

PDA-Messungen von Wasserzerstäubung an einer Schaufelkante in der Luftströmung

Zh. Zhang

Kraftwerke Oberhasli AG
CH-3862 Innertkirchen, Schweiz
zha@kwo.ch

K.C. Heiniger,

FH Aargau, Labor für Thermo- und Fluidengineering (LTFE)
CH-5210 Windisch, Schweiz

1. Einleitung

Zweiphasenströmungen aus Gas und Wasser begegnet man oft in speziellen Industrieanwendungen, wo z.B. heisse Luft durch die Eindüsung vom kalten Wasser abgekühlt wird. Infolge Tropfenträgheit in gekrümmten Strömungsfeldern oder aufgrund ungünstiger Strömungsverhältnisse sowie durch thermodynamische Prozesse (z.B. Kondensation) kann sich Wasser an den Schaufeloberflächen (v.a. auf den Schaufeldruckseiten) niederschlagen, wo es angetrieben durch die Aussenströmung in einem Film zur Schaufelhinterkante transportiert wird. An der Hinterkante akkumuliert immer mehr Wasser, bis es unter der Scherwirkung der Gitterströmung wieder in grossen Tropfen abgerissen und schliesslich im Strömungsfeld zerstäubt wird. Abb. 1 zeigt schematisch den Vorgang an einer Schaufelhinterkante in einer Gasströmung.

Aus verschiedenen technischen Aspekten ist die Wasserzerstäubung nach Abb. 1 zu quantifizieren. Es ist z.B. von Bedeutung, von welchen Parametern dieser Zerstäubungsprozess in einer gegebenen Gasströmung abhängt. Um dies zu erzielen, wurden PDA-Messungen (Phase Doppler Anemometrie) am Labor für Thermo- und Fluidengineering der Fachhochschule Aargau durchgeführt.

Die Güte der Zerstäubung nach Abb. 1 ist unter anderem von den Strömungsbedingungen im Turbinengitter abhängig. Bei genügend hohen Gasgeschwindigkeiten wird das an der Schaufelhinterkante akkumulierte Wasser von der Gasströmung in einzelnen Paketen abgeris-

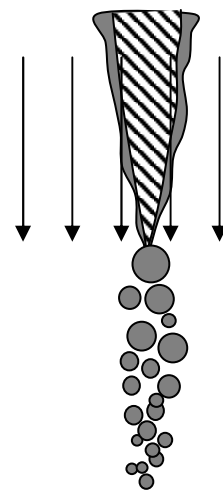


Abb. 1: Zerstäubung des Wassers an einer Schaufelkante

sen und schliesslich durch die existierende Schergeschwindigkeit zwischen Gas- und Tropfenströmung beschleunigt und zerstäubt. Die Beschleunigung der Wassertropfen hängt wesentlich von der Tropfengrösse ab. Es ist daher zu erwarten, dass an einer bestimmten Stelle im Nachlauf der Schaufelhinterkante die Geschwindigkeit der Wassertropfen mit deren Grösse korrelieren muss. In guter Näherung kann eine derartige Korrelation auch aus dem Stokes'schen Widerstandsgesetz für Kugeln abgeschätzt werden, wenn die Tropfengrössen bekannt sind und die Reynoldszahl im entsprechenden Bereich liegt.

2. Experimentelle Aufbau und Messsystem

Die PDA-Messungen wurden in einem offenen Turbinen-Gitterwindkanal durchgeführt. Die begrenzenden Kanalwände wurden dabei als Druck- bzw. Saugseiten ausgeführt. Zylindrische Schaufeln mit unterschiedlichen Hinterkanten wurden senkrecht am Austritt des Kanals angeordnet (Abb.2). Die Eindüsung des Wassers erfolgte vor der Turbinenschaufel im Windkanal (Partikelgrössen $<30\mu\text{m}$). Eine Luftströmung wurde auf folgende Grössen festgelegt:

- Luftaustrittsgeschwindigkeit: $u_l = 60 \text{ m/s}$
- Lufttemperatur: $T = 20^\circ\text{C}$

An der Schaufelhinterkante werden ungleichmässig grosse Wasserpakete (grosse Tropfen) abgerissen. Die initiale Schergeschwindigkeit zwischen diesen Flüssigkeitspaketen und der Luftströmung ist so gross, dass sie dabei zerkleinert und schliesslich je nach Randbedingung zerstäubt werden. Mit dem Zerfall der Wassertropfen und deren Beschleunigung verringert sich aber auch die Schergeschwindigkeit, so dass schnell ein Zustand von stabilen Wassertropfengrössen im Strömungsfeld erreicht wird. Das Kriterium für den stabilen Zustand der Wassertropfen ist die kritische Weber-Zahl, die folgendermassen definiert ist [1]:

$$We_{kr} = \frac{\rho_L (u_l - u_w)^2 D_{\max}}{\sigma} = 1.18 \quad (1)$$

Die Oberflächenspannung von Wasser beträgt $\sigma_w = 0.073 \text{ N/m}$.

Für eine Schergeschwindigkeit von 60 m/s beträgt der maximale Tropfendurchmesser $210 \mu\text{m}$ (für $u = 50 \text{ m/s}$ beträgt $D_{\max} = 300 \mu\text{m}$).

Das angewandte PDA-System war ein Planar-PDA System vom Dantec-Dynamics. Das Messvolumen des PDA-Systems wurde im Nachlauf der Schaufelhinterkante positioniert.

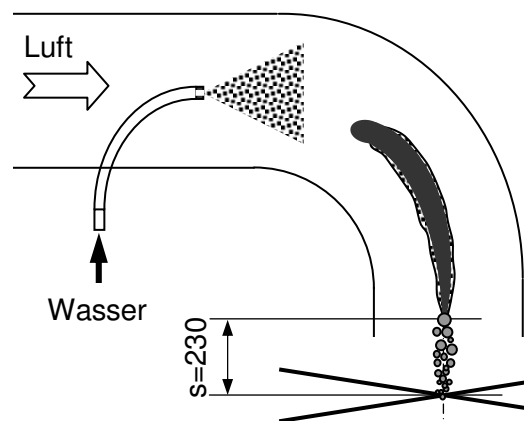


Abb. 2: Windkanal und PDA-Anordnung

3. Messergebnisse und Vergleich mit Berechnungen

Abb.3 zeigt das Histogramm von gemessenen Wassertropfen an der Messstelle im Nachlauf der Schaufelhinterkante. Die Gesamtanzahl der Wassertropfen, die grösser als $60\ \mu\text{m}$ sind, ist am rechten Rand des Diagrammes dargestellt. Aus der Darstellung ist zu sehen, dass die Zerstäubung des Wassers an dieser Stelle bereits weitgehend abgeschlossen war.

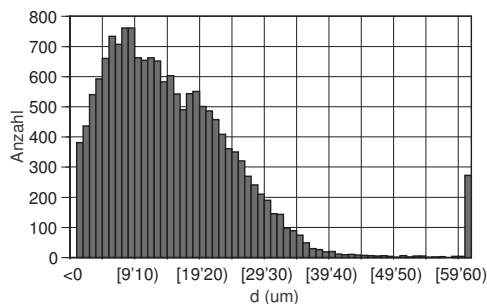


Abb.3: Histogramm der PDA-Messungen

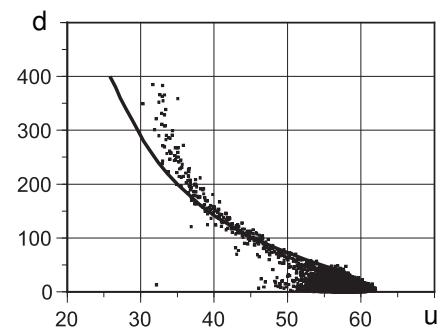


Abb. 4: Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Grösse von Wassertropfen im Nachlauf einer Schaufel.

Durch den Zerstäubungsmechanismus werden die Tropfen während bzw. nach der Zerstäubung weiter beschleunigt. Die Beschleunigung der Wassertropfen hängt in erster Linie von der initialen Tropfengrösse ab, so dass an der Messstelle unterschiedliche Geschwindigkeiten vorliegen müssen. Abb. 4 zeigt die gemessene Korrelation zwischen Geschwindigkeiten und Wassertropfengrößen. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass die grossen Tropfen weniger beschleunigt sind als die kleinen.

Die klar vorhandene Korrelation zwischen Geschwindigkeiten und Wassertropfengrößen deutet darauf hin, dass die PDA-Messungen im vorliegenden Fall hinreichend genau waren. Aus uns bekannten Kenntnissen konnte in bisherigen PDA-Anwendungen noch keine derartig klare Korrelation gezeigt werden. Ein Messaufbau nach Abb. 2 zur Erzeugung von Wassertropfen und deren Messungen könnte daher allgemein zur Validierung des PDA-Verfahrens verwendet werden. Zu diesem Zweck ist die direkte Eindüsung von Wassers vor der Schaufeleintrittskante einfach möglich.

Die Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Wassertropfengrößen kann auch durch einfache Berechnungen abgeschätzt werden. Hierzu wurde angenommen, dass das Abreissen von Wassertropfen an der Schaufelhinterkante geschieht (dort herrscht maximale Geschwindigkeitsdifferenz) und kurz dahinter abgeschlossen war. Zu Beginn der Beschleunigung wird die Tropfengeschwindigkeit als Null angenommen. Der Einfachheit halber wird weiter angenommen, dass die Tropfen auf der Strecke zwischen Schaufelhinterkante und Messstelle nur infolge der Schergeschwindigkeit und somit nur durch die Reibungskräfte beschleunigt werden.

Bei Betrachtung der Beschleunigung eines Wassertropfens (Index w) ist deren Relativgeschwindigkeit zur Luftströmung (Index l) zu berücksichtigen. Die Bewegungsgleichung des Tropfens (Durchmesser d) ist dann gegeben durch

$$\frac{1}{6} \rho_w \pi d^3 \frac{du_w}{dt} = c_w \frac{1}{2} \rho_l (u_l - u_w)^2 \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (2)$$

bzw.

$$\frac{du_w}{dt} = \frac{3}{4} c_w \frac{\rho_l}{\rho_w} (u_l - u_w)^2 \frac{1}{d} \quad (3)$$

Der Widerstandbeiwert ist eine Funktion von Reynoldszahl. Im Bereich der Reynoldszahl bis 10^4 lässt sich der Widerstandbeiwert folgendermassen berechnen [2]:

$$c_w = \frac{24}{Re} + \frac{5.48}{Re^{0.573}} + 0.36 \quad (4)$$

Die Bewegungsgleichung (3) wird dann

$$\frac{du_w}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho_l}{\rho_w} (u_l - u_w)^2 \frac{1}{d} \left(\frac{24}{Re} + \frac{5.48}{Re^{0.573}} + 0.36 \right) \quad (5)$$

Diese Gleichung stellt eine Funktion der Tropfengeschwindigkeit von der Zeit $u_w = f(t, d)$ dar, die numerisch gelöst werden kann. Wird der Term $Re^{0.573}$ in der obigen Gleichung durch $Re^{0.5}$ approximiert, lässt sich Gl. (5) problemlos integrieren. Schliesslich muss die Funktion $u_w = f(t, d)$ über die Zeit so lange integriert werden, bis die Wassertropfen die Messstelle erreichen:

$$s = \int_0^t u_w dt = 230 \quad (6)$$

Die dadurch erhaltene Geschwindigkeit von Wassertropfen an der Messstelle ist dann nur noch eine Funktion der Tropfengrösse. Die entsprechenden Rechenergebnisse sind bereits in Abb. 3 eingetragen. Man erkennt, dass die gemessene Korrelation zwischen Geschwindigkeiten und Wassertropfengrössen durch die Berechnung recht gut wiedergegeben werden konnte.

Wie gezeigt, korrelieren die Geschwindigkeiten und Wassertropfengrössen im vorliegenden Fall stark. Diese starke Korrelation erschwert jedoch die statistische Berechnung von anderen Grössen im Messvolumen erheblich. Soll z.B. die Energiestromdichte des Wassers an der Messstelle berechnet werden, so ist anhand der Definition die folgende Berechnung auszuführen:

$$\dot{e}_w = \frac{1}{2} \frac{\pi}{6} \rho \frac{1}{\Delta t} \sum_{j=1}^k \left(\frac{1}{A_j} \sum_{i=1}^{N_j} d_i^3 u_i^2 \right) \quad J/(m^2 s) \quad (7)$$

Dabei sind Wassertropfen in k Grössenklassen unterteilt. Der Strömungsquerschnitt A ist von der Grösse der Wassertropfen abhängig.

Die Berechnung nach Gl. (7) lässt sich vereinfachen, wenn die Geschwindigkeit in der Klasse j der Wassertropfen als konstant betrachtet ist. Daraus ergibt sich:

$$\dot{e}_w = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{\Delta t} \sum_{j=1}^k u_j^2 \frac{N_j}{A_j} \frac{\pi}{6} d_i^3 \quad (8)$$

Eine weitere Vereinfachung der Berechnung ist wegen der starken Korrelation zwischen Geschwindigkeit und Wassertropfengrösse nicht möglich. Im Gegensatz dazu, lässt sich die Berechnung nur dann weiter vereinfachen, wenn die Geschwindigkeit konstant und daher unabhängig von der Grösse von Wassertropfen angenommen werden kann. Diese Vereinfachung führt dann zu:

$$\dot{e}_w = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \sum_{j=1}^k \dot{V}_j = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2 \dot{V} = \frac{1}{2} \dot{m} \bar{u}^2 \quad (9)$$

Die Massenstromdichte in der Gleichung ist gegeben durch [3, 4]

$$\dot{m} = \bar{u} \rho C_n \frac{1}{6} \pi D30^3 \quad (10)$$

mit C_n und $D30$ jeweils als Anzahlkonzentration und mittlerer Volumendurchmesser von Wassertropfen.

Die Gl. (9) kann weiter umgeformt werden zu

$$\dot{e}_w = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^3 C_n \frac{1}{6} \pi D30^3 = \frac{1}{2} (\bar{u} C_m) \bar{u}^2 \quad (11)$$

wobei C_m die Massenkonzentration der Wassertropfen in der Strömung bezeichnet.

Es ist ersichtlich, dass die vereinfachten Rechenformen Gl. (9) und (11) auf der Annahme basieren, dass zwischen Geschwindigkeiten und Wassertropfengrössen keine Korrelation vorhanden ist. Dies ist klar nicht der Fall, wenn die Zerstäubung nach Abb. 2 aus PDA-Messungen charakterisiert werden muss. Die Energiestromdichte des Wassers z.B. kann dann nur aus Gleichung (7) oder (8) berechnet werden.

4. Zusammenfassung

In einer speziellen Anwendung von PDA-Verfahren wurde die Wasserzerstäubung im Nachlauf einer Schaufelhinterkante untersucht. Dabei wurde eine klare Korrelation zwischen Geschwindigkeiten und Wassertropfengrössen festgestellt. Eine derartige Korrelation konnte zusätzlich durch analytische Berechnungen bestätigt werden. Die gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und der Berechnung deutet darauf hin, dass die Messungen hinreichend genau waren. Deshalb empfehlen die Autoren den vorgestellten Versuchsaufbau für die Validierung des PDA-Verfahrens.

Anhand der vorgestellten Messungen wurde gezeigt, dass die starke Korrelation zwischen Geschwindigkeiten und Wassertropfengrößen die Berechnungen von anderen physikalischen Größen in der Strömung erheblich erschweren kann. Vereinfachungen zur Bestimmung von Energiestromdichten sind in solchen Fällen nicht zulässig.

Literatur

1. **Lefebvre A** (1989) Atomization and sprays. Hemisphere Publishing Corporation
2. **Ihme H, Schmidt-Traub H, Brauer H** (1972) Theoretische Untersuchung über die Umströmung und den Stoffübergang an Kugeln. *Chem. Ing. Techn.* 44, 306-319
3. **Zhang Zh, Ziada S** (2000): PDA measurements of droplet size and mass flux in the three-dimensional atomisation region of water jet in air cross-flow. *J. Experiments in Fluids* 28: 29-35
4. **Zhang Zh, Eisele K** (1999): Mass flux measurements by PDA method. Proceedings of the *8th Int. Conference Laser Anemometry, Advances and Applications*, Rome, Italy