

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM VERDAMPFUNGSPROZESS VON WASSERTROPFEN BEI HOHEN DRUCK UND TEMPERATURNIVEAUS

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF WATER DROPLET EVAPORATION AT HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE LEVELS

Kefalas A., Schnitzler J.P., Barabas B., Benra F.-K., Dohmen H.J.

Universität Duisburg-Essen,
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Institut für Energie- und Umweltverfahrenstechnik
Strömungsmaschinen
Lotharstr. 1, 47057 Duisburg
Alexander.Kefalas@uni-due.de

Schlagworte: Verdampfungsprozess, Wassertropfen, hoher Druck und Temperatur
Key words: Evaporation, water droplets, high pressure and temperature

Zusammenfassung

Gegenstand des vorliegenden Beitrages ist die Vorstellung eines Prüfstandes zur Untersuchung des Verdampfungsprozesses von Wassertropfen bei hohen Druck- und Temperaturniveaus. Nach einer Erläuterung des Prüfstandaufbaus, erfolgt eine Beschreibung der eingesetzten laserbasierten Messtechnik, bei welcher es sich um ein PDPA-System handelt. Weiterhin wird auf die Systematik der Datenaufnahme in der Testsektion eingegangen und anhand der Gestaltung des ersten Untersuchungsarrangements verdeutlicht. Der zweite Teil beinhaltet Auswertungen erster Messergebnisse unter Verwendung einer Hohlkegeldüse. Es erfolgt die Darstellung der Sprühbildentwicklung anhand des Sauterdurchmessers (D_{32}) und der mittleren Geschwindigkeitsverteilung in der meridianen und drei orthogonal zur Strömungsrichtung angeordneten Messebenen. Weiterhin werden Ergebnisse zum Verdampfungsprozess von Wassertropfen in Abhängigkeit von Temperaturvariationen vorgestellt. Hierbei wird eine Entwicklung der aufgenommenen Messdaten über den Verlauf der Meridianebene bei unterschiedlichen Temperaturen der Luftströmung dargestellt.

Einleitung

Das Eindüsen von Wasser in Gasturbinen zur Konditionierung der Prozessrandbedingungen ist Gegenstand der Forschung seit einigen Jahrzehnten. Der Grund dafür sind die Aussichten auf Leistungssteigerungen sowie Verbesserung des Wirkungsgrades der Maschinen. Basierend auf Untersuchungen bei Umgebungsbedingungen wurden in der Vergangenheit bereits viele Anwendungen entwickelt und umgesetzt, wie z.B. das Inlet Fogging. Hinsichtlich der Wassereindüsung in ein Medium mit hohen Drücken und Temperaturen wurden bislang nur wenige praktische Arbeiten durchgeführt. Um im Hinblick auf diese Thematik grundlegende Erkenntnisse zu sammeln wurde am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen der Universität Duisburg-Essen ein Prüfstand aufgebaut. Kern dieses Prüfstandes bildet eine Testsektion, welche es anhand eines gläsernen Kolbens ermöglicht Wassersprays in einer Luftströmung zu

untersuchen. Hierbei ist kann die Luftströmung bis zu $p_{\max} = 10$ bar und $T_{\max} = 688$ K konditioniert und ein Druck für das einzudüsende Wasser von bis zu 230 bar vorgegeben werden. Zum Vermessen des Wassersprays wird eine auf der Phasen Doppler Anemometrie basierende Messtechnik eingesetzt.

Experimentelle Versuchseinrichtung

Der am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen der Universität Duisburg Essen aufgebaute Prüfstand ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die Abbildung gibt einen Überblick über die wesentlichen Komponenten der Anlage. Über einen Ansaugraum wird gefilterte Umgebungsluft einem vierstufigen Verdichter bereitgestellt. Durch diesen wird die Luft auf ein erhöhtes Druckniveau von bis zu 10 bar gebracht und mit einem maximalen Massenstrom von 1.8 kg/s in das anschließende System eingespeist. Ein nachfolgender Strömungserhitzer konditionieren die Luft in einem Bereich zwischen $T_{\min} = 308$ K und $T_{\max} = 688$ K, bevor das Medium in die Messstrecke geleitet wird. Bei der Messstrecke handelt es sich um einen gläsernen Kolben, in welchem demineralisiertes Wasser unter Druck in die Luftströmung eingespritzt wird. Hierbei ist die Implementierung unterschiedlich gearteter Einsprühkonzepte, durch einen austauschbaren Bereich vor der Messstrecke möglich. Durch eine Kolbenpumpe kann das einzudüsende Wasser auf einen Druck von bis zu 25 MPa bei Umgebungstemperatur gebracht werden. Unter Verwendung eines PDPA-Systems wird das Sprühbild in der Testsektion berührungslos vermessen.

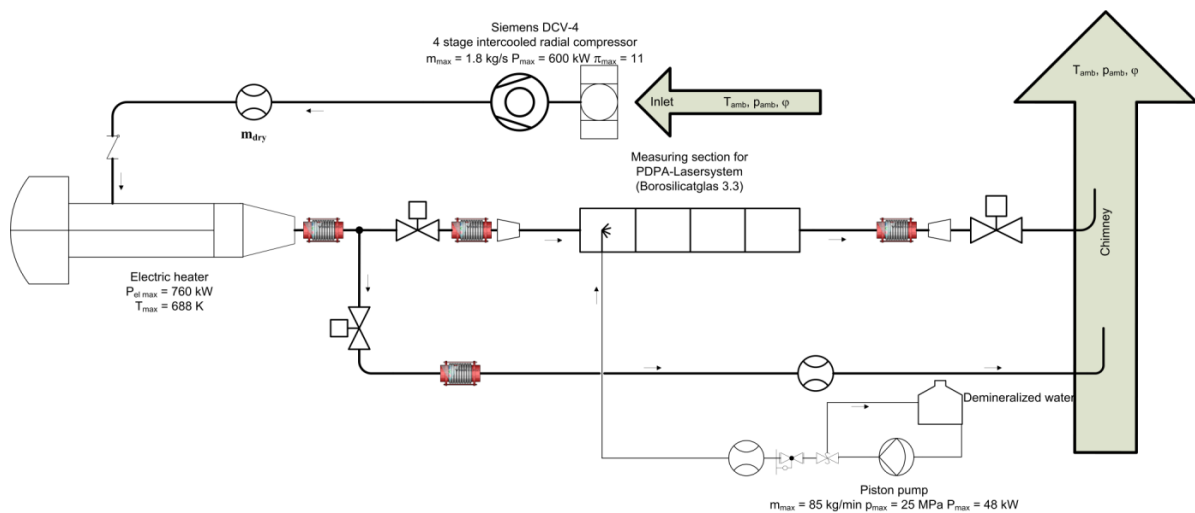


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung

Messstrecke

Die Messstrecke besteht im Wesentlichen aus einem Glaskolben und einer Sektion, welche das Eindüsen von demineralisiertem Wasser in die Luftströmung ermöglicht. Aufgrund der hohen Ansprüche an die gläserne Messstrecke, in Hinblick auf hohen Druck- und Temperaturniveaus bei zusätzlichen geeigneten optischen Eigenschaften für die laserbasierte Messtechnik, ist diese aus 9 mm dickem Borosilikatglas gefertigt. Der Glaskolben weist eine Länge von 1000 mm und einem inneren Durchmesser von 102 mm auf. Der Bereich vor der gläsernen Messstrecke ist so ausgelegt, dass unterschiedliche Düsen und Eindüsenkonzepte

implementiert werden können, sowie der Eindüsungswinkel zur Strömungsrichtung variiert werden kann. Zum Schutz der um das Glasrohr befindlichen Messtechnik und anliegenden Anlagenkomponenten ist für den Fall des Berstens des Glaskolbens ein Splitterschutz um die Messstrecke eingerichtet. In Abbildung 2 ist eine Ansicht des Prüfstandes mit der gläsernen Messstrecke und der umliegender Messtechnik im Zentrum des Bildes dargestellt.

Laserbasierte Messtechnik

Für die Untersuchungen des Sprühbildes im Glaskolben wird ein Phase Doppler Particle Analyzer System (PDPA) der Firma TSI eingesetzt. Das PDPA-System wurde für die Untersuchungen ausgewählt, bedingt dadurch dass es sich um ein berührungsloses Messsystem handelt, welches es ermöglicht die Geschwindigkeit und die Größe der in der Strömung befindlichen Wassertropfen zu bestimmen, ohne die Strömung durch Aufbauten in dieser zu beeinflussen. Wie in Abbildung 3 dargestellt sind die fiberoptische Sonde und der Receiver gegeneinander ausgerichtet. Hierbei ist der Receiver um 30° aus der Ebene der Laserstrahlen verschoben. Die Brennweite des Transmitters beträgt 512 mm, die Laserstrahlen weisen eine Durchmesser von 2.65 mm und einen Abstand zueinander am Sondaustritt von 50 mm auf. Dadurch wird ein Messvolumen mit einem Durchmesser von $90\ \mu\text{m}$ und einer Länge von 1.31 mm generiert. Die Brennweite des Empfängers beträgt 480 mm. Eingesetzt wird ein wassergekühlter Argon-Ionen Laser mit einer Leistung von 5 W.



Abbildung 2: Ansicht der Messstrecke

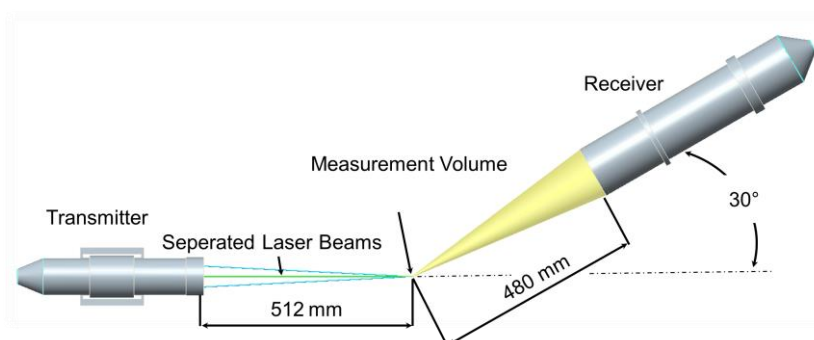


Abbildung 3: Ausrichtung der Komponenten des PDPA-Systems

Die Kalibrierung und Bedienung des Messsystems erfolgt über die Software *Flow Sizer* der Firma *TSI*. Zum Verschieben des Messvolumens in der Testsektion ist die Messtechnik auf einer dreidimensional verfahrbaren Traverse montiert. Diese kann durch eine Oberfläche welche in der verwendeten Software implementiert ist angesprochen und gesteuert werden. In Kombination von Messprogramm und Traverse können so Punktematrizen für verschiedene Ebenen in der Testsektion definiert werden, welche den Verfahrweg des Messvolumens vorgeben.

Datenaufnahme

Die Datenaufnahme für das Sprühbild einer im Zentrum des Glaskolbens implementierten Düse erfolgt anhand von vier Ebenen. In Abbildung 4 sind die definierten Messebenen in der Testsektion dargestellt. Vermessen werden der halbe Meridianschnitt in der x-y Ebene und drei orthogonal zu dieser positionierten Ebenen in der y-z Ebene. Hierbei befindet sich die erste orthogonale Ebene direkt nach dem Düsenaustritt (Ebene 4, $x = 14$ mm), die zweite Ebene bei der Hälfte des Glaskolbens (Ebene 3, $x = 450$ mm), sowie die letzte orthogonale Ebene am Austritt der Messsektion (Ebene 2, $x = 850$ mm). Der zugrunde liegende Koordinatenursprung, der Messebenen und der in diesen befindlichen Messpunkten, liegt im Zentrum des Düsenaustrittes. Die Ausdehnung der Ebenen 2 und 3 erstreckt sich über den gesamten Kolbenquerschnitt. Die Ebene 4 ist hingegen flächenmäßig kleiner als die vorhergehenden zwei Ebenen. Dies ist begründet in der Tatsache, dass die Ausbreitung des Sprühkegels an dieser Stelle noch nicht den gesamten Kolbendurchmesser einnimmt und somit kleine Fläche ausreichend ist, um das Sprühbild zu erfassen. Bedingt dadurch, dass mit einer Variation der Düse auch eine Veränderung des sich ausprägende Sprühkegels einhergeht (durch z.B. unterschiedliche Austrittswinkel oder Austrittsbohrung) wird die Ebene 4 für jede Düse spezifisch angepasst.

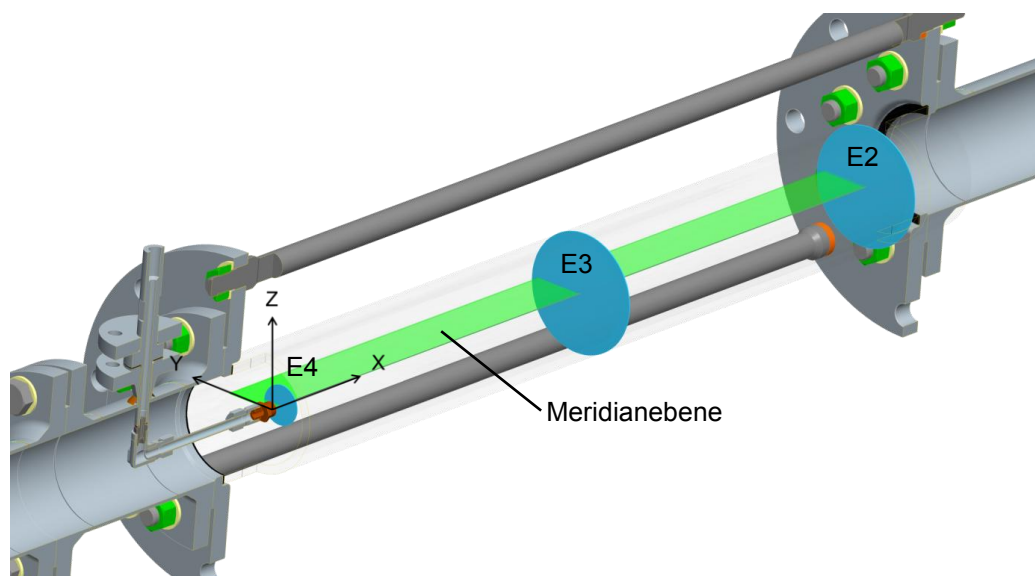


Abbildung 4: Messebenen zum Vermessen des Sprühbildes im Glaskolben

In Abbildung 5 sind beispielhaft die Messpunkt-Matrizen in einer orthogonalen Ebene (links) sowie der Meridianebene (rechts) dargestellt. Anhand dieser vorgegebenen Matrizen fährt das Messvolumen die Ebene ab und verweilt für eine vorgegebene Dauer oder Abbruchkrite-

rium an den einzelnen Messpunkten für die Datenaufnahme. Die Messpunkte der orthogonalen Ebene sind sternförmig angeordnet und weisen, im Hinblick auf eine gleichmäßige Verteilung der Messpunkte auf einer Flanke, ein Spacing zwischen den Messpunkten auf. In der Meridianebene wird bedingt durch ein rotationssymmetrisches Sprühbild lediglich die halbe Ebene vermessen. Die Verteilung der Messpunkte auf den Flanken in der Meridianebene in y-Richtung ist deckungsgleich mit der Verteilung der Messpunkte auf der y-Achse der orthogonalen Ebenen. Anhand dieser Maßnahme kann eine räumliche Zuordnung der Messebenen erfolgen, um in zukünftigen Schritten z.B. ein dreidimensionales Datenbild des Sprühbildes zu generieren. Neben dem Spacing in y-Richtung unterliegt die Verteilung der Messpunkte in x-Richtung ebenfalls einem Spacing. Dieses ist begründet in der Tatsache, dass mit wachsendem Abstand der Messpunkte zum Düsenaustritt (in x-Richtung) die Entwicklung der Wassertropfenparameter, zwischen den einzelnen Messpunkten in x-Richtung, geringere Variationen aufweisen. Farblich gekennzeichnet sind die drei definierten orthogonalen Messebenen (Vergleich Abbildung 4). Die Anzahl der Messpunkte in einer Ebene ist so definiert, dass eine Messdauer von einer Stunde für die Datenaufnahme einer Ebene notwendig ist. Mit dem Anfahren der einzelnen Prüfstandskomponenten und der Einrichtung eines stationären Betriebspunktes, ist für die Vermessung eines Sprühbildes ein Zeitraum von 5 bis 6 Stunden vorzusehen.

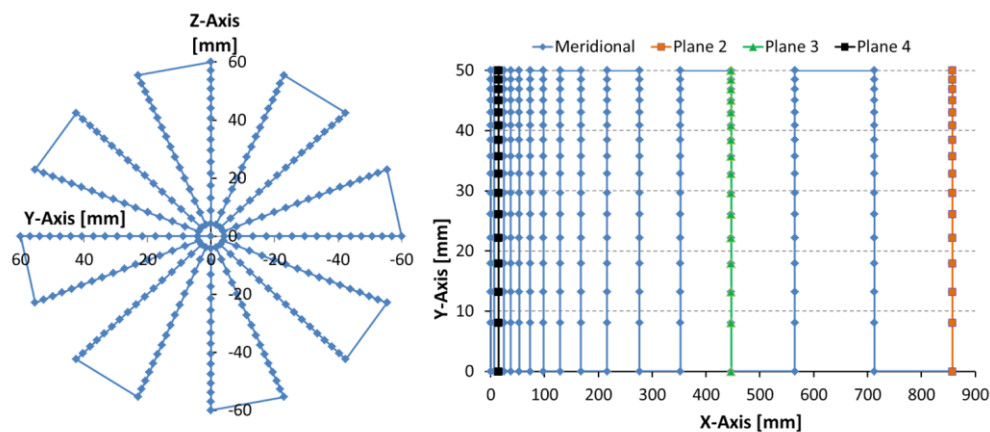


Abbildung 5: Verteilung der Messpunkte in den Ebenen

Ergebnisse

Die im Nachfolgenden präsentierten Messergebnisse des Sprühbildes wurden unter Verwendung einer Hohlkegeldüse generiert. Die aufgenommenen Rohdaten sind hinsichtlich des Sauterdurchmessers (D_{32}) und der durchschnittlichen Geschwindigkeit der Wassertropfen ausgewertet, sowie grafisch in falschfarbenen Bildern dargestellt. In Tabelle 1 sind die eingestellten Randbedingungen für beide Medien während der Datenaufnahme aufgeführt.

	Druck [MPa]	Temperatur [K]	Massen-/Volumenstrom
Trockene Luft	0.41	480	1.6 [kg/s]
Demineralisiertes Wasser	0.80	288	1.7 [l/min]

Tabelle 1: stationäre Randbedingungen

In den Abbildungen 6 bis 9 sind die evaluierten Verteilungen hinsichtlich des Sauterdurchmessers (linke Abbildung) sowie der durchschnittlichen Geschwindigkeit (rechtes Abbildung)

dargestellt. Die in den Grafiken zu erkennenden schwarzen Punkte repräsentieren die Positionen an denen Messdaten aufgenommen wurden. In Abbildung 6 sind die ausgewerteten Ergebnisse für den Meridianschnitt dargestellt. Im Koordinatenursprung ist der Austritt der Düse wiederzufinden. Ausgehend von diesem Punkt ist deutlich die Entstehung des Wasserkegels zu erkennen, bis das Sprühbild den gesamten Querschnitt einnimmt. Bedingt durch die Krümmung des Glaskolbens sowie das sehr dichte Wassertropfenfeld und der infolgedessen starken Schwächung und Zerstreung der Laserstrahlen durch die hohe Anzahl an Tropfen, ist eine Datenaufnahme an der Glaskolbenwand nicht möglich. Aus diesem Grund liegen lediglich Rohdaten bis zu einem Radius von 43 mm (anstatt 50 mm) vor. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Austritt der Wassertropfen aus der Düse diese zunächst den designierten Austrittswinkel beibehalten. Bedingt dadurch sind zu Beginn des Sprühbildes im Zentrum des Glaskolbens ein sehr geringer D_{32} -Wert und geringere Geschwindigkeiten festzustellen. Durch eintretende Wechselwirkungen mit der Luftströmung werden die Wassertropfen in Abhängigkeit von ihrer Größe mit zunehmendem Abstand vom Düsenaustritt in ihrer Richtung umgelenkt. Aus diesem Grund stellt sich nach etwa 200 mm ein zum Kolbenrand ansteigende D_{32} -Verteilung ein. Erst im weiteren Verlauf der Testsektion kommt es zu einer Vergleichmäßigung der Tropfenverteilung im Sprühbild. Die Abbildungen 7 bis 9 stellen die Ergebnisse der drei orthogonalen Messebenen aus der Blickrichtung der Düse dar. In Abbildung 7 ist die in der Meridianebene festgestellte ringförmige Ausprägung des Sprühbildes wiederzufinden. Im Zentrum ist ein geringerer D_{32} -Wert bei einer deutlich langsameren Strömungsgeschwindigkeit als im Umfeld auszumachen. Anhand der Abbildung 8 und 9 wird die am Meridianschnitt festgestellte Vergleichmäßigung der Verteilung des Sauterdurchmessers und der mittleren Geschwindigkeit im gesamten Kolbenquerschnitt deutlich. Bedingt durch die Schwierigkeit das Sprühbild aufgrund der hohen Tropfendichte, insbesondere an der Kolbenwand, und der Krümmung des Glaskolbens zu erfassen, ist eine vollständige Darstellung der Tropfenverteilung für die beiden Ebenen nicht möglich.

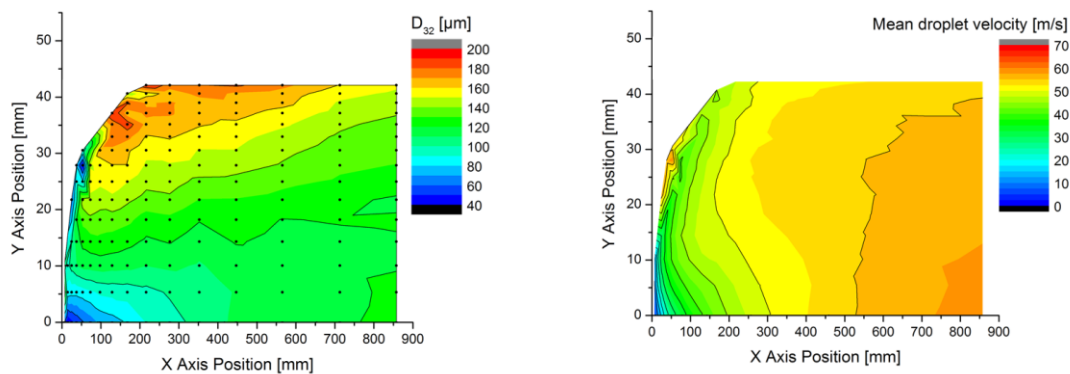


Abbildung 6: Verteilung von D_{32} und mittleren Geschwindigkeit im Meridianschnitt

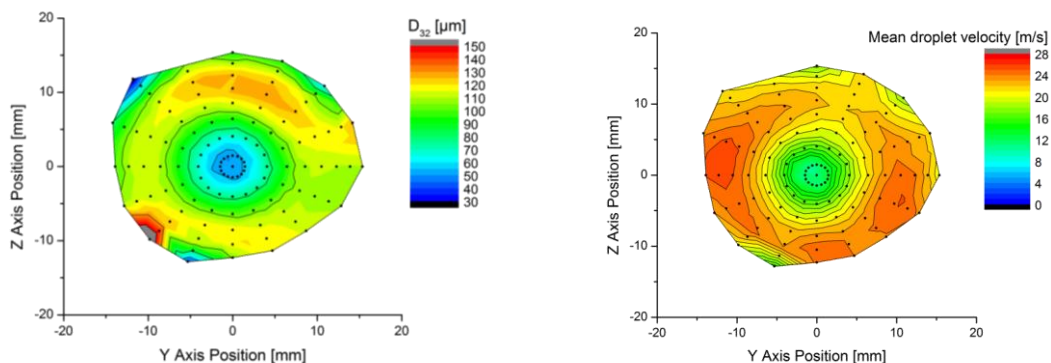


Abbildung 7: Verteilung von D_{32} und mittleren Geschwindigkeit in Ebene 4 (14 mm)

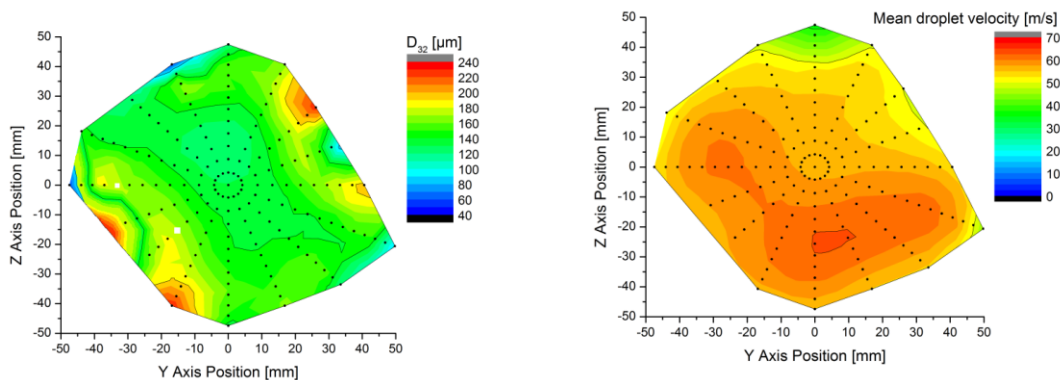


Abbildung 8: Verteilung von D_{32} und mittleren Geschwindigkeit in Ebene 3 (450 mm)

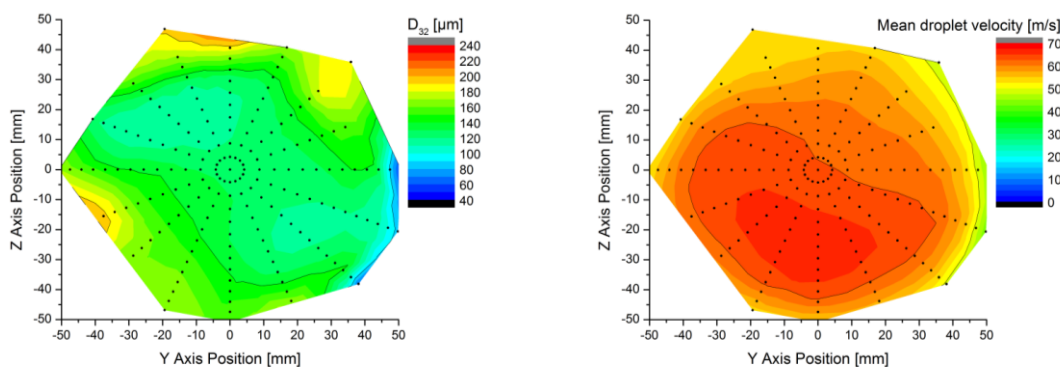


Abbildung 9 Verteilung von D_{32} und mittleren Geschwindigkeit in Ebene 2 (850 mm)

Einfluss der Temperaturvariation auf die Größenverteilung der Wassertropfen des Sprühbildes

Bei den Untersuchungen des Einflusses des Temperaturniveaus der Luftströmung auf die Größenverteilung der Wassertropfen im Sprühbild, wurden die Parameter des Luftdruckes und des Wasserdruckes konstant gehalten und lediglich die Temperatur der Luft variiert. Die Messungen wurden bei einer Temperatur von $T_1 = 460 \text{ K}$, $T_2 = 510 \text{ K}$ und $T_3 = 560 \text{ K}$ durchgeführt. Vermessen wurde jeweils die Meridianebene des sich einstellenden Sprühbildes. In Abbildung 10 und 11 sind Auswertungen hinsichtlich der Tropfengrößenverteilungen des Wassersprays in drei Ebenen des Meridianschnittes bei T_1 , T_2 und T_3 dargestellt. Abbildung 10 stellt den relativen Anteil der einzelnen Tropfengrößen zu allen gemessenen Tropfen in den einzelnen Ebenen (14 mm, 450 mm, 850 mm) und für unterschiedliche Temperatureinflüsse dar. Abbildung 11 hingegen stellt den absoluten Anteil der einzelnen Tropfengrößen, bezogen auf alle gemessenen Tropfen in der gesamten Meridianebene in Relation. Die Betrachtung der Entwicklung der relativen Tropfenverteilung über die drei Ebenen zeigt, dass bei 14 mm der Verteilungsverlauf für alle Temperaturen ähnlich ist. Nur für T_2 und T_3 ist eine Verschiebung der Verteilung zu größeren Tropfen festzustellen. Im weiteren Verlauf sind für die Tropfengrößenverteilung bei T_1 nur geringfügige Veränderungen über die Ebenen auszumachen. Festzuhalten ist, dass es zu einer Agglomeration kleinerer Tropfen ($< 40 \mu\text{m}$) kommt, bedingt durch die Zunahme der relativen Anteile mittelgroßer Tropfen ($> 40 \mu\text{m}$ bis $120 \mu\text{m}$). Bei T_2 und T_3 ist eine andere Entwicklung aufgezeigt. Zwischen der ersten und der letzten Messebene ist eine deutliche Reduzierung der relativen Anteile von Tropfen $< 40 \mu\text{m}$ und $> 120 \mu\text{m}$, bei einem gleichzeitigen Ansteigen der relativen Anteile mittelgroßer Tropfen, zu vermerken. Bis zur Ebene bei 850 mm muss somit ein Zerfall großer

Tropfen und gleichzeitig ein Verschwinden von Tropfen $< 40 \mu\text{m}$ durch Agglomeration oder Verdampfung eingetreten sein. Zusätzlich ist der zackige Verlauf der eigentlichen Kurve auf eine geringe Datenrate, bedingt durch eine reduzierte Tropfenanzahl im Sprühbild zurückzuführen. Eine Untersuchung der Entwicklung der absoluten Tropfenanteile unterstützt die Beobachtungen aus Abbildung 10. Für die Verläufe von T_2 und T_3 ist ein markanter Abfall in der absoluten Tropfenanzahl bis zur Messebene bei 850 mm festzustellen. Ähnlich wie in Abbildung 10 ist der Temperatureinfluss zwischen den Verläufen von T_2 und T_3 zu T_1 ebenfalls signifikant. Deutlich wird, dass zwischen T_1 und T_2 die Grenze liegt bei dem die Temperatur in für die Verdampfung der Tropfen ausreichend ist. Weiterhin ist festzustellen, dass eine wesentlich höhere Temperatur als T_3 notwendig ist um bei den getroffenen Randbedingungen eine komplette Verdampfung der Wassertropfen zu realisieren.

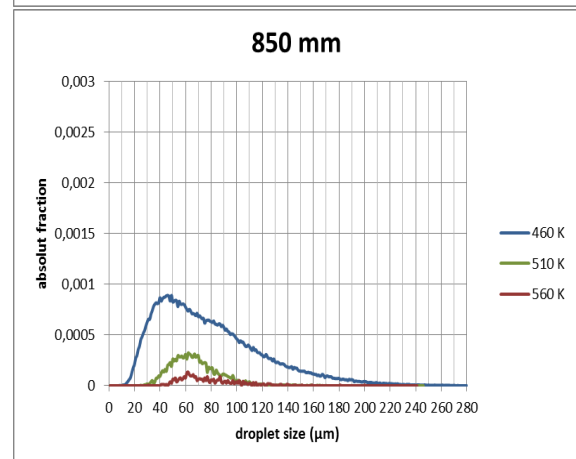
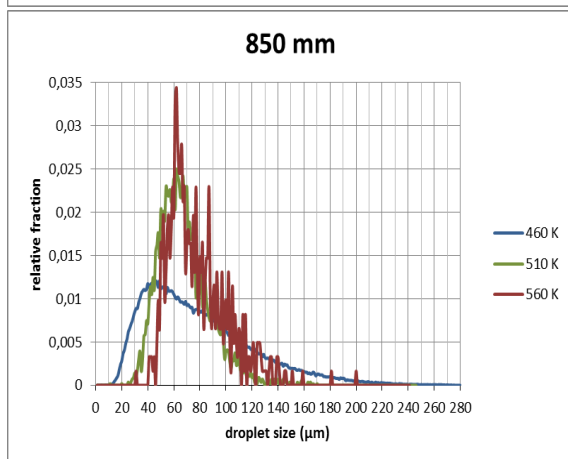
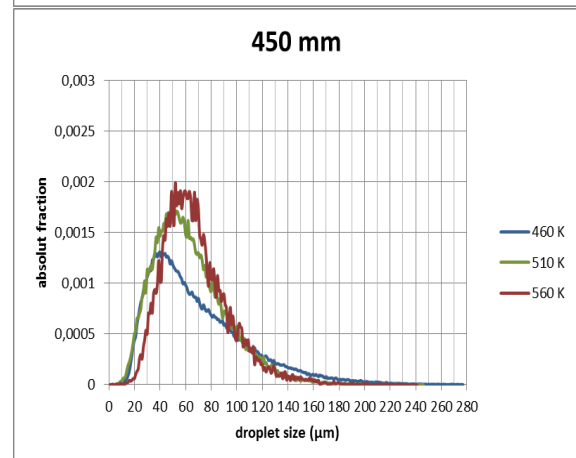
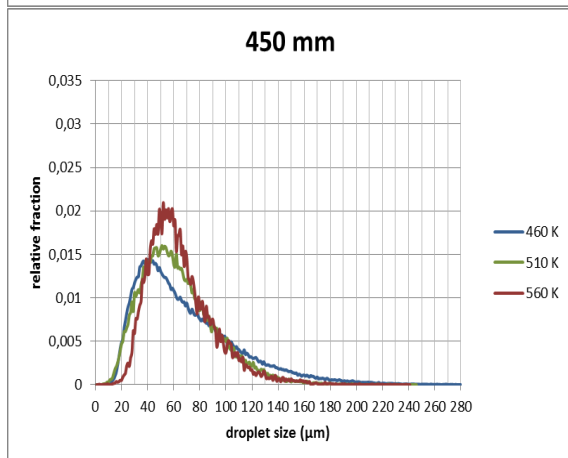
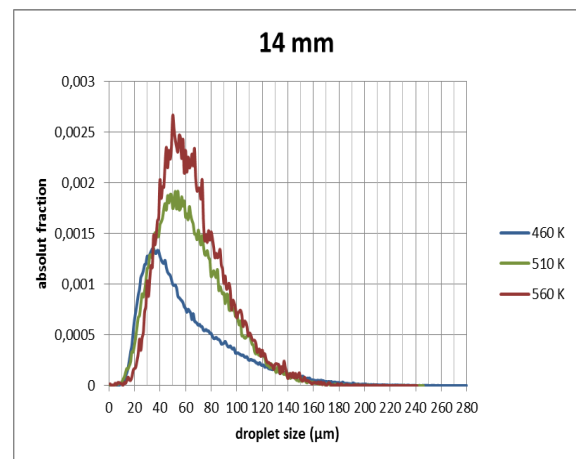
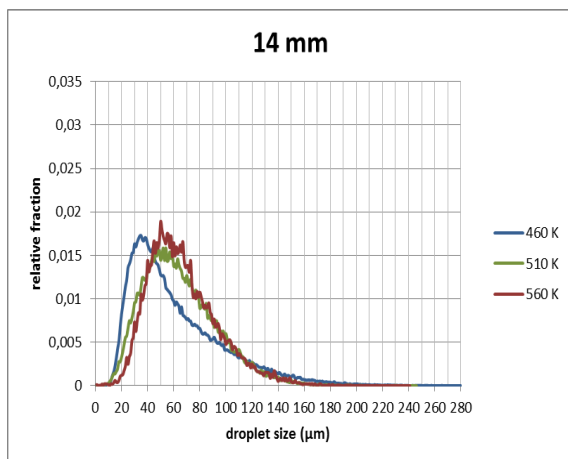


Abbildung 10: Relativer Anteil der Tropfengrößen

Abbildung 11: Absoluter Anteil der Tropfengrößen

Diskussion und Ausblick

Die in diesem Betrag dargestellten ersten Messergebnisse und Auswertungen zeigen, dass das Vermessen eines Sprühbildes in dem implementierten gläsernen Kolben mit der eingesetzten Messtechnik realisierbar ist. Weiterhin besteht die Möglichkeit anhand der aufgenommenen Rohdaten die Entwicklung der Wassertropfen detailliert auszuwerten und so den Verdampfungsprozess in der Messstrecke darzustellen. Hinsichtlich zukünftiger Untersuchungen gilt es eine deutliche Verbesserung der Datengewinnung, insbesondere in Gebieten mit hoher Glaswandkrümmung und bei dichten Wassersprays zu erzielen. Gegenstand zukünftiger Untersuchungen werden Variationen weiterer Randbedingungen sein, um den Einfluss dieser auf den Verdampfungsprozess der Wassertropfen bei hohen- Druck und Temperaturniveaus weiter zu beleuchten.

Literatur

- [1] Chaker M.A., Meher-Homji C.B., Mee T., Inlet Fogging of Gas Turbine Engines – Experimental and Analytical Investigations on Impaction Pin Fog Nozzle Behavior, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2003*, GT2003-38801, Atlanta, Georgia, USA
- [2] Bhargava R. K., Bianchi M., Chaker M., Melino F., Peretto A., and Spina P.R., Gas Turbine Compressor Performance Characteristics During Wet Compression – Influence of Polydisperse Spray, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2009*, GT2009-59920
- [3] Bianchi M., Melino F., Peretto A., Spina P.R., and Ingistov S., Influence of Water Droplet Size and Temperature on Wet Compression, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2007*, GT2007-27458, Montreal, Canada
- [4] Bianchi M., Chaker M., de Pascale A., Peretto A., and Spina P.R., CFD Simulation of Water Injection in GT Inlet Duct Using Spray Experimentally Tuned Data: Nozzle Spray Simulation Model and Results for an Application to a Heavy-Duty Gas Turbine, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2007*, GT2007-27361, Montreal, Canada
- [5] Matz C., Kappis W., Cataldi G., Mundinger G., Bischoff S., Helland E., Ripken M., Prediction of Evaporative Effects Within the Blading of an Industrial Axial Compressor, *Proceedings of ASME Turbo Expo 2008*, GT2008-50166, Berlin, Germany
- [6] Eisfeld Tjark, Joos Franz: Experimental Investigations of the Aerodynamic Performance of a linear axial Compressor Cascade with Water Droplet Loading; *Proceedings of ASME Turbo Expo 2010*, GT2010-22831
- [7] Bettochi R., Morini M., Pinelli M., Spina P. R., Venturini M., Torsello G.: Setup of an Experimental Facility for the Investigation of Wet Compression on a Multistage Compressor, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, October 2011, Vol. 13
- [8] Day I., Williams J., Freeman C.: Rain Ingestion in Axial Flow Compressors at Part Speed, *Journal of Turbomachinery*, January 2008, Vol. 130/011024-1
- [9] Suryan A., Lee J. K., Kim C. K., Jeong H. Y., Kim H. D.: Experimental Measurement of Fog Droplet Distributions from Impaction Pin Nozzle Using Global Sizing Velocimetry, *Proceedings of the 10th International Symposium on Experimental Computational Aerothermodynamics of Internal Flows*, ISAI10-071
- [10] Guo T., Wang T. and Gaddis J.I., Mist/Steam cooling in a heated horizontal tube – Part1: Experimental System, *Transactions of the ASME*, Vol. 122, 2000