracerpartikel zeigen sich als Spitzen mit Grauwerten um 4000.

Bei der kombinierten PIV und LIF Aufnahme des mit der Vinylfarbe angereicherten Wasserstrahls in Wasser können drei unterschiedliche Graustufenbereiche unterschieden werden. Eine geeignete Trennung der unterschiedlichen Grauwertstufen ermöglicht so die Auswertung sowohl von Struktur des Wasserstrahls als auch der Geschwindigkeit aus einer einzelnen Aufnahme (vgl. Lindken und Merzkirch 2002). Abbildung 4 veranschaulicht die unterschiedlichen Grauwerte einer Aufnahme. Drei Grauwertstufen können bei der Aufnahme in steigender Reihenfolge unterschieden werden: der Hintergrund, die gelöste Farbe im Wasserstrahl und noch nicht gelöste Farbpartikel.

Für die Versuche in Wasser werden wie bei den Schattenaufnahmen 1000 Doppelbilder aufgenommen und eine PIV Analyse durchgeführt. Um die Struktur des Wasserstrahls auswerten zu können, wird ein geeigneter Grenzwert gesetzt und die Strahlanalyse erfolgt wie zuvor beschrieben.

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3

Geschwindigkeitsanalyse des Wasserstrahls

Mit der PIV-Auswertung der Schattenbilder ist es möglich, die Geschwindigkeit an der Strahloberfläche des Wasserstrahls zu bestimmen. Das Bildfeld der Aufnahme bildet nur den Kernbereich des Wasserstrahls ab, der je nach Düse bis maximal 12 Düsendurchmesser beträgt. Der Kernbereich des Freistrahls mit nahezu gleicher Geschwindigkeit über den Strahlquerschnitt wie am Düsenaustritt liegt im Bereich bis zu zehn Düsendurchmessern (Abramovich 1963). In dem untersuchten Bildfeld kann also die Annahme getroffen werden, dass die Geschwindigkeitsmessung am Rand des Wasserstrahls auch die Geschwindigkeit im Strahlinneren abbildet. Daher wird zur Verifizierung der Korrelationsergebnisse die Geschwindigkeit des Wasserstrahls u_S mittels Kontinuitätsgleichung über den gemessenen Durchfluss Q und den Düsenquerschnitt A_D berechnet. Abbildung 5 zeigt den Vergleich der berechneten Werte mit der Geschwindigkeitsmessung.

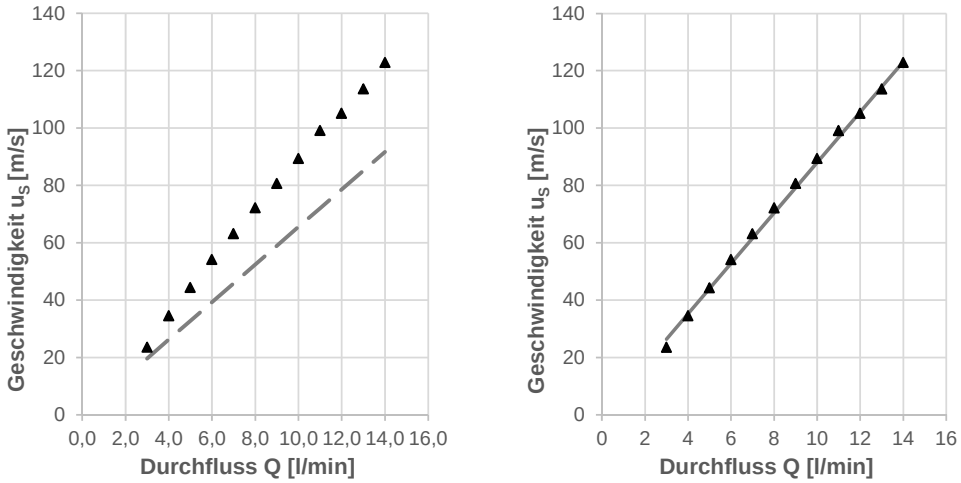

Abb. 5: Geschwindigkeit an der Strahloberfläche bei einem Düsendurchmesser von d_D = 1,8 mm. Berechnete Werte mit der Annahme einphasiger Strömung (links, grau gestrichelt) und zweiphasiger Strömung (rechts, graue Linie). Werte der Geschwindigkeitsmessung sind in beiden Diagrammen dargestellt (schwarze Dreiecke).

Anders als erwartet sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung höher als die zuvor berechneten. Für die Berechnung wurde die Annahme einer einphasigen, flüssigen Strömung für den Wasserstrahl am Düsenaustritt angenommen, wie es auf den Schattenaufnahmen des Wasserstrahls in Luft zu erkennen war. Die Differenz in den Geschwindigkeiten ist auf diese Annahme zurückzuführen. Bei den Versuchen in Wasser zeigt sich deutlich eine zweiphasige Strömung, die auf Kavitation am Düsenaustritt zurückzuführen ist.

Die entstehenden Gasblasen können einen Teil des Düsenquerschnitts blockieren und so den effektiven Düsenquerschnitt reduzieren. Daraus resultiert bei gleichem Durchfluss eine höhere Geschwindigkeit. Der Anteil des blockierten Düsenquerschnitts kann durch die Korrelationsergebnisse und den gemessenen Durchfluss ebenfalls über die Kontinuitätsgleichung bestimmt werden. Daraus ergibt sich ein Gasanteil von 20-30%, steigend mit kleinerem Düsendurchmesser. Für die Düse mit d_D = 1,8 mm zeigt Abbildung 5 die berechneten Werte mit einem Gasanteil von 26%.

Die Gasblasen kurz hinter dem Düsenaustritt stellen auch ein Hindernis für die PIV Analyse dar, da diese sowohl das Laserlicht als auch das emittierte Licht des Fluoreszenzstoffs streuen. Eine Analyse direkt am Düsensautritt ist deshalb nicht möglich. In einer Entfernung von etwa zehnfachem Düsendurchmesser ist jedoch keine Kavitation mehr zu erkennen und eine Korrelation ist hier möglich. Ein Vergleich der Geschwindigkeiten des Wasserstrahls in Luft und in Wasser ist daher nur in größerem Abstand zum Düsenaustritt möglich. Wie zu

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3

erwarten, zeigen die Korrelationsergebnisse, dass die Geschwindigkeit des Wasserstrahls in Wasser geringer ist als in Luft.

Strukturanalyse des Wasserstrahls

Die für diese Versuche verwendeten Vollstrahldüsen sind so ausgelegt, dass in Luft ein möglichst lange kohärenter Strahl mit geringem Strahlwinkel und somit hohem Energieeintrag entsteht. Die Analyse des Strahlwinkels des Wasserstrahls in Luft ist für alle durchgeführten Versuche kleiner als 4° und zeigt nur einen leichten Anstieg mit steigendem Durchfluss, Düsenaustrittsdruck und Düsenaustrittsdurchmesser. Im Gegensatz dazu zeigt der Wasserstrahl in Wasser wie zu erwarten einen deutlich größeren Strahlwinkel für den gleichen Messpunkt, bedingt durch höhere Scherkräfte an der Strahloberfläche. Abbildung 6 zeigt beispielhaft eine zeitlich gemittelte Aufnahme des Wasserstrahls. Die Momentaufnahmen des Wasserstrahls zeigen deutlich, dass der Wasserstrahl in Luft über das gesamte Bildfeld kohärent bleibt und nicht aufbricht. Im Kontrast dazu bricht der Strahl in Wasser am gleichen Messpunkt schon deutlich früher auf. Ein Beispiel dieser Momentaufnahmen zeigt Abbildung 7.

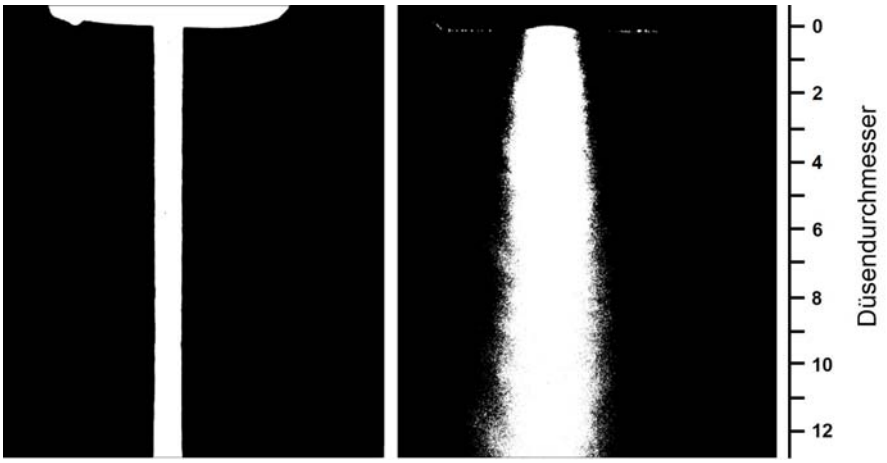

Abbildung 6: Vergleich der zeitlich gemittelten Struktur eines Wasserstrahls in Luft (links) und Wasser (rechts), d_D = 1,8 mm, p_D = 0,1 MPa, Q = 2,3 l/min, Re_D = 1,5x10^4

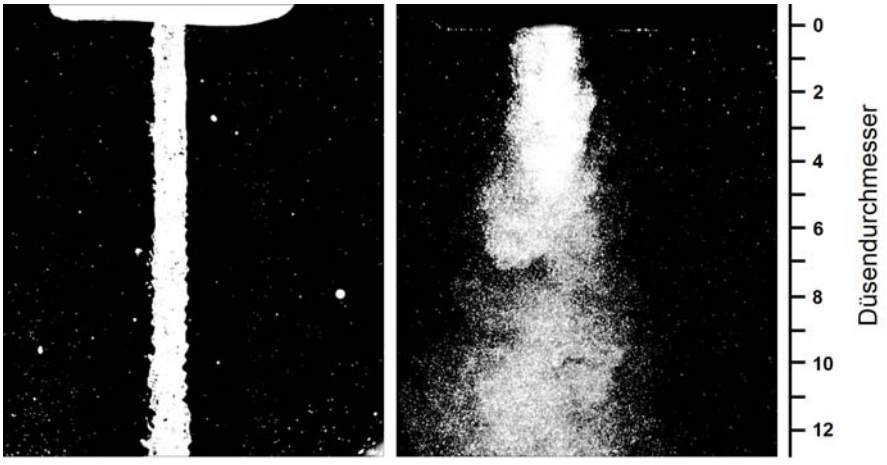

Abb. 7: Vergleich von Momentaufnahmen eines Wasserstrahls in Luft (links) und Wasser (rechts), d_D = 1,8 mm, p_D = 0,1 MPa, Q = 2,3 l/min, Re_D = 1,5x10^4

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden zwei unterschiedliche optische Verfahren auf ihre Anwendbarkeit für die Analyse von Hochdruck-Wasserstrahlen mit hohen Reynolds-Zahlen getestet. Sowohl das Schattenverfahren mit einer diffusen Doppelpuls-Hintergrundbeleuchtung in Kombination mit einer PIV Auswertung als auch das kombinierte PIV und LIF Verfahren haben sich als geeignet für die Strahlanalyse gezeigt. Beide Techniken können genutzt werden, um Hochdruck-Wasserstrahlen für die Bohrtechnik zu analysieren. Sowohl die Struktur- als auch die Geschwindigkeitsanalyse zeigen, dass der Energieeintrag unter realistischen Bohrlochbedingungen, d.h. nicht in Luft, deutlich geringer ist als unter atmosphärischen Bedingungen. Weitere Untersuchungen zur Entstehung und Entwicklung des Wasserstrahls in unterschiedlichen Fluiden und unter unterschiedlichen Bedingungen sind also notwendig, um die optimale Konfiguration für die Gesteinszerstörung herauszufinden. Um eine PIV Analyse unter diesen Bedingungen auch im Nahfeld der Düse umzusetzen und die Entstehung von Gasblasen zu verhindern, werden Versuche mit erhöhtem Gegendruck durchgeführt. Die validierte Messtechnik kann außerdem für weitere Untersuchungen in Gesteinssuspension und Bohrschlamm genutzt werden.

Dankesworte

Dieser Beitrag wird durch das „FH Struktur“ Förderprogramm für Fachhochschulen des Ministeriums für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert (AZ: 322-8.03.04.02).

Literatur

Abramovich, G.N., 1963: „The theory of turbulent jets“, MIT Press, Cambridge

Brauer, M., Freeden, W., Jacobi, H., Neu, T., 2014: „Handbuch Tiefe Geothermie. Prospektion, Exploration, Realisierung, Nutzung“, Springer, Berlin Heidelberg

Brook, N., Summers, D. A., 1969: “The penetration of rock by high-speed water jets”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 6, No. 3, pp. 249-258

Donald, M.B., Singer, H., 1959: “Entrainment in turbulent fluid jets”, Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Vol. 37, pp. 255-267

Farmer, I., Attewell, P., 1965: “Rock penetration by high velocity water jet”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 2, No. 2, pp. 135-153

Fukushima C., Aanen L., Westerweel J., 2000: “Investigation of the mixing process in an axisymmetric turbulent jet using PIV and LIF”, Laser Techniques for Fluid Mechanics, pp. 339-356

Hood, M., Nordlund, R., Thimons, E., 1990: “A study of rock erosion using high-pressure water jets”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 27, No. 2, pp. 77-86

Lacagnina, G., Romano, G.P., 2015: “PIV investigations on optical magnification and small scales in the near-field of an orifice jet”, Experiments in Fluids, Vol. 56, No. 1, pp. 480-490

Lindken, R., Merzkirch, W., 2002: „A novel PIV technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows“, Experiments in Fluids, Vol. 33, No. 6, pp. 814-825

Or, C. M., Lam, K. M., Liu, P., 2011: “Potential core lengths of round jets in stagnant and moving environments”, Journal of Hydro-environment Research, Vol. 5, No. 2, pp. 81-91

Soyama, H., Yanauchi, Y., Sato, K., Ikohagi, T., Oba, R., Oshima, R., 1996: “High-speed observation of ultrahigh-speed submerged water jets”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 12, No. 4, pp. 411-416

Webster, D.R., Roberts, P.J.W., Ra’ad, L., 2001: “Simultaneous DPTV/PLIF measurement of a turbulent jet”, Experiments in Fluids, Vol. 30, No. 1, pp. 65-72

Zelenak, M., Foldyna, J., Scucka, J., Hloch, S., Riha, Z., 2015: “Visualisation and measurement of high-speed pulsating and continuous water jets”, Measurement, Vol. 72, pp. 1-8

Copyright © 2017 and published by German Association for Laser Anemometry GALA e.V.,
Karlsruhe, Germany, ISBN 978-3-9816764-3-3