

Gegenüberstellung der Spraybildung und -verdunstung mit einer Flachstrahldüse und einem fluidischen Oszillator mittels laser-optischen Verfahren

Comparison of spray formation and evaporation created with a flat jet nozzle and a fluidic oscillator using laser-optical methods

Daniel Altegoer¹, Jeanette Hussong² und Ralph Lindken¹

¹Institut für Thermo- und Fluidodynamik, Hochschule Bochum, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum

²AG Lasermesstechnik der Mehrphasenströmung, Lehrstuhl für Hydraulische Strömungsmaschinen, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44801 Bochum

Spraybildung, Verdunstung, Flachstrahldüse, Fluidischer Oszillator, Schattenbildverfahren
spray formation, evaporation, flat jet nozzle, fluidic oscillator, shadowgraphy

Kurzfassung

Der physikalische Vorgang der Verdunstung wird bereits seit langem in technischen Anwendungen zur Kühlung eingesetzt, beispielsweise in der Kraftwerkstechnik beim Naturzugkühlturm oder in der Gebäudeklimatisierung. Dieser Vorgang kann auch zur Effizienzsteigerung von Photovoltaik Anlagen in einem kleineren, am Solarmodul rückseitig angebrachten, Kühlkanal genutzt werden und dadurch einen Beitrag zur effizienten Energieversorgung leisten. Um diesen Transfer auf kleinere Skalen bestmöglich durchführen zu können, bedarf es einer strömungstechnischen Analyse und Auslegung des Kühlkanals. Auch eine ausführliche Untersuchung der Spraybildung verschiedener Düsen und der Verdunstung der jeweiligen Sprays ist von besonderem Interesse. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf ersten Untersuchungen der Spraybildung und Sprayverdunstung. Die Herausforderung bei der optischen Analyse des Sprays liegt in den großen Längenskalen des Sprays in Höhe und Breite verglichen zur darstellbaren Bildfläche der Kamera und der Tropfengröße. Im Verlauf kommen zwei unterschiedliche Ansätze der Hochgeschwindigkeitsfotografie im Durchlicht-Schattenbildverfahren zum Einsatz. Zum einen wird eine CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera bei einer Belichtungszeit von 1,5 μs mit einem 30W-LED Strahler als Hintergrundbeleuchtung verwendet. Zum anderen wird eine sCMOS-Doppelbildkamera mit einer Belichtungszeit von 23 ns mit einer Laser-Hintergrundbeleuchtung genutzt. Diese werden verglichen und auf ihre Tauglichkeit zur Sprayanalyse geprüft.

Einleitung

Etwa 43% des energiebedingten Gesamtausstoßes an CO₂ ist im Jahr 2016 auf die Energiewirtschaft entfallen (siehe Statista 2018). Daher ist der Aufbau einer sicheren, sauberen und effizienten Energieversorgung ein zentraler Baustein für die Einhaltung weltweiter Klimaschutzziele, sowie für wirtschaftlichen Wachstum und gesellschaftlichen Wohlstand. In diesem Zusammenhang ist es von essenzieller Bedeutung, neben dem Aufbau neuer und der Erweiterung bestehender regenerativer Energiequellen die Effizienzsteigerung der bereits genutzten regenerativen Technologien voranzutreiben.

Die Nutzung der Photovoltaik kann im zukünftigen Mix der regenerativen Energieversorgung eine bedeutende Rolle einnehmen. Gegenüber den fossilen Brennstoffen arbeitet diese Technologie während des Betriebs klimaneutral und nutzt zudem eine nahezu unerschöpfliche Energiequelle, die Sonne. Es bedarf jedoch innovativer Konzepte, um diese Technologie effizienter und günstiger zu machen. Heutige marktübliche Solarzellen wandeln nur etwa 15% bis 20% der Sonnenenergie in Elektrizität um (z.B. Schiro et al. 2017, Stropnik und Stritih 2016). Der restliche Anteil an absorbierte Strahlung wird in Wärme umgewandelt. Diese Wärmeentwicklung führt zu einer Temperatursteigerung der Solarzellen auf bis zu 40 °C über Umgebungstemperatur. Der Temperaturanstieg bedingt eine Erhöhung des Innenwiderstandes der Solarzellen und damit eine Absenkung des Wirkungsgrades von etwa 0,5% pro 1 °C Temperatursteigerung (Rosa-Clot et al. 2010). Aus diesem Grund gibt es bereits eine hohe Anzahl verschiedener Ansätze zur Kühlung von Solarzellen.

Beispielhaft beschreiben Rosa-Clot et al. 2010 die Effekte zur Steigerung der Effizienz von Photovoltaik anhand einer in Wasser getauchten Solarzelle. Als maßgebliche Einflussgrößen werden dort die Lichtreflektion der Solarpaneele sowie die Zelltemperatur genannt. An der Wasseroberfläche erfährt die Solarzelle durch Absenkung der Temperatur auf konstant 30 °C eine Effizienzsteigerung von 20%, wogegen das Untertauchen mit steigender Tiefe zu Effizienzverlusten führt. Diese Methode ist aufgrund ihres Aufbaus jedoch nicht für große PV Kraftwerke oder für Dachanlagen geeignet. Nižetić et al. 2016 beschreiben den Ansatz einer Wasserspraykühlung, die beidseitig an einem Solarmodul implementiert wird. Durch das beidseitige Besprühen des Solarmoduls mit Wasser kann die Zelltemperatur bei maximalem Strahlungseinfall auf etwa 22 °C konstant gehalten werden. Dies resultierte in einer Effizienzsteigerung von ungefähr 14%. Als zusätzlicher positiver Nebeneffekt wurde das Solarmodul während der gesamten Laufzeit durch das Wasser auf der Front sauber gehalten. Nachteilig ist bei diesem Ansatz jedoch der hohe Wasserverbrauch von bis zu 225 l / h.

Weitere Ansätze stellen etwa erzwungene Luftkühlung (z.B. Teo et al. 2012), flüssigkeitsdurchströmte Mikrokanal-Kühlkörper für konzentrierte PV (z.B. Radwan et al. 2016), Verdunstungskühlung unter Verwendung von Tonerde (z.B. Alami 2013) oder auch die Nutzung von Latentwärmespeichern (z.B. Stropnik und Stritih 2016) dar. Weit erforscht ist zudem die Hybridlösung aus PV und thermischer Absorption (PV/T), siehe z.B. Alobaid et al. 2017. Die hier aufgeführten Ansätze geben einen Eindruck über die Vielzahl der bereits wissenschaftlich beschriebenen Varianten und sind nicht vollständig. Sie verdeutlichen aber die Notwendigkeit der Temperatursenkung von Solarzellen zur Effizienzsteigerung.

Unser Ansatz zielt darauf ab, eine Kühllösung auf Basis natürlicher Konvektion und dem Phasenwechsel einer Kühlflüssigkeit zu entwickeln. Hierzu soll in einer ersten Iteration auf der Rückseite eines Solarmoduls ein nach oben und unten hin offener Kühlkanal angebracht werden. In diesem Kanal stellt sich durch den Temperaturgradienten zwischen der Rückseite des Moduls und der Umgebungsluft eine Konvektionsströmung ein. Parallel zu dieser Strömung wird dann über ein Düsensystem Wasser als Kühlmittel in den Kanal eingesprüht und zerstäubt. Der feine Wassernebel verdunstet unter Energieaufnahme aus dem System und senkt somit die Temperatur des Moduls ab. Die Konvektionsströmung transportiert abschließend die feuchte Luft aus dem Kanal und sorgt so für einen Abtransport der Wärme. Abbildung 1 veranschaulicht in diesem Zusammenhang das Funktionsprinzip der Verdunstungskühlung. Vorteile dieses Ansatzes sind hier vor allem der geringere Wasserverbrauch etwa gegenüber dem Ansatz von Nižetić et al. 2016 und ein einfacher Aufbau.

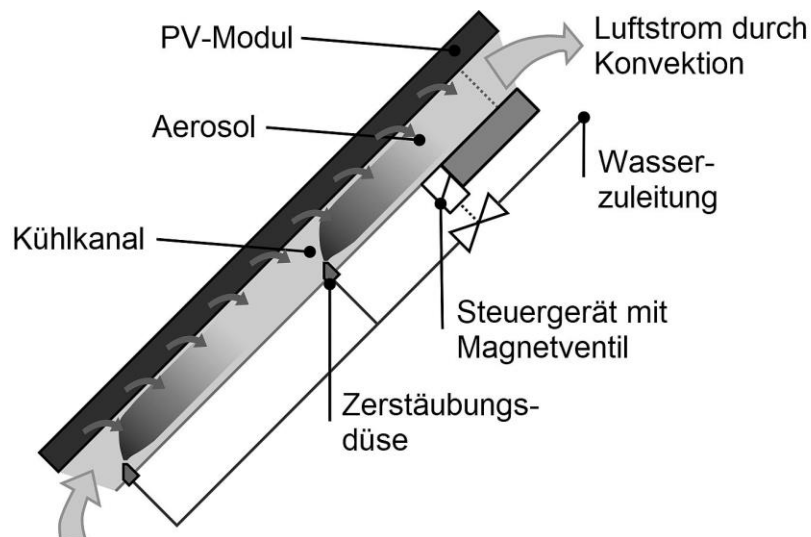


Abb. 1: Funktionsprinzip der Verdunstungskühlung in einem am Solarmodul rückseitig angebrachten Kühlkanal. Das System besteht aus dem Kühlkanal, Zerstäubungsdüsen sowie einem Steuergerät mit Magnetventil und der Wasserzuleitung.

Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung ist die Optimierung hinsichtlich einer maximalen Kühlleistung bei gleichzeitig minimalen Wasser- und Energieverbrauch. Zudem muss das System wartungsfrei und möglichst universell einsetzbar sein, um den Betrieb einer Photovoltaik Anlage nicht unwirtschaftlich zu machen und eine weite Verbreitung zu ermöglichen. Da die Kühlleistung des Systems eng mit der verwendeten Düse und der Zerstäubung des Sprays zusammenhängt, muss zunächst die Auswahl einer geeigneten Düse getroffen werden. Hier erscheint der Einsatz eines fluidischen Oszillators vorteilhaft, da er keine beweglichen Bauteile beinhaltet und somit wartungsfrei ist. Gleichzeitig kann ein großer Bereich des Kühlkanals mit hohem Breiten- zu Höhen-Verhältnis mit einer einzelnen Düse abgedeckt werden.

Experimenteller Aufbau

Zur Erzeugung des Sprays wird ein System aus Druckluftversorgung und Wassertank genutzt. Die Druckluftversorgung des Labors (max. Betriebsdruck 0,6 MPa) ist über ein Filterregelventil (Einlass: max. Betriebsdruck 1,6 MPa, Auslass: max. Betriebsdruck 1,2 MPa) zur Vordruckregelung mit einem Druckluftspeicher (max. Volumen 5 l \pm 10%, max. Betriebsdruck 1,6 MPa) verbunden. Dieser Druckluftspeicher dient als Wassertank und ist mit einem Absperrventil an der Auslassseite bestückt. Zur Verbindung mit der Düse wird ein Gewebeschlauch mit einem Innendurchmesser von 6 mm eingesetzt. Der Durchfluss Q wird über einen in diesen Schlauch eingebauten magnetisch-induktiven Durchflusssensor (SM4100, IFM) gemessen. Zur Messung des Düsenvordrucks $p_{\text{Düse}}$ befindet sich 90 mm vor dem Düseneinlass ein Drucksensor (A-10-12725057, WIKA). Im Abstand von einem Meter zur Düse befindet sich ein Entwicklungsboard mit digitalem Luftfeuchtigkeits- und Temperatursensor (HTU21D-F, Adafruit Industries). Der Luftdruck innerhalb des Labors wird über einen elektrischen Quarzdruckaufnehmer (AGS4103, Althen) aufgezeichnet. Die Versuche werden mit verschiedenen Düsentypen und -größen durchgeführt. Die unterschiedlichen Düsen werden jeweils in einer Höhe von 1,14 m angebracht. Prüfstandbedingt ergibt dies eine maximal darstellbare Messstrecke von 0,6 m. Diese ist im Hinblick auf eine möglichst kurze Verdunstungsstrecke für die geplante Verdunstungskühlung als ausreichend anzusehen. Eine Übersicht über die genauen Versuchsparameter ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Übersicht der Versuchsparameter

Parameter		Dimension	Wert
Düsenaustrittsdurchmesser	$d_{\text{Düse}}$	mm	0,3 - 0,98
Düsenaustrittsdruck	$p_{\text{Düse}}$	MPa	0,33 - 0,4
Volumenstrom	Q	l / min	0,123- 0,8

Das Bildfeld der Aufnahmen sowohl mit der Hochgeschwindigkeitskamera als auch mit der Doppelbildkamera hat eine Größe von 39 mm x 50 mm. Das Positionieren der Kameras erfolgt millimetergenau über eine elektrische x,y-Lineareinheit (LES 5 L = 1490 mm & L = 1190 mm, isel Germany). Die Hintergrundbeleuchtung wird in der x-Achse ebenfalls millimetergenau positioniert (LES 5 L = 2490 mm, isel Germany), die Verstellung der y-Achse erfolgt manuell über 50 mm breite Abstandshalter. Die Lineareinheiten werden über einen entsprechenden Controller (IMC-S8, isel Germany) per Computer gesteuert. Zum Schutz der Kameras sowie der elektrischen Lineareinheiten vor Wasser befinden sich auf beiden Seiten des Prüfstands 3mm starke klare Plexiglasscheiben.

Die Visualisierung des Sprays in der Umgebungsluft erfolgt durch das Durchlicht-Schattenbildverfahren mit zwei unterschiedlichen Kombinationen aus Kamera und Hintergrundbeleuchtung. Die Ergebnisse geben hierbei einen Ausblick auf die Verdunstung des Sprays in freier Umgebung. Zudem kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die Aufnahme sehr vieler Bilder bei erhöhter Belichtungszeit oder die Aufnahme weniger Bilder in sehr kurzen Zeitabständen mit entsprechend niedriger Belichtungszeit zu besseren Ergebnissen führt. Abbildung 2 zeigt den Aufbau des Versuchstandes mit Hochgeschwindigkeitskamera. Dieser besteht aus einer 12-bit CMOS Hochgeschwindigkeitskamera (Phantom V611, Vision Research) mit einem Zeiss Yashica Makro-Objektiv und einem LED-Strahler (Ausgangsleistung 30 W, Lichtstrom 1850 lm, Farbtemperatur 4000 K). Auf dem Frontglas des LED-Strahlers befindet sich zudem eine 3 mm starke satinierte Plexiglasscheibe zum Erzeugen einer homogenen diffus gestreuten Hintergrundbeleuchtung.

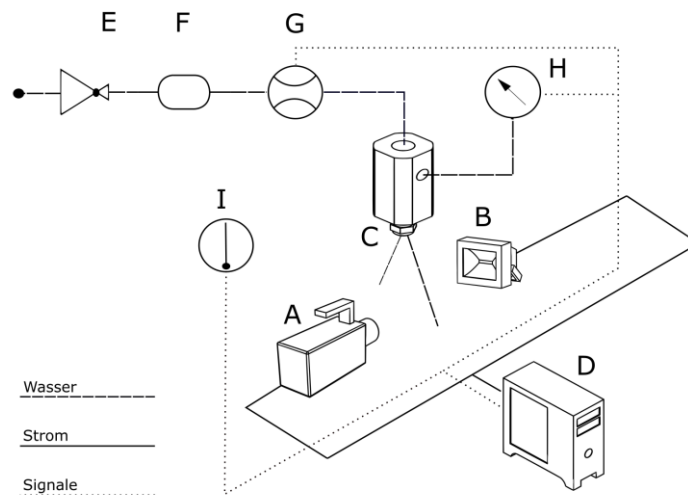


Abb. 2: Versuchsaufbau für das Durchlicht-Schattenbildverfahren mit der Hochgeschwindigkeitskamera (A), LED-Strahler (B) und Düse (C) sowie Computer (D), Filterregelventil (E), Wassertank (F), Durchfluss- (G) und Drucksensor (H) und Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor (I)

In Abbildung 3 ist der Aufbau des Versuchsstandes mit der Doppelbildkamera dargestellt. Der grundsätzliche Aufbau bleibt erhalten, die Kamera sowie die Hintergrundbeleuchtung werden jedoch ausgetauscht. Als Kamera wird in diesem Fall eine 16-bit sCMOS Kamera (Imager sCMOS, LaVision) mit Zeiss Yashica Makro-Objektiv eingesetzt. Als Hintergrundbeleuchtung kommt eine Kombination aus einem Nd:YAG Doppelpuls-Laser (Quantel Evergreen 200, max. Frequenz 15 Hz, Wellenlänge 532 nm, Pulslänge 5 ns, max. Ausgangsenergie 200 mJ pro Puls), einem Lichtführungsarm sowie einem optischen Diffusor (High Efficiency Diffusor, LaVision) zum Einsatz. Über den Diffusor wird der 5 ns Laserpuls in einen nicht-kohärenten, frequenzverschobenen Puls mit einer Dauer von ca. 23 ns umgewandelt. Die maximale Eingangsleistung des Diffusors ist durch die mit Fluoreszenzstoff beschichtete Kunststoffplatte auf 50 mJ limitiert. Um dennoch einen stabilen Betrieb des Lasers sicherzustellen ist dieser vor dem Lichtführungsarm mit einem Laserabschwächer (Metrolux VAM532) gekoppelt, über den die Ausgangsleistung des Lasers auf die benötigte Eingangsleistung des Diffusors verringert werden kann. Die Kamera und der Laser werden über eine programmierbare Steuerungseinheit für die Aufnahmen synchronisiert.

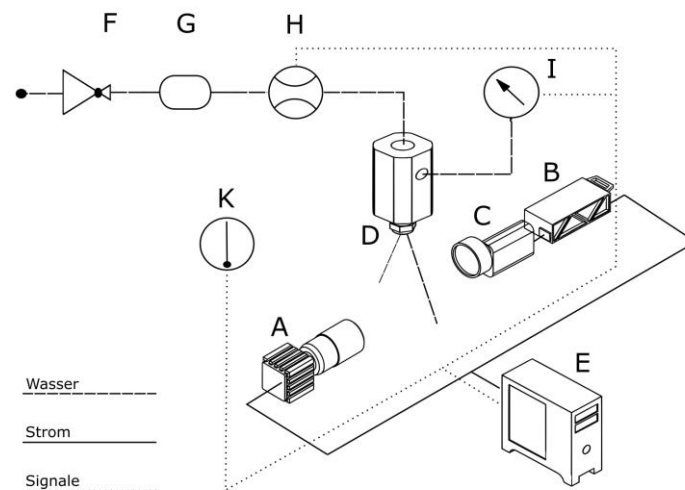


Abb. 3: Versuchsaufbau für das Durchlicht-Schattenbildverfahren mit der Doppelbildkamera (A), Laser (B), Diffusor (C) und Düse (D) sowie Computer (E), Filterregelventil (F), Wassertank (G), Durchfluss- (H) und Drucksensor (I) und Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor (K)

Gegenüberstellung der Durchlicht-Schattenbildverfahren

Im Folgenden werden die beschriebenen Kombinationen aus Kamera und Hintergrundbeleuchtung auf ihre Tauglichkeit zur Untersuchung des Sprays in unserem Anwendungsfall geprüft. Hierzu stellt Tabelle 2 zunächst die wesentlichen Unterschiede der beiden Bildsensoren der Kameras sowie der jeweils genutzten Hintergrundbeleuchtung gegenüber.

Tab. 2: Gegenüberstellung der Bildsensoren und Hintergrundbeleuchtungen

	Phantom v611	Imager sCMOS
Sensor	CMOS	sCMOS
Bildaufnahme	Einzelbild	Doppelbild
Auflösung	504 x 655 Pixel	2160 x 2560 pixel
Geschwindigkeit	15462 (max. 680000) fps	50 fps
Bildabstand	65 μ s	10 μ s
Pixelgröße	20 μ m	6,5 μ m
max. Farbstufen	12-bit (4096)	16-bit (65536)
Hintergrundbeleuchtung	kontinuierliche LED	gepulster Laser (15 Hz)
Belichtungszeit	1,5 μ s	23 ns

Die Betrachtung der Bildsensoren zeigt für beide Kameras spezifische Einsatzgebiete auf. Der wesentliche Vorteil der CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera liegt in der zeitlichen Auflösung des oszillierenden Strahls. Durch die im Versuch genutzte Aufnahmegeschwindigkeit von 15462 Bildern pro Sekunde wird alle 65 μs ein Bild aufgenommen. Dies ermöglicht es, den oszillierenden Wasserstrahl am Düsenausgang sowie die sich im Verlauf bildenden und zerfallenden Tropfen zeitlich präzise darzustellen. So kann beispielsweise für eine OsciJet Düse der Firma FDX Fluid Dynamix ($d_{\text{Düse}} = 0,3 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse}} = 0,4 \text{ MPa}$, $Q = 130 \text{ ml / min}$) eine Oszillationsfrequenz von ca. 1200 Hz am Düsenausgang bestimmt werden. Diese Geschwindigkeit in Kombination mit einer sehr einfachen Handhabung der Kamera und der Hintergrundbeleuchtung bezüglich der Positionierung erlauben es zudem, sehr viele aufeinanderfolgende Bildreihen mit dem auf 5 Litern begrenzten Wassertank bei dauerhaft eingeschalteter Düse durchzuführen. Hierüber können während des Versuchs die Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur im Kontrollbereich aufgezeichnet werden, ohne diese durch das Ein- und Ausschalten der Düse zu verfälschen. Aus Abbildung 4 ist weiterhin ersichtlich, dass die LED-Hintergrundbeleuchtung für eine homogene Ausleuchtung sorgt und groß genug für ein Bildfeld von 39 mm x 50 mm ist. Sie ist jedoch nicht frequenzstabilisiert, sodass die eingebauten LEDs bei einer Netzfrequenz von 50 Hz mit einer Frequenz von etwa 100 Hz geringfügig in der Intensität zwischen 1000 und 1400 Counts pulsieren. In einem Vergleich diverser LED-Strahler hat sich dieser Strahler jedoch als beste Option ergeben. Die kontinuierliche Hintergrundbeleuchtung und die Belichtungszeit von 1,5 μs führen zudem bei genauer Betrachtung eines Tropfens zu Bewegungsunschärfe im Randbereich. Dies in Kombination mit einer geringen Bildauflösung, 12-bit Farbabstufungen und einer Pixelgröße von 20 μm führt dazu, dass sehr feine Strukturen / Tropfen bzw. deren Ränder nicht optimal dargestellt werden können.

Die Stärken der sCMOS-Doppelbildkamera liegen hingegen in der Geschwindigkeitsmessung sowie der Tropfengrößenbestimmung. Hierfür ist in beiden Fällen die Minimierung der Bewegungsunschärfe der Tropfen ein essentieller Bestandteil. Dies wird über die laserpulsbedingte Belichtungszeit von 23 ns realisiert. Die gegenüber der Hochgeschwindigkeitskamera gesteigerte Anzahl an Farbstufen auf 16-bit, sowie die etwa viermal höhere Auflösung in Kombination mit wesentlich kleineren Pixeln sorgen zusätzlich für eine detaillierte Darstellung mit scharfen Konturen der einzelnen Tropfen. Abbildung 4 zeigt hierzu den entsprechenden Unterschied der beiden Kameras klar auf. Diese detailgetreue Darstellung in Kombination mit der Aufnahme von Doppelbildern in einem fest eingestellten Bildabstand von 10 μs ermöglicht über die Betrachtung der Verschiebung der einzelnen Tropfen in x- und y-Richtung die präzise Berechnung der Tropfengeschwindigkeit. Für die Bestimmung der Tropfengröße ist hier bereits ein einzelnes Bild ohne Bewegungsunschärfe ausreichend.

Zur Erzeugung der Hintergrundbeleuchtung ist der Laser wie bereits beschrieben über einen Lichtführungsarm mit dem Diffusor verbunden. Zur Betrachtung anderer Gebiete im Sprayverlauf muss analog zur Hochgeschwindigkeitskamera mit dem LED-Strahler die Position des Diffusors entsprechend der Verschiebung der Kamera angepasst werden. Dies bedingt eine Verstellung der Position des Lichtführungsarms, sodass dieser zur Sicherstellung eines optimalen Strahlverlaufs und somit der Strahlqualität nachjustiert werden sollte. Aus diesem Grund ist die Handhabung dieser Kombination in Hinsicht auf die Größe des zu vermessenden Sprays deutlich aufwendiger. Zudem verhindert die vom Laser vorgegebene maximale Aufnahmefrequenz von 15 Hz eine detaillierte Darstellung der Sprayerzeugung am Düsenauslass. Des Weiteren ist die Ausleuchtung des 39 mm x 50 mm großen Bildfeldes aufgrund des Fokuspunktes des Diffusors inhomogen. Während der mittlere Bereich eine gute Ausleuchtung in runder Form erfährt, nimmt diese zu den Rändern hin ab. Zur optimalen Aufnahme des Sprays wäre daher ein kleineres Bildfeld und somit mehr Messreihen sinnvoll.

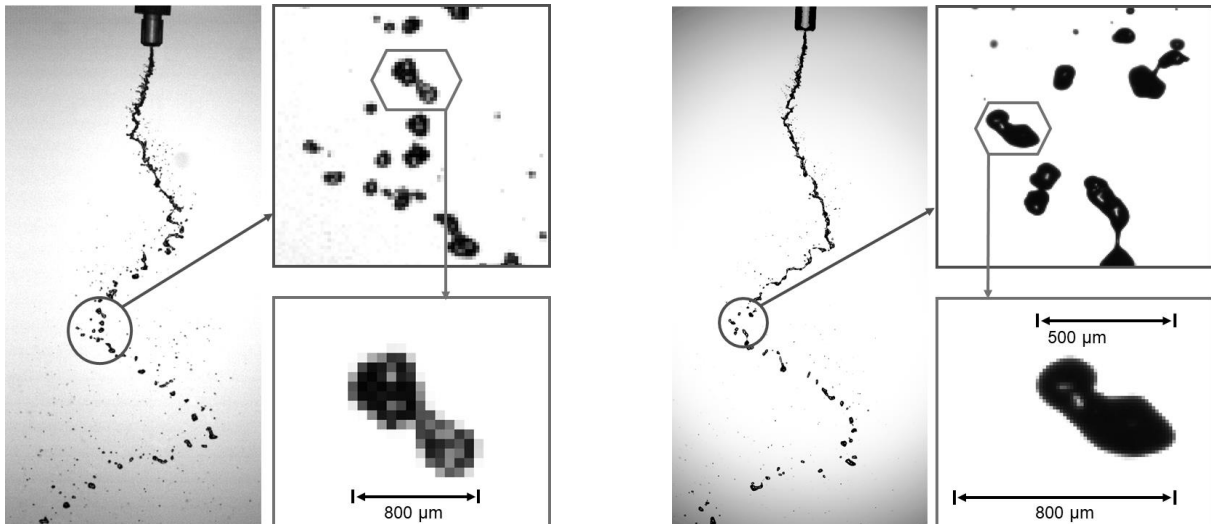


Abb. 4: Gegenüberstellung der Durchlicht-Schattenbildverfahren anhand einer FDX Fluid Dynamix Oscijet Düse ($d_{\text{Düse}} = 0,3 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse}} = 0,4 \text{ MPa}$, $Q = 130 \text{ ml / min}$) in einem Bildfeld von $39 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$. Auf der linken Seite ist das Ergebnis der Kombination aus Hochgeschwindigkeitskamera und kontinuierlicher LED-Hintergrundbeleuchtung sowie einen Bildausschnitt bei 1600% Vergrößerung oben und 3200% Vergrößerung unten dargestellt. Die Counts liegen im dargestellten Tropfen bei 20-200 zur Beleuchtung mit 1100. Die rechte Seite zeigt die Kombination aus Doppelbildkamera und gepulster Laserbeleuchtung sowie einen Ausschnitt mit 600% Vergrößerung oben und 1600% unten. Hier liegen die Counts im Tropfen bei 600-4000 zu 21000.

Die Ergebnisse der Sprayanalysen werden als Benchmark-Experiment zur Verifikation von Simulationen eines verdunstenden Sprays in einer CFD-Software benötigt. Aus diesem Grund werden alle nachfolgenden Untersuchungen mit der Kombination aus Doppelbildkamera und Laser-Hintergrundbeleuchtung durchgeführt. Durch die feinere Einteilung der Graustufen lassen sich Tropfen außerhalb der Fokusebene während der Analyse herausfiltern, sodass hier die Qualität der Ergebnisse gesteigert wird. Der Vorteil der Hochgeschwindigkeitskamera bezüglich der zeitlichen Auflösung der Sprayerzeugung am Düsenauslass wird zu einem späteren Zeitpunkt genutzt und fließt dann ebenfalls in die CFD-Simulation ein. Die parallele Aufnahme der Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit während der Messaufnahmen wird auf eine separate Messung dieser Änderung im Anschluss an die Aufnahmen verschoben. Hierbei wird beachtet, dass das Spray während der Aufnahmen die Umgebung beeinflusst hat und entsprechend Zeit für die Wiederherstellung der Anfangsumgebungsparameter eingeräumt.

Spraybildung verschiedener Düsen

Im Folgenden werden zwei Modelle der bereits vorgestellten Oscijet Düse der Firma FDX Fluid Dynamix ($d_{\text{Düse1}} = 0,3 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse1}} = 0,4 \text{ MPa}$, $Q_1 = 130 \text{ ml / min}$ sowie $d_{\text{Düse2}} = 0,98 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse2}} = 0,4 \text{ MPa}$, $Q_2 = 800 \text{ ml / min}$) mit Flachstrahldüsen der Firma Spraying Systems ($d_{\text{Düse3}} = 0,38 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse3}} = 0,33 \text{ MPa}$, $Q_3 = 130 \text{ ml / min}$ und $d_{\text{Düse4}} = 0,9 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse4}} = 0,33 \text{ MPa}$, $Q_4 = 800 \text{ ml / min}$) bezüglich ihrer Spraybildung am Düsenauslass und auf die Anwendbarkeit in unserem Kühlungsansatz hin verglichen. Da unser Ansatz auf einen möglichst geringen Wasserverbrauch bei Leitungsdruck bis maximal $0,5 \text{ MPa}$ abzielt, wurde für die Aufnahmen der Flachstrahldüsen der Düsenvordruck auf $0,33 \text{ MPa}$ reduziert und so der Volumenstrom entsprechend der Oscijet Düsen angepasst. Abbildung 5 stellt in diesem Zusammenhang die Spraybildung aller vier Düsen gegenüber.

Auf der linken Seite ist die OsciJet Düse mit einem Düsenauslassdurchmesser von 0,3 mm gezeigt. Hier ist deutlich die oszillierende Bewegung des Wasserstrahls zu erkennen. Dieser zieht sich im betrachteten Bereich von 0 - 40 mm ab Düsenauslass nahezu als zusammenhängender Faden durch die Aufnahme und zerfällt nur langsam an den Randstrukturen in kleinere Tropfen. Der Sprühwinkel beträgt dabei etwa 34°. In der mittleren Darstellung ist das Spray der größeren OsciJet Düse zu sehen. Aufgrund des höheren Düsenauslassdurchmessers und des ebenfalls höheren Volumenstroms hat auch der Wasserstrahl einen größeren Durchmesser. Deutlich zu erkennen ist, dass der Strahl an den Randstrukturen stärker aufbricht und im Verlauf schneller in Tropfen zerfällt. Der Sprühwinkel liegt hier bei 110°. Im Gegensatz dazu ist auf der rechten Seite die Spraybildung der Flachstrahldüsen dargestellt. Diese unterscheidet sich bei den verwendeten Düsendurchmessern kaum, sodass hier exemplarisch der Auslassdurchmesser von 0,38 mm dargestellt ist. Zu sehen ist gemäß Lebevre und McDonell 2017 der Strahlzerfall beginnend mit der Lamellen- und Fadenbildung und dem anschließenden Zerfall in Tropfen. Für unseren Kühlanlass ist die bereits frühe Ausbildung einer hohen Anzahl kleiner Tropfen positiv zu bewerten. Der Sprühwinkel in diesem Beispiel beträgt 110°.

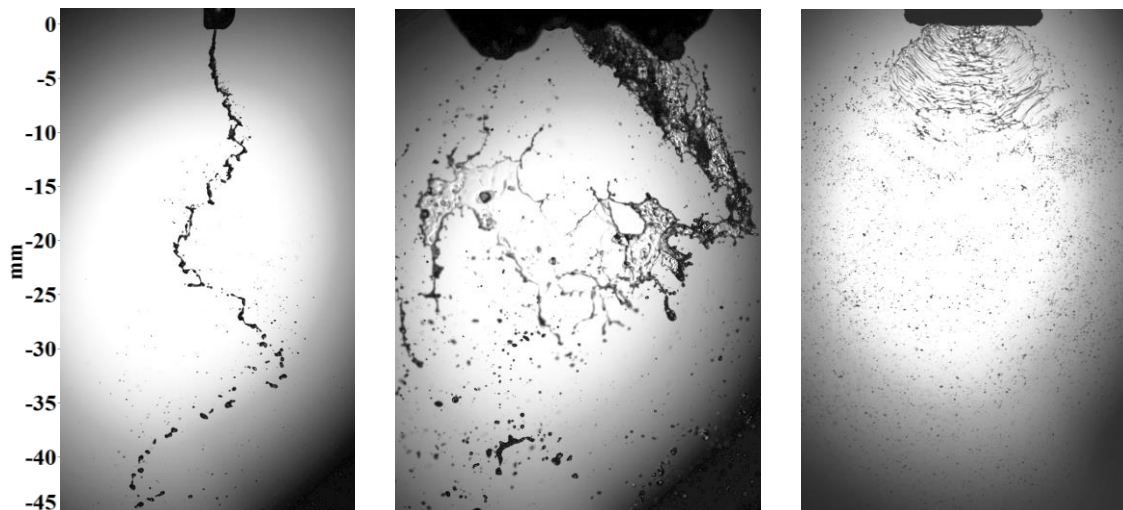


Abb. 5: Gegenüberstellung der Spraybildung von OsciJet- und Flachstrahldüsen. Auf der linken Seite ist die Spraybildung einer OsciJet Düse der Firma FDX Fluid Dynamix mit $d_{\text{Düse}} = 0,3 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse}} = 0,4 \text{ MPa}$ und $Q = 130 \text{ ml / min}$ dargestellt. Mittig ist die OsciJet Düse bei $d_{\text{Düse}} = 0,98 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse}} = 0,4 \text{ MPa}$ und $Q = 800 \text{ ml / min}$ zu sehen. Die rechte Seite zeigt die Spraybildung einer Flachstrahldüse der Firma Spraying Systems mit $d_{\text{Düse}} = 0,38 \text{ mm}$, $p_{\text{Düse}} = 0,33 \text{ MPa}$ und $Q = 130 \text{ ml / min}$.

Betrachtung des Sprayverlaufs

Um die Verdunstung der jeweiligen Sprays quantitativ einschätzen zu können wird die Änderung der Tropfengröße nach Abschluss des Strahlzerfalls in Tropfen bis zur niedrigsten möglichen Aufnahmeposition am Prüfstand betrachtet. Dies ergibt eine Höhendifferenz von 600 mm. Für jeden Messpunkt werden zunächst 200 Doppelbilder aufgezeichnet. Aus diesen erfolgt eine manuelle Auswahl an Aufnahmen, auf denen möglichst viele Tropfen in der Fokusebene liegen. Um die verbleibenden Tropfen außerhalb der Fokusebene herausfiltern zu können, wird über das Softwarepaket Davis ParticleMaster der Firma LaVision ein geeigneter Graustufen-Grenzwert gesetzt. Dies ermöglicht im Anschluss eine detaillierte Analyse der Tropfengröße und -geschwindigkeit. Die Abbildungen 6 und 7 zeigen diese Auswertung am Beispiel der Flachstrahldüse mit einem Düsenauslassdurchmesser von 0,38 mm. In Abbildung 6 ist hierbei ein Abstand von 20 mm zur Düse gewählt. In diesem Bereich ist der Strahl vollständig in Tropfen übergegangen. Bei der Analyse werden etwa 1550 Objekte mit einer Tropfengröße zwischen 40 μm und 300 μm erkannt.

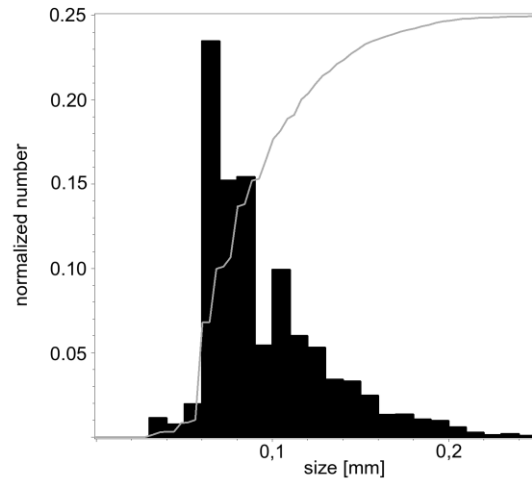


Abb. 6: Betrachtung der Tropfengröße der Flachstrahldüse mit einem Düsenauslassdurchmesser von 0,38 mm in einem Abstand von 20 mm zur Düse. Auf der linken Seite ist ein Ausschnitt des am Prüfstand aufgenommene Bild zu sehen, auf dessen Basis eine Analyse erfolgt. Die rechte Seite zeigt im Diagramm auf der x-Achse die Tropfengröße in μm , auf der y-Achse die normalisierte Tropfenanzahl. Die Balken stellen hierbei ein Histogramm dar, die Kennlinie den kumulierten Prozentsatz der Tropfen.

Die Analyse der zweiten Messposition in einem Abstand von 600 mm zur Düse ergibt nach demselben Verfahren eine Tropfenanzahl von 350. Somit werden nur noch etwa 22,5 % der vorherigen Tropfen erkannt. Dies ist zum einen auf ein Aufweiten des Strahls zurückzuführen, durch welches die Tropfen aus der Fokusebene herausfallen und somit in der Auswertung herausgefiltert werden. Bei einem optischen Vergleich zwischen den linken Aufnahmen aus Abbildung 6 und 7 wird aber auch deutlich, dass die Gesamtanzahl der Tropfen auch unter Berücksichtigung des Effekts der Strahlaufweitung verringert ist. Da sich nach Abbildung 7 die durchschnittliche Tropfengröße verringert hat ist davon auszugehen, dass hier ein gewisser Volumenanteil des Wassers verdunstet ist. Diese Annahme ist in späteren Versuchen zu verifizieren und zur Einbindung in die CFD-Simulation zu quantifizieren.

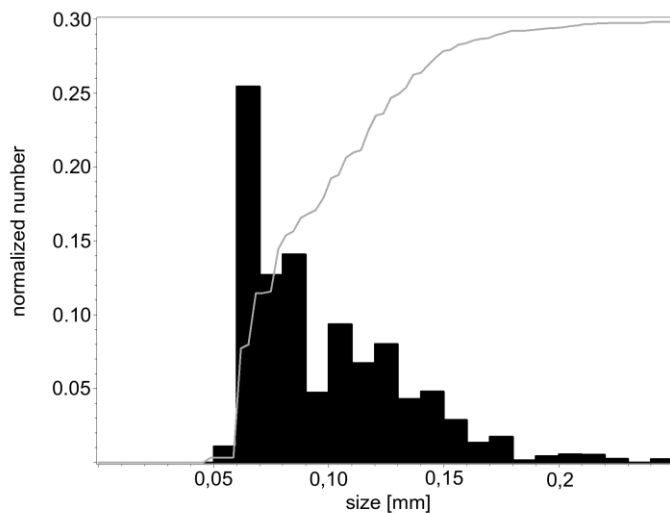


Abb. 7: Betrachtung der Tropfengröße der Flachstrahldüse mit einem Düsenauslassdurchmesser von 0,38 mm in einem Abstand von 600 mm zur Düse. Die linke Seite zeigt auch hier das aufgenommene Bild, während die rechte Seite analog zu Abbildung 6 eine Übersicht über die Tropfengröße gibt.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden zwei Kombinationen aus unterschiedlicher Kamera und Hintergrundbeleuchtung zur Durchführung von Durchlicht-Schattenbildern in Bezug auf die Anwendbarkeit von Sprayanalysen mit Strahlhöhen und -breiten im Bereich von einem Meter miteinander verglichen. Die Versuche haben gezeigt, dass das Durchlicht-Schattenbildverfahren in der Kombination aus Doppelbildkamera und Laser-Hintergrundbeleuchtung schwieriger in der Handhabung ist, jedoch zur Analyse des erzeugten Sprays wesentlich bessere Aufnahmen liefert. Auf dieser Basis wurden erste Versuchsreihen mit fluidischen Oszillatoren sowie handelsüblichen Flachstrahldüsen durchgeführt und deren Spraybildung gegenübergestellt. Die Betrachtung der Verdunstung erfolgte beispielhaft anhand einer Tropfengrößenveränderung entlang der Messstrecke. Im weiteren Verlauf des Projektes werden die hier vorgestellten Düsen mit Hohlkegeldüsen sowie Feinzerstäubungsdüsen verglichen. Der Fokus liegt dabei in der Ermittlung einer statistischen Tropfengröße und -verteilung zur Nachbildung der Sprays in CFD-Simulationen sowie der Ermittlung der jeweiligen Verdunstungslängen bei unterschiedlichen klimatischen Umgebungsparametern zur Auslegung des Kühlsystems bezüglich optimalem Verhältnis aus Kühlleistung zu Wasser- und Energieverbrauch.

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 – FH-Struktur 2017/08). Zudem bedanken sich die Autoren bei der Firma FDX Fluid Dynamix für die Leihgabe von OsciJet Düsen, bei der Firma LaVision für die Leihgabe der Sprayanalyse-Software sowie bei Prof. Vennemann der FH Münster für die Leihgabe von Lineareinheiten zum Prüfstandsbaus.

Literatur

- Alami, A.H., 2014:** "Effects of evaporative cooling on efficiency of photovoltaic modules", Energy Conversion and Management, 77, pp. 668-679
- Alobaid, M., Hughes, B., Kaiser Calautit, J., O'Connor, D., Heyes, A., 2017:** "A review of solar driven absorption cooling with photovoltaic thermal systems", Renewable Sustainable Energy Reviews, 76, pp. 728-742
- Lefebvre, A.H., McDonell, V.G., 2017:** "Atomization and Sprays", Second Edition, CRC Press, Florida / USA
- Nižetić, S. Čoko, D., Yadav, A., Grubišić-Čabo, F., 2016:** "Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: The performance response", Energy Conversion and Management, 108, pp. 287-296
- Radwan, A., Ahmed, Mahmoud, Ookawara, S., 2016:** "Performance enhancement of concentrated photovoltaic systems using a microchannel heat sink with nanofluids", Energy Conversion and Management, 119, pp. 289-303
- Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., Tina, G.M., Scandura, P.F., 2010:** "Submerged photovoltaic solar panel: SP2", Renewable Energy, 35, pp. 1862-1865
- Schiro, F., Benato, A., Stoppato, A., Destro, N., 2017:** "Improving photovoltaics efficiency by water cooling: Modelling and experimental approach", Energy, 137, pp. 798-810
- Statista, 2018:** „Energiebedingte Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektor im Jahr 2016 *(in Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent)“
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/311928/umfrage/energiebedingte-treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-sektor/> abgerufen am 15.06.2018
- Stropnik, R., Stritih, U., 2016:** "Increasing the efficiency of PV panel with the use of PCM", Renewable Energy, 97, pp. 671-679
- Teo, H.G., Lee, P.S., Hawlader, M.N.A., 2012:** "An active cooling system for photovoltaic modules", Applied Energy, 90, pp. 309-315