
Strömungsmechanische, biomechanische und trainingswissenschaftliche Untersuchung der Spritzerbildung beim Eintauchvorgang im Wasserspringen

V. Zschorlich¹, M. Lames¹, A. Leder²

Universität Rostock

¹Institut für Sportwissenschaft,

²Institut für Maritime Systeme und Strömungstechnik

1 Einleitung

Das Forschungsprojekt „Eintauchtechnik“¹ an der Universität Rostock beschäftigt sich mit dem Problem der Spritzerbildung beim Wasserspringen aus einer interdisziplinären Perspektive. Ein strömungsdynamisch orientiertes Teilprojekt untersucht am Institut für Strömungstechnik (Leder und Mitarbeiter) Druck- und Geschwindigkeitsverhältnisse am Modell eines untergetauchten Wasserspringers, um insbesondere der Frage der Spritzerbildung durch Kavitationsphänomene („Spontane“ Blasenbildung durch Unterschreiten des Dampfdruckes) nachzugehen. Hier kann am Modell der Einfluss von Eintauchgeschwindigkeit und Eintauchtechnik (z.B. Durchtauchen oder Abrollen) auf die Form der Spritzerbildung studiert werden.

Ein biomechanisch orientiertes Teilprojekt (Zschorlich, Bartels und Hintz) untersucht die Unterwasserkinematik, um Aufschlüsse über die Tauchbewegung und die Spritzerbildung herzustellen. Die biomechanische Analyse des Eintauchverhaltens bezieht sich in diesem Projekt auf die rückwärts drehenden Sprünge. Ziel der Untersuchung ist die Aufklärung der Spritzerbildung durch bewegungsanalytische Verfahren. Dabei ist von besonderer Bedeutung, typische Bewegungsmerkmale der spezifischen Dynamik der Spritzerbildung zuzuordnen. Die besondere Schwierigkeit in der Analyse dieser Vorgänge liegt in der Geschwindigkeit des Bewegungsablaufes im Eintauchvorgang und in der Kürze der Entstehungszeit der Spritzerentwicklung.

Ein trainingswissenschaftlich ausgerichtetes Teilprojekt (Lames und Wolle) soll eine Aufklärung der Wettkampfleistung im Wasserspringen vornehmen, um die Relevanz der Spritzerbildung für die Leistung im Wasserspringen abzuschätzen. Darüber hinaus soll auch die praktische Zielstellung verfolgt werden, Trainern Hinweise auf Merkmale der Spritzerbildung zu geben, die einen besonders hohen Einfluss auf die Bewertung haben.

¹ BISp-Projektnummern VF 0408/05/01/2001-2002

2 Strömungsdynamische Untersuchungen

Im Forschungsvorhaben sollten Ursachen zur Gasblasenbildung unter Wasser untersucht werden. Insbesondere soll die Frage geklärt werden, ob bei einem rückwärts drehenden Sprung eventuell auftretende Ablösegebiete in Abhängigkeit von der Körperhaltung des Springers lokalisiert werden können. Die Untersuchungen sollen die bereits an einem vorwärts drehenden Sprung durchgeführten Messungen ergänzen, wo in Bewegungsphase 2 (Körper im Wasser) im Bauchbereich eine ausgeprägte Rezirkulationsströmung detektiert werden konnte (1).

Bei höheren Eintauchgeschwindigkeiten können unter Wasser Gasblasen auch durch Kavitation entstehen. Unter Kavitation wird die Hohlräumbildung im Wasser durch Unterschreitung des Dampfdruckes verstanden. Das Auftreten von Kavitation ist an das lokale Druck- bzw. Geschwindigkeitsfeld gebunden. Weitere Faktoren sind die Wassertemperatur sowie das Vorhandensein von Kavitationskeimen (Gasblasen, Schmutzpartikel) im Wasser. Abgeschlossene Untersuchungen zum Kavitationsverhalten zeigten, dass bereits bei einem Sprung vom 3-m-Brett mit Kavitationserscheinungen zu rechnen ist (1, 2).

Das Eintauchen ist ein instationärer Vorgang. Innerhalb weniger Sekundenbruchteile nach dem Aufprall auf die Wasseroberfläche wird der Körper durch den Strömungswiderstand vollständig abgebremst. Der vorliegende instationäre Zustand wird im Experiment in quasistationäre Zustände überführt. Es werden verschiedene Bewegungsphasen eines Sprunges der Eintauchtechnik „Einrollen“ (rückwärts) analysiert. Die Experimente erfolgen an einem verkleinerten Modell (Maßstab 1:5).

Das Ausführen der Rollbewegung unter Wasser dauert nur wenige Zehntelsekunden. Dabei werden die Arme in einem seitlichen „Schwimmzug“ vom Kopf an den Körper herangeführt. Der Bewegungsablauf wurde im Rahmen dieser Studie in folgende zwei Phasen unterteilt:

Phase 1: Die Eintauchphase, in der die Körperhaltung gestreckt ist, der Körper ist bis zur Hüfte eingetaucht (ca. 0,10s nach Auftreffen der Hände auf Wasseroberfläche).

Phase 2: Die Unterwasserphase, in der der Körper schwach gekrümmt ist, er befindet sich erstmalig vollständig im Wasser (0,22s nach Auftreffen der Hände auf die Wasseroberfläche).

Zur Ermittlung der sich um den Körper ausbildenden Strömungsstrukturen, insbesondere zur Ermittlung der Lage und Größe der Ablösegebiete, wurde die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) eingesetzt. Die Messergebnisse wurden in Abhängigkeit von der Körperhaltung interpretiert und Rückschlüsse auf den Bewegungsablauf gezogen.

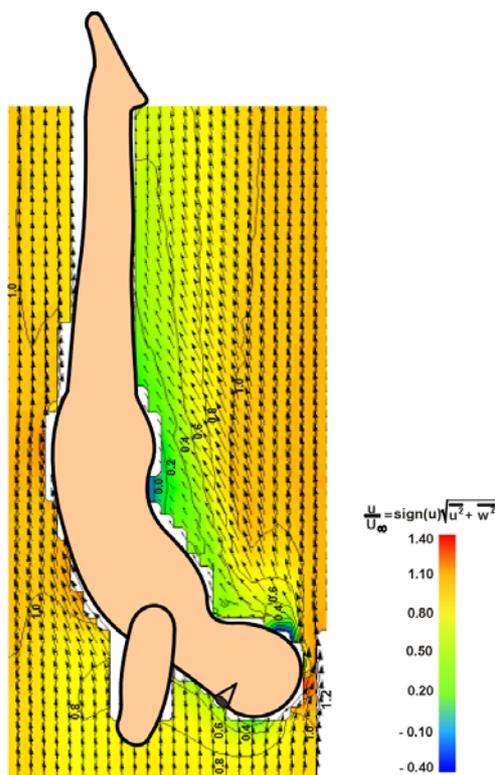


Abb. 1: Bewegungsphase 2: Ansätze von Strömungsablösungen im Hinterkopf- und Lendenbereich

In Ablösegebieten bilden sich Rezirkulationsströmungen aus. Die Rezirkulation des Fluids kann verantwortlich sein für die Ansammlung der Luftblasen. Beim senkrechten Eintauchen ($\alpha = 0^\circ$), treten erwartungsgemäß keine Ablösegebiete mit nennenswerter Rückströmung auf. Diese Aussage kann auch für einen leicht unterdrehten Sprung ($\alpha = +6^\circ$) und einen leicht überdrehten Sprung ($\alpha = -6^\circ$) getroffen werden: In den drei untersuchten Strömungsfeldern treten keine negativen Strömungsgeschwindigkeiten auf.

In Bewegungsphase 2 können die Ansätze von zwei Ablösegebieten ermittelt werden: Im Hinterkopfbereich und im Lendenbereich des Springers lassen sich Rückströmungen ermitteln (siehe Abb. 1).

Die Ergebnisse der Laser-Doppler-Untersuchungen verdeutlichen, dass bei der Sprungtechnik „rückwärts Einrollen“

1. in der Bewegungsphase 1 keine Ablösezonen am Körper des Sportlers auftreten; dies gilt auch für eine Winkelabweichung der Körperachse von -6° bis $+6^\circ$;
2. in der Bewegungsphase 2 im Kopfbereich und Lendenbereich Ansätze von Rezirkulationsströmungen entstehen, die zu einem Gefährdungspotenzial für Sekundärspritzer beitragen können.

3 Biomechanische Untersuchung

Ziel der biomechanischen Untersuchung ist die Aufklärung der Spritzerbildung durch bewegungsanalytische Verfahren. Dabei ist von besonderer Bedeutung, der spezifischen Dynamik der Spritzerbildung typische Bewegungsmerkmale zuzuordnen. Die besondere Schwierigkeit in der Analyse dieser Vorgänge liegt in der Geschwindigkeit des Bewegungsablaufes im Eintauchvorgang und in der Kürze der Entstehungszeit der Spritzerentwicklung.

Methodisch wurde das folgende Vorgehen gewählt: Der Bewegungsablauf wird im Bereich des Eintauchvorganges mit Hilfe dreier digitaler Videokameras und zweier digitaler Hochgeschwindigkeitskameras (Kodak) erfasst. Die Hochgeschwindigkeitskameras sind elektronisch synchronisiert und erfassen den Bewegungsablauf unter Wasser in Abhängigkeit von den Lichtverhältnissen mit bis zu 250 Aufnahmen pro Sekunde. Diese Aufnahmefrequenz ist ausreichend, um die wesentlichsten Vorgänge bei der Entstehung der Gasblasen zu erfassen.

Um die Repräsentation der Abläufe über optische Verfahren zu gewährleisten, wurden Unterwasser-Schalldruckmessungen mit einem speziellen Hydrofon (Bruel&Kjaer) durchgeführt. Hier hat sich gezeigt, dass die größten Signalleistungen (Primärspritzer) im Bereich um 200 Hz liegen. Damit sind alle bedeutsamen Phänomene der Sekundärspritzerbildung durch die optische Abtastung hinreichend zu erfassen und zu bewerten.

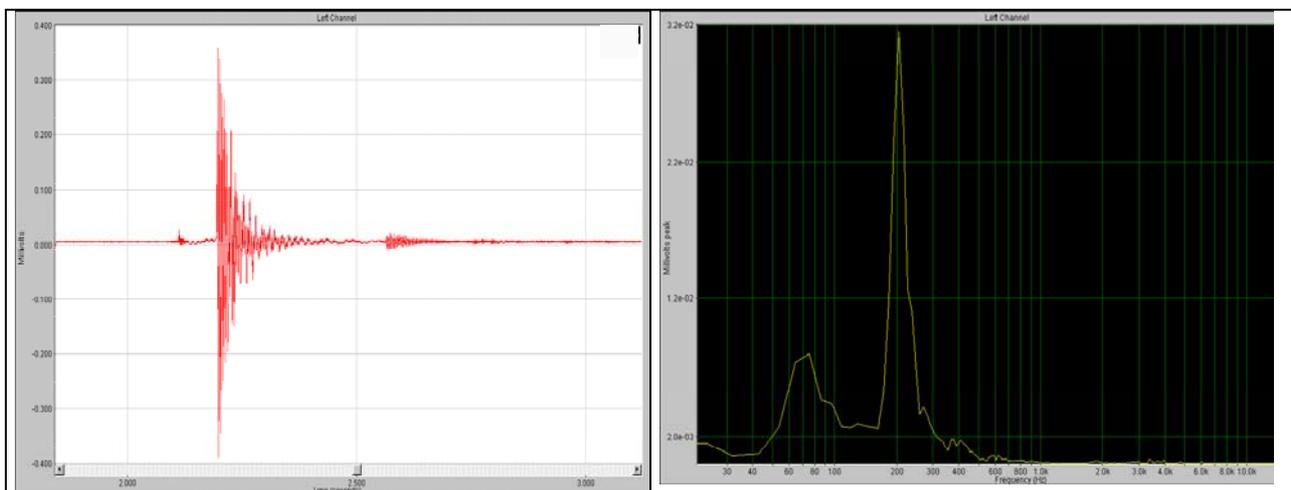


Abb. 2: Verlauf des Unterwasser-Schalldruckes mit Primär- und Sekundärspritzeranteil (links) und dem zugehörigen Leistungsspektrum (rechts).

Die Schalldruckmessung zeigt einen typischen transienten Signalverlauf, der mit der Berührung der Wasseroberfläche eine kurze Druckwelle mit großer Signalleistung erzeugt. Dieser Vorgang löst die sogenannten Primärspritzer zu Beginn der Eintauchphase aus.

Diese Primärspritzerbildung ist praktisch unvermeidlich und im Bereich des Hochleistungssports bei gelungenen Sprüngen mit einer wenig differenzierenden Beurteilung verbunden.

Anders verhält es sich bei der Bewertung der darauf folgenden Sekundärspritzerbildung. Hier sind deutliche Unterscheidungsmerkmale offensichtlich, die nach den Erkenntnissen aus dem trainingswissenschaftlichen Teilprojekt einen erheblichen Einfluss auf die Bewertung des Bewegungsablaufes durch die Kampfrichter haben.

Für die Sportpraxis stellt sich die Frage, wie muss der Eintauchvorgang im Bewegungsablauf gestaltet werden, um eine möglichst geringe Spritzerbildung zu entwickeln. Dazu ist es notwendig, den Vorgang der Spritzerbildung in seiner Entstehung und in seiner Wirkungsweise aufzuklären. Neben den strömungsmechanischen Untersuchungen am Modell werden die Vorgänge auch beim Wasserspringen mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskameras untersucht.

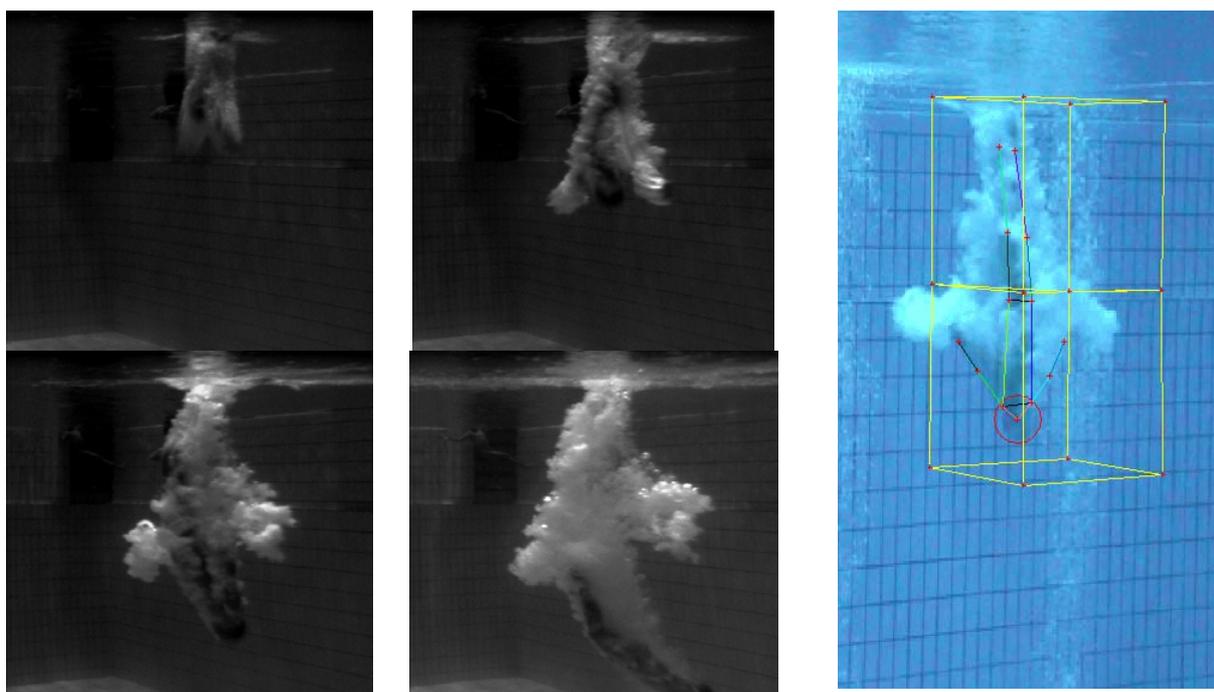


Abb. 3: Eintauchphase mit der Durchdringung der Wasseroberfläche (links oben) und der folgenden Bewegungsphase mit dem Ziel der Reduktion des Sekundärspritzers. Gleitphase des Springers nach vollständiger Durchdringung der Wasseroberfläche mit der Eintauchtechnik „Durchtauchen“ (links). Kinematische Erfassung des Bewegungsablaufes mit eingeblendetem Kalibrierwürfel (rechts).

Es ließ sich zeigen, dass der Vorgang der Sekundärspritzerbildung von verschiedenen Merkmalen des Bewegungsablaufes abhängig ist. Zunächst wird während des Eintauchgeschehens bei der Durchdringung der Wasseroberfläche mit dem eintauchenden Körper

ein Gasblasenschlauch mit in die Tiefe gezogen. Dies geschieht zunächst dadurch, dass der ins Wasser eindringende Springer mit großer Geschwindigkeit das Wasser verdrängt und unter Wasser eine erhebliche Druckwelle erzeugt, die sich auch durch die Schalldruckmessung nachweisen lässt. Ist der Springer vollständig im Wasser eingetaucht, nach etwa 200 msec, versuchen die verdrängten Wassermassen von unten her in den durch die Gasblase gebildeten Schlauch einzudringen. Da der Vorgang der kollabierenden Gasblase sich von unten nach oben fortsetzt, wird eine große Menge Wasser in Richtung Wasseroberfläche beschleunigt und wie aus einem Lauf ausgeworfen. In der Untersuchung ist deutlich geworden, dass der Bewegungsablauf des Springers unter Wasser den Vorgang des Gasblasenkollapses stark beeinflussen kann.

4 Trainingswissenschaftliche Untersuchung

In der trainingswissenschaftlichen Studie wird untersucht, ob ein Zusammenhang zwischen der Kampfrichterwertung und dem Aufspritzvorgang beim Eintauchen existiert. Da der Schwierigkeitsgrad deterministisch in die Bewertung einfließt, wurde er eliminiert und nur die bereinigte Kampfrichterwertung zur Analyse verwendet. In Tabelle 1 werden jeder Merkmalsstufe die Mittelwerte der Beurteilungen sowie deren Standardabweichung zugeordnet. Die Signifikanzprüfung erfolgte durch eine einfache Varianzanalyse.

Von besonderem Interesse ist der η^2 -Wert, der aussagt, welcher Anteil der Varianz im Kriterium, d.h. der schwierigkeitsbereinigten Bewertung, auf das jeweilige Beobachtungsmerkmal zurückzuführen ist. Ein η^2 -Wert von 0.29 bedeutet z.B., dass 29 % der Unterschiede in der Bewertung auf die Ausprägung des Merkmals Höhe der Primärspritzer zurückzuführen sind.

Die beobachteten Merkmale weisen einen hohen bis sehr hohen Zusammenhang mit der Bewertung auf. Die Unterschiede in der Bewertung zwischen den einzelnen Stufen der Merkmale sind alle hoch signifikant (Ausnahme: Form Primärspritzer, signifikant).

Den größten Einfluss auf die Bewertung weist das Volumen der Sekundärspritzer auf, das mit 60% gemeinsamer Varianz das Urteil stark determiniert. Für Primär- und Sekundärspritzer gilt, dass das Volumen vor der Höhe vor der Form die Bewertung beeinflusst. Insgesamt gilt, dass die Sekundärspritzer die Bewertung stärker beeinflussen als die Primärspritzer. Damit ist gezeigt, dass die erhobenen Merkmale der Spritzerbildung einen überaus bedeutsamen Zusammenhang mit der Bewertung aufweisen.

Tab. 1 Varianzanalytisch bestimmter Einfluss der Beobachtungsmerkmale auf die Bewertung

Merkmal	Stufen	Mittelwert	Std.-Abw.	F-Wert	P	η^2
Primär- Form	Krone	50,399	***	5,900	0,016	.02
	Sessel	48,188				
Primär- Höhe	Sehr niedrig	54,290	***	40,520	<0.001	.29
	Niedrig	51,039				
	Hoch	46,412				
	Sehr hoch	39,022				
Primär- Volumen	Sehr gering	54,516	***	64,808	<0.001	.39
	Gering	51,496				
	Groß	46,444				
	Sehr groß	38,210				
Sekundär- Form	Busch	52,382	***	50,564	0,016	.14
	Wolke	46,753				
Sekundär- Höhe	Sehr niedrig	56,717	***	64,516	<0.001	.39
	Niedrig	51,606				
	Hoch	46,645				
	Sehr hoch	41,327				
Sekundär- Volumen	Sehr gering	56,980	***	152,419	<0.001	.60
	Gering	51,500				
	Groß	47,051				
	Sehr groß	39,792				

Das entwickelte Beobachtungssystem zur Bewertung der Spritzerbildung im Wasserspringen erfasst inhaltlich die wesentlichen Aspekte des Spritzeraufwurfs. Es gelingt nicht, eine zufriedenstellende Höhe der intersubjektiven Übereinstimmung zu erzielen. Dies ist wohl auf die Schwierigkeit zurückzuführen, eine solide Verankerung der Merkmalsstufen zu finden (z.B. Höhe: sehr niedrig, niedrig, hoch, sehr hoch), da es sich eigentlich um ein quantitatives Kontinuum handelt, das durch die Merkmalsstufen nur künstlich strukturiert wird. Überzeugend ist jedoch die intrasubjektive Übereinstimmung, die besagt, dass die subjektiven Beurteilungsmaßstäbe durchaus stabil bleiben. Dieses Resultat ist besonders für die praktische Verwendbarkeit des Beobachtungssystems von Bedeutung. Resultativ zeigen die erzielten Eta-Werte univariat bereits Gemeinsamkeiten bis zu 60% zwischen den Merkmalen der Spritzerbildung und der schwierigkeitsgradbereinigten Wettkampfleistung (Bewertungsanteil). Der gesamte Anteil der Spritzerbildung dürfte noch wesentlich höher liegen, da die Merkmale zwar einen starken, aber keinen vollständigen Zusammenhang aufweisen. Bemerkenswert ist weiter, dass besonders Merkmale der Sekundär-

spritzer in die Bewertung eingehen, was mit dem recency-Effekt erklärbar ist und eine orientierende Aussage für die Trainingspraxis darstellt.

5 Literatur

- (1) LEDER, A.; LAMES, M.: Hydrodynamische Untersuchungen zum Eintauchen im Turm- und Kunstspringen. Abschlussbericht (30.06.2001).
- (2) KLEINAU, D.; KLEIST, H.; LAMES, M.; LEDER, A.; MASIP, J.; POKRIEFKE, G.: Strömungstechnische Untersuchungen zu Eintauchvorgängen im Wasserspringen. In: DELGADO, A.; WERNER, F.; RUCK, B.; LEDER, A.; DOPHEIDE, D. (Hrsg.): „Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik“-8. Fachtagung der GALA e.V. 2000. Aachen 2000, 36.1-36.7.
- (3) LEDER, A.: Abgelöste Strömungen – Physikalische Grundlagen. Braunschweig 1992.
- (4) BROWN, J.G.; ABRAHAM, L.D.; BERTIN, J.J.: Descriptive Analysis of the Rip Entry in Competitive Diving. Res. Quart. Exerc. and Sport 55 (1984) 2, 93-102.