

Kontinuierliche hochpräzise 3D-Oberflächenvermessung von Wasserwellen

Marcus GROßE, Martin SCHAFFER und Silke WEINFURTNER

Zusammenfassung

Die Existenz schwarzer Löcher gilt durch zahlreiche indirekte Beobachtungen als gesichert. Allerdings sind die Eigenschaften schwarzer Löcher, wie beispielsweise die Abgabe von Hawking-Strahlung oder die Abgabe von Drehimpuls schwarzer Löcher der Beobachtung von der Erde aus nicht zugänglich. In analogen Labormodellen, welche starke Analogien zum Verhalten schwarzer Löcher aufweisen, können dennoch Untersuchungen zu Systemeigenschaften durchgeführt werden. In theoretischen und experimentellen Arbeiten konnte das Vorliegen starker Analogien in hydrodynamischen Systemen nachgewiesen werden. Im Kontext derartiger Experimente ist die präzise und schnelle Erfassung der Oberflächenform von Flüssigkeiten notwendig. In unserem Beitrag möchten wir einen Ansatz zur 3D-Vermessung derartiger Oberflächen mithilfe strukturierter Beleuchtung in Verbindung mit stereophotogrammetrischen Aufnahmen der betreffenden Wasseroberfläche vorstellen.

1 Einleitung: schwarze Löcher im Labormodell

1.1 Schwarze Löcher

Schwarze Löcher sind kompakte, massereiche Objekte, deren Gravitationswirkung ab einer bestimmten Entfernung derart groß wird, dass selbst Licht dem Gravitationsfeld nicht mehr entweichen kann. Bereits ein Jahr nach der Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie wurden 1916 von Karl Schwarzschild die Eigenschaften nichtrotierender schwarzer Löcher berechnet. Im Jahr 1963 wurden dann durch Roy Kerr das Verhalten rotierender schwarzer Löcher beschrieben. Durch theoretische Betrachtungen wurde von Stephen Hawking die Existenz einer sogenannten Hawking-Strahlung, welche schwarze Löcher emittieren, festgestellt. Diese lässt sich aufgrund ihrer geringen Intensität von der Erde aus nicht beobachten. Die Existenz schwarzer Löcher kann daher nur über ihren gravitativen Einfluss auf umgebende Materie festgestellt werden. Langzeitbeobachtungen zur Bewegung von Sternen in der Nähe einer starken Röntgenquelle haben den Nachweis erbracht, dass sich im Zentrum der Milchstraße ein schwarzes Loch mit vier Millionen Sonnenmassen befindet. Die Existenz schwarzer Löcher gilt inzwischen in der Fachwelt als gesichert.

1.2 Schwarze Löcher im Labormodell

Auch wenn die Existenz schwarzer Löcher als gesichert gilt, so entziehen sich diese selbst der Beobachtung, da Eigenschaften wie Drehimpulsabgabe und Hawking-Strahlung von der Erde aus nicht beobachtbar sind. Durch die gemeinsame Arbeit mehrerer Forschergruppen der University of British Columbia, the Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati

sowie der University of Nottingham konnte jedoch gezeigt werden, dass sich im Labor physikalische Systeme konzipieren lassen, welche Ähnlichkeiten zu schwarzen Löchern aufweisen (WEINFURTNER et al. 2011), (RICHARTZ et al. 2014). Diese Ähnlichkeit ist derart zu verstehen, dass die mathematische Struktur dieser Laborsysteme der mathematischen Struktur der Beschreibung schwarzer Löcher gleicht. Dieser Sachverhalt wird als Starke Analogie der Systeme bezeichnet. Beispielsweise stellen die Differentialgleichung zur Beschreibung eines gedämpften Pendels und eines gedämpften elektrischen Schwingkreises eine derartige Starke Analogie dar.

Die Forscher konnten zeigen, dass sich spezielle hydrodynamische Systeme als Labormodelle, welche eine Starke Analogie zu schwarzen Löchern aufweisen, eignen. In ersten Experimenten konnten sie das Analogon zur Hawking-Strahlung nachweisen und deren Eigenschaften untersuchen. In Abbildung 1 ist der genutzte Aufbau gezeigt.

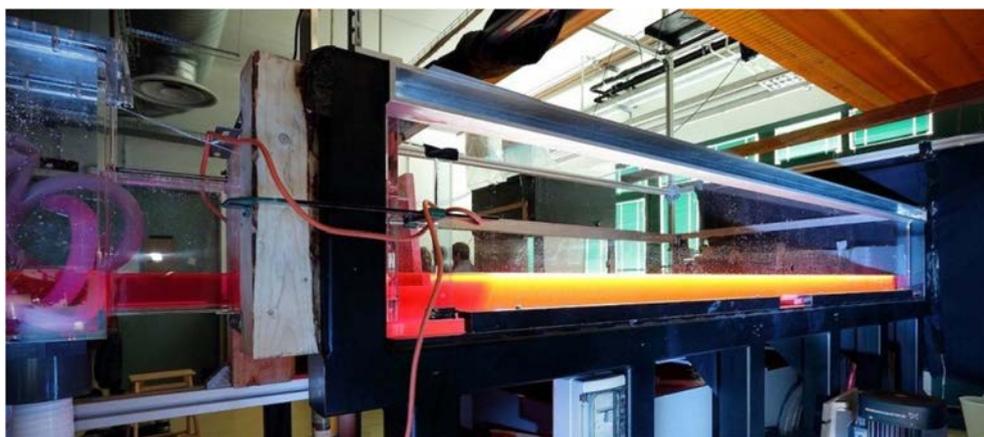


Abb. 1: Hydrodynamisches System zum Nachweis der Hawking-Strahlung

Im oben stehenden Becken werden Oberflächenwellen angeregt und diese durch einen Strudel leicht gestört. Aus der Beobachtung der einlaufenden Oberflächenwellen und deren Beeinflussung durch die eingebrachte Störung können Aussagen über Analoge Hawking-Strahlung abgeleitet werden (WEINFURTNER et al. 2011)

1.3 Anforderungen an ein Messsystem zur Untersuchung der Drehimpulsabgabe schwarzer Löcher

Mit einem neuen Versuchsaufbau sind in Zukunft weitere Untersuchungen am Labormodell geplant. Mittels des neuen hydrodynamischen Systems soll die Frage beantwortet werden, ob die Interaktion schwarzer Löcher mit Ihrer Umgebung zu einer Drehimpulsabgabe dieser führt, und sich damit die Rotationsgeschwindigkeit schwarzer Löcher allmählich verlangsamt. In Abbildung 2 ist ein Bild des hydrodynamischen Systems zu sehen, welches für diese Untersuchungen genutzt werden soll. Es werden wieder in einem Becken Oberflächenwellen angeregt und diese passieren während ihrer Propagation einen Strudel. Durch die Wechselwirkung der einlaufenden Oberflächenwellen mit dem Strudel erhält die auslaufende Welle im Vergleich zur einlaufenden Welle eine höhere Energie. Durch die Vermessung dieser

Oberflächenwellen können aufgrund der starken Analogie zu schwarzen Löchern Rückschlüsse auf die Drehimpulsabgabe schwarzer Löcher gezogen werden.

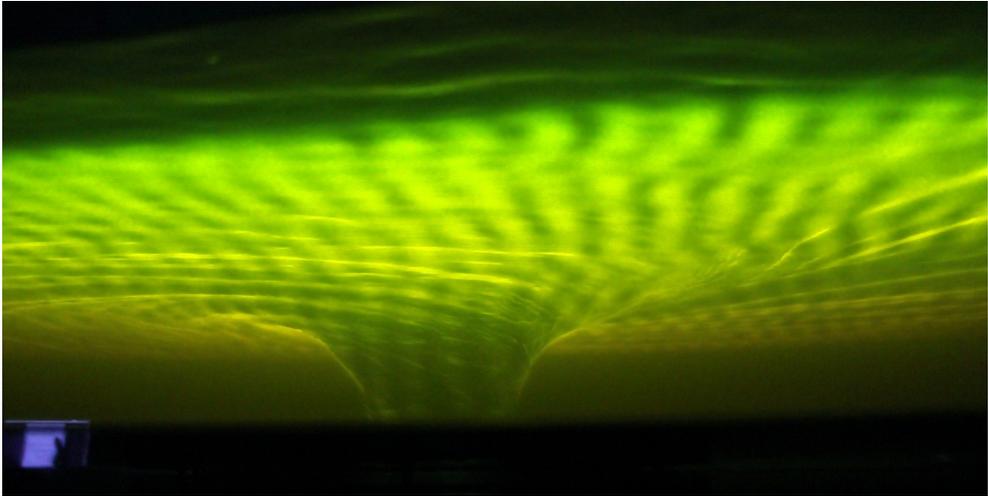


Abb. 2: Hydrodynamisches System zum Nachweis der Drehimpulsabgabe schwarzer Löcher

Die Vermessung der einlaufenden Oberflächenwellen als auch der am Strudel gestörten und gestreuten Welle stellt nun eine zentrale Herausforderung für die erfolgreiche Durchführung des Experimentes dar. Die Wasseroberfläche muss für verschiedenste Wellenlängen (5 cm bis 150 cm), Wellenfrequenzen (2 Hz bis 20 Hz) und Wellenamplituden (0,1 mm bis mehrere Zentimeter) in ihrer Dynamik präzise und mit vielen Messpunkten (lateraler Punktabstand < 5 mm) in einem Messfeld von $1,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$ erfasst werden. Um derart präzise und dichte Messdaten der strukturlosen Wasseroberfläche zu gewinnen, sind photogrammetrische Methoden unter Verwendung strukturierter Beleuchtung notwendig.

2 3D-Vermessung von Wasseroberflächen

2.1 Bekannte Verfahren zur Vermessung von Wasseroberflächen mit optischen Verfahren

Als hoch-transparentes Medium mit teilweiser Reflexion optischer Strahlung an der Oberfläche eignen sich Wasseroberflächen nur schlecht für die Vermessung mit optischen Methoden. In der Literatur wurden schon verschiedene Ansätze vorgestellt, um die optischen Eigenschaften der Oberfläche zu verbessern. In COCHARD et al. (2008) wurden der Wasseroberfläche weiße Farbpigmente zugesetzt, um eine diffuse Streuung des projizierten Streifenmusters zu gewährleisten. Die Wasseroberfläche ist dabei mit einem profilometrischen Ansatz erfasst und die Oberfläche in ihrer zeitlichen Dynamik rekonstruiert worden. In TSUBAKIET et al. (2005) wurden ebenfalls weiße Farbpigmente der Flüssigkeit zugesetzt und

ein einzelnes statistisches Muster zur Strukturierung der Oberfläche auf die Flüssigkeit projiziert. Beide Methoden weisen den Nachteil auf, dass je nach Wellengang zahlreiche spekulare Reflexe an der Oberfläche in Abhängigkeit des Kamerastandortes auftreten und an diesen Stellen keine Oberflächeninformationen gewonnen werden kann.

2.2 Vermessung von Wasseroberflächen unter Verwendung fluoreszierender Stoffe

Eine alternative zur Verwendung von Farbpigmenten stellt die Verwendung von fluoreszierenden Stoffen dar. Der fluoreszierende Farbstoff wird der zu vermessenden Flüssigkeitsoberfläche zugesetzt und kann durch eine angepasste strukturierte Beleuchtung zur Fluoreszenz angeregt werden. Je nach Auswahl des fluoreszierenden Stoffes liegt die Wellenlänge der Fluoreszenz im Wellenlängenbereich der strukturierten Beleuchtung oder in einem langwelligeren Bereich. Im zweiten Fall kann durch kameraseitige Spektralfilter die Wellenlänge der strukturierten Beleuchtung gefiltert und es können Bilder ohne störende spekulare Reflexionen an der Wasseroberfläche gewonnen werden. In Abbildung 3 ist dieser Sachverhalt veranschaulicht.

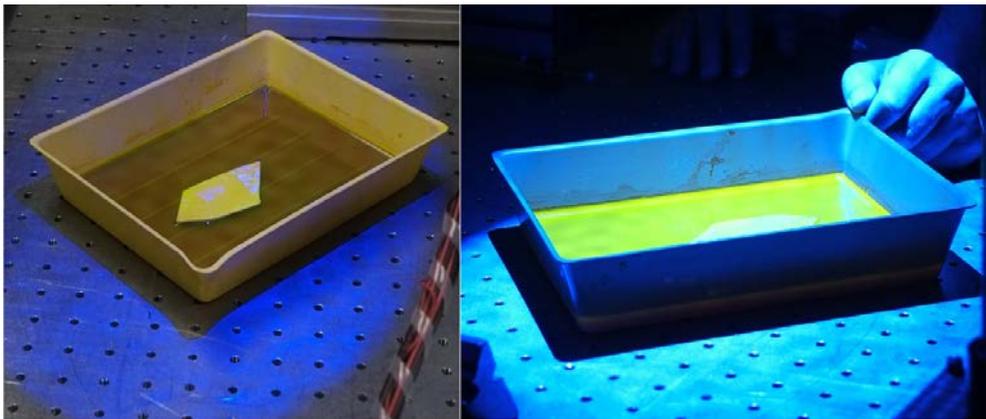


Abb. 3: Aufnahme eines Wasserbeckens mit zugesetztem fluoreszierendem Stoff mit Laborbeleuchtung und strukturierter Beleuchtung (links); nur mit strukturierter Beleuchtung (rechts)

In beiden Bildern ist ein mit Wasser gefülltes Becken zu sehen, welches mit einem fluoreszierenden Stoff versetzt ist. Weiterhin schwimmt auf der Wasseroberfläche ein Kunststoffstück, welches teilweise von der Flüssigkeit benetzt ist. Die Aufnahme des linken Bildes ist bei gleichzeitiger Labor- und strukturierter Beleuchtung aufgenommen worden. Die strukturierte Beleuchtung in blau wird durch die Fluoreszenz im Bereich des Beckens vollständig in langwelligeres grünes Licht umgewandelt und diffus emittiert. Weiterhin ist in diesem Bild der Boden des Beckens zu erkennen, da ein Großteil der Laborbeleuchtung keine Fluoreszenz anregt und ungehindert in das Wasser eindringen und wieder aus dem Wasser zurückkommen kann. Bei der Aufnahme des rechten Bildes ist die Laborbeleuchtung ausgestellt und nur die strukturierte Beleuchtung beleuchtet das Becken. In dieser Konstellation ist der Boden des

Beckens nicht mehr zu sehen, da die strukturierte Beleuchtung vollständig an der Wasseroberfläche absorbiert wird und anschließend durch Fluoreszenz im langwelligeren Bereich diffus emittiert wird. Der am rechten Beckenrand sichtbare Reflex der strukturierten Beleuchtung könnte durch kameraseitige Filter komplett unterdrückt werden, sodass nur das aus der Fluoreszenz resultierende Licht detektiert würde.

3 Realisierung im Labor und erste Ergebnisse

Da erste Voruntersuchungen vielversprechende Ergebnisse lieferten (siehe Tagungsband der Oldenburger 3D-Tage 2015) wurde in den Räumlichkeiten der University of Nottingham ein erster Aufbau zur Vermessung von bewegten Wasseroberflächen unter Verwendung fluoreszierender Stoffe sowie eines EnShape-Sensor aus der Detect-Familie realisiert.

3.1 Aufbau und Versuchsablauf

In Abbildung 4 ist der finale Aufbau dargestellt.

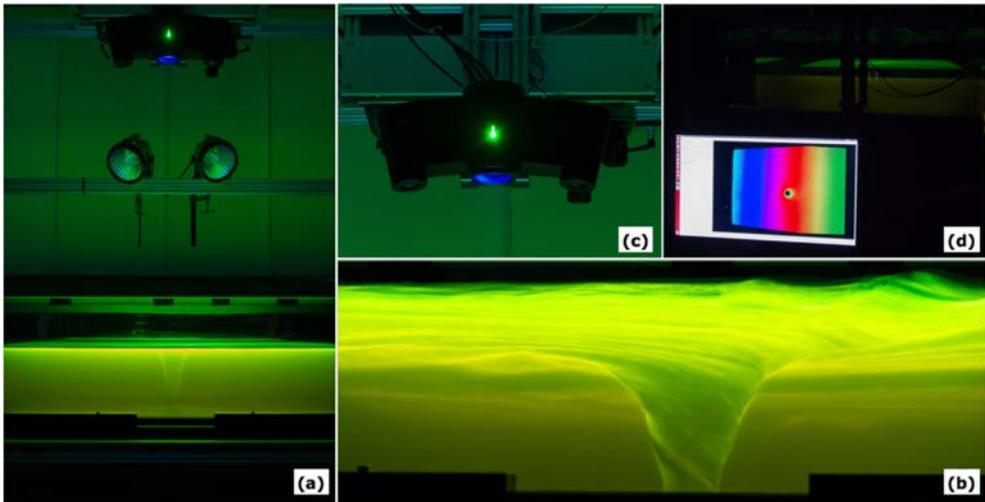


Abb. 4: Ansichten des realisierten Aufbaus: (a) Gesamtaufbau; (b) Nahaufnahme des ausgebildeten Strudels (c) Nahaufnahme 3D-Sensor Detect; (d) Live-Rekonstruktion der erfassten Wasseroberfläche

Der Wassertank hat eine Gesamtgröße von $3,0 \text{ m} \times 1,4 \text{ m}$. Am linken und rechten Rand wird Wasser kontinuierlich ins Becken gepumpt. Dem Wasser wird vorab ein fluoreszierender Farbstoff in einer Konzentration $> 0,2 \text{ g/l}$ zugesetzt. Im zentralen Bereich des Beckens befindet sich eine austauschbare Bodenplatte über deren Form die Eigenschaften des Strudels verändert werden können (Abb. 4b). Über die Öffnung der Bodenplatte fließt Wasser kontinuierlich in ein unteres Becken aus welchem dieses wieder nach oben gepumpt wird. Zentral über der Bodenplatte ist der Detect-Sensor mit einem Messfeld von $1,4 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}$ angebracht (siehe Abb. 4a). Sobald sich ein stationärer Zustand im Becken ausgebildet hat, können über

einen Wellengenerator am Rand des Beckens definiert Oberflächenwellen erzeugt werden, welche dann auf den Strudel einlaufen und von diesem gestreut werden.

Für die experimentellen Messungen erfasst der Detect-Sensor über einen Zeitraum von bis zu 5 Minuten kontinuierlich mit bis zu 31,25 Hz die Form der Wasseroberfläche (300.000 3D-Messpunkte pro Messung). Die Zeitauflösung bei der Erfassung der Oberfläche zwischen zwei Messungen beträgt also ca. 32 ms. Im Anschluss an die Messung erfolgt die Auswertung der 3D-Daten. Die 3D-Daten dienen den Forschern der Universität Nottingham als Rohdatengrundlage für die nachfolgende Analyse bzgl. der Entwicklung von Wellenamplituden und Wellenzahlen im Beobachtungszeitraum.

3.2 Erste experimentelle Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt das System während eines der ersten Versuche. Im linken Bild ist das grüne fluoreszierende Licht, welches von der Wasseroberfläche kommt, zu sehen. Weiterhin sind spekulare Reflexe der blauen strukturierten Beleuchtung zu erkennen. Im rechten Bild ist eine Live-Rekonstruktion der 3D-Wasseroberfläche zu sehen.

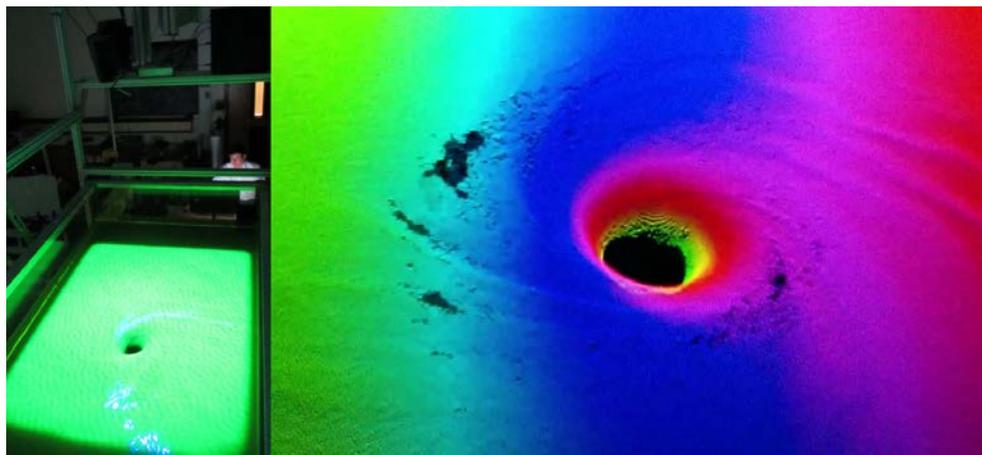


Abb. 5: Messung der Wasseroberfläche während eines Versuchs: Foto Aufbau (links); Rekonstruktion der Wasseroberfläche (rechts)

Da bei diesem ersten Versuch die spektralen Anteile der strukturierten Beleuchtung noch nicht herausgefiltert worden sind, konnten in der Nähe des Strudels Oberflächenbereiche nicht rekonstruiert werden. Dies entspricht in etwa der Rekonstruktionsqualität, welche unter Verwendung von Farbpigmenten zu erwarten wäre.

In einem nächsten Schritt wurden sensorseitig die spektralen Anteile der strukturierten Beleuchtung herausgefiltert, um nur die Wellenlänge des fluoreszierenden Lichtes zu detektieren. Dadurch lässt sich auch in Bereichen mit stärkerem Wellengang, insbesondere in der Umgebung des Strudels, die Wellenoberfläche ohne Fehlstellen robust rekonstruieren. In Abbildung 6 sind entsprechende 3D-Rekonstruktionen einer zeitlichen Abfolge von Oberflächenzuständen zu sehen. In diesem Versuch wurden nach Erreichen eines stationären Zustandes Oberflächenwellen angeregt, welche im Bild von unten auf den Strudel laufen. Durch die

Wechselwirkung mit dem Strudel werden die angeregten Wellen gestreut und in ihrer Struktur verändert. Aus den Veränderungen lassen sich Rückschlüsse über die Interaktion der Oberflächenwellen mit dem Strudel ziehen. Hierzu werden aus den räumlich- und zeitlich hoch aufgelösten 3D-Daten über eine Fourieranalyse Wellenamplituden und Wellenzahlen ermittelt.

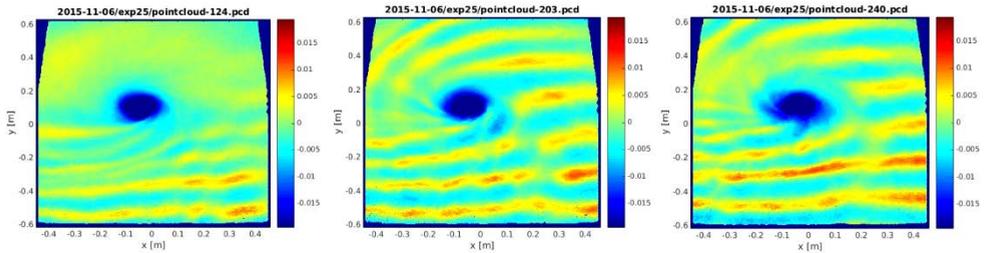


Abb. 6: Ergebnisse der Wasseroberflächenvermessung zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten eines Versuches

In den bisher durchgeführten Versuchen wurden Untersuchungen zur notwendigen Konzentration des genutzten Fluoreszenzstoffes durchgeführt, wobei bereits ab Konzentrationen von 0,2 g/l eine gute Rekonstruktion der Oberfläche möglich war. Weiterhin wurde untersucht, welche Wellenamplitude mit dem realisierten Aufbau noch nachweisbar ist. Hierbei wurde für die mit dem System detektierbaren Wellenlängen über die Fourieranalyse gezeigt, dass sich Wellenamplituden bis 200 Mikrometer nachweisen lassen.

In den nächsten Schritten planen die Forscher der Universität Nottingham systematische Untersuchungen zu den Eigenschaften der genutzten Fluoreszenzstoffe. Unter anderem sollen hier Effekte wie Eindringtiefe, Lichteffizienz und Konzentrationsabhängigkeit untersucht werden. Weiterhin sollen vergleichende Untersuchungen zur Erfassung von Wasseroberflächen mit anderen Vermessungsansätzen durchgeführt und gegenübergestellt werden. Ebenfalls interessant für die geplanten Untersuchungen ist die simultane vollflächige 3D-Erfassung der Wasseroberfläche in Kombination mit Probekörpern und Tracern. Hierüber wären neben Aussagen zum Strömungsverlauf auch gleichzeitig Informationen über das Verhalten im Volumen des Wassers ableitbar.

4 Zusammenfassung

Die Eigenschaften schwarzer Löcher lassen sich anhand von physikalischen Systemen aufgrund des Vorliegens starker Analogien untersuchen. Hierbei bieten sich hydrodynamische Systeme an, wobei für spezielle Fragestellungen die Oberfläche von Flüssigkeiten dicht und präzise erfasst werden muss. In unserem Beitrag haben wir einen Ansatz vorgestellt, welcher die präzise und dichte Vermessung von bewegten Wasseroberflächen ermöglicht. Nach vielversprechenden Voruntersuchungen in kleinem Maßstab wurde ein EnShape-Sensor aus der Detect-Familie im Labor der Universität Nottingham installiert. Bei einem Messfeld von $1,4 \text{ m} \times 1,1 \text{ m}$ können Wellenamplituden im Bereich von hinunter zu 200 Mikrometern nach-

gewiesen werden. Anwendungen des vorgestellten Ansatzes sind nicht nur bei der 3D-Oberflächenerfassung sich bewegender Flüssigkeiten nutzbar. Vorstellbar ist auch, die Untersuchung von thermischen bzw. dynamischen Prozesse bei Gelen, welchen bei der Herstellung ein fluoreszierender Farbstoff beigemischt worden ist.

Literatur

- Cochard, S. et al. (2008): *Tracking the free surface of time-dependent flows: image processing for the dam-break problem*. Experiments in Fluids, 44, S. 59-71.
- Richartz et al. (2014): *Rotating black holes in a draining bathtub: superradiant scattering of gravity waves*. ArXiv, 1411.1662.
- Tsubaki et al. (2008): *Stereoscopic measurement of a fluctuating free surface with discontinuities*. Measurement Science and Technology, 16, S. 1894-1902.
- Weinfurtner et al. (2011): *Measurement of stimulated Hawking emission in an analogue system*. Phys. Rev. Lett., 106, S. 021302.