

PSP UND μ PSP UNTERSUCHUNGEN ZUR FREISTRAHL / WAND- INTERAKTION IM UNTER- UND ÜBERSCHALL

INVESTIGATIONS ON AN IMPINGING SUPERSONIC JET USING PSP AND μ PSP

Martin Bitter¹, Christian Klein², Christian J. Kähler¹

¹ Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik, Universität der Bundeswehr München,
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

² Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
Bunsenstraße 10, 37073 Göttingen

Schlagworte: Druckempfindliche Farbe (PSP), mikro - PSP, Kalibrierung, Freistrahl
Keywords: pressure sensitive paint (PSP), μ PSP, calibration, impinging jet,

Zusammenfassung

Mit dem Ziel Druckverteilungsmessungen mit sehr hoher Ortsauflösung durchführen zu können, wurden systematische PSP- und μ PSP-Untersuchungen unternommen. Zunächst wird die Kalibrierung der PSP-Farbe mit dem an der *UniBwM* entwickelten Kalibriersystem vorgestellt. Zur Qualifizierung wird die PSP- und μ PSP-Messtechnik zur Bestimmung der flächigen Druckverteilung eines Freistrahlexperimentes bei verschiedenen Düsenvordrücken angewendet. Es konnte gezeigt werden, dass die Oberflächenbeschaffenheit für μ PSP-Anwendungen aufgrund der stark vergrößerten örtlichen Auflösung eine deutlich größere Rolle spielt, als für klassische PSP-Untersuchungen. Zur Reduzierung der dadurch hervorgerufenen Rauschanteile in den PSP-Druckverteilungen wurden verschiedene Maßnahmen systematisch untersucht und bewertet.

Einleitung

Die Pressure Sensitive Paint (PSP)-Messtechnik ist eine optische Messmethode zur berührungslosen Druckmessung mit hoher örtlicher Auflösung. Die photochemische Basis dieses Messverfahrens beruht auf der Deaktivierung optisch angeregter Moleküle durch Sauerstoffmoleküle (quenching), Parker 1968, Peterson et al. 1980, Wolfbeis et al. 1988. Dabei wird das Henry'sche Gesetz genutzt, welches die Molekülkonzentration eines Gases direkt mit dem statischen Druck in Zusammenhang bringt. Dazu werden O₂-reaktante Moleküle (bspw. Pyren, Porphyrin) mit Licht geeigneter Wellenlänge angeregt und die von der Sauerstoffkonzentration abhängige Fluoreszenzintensität gemessen. Die Moleküle werden, in einer O₂-permeablen Trägerlösung eingebettet, auf die zu untersuchende Oberfläche aufgetragen. Detaillierte Informationen zur Anwendung und Historie der PSP-Messtechnik findet man in Liu et al. 2004, Klein et al. 2005, Tropea et al. 2007.

Bislang setzen fast ausschließlich große Forschungseinrichtungen wie bspw. das *Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt* e.V. (DLR), die amerikanische Weltraumbehörde NASA, die französische ONERA oder das japanische JAXA diese Technik ein (siehe Klein et al. 2005, Nakakita et al. 2006). Seit einiger Zeit wird diese Messtechnik auch am *Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik der Universität der Bundeswehr München (UniBwM)* für verschiedene Projekte eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit sollen erste Ergebnisse vorgestellt werden, welche die grundlegenden Eigenschaften des an der *UniBwM* vorhandenen

PSP-Systeme qualifizieren. Systematische Untersuchungen zur Freistrah / Wand-Interaktion zeigen sowohl günstige Aufnahmeparameter für das vorhandene Messsystem, als auch Möglichkeiten zur Steigerung der örtlichen Auflösung durch den Einsatz verschiedenster optischer Komponenten oder Methoden digitaler Bildverarbeitung.

Experimenteller Aufbau und Durchführung

Farbe und Beschichtung

In Abbildung 1 ist das Emissionsspektrum der verwendeten PSP-Farbe gezeigt. Die Farbe wurde vom Projektpartner *DLR* für diese Anwendungen zur Verfügung gestellt. Bei den O_2 -sensitiven Molekülen, welche in die Farbe eingebettet sind und den sogenannten Druckmonitor bilden, handelt es sich um Porphyrin-Moleküle (tetra(pentafluorophenyl)porphyrin – PtTFPP), siehe Klein et al. 2007. Ein weiterer Farbstoff ist in das Bindematerial eingearbeitet, welcher keine O_2 -Sensitivität aufweist, sondern Einflüsse durch inhomogene Intensitätsverteilungen in der Anregung kompensiert (Intensitätsmonitor), siehe Klein et al. 2005, Khalil et al. 2004. Die Beschichtung der Oberfläche für die im Folgenden vorgestellten Experimente wurde am *DLR* in Göttingen durchgeführt. Bei der Beschichtung kommt es sowohl auf eine homogene Konzentration der O_2 -sensitiven Moleküle innerhalb des Bindematerials als auch auf einen homogenen Farbauftrag auf der Modelloberfläche an. Die Oberflächenschichtdicke für die hier vorgestellten Experimente lag bei $s_P = 17\mu\text{m}$.

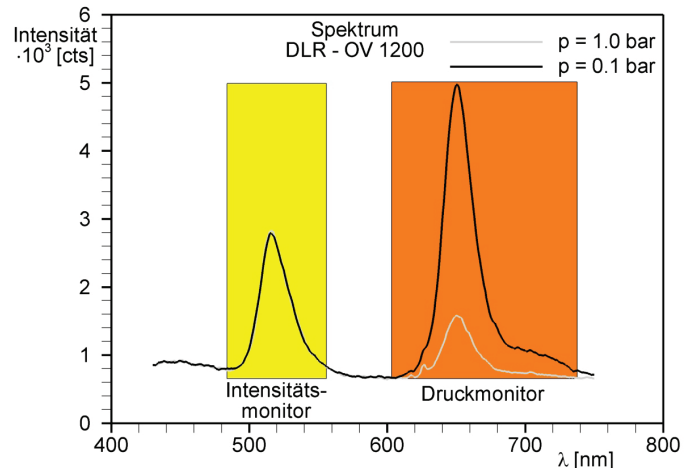


Abb. 1: Emissionsspektrum der PSP-Farbe, siehe Klein et al. 2007

Kalibrierkammer und Kalibrierung der PSP-Farbe

Zur Druck / Intensitäts-Zuordnung der PSP-Modelloberfläche, muss jede Farbe nach deren Auftrag kalibriert werden. Es gibt verschiedene Varianten der Farbkalibrierung, siehe Liu et al. 2004. Hat man für die PSP-Untersuchungen eine Windkanalanlage zur Verfügung, in der sich der statische Druck unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit einstellen lässt, so kann die Farbe direkt am Modell in der Messstrecke kalibriert werden. Dafür werden verschiedene statische Drücke ohne Umströmung des Modells in der Messstrecke eingestellt und die jeweils abgegebene Fluoreszenzintensität gemessen (in-situ-Kalibrierung). Andernfalls besteht die Möglichkeit einer Vorabkalibrierung der Farbe in einer Kalibrierkammer (a-priori-Kalibrierung). Hierzu wird zeitgleich mit dem Modell eine Probe mit der PSP-Farbe beschichtet, welche idealerweise die gleichen optischen und Oberflächeneigenschaften wie das Modell aufweist. Diese Probe wird anschließend in der Kammer verschiedenen statischen Drücken ausgesetzt und die jeweilige abgestrahlte Intensität aufgenommen. Da die Farbe eine Temperaturabhängigkeit aufweist, sollte die Kammer beheizbar sein bzw. gekühlt werden können. Somit können temperaturabhängige Intensitätsschwankungen während des Windkanalversuchs berücksichtigt werden. In Abbildung 2 ist die eigens entwickelte Kalibrierkammer des Instituts mit deren Komponenten und der Kalibrierstand zur PSP-Kalibrierung zu sehen. Der Körper und der Deckel der Kammer wurden aus Aluminium gefertigt und zur Vermeidung von Reflexionen, welche zu Sekundärbeleuchtung der Probe führen, matt schwarz eloxiert. Der optische Zugang erfolgt durch eine anti-reflexbeschichtete Scheibe (BK7) im Deckel. Die Einstellung der Temperatur der PSP-Probe erfolgt über ein Peltier-

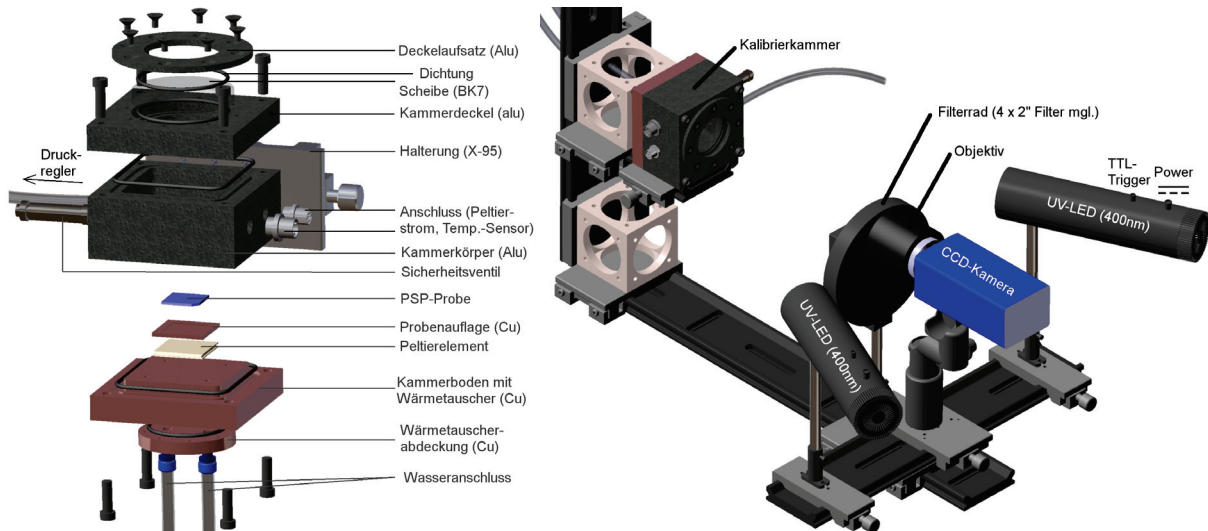


Abb. 2: Kalibrierkammer der *UniBwM* mit ihren Komponenten (links); Kalibrierstand (rechts)

element, welches auf dem im Kammerboden befindlichen wassergekühlten Wärmetauscher aus Kupfer verklebt ist. Der Temperaturbereich der Kammer beträgt $-35\text{ °C} \leq T \leq 60\text{ °C}$. Auf dem Peltierelement befindet sich die Probenauflage, auf der die PSP Probe zum besseren Wärmeübergang verspannt wird. Die Kammer ist für statische Drücke bis $p_t = 7\text{ bar}$ ausgelegt, da der Trisonische Windkanal der *UniBwM* (*TWM*) im Bereich bis $p_t \leq 5\text{ bar}$ operiert. Zur Sicherheit ist ein Überdruckventil in die Kammer integriert. Der Druck innerhalb der Kammer wird mit einem Präzisionsdruckregler, *PACE5000*, mit einer erhöhten Genauigkeit von 0,01 % des Druckbereiches von 7 bar eingestellt. Die Überdruckversorgung erfolgte durch die lokale Druckluftversorgung vor Ort. Die Unterdruckerzeugung erfolgte durch eine Membranvakuumpumpe. Diese liefert einen minimalen Kammerdruck von $p_{min} = 25\text{ mbar}$. Zur Anregung der Farbe wurden gepulste High-Power UV-LEDs mit $\lambda_{em} = 400 \pm 5\text{ nm}$ und einer Spitzleistung von $P = 0,75\text{ W} / \text{m}^2$ bei einer Pulsdauer von $t_p = 150\text{ ns}$ eingesetzt. Die emittierte Intensität wurde mit einer $2048 \times 2048\text{ px}^2$ CCD-Kamera mit 14 bit Dynamik und Sensorabmessungen von $15,15 \times 15,15\text{ mm}^2$ aufgenommen. Die Belichtungszeit der Kamera, die Bildanzahl und die Pulsfrequenz der UV-LEDs wurden synchronisiert und derart eingerichtet, dass sich jeweils 1000 LED-Pulse in einem gemittelten Intensitätsbild befinden. Bei einer LED-Pulsfrequenz von 10 Hz und einer Belichtungszeit von $t_b = 2\text{ s}$ wurden somit 50 Einzelbilder zu einem mittleren Intensitätsbild verrechnet. Der sich ergebende Verlauf der Kalibrierfunktion für die hier vorgestellten Untersuchungen bei drei unterschiedlichen Temperaturen ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Verlauf der Kalibrierfunktion ist durch die Stern-Vollmer Beziehung (1), Stern et al. 1919, gegeben,

$$\frac{I_{ref}}{I}(T, p) = A(T) \cdot p + B(T) \quad (1)$$

wobei die Konstanten A und B temperaturabhängige Materialkonstanten des Polymers darstellen. Zur Bestimmung der Druckverteilung nach Gleichung (2) werden neben den Kalibrierdaten der Farbe vier Mittelwertbilder benötigt.

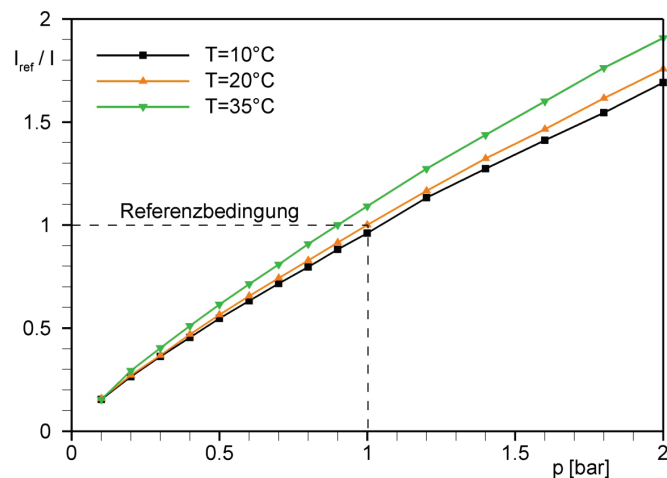


Abb. 3: Kalibrierverläufe der DLR - OV1200 Farbe des *DLR*. Referenzbedingung $p = 1\text{ bar}$, $T = 20\text{ °C}$.

$$p(x, y) = \frac{\bar{I}_{ref}(x, y) - \bar{I}_{d,ref}(x, y)}{\bar{I}_{sig}(x, y) - \bar{I}_{d,sig}(x, y)} \cdot Kal(A, B) \quad (2)$$

Dabei handelt es sich jeweils um ein gemittelttes Intensitätsbild während des Referenzzustandes (I_{ref} , hier bei $p = p_{\infty} = 1$ bar), ein Intensitätsbild unter Testbedingungen (I_{sig}) und ein jeweiliges Dunkelbild (I_d) um Restlicheinflüsse, welche Unterschiede zwischen Kalibrierung und Messung hervorrufen, zu eliminieren.

Variation der Aufnahmeparameter

Um die beste Aufnahmeconfiguration mit dem PSP-System zu ermitteln, wurden Untersuchungen zur Intensitätsverteilung bei unterschiedlicher Aufnahmeconfiguration, Belichtungszeit und Bildanzahl gemacht. Da es sich um gepulste Lichtquellen handelt, wurde die Einschätzung des Signal-zu-Rausch Verhältnisses (SNR) auf die Anzahl der LED-Pulse m , innerhalb eines aus N Einzelbildern errechneten Mittelwertbildes bezogen.

$$\frac{I}{I_{AVG}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m I_i \quad \text{mit} \quad I_{AVG} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} I_i \quad (3)$$

Es wurden $N = [1000; 500; 250; 50]$ Bilder mit einer Belichtungszeit von $t_B = [0,1; 0,2; 0,4; 2]$ s für die Pulsfrequenz $f_{UV} = 10$ Hz aufgenommen, so dass sich im Mittelwertbild des entsprechenden Datensatzes jeweils 1000 LED-Pulse befinden. Hiermit soll untersucht werden, ob eine lange Belichtungsdauer mit geringer Bildanzahl gegenüber der Mittelung einer Vielzahl von Bildern geringerer Intensität einen Vorteil aufweist. Ferner sollte die für zuverlässige Druckverteilungsmessungen nötige Bildanzahl bestimmt werden. Für die Berechnung nach (3) sind die Intensitätsvariationen für 2 Bereiche ($20 \times 80 \text{ px}^2$; $40 \times 160 \text{ px}^2$) der jeweiligen Referenzaufnahmen bestimmt worden, um Intensitätsänderungen durch Druckvariationen während des Ausblasens zu vermeiden. Die Intensitätsvariation wurde für auskonvergiert erklärt, sobald sich über einen Bereich von $m = 10$ Pulsen eine Variationsänderung $I / I_{AVG} < 0,03 \%$ einstellt. Des Weiteren sind zur Verbesserung der mit PSP gemessenen Druckverläufe Untersuchungen mit unterschiedlicher örtlichen Auflösung gemacht worden. Dabei wurde die Auflösung sowohl physikalisch durch unterschiedliche Objektive (50 mm Zeiss, 100 mm Zeiss + 2fach Kenko Telekonverter, Infinity K2 Fernmikroskop) als auch virtuell durch Pixel *binning* oder digitale Filterung der Daten mittels Median-Filter variiert. Die Untersuchungen sollen Fragestellungen hinsichtlich der Oberflächenbeschaffenheit für mikroskopische PSP- (μ PSP)-Anwendungen klären. Zudem sollen sie Aufschluss darüber geben, ob die Druckverläufe, die durch höhere Abtastung mit mikroskopischem Ansatz und anschließender Filterung der Daten gegenüber den Verläufen mit geringer örtlicher Auflösung vergleichbar sind.

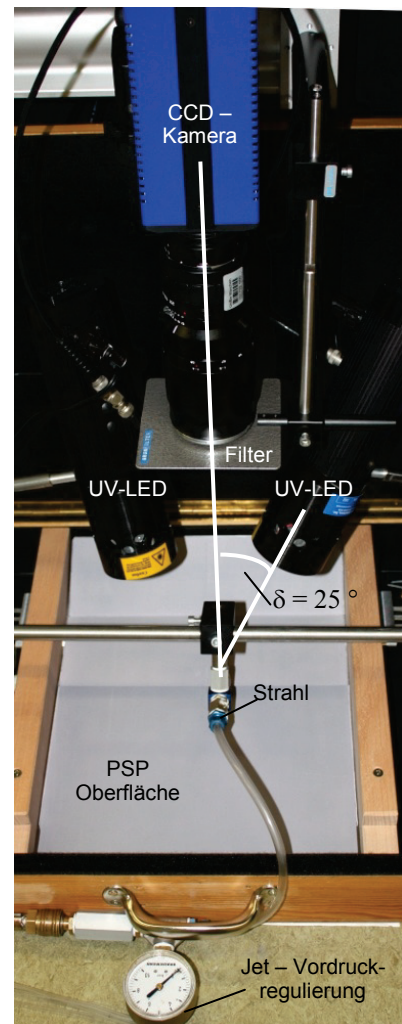


Abb. 4: Versuchsaufbau

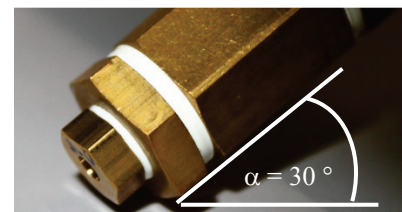


Abb. 5: Düsenaustritt des Freistrahls

Das Freistrahlexperiment

Um grundlegende Erfahrungen mit dem Einsatz der PSP-Messtechnik zu sammeln, wurde ein Freistrahlexperiment, wie in Abbildung 4 und 5 zu sehen, aufgebaut. Hiermit sollte der durch den Strahl auf der Platte verursachte Druckverlauf aufgelöst werden. Untersuchungen zeigen, dass sich bspw. bei einem unterexpandierten Strahl charakteristische Überschallgebiete mit wellenartigen Druckverläufen ergeben, welche durch Verdichtungsstöße bei der Expansion des Strahls am Düsenaustritt hervorgerufen werden, siehe Crafton et al. 2006, Crafton et al. 1999. Mit diesem Experiment soll die Reproduzierbarkeit einiger Testfälle aus Crafton et al. 2006 untersucht werden. Der Durchmesser des Düsenaustritts betrug $d = 3$ mm und wurde in einer Höhe $h = 4$ mm über der PSP-Oberfläche positioniert. Der Anstellwinkel des Strahls betrug $\alpha = 30^\circ$. Das Druckverhältnis $\Phi = p / p_\infty$ wurde mit einem Manometer und einer Feinverstelldüse, welche sich um $s = 250$ mm vor dem Düsenaustritt befanden, eingestellt. Es wurden Druckverhältnisse von $\Phi = 1,5 - 4$ mit $\Delta p = 0,5$ bar untersucht. In der Oberfläche befanden sich statische Druckbohrungen, welche genutzt wurden, um die mit PSP und mit der klassischen Messtechnik gemessenen Druckverläufe zu vergleichen. Die Anregung erfolgte über 2 HighPower UV-LEDs, welche unter $\delta = 25^\circ$ mit einem Abstand von 160 mm zur Modelloberfläche installiert wurden.

Ergebnisse

A) Variation der Aufnahmeparameter

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse zur Variation der Aufnahmeparameter dargestellt. Es zeigt sich für $m = [1; 2; 4]$ Pulse pro Bild ein degressives Konvergenzverhalten. Das Konvergenzkriterium $I / I_{AVG} < 0,03\%$ wird für diese Fälle zwar bei ca. 520 - 580 Pulsen erfüllt, jedoch zeigt sich eine starke Änderung der emittierten Intensität über den Gesamtbereich von $> 1,5\%$. Der Grund dafür könnte bspw. eine Inhomogenität der Anregung durch die UV-LEDs sein. Für $m = 20$ Pulse je Bild stellt sich ein progressiver Konvergenzverlauf von I / I_{AVG} mit deutlich geringerer Abweichung von $< 0,2\%$ zur mittleren Intensität ein. In Aufnahmen mit 20 oder mehr Pulsen je Bild erfolgt bereits durch Integration der Pulse im Einzelbild eine Eliminierung der Schwankungen in der Anregung. Das Konvergenzkriterium $I / I_{AVG} < 0,03\%$ ist für $N > 780$ Pulse erfüllt. Für die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen ist auf Basis dieser Ergebnisse die Wahl auf die Aufnahmeconfiguration mit $t_B = 2$ s, $f_{UV} = 10$ Hz, $N = 50$ Bilder gefallen. Eine Variation des Beleuchtungswinkels $25^\circ \leq \delta \leq 75^\circ$ und des Beleuchtungsabstandes führte zu keiner signifikanten Änderung in der Druckverteilung, weshalb an dieser Stelle auf eine Illustration verzichtet werden soll.

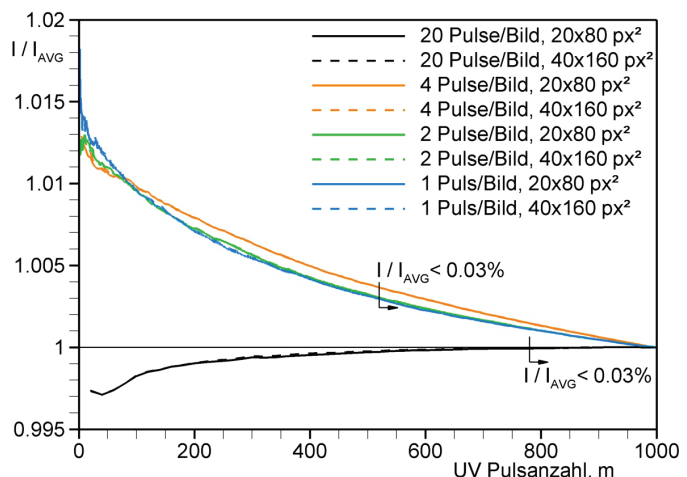


Abb. 6: Entwicklung der gemittelten Intensität für ausgewählte Bildbereiche in Abhängigkeit der Anzahl der LED-Pulse m für verschiedene Belichtungszeiten t_b

B) Optimierung der PSP Druckverläufe

Im Folgenden werden die Ergebnisse gezeigt, bei denen eine Variation der effektiven örtlichen Auflösung durchgeführt wurde, um das Auflösen kleinster Druckschwankungen bei verschiedenen Abbildungsmaßstäben zu untersuchen und zu vergleichen. Ziel dieser Sensitivitätsanalyse war die Ableitung von geeigneten Auswerteparametern.

B I) Physikalische Variation der Ortsauflösung

Für diese Untersuchungen, wurde die örtliche Auflösung durch die Wahl verschiedener optischer Komponenten unterschiedlicher Brennweiten physikalisch verändert. Die verwendeten Abbildungsmaßstäbe lagen bei: M (Infinity K2) = 1,3:1; M (100 mm Zeiss + Kenko 2x) = 3:4, M (50 mm Zeiss) = 1:8. Typische PSP-Experimente, bei denen größere Modelle untersucht werden, haben einen Abbildungsmaßstab von $M \approx 1:10 - 1:100$. Mikroskopische Untersuchungen führt man bei $M > 1$ durch. Die Druckverläufe wurden für $\Phi = 3$ und $\alpha = 30^\circ$ bestimmt. In Abbildung 7 sind die extrahierten und skalierten Druckverläufe entlang der Mittelachse des Strahls für den Arbeitsabstand $s = 555$ mm präsentiert. Es zeigt sich mit zunehmendem Abbildungsmaßstab eine deutliche Erhöhung des Rauschanteils in der Druckverteilung, welche durch die Auflösung kleinster Farbunregelmäßigkeiten und Rauigkeiten der Modelloberfläche zustande kommt. Das bedeutet, dass für μ PSP-Anwendungen eine noch höhere Qualität der Polymeroberfläche, sowohl bei der Herstellung der Konzentration als auch beim Auftragen der Farbe auf das Modell gewährleistet werden muss. Der Verlauf der Druckmessung bei $M = 1:8$ weist ein höheres absolutes Druckmaximum auf als die verbleibenden Verläufe. Der Grund dafür könnten geringe Schwankungen in der Hausdruckversorgung des Instituts oder ein systematischer Fehler bei der Einstellung des Vordrucks sein. Es wird der vorhandene Druckverlauf jedoch in allen Verläufen analog wiedergegeben, wobei durch physikalische Verringerung der Auflösung ein Mittelungseffekt und eine Verlaufsglättung eintreten.

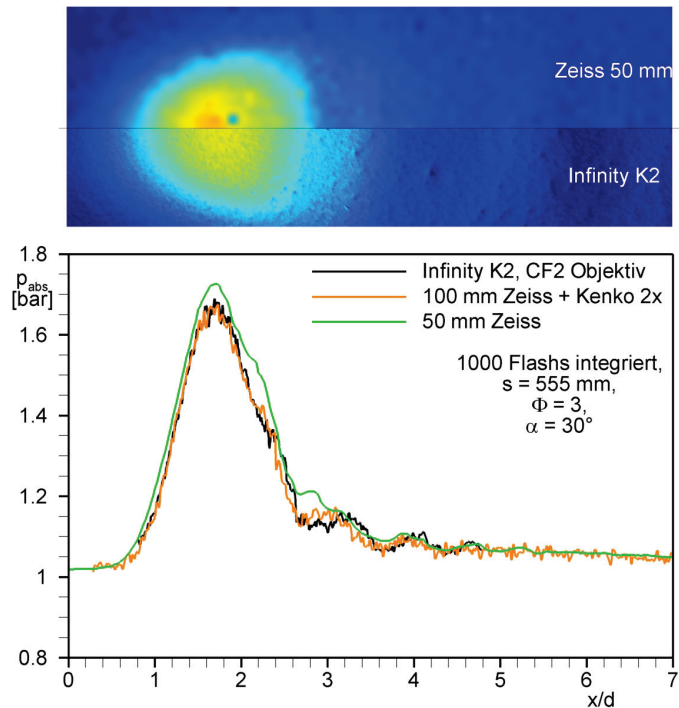


Abb. 7: Vergleich der Druckverteilung entlang der Mittelachse des Strahls für verschiedene örtliche Auflösungen

B II) Variation der Ortsauflösung mittels Hardware binning

Für diese Tests wurde die *binning* Funktion der CCD-Kamera genutzt, die es erlaubt, eine Anzahl von $n = [1$ (*binning* aus), 2, 4, 8] Pixeln in Richtung der Strahlmittelachse zu einem effektiven Pixel zusammenzufassen. Man erwartet eine Glättung der Druckverläufe, da sowohl die örtliche Auflösung mit *binning* (M_b) um den jeweiligen *binning* Faktor $B = 1 / n^d$ (d – Dimension des *binnings*, hier $d = 1$) reduziert wird, als auch die Messgenauigkeit durch Erhöhen des SNR gesteigert wird. Es gilt:

$$M_b = M \cdot B. \quad (4)$$

Das *binning* wurde für das 100 mm Zeiss Objektiv mit Kenko 2x Telekonverter durchgeführt und mit dem geringeren Abbildungsmaßstab des Zeiss 50 mm Objektivs verglichen. In Abbildung 8 sind die Ergebnisse für $\Phi = 4$ dargestellt. Es stellt sich mit Erhöhung von n eine Reduzierung des Rauschanteils und eine Annäherung der Verläufe mit *binning* an das Ergebnis bei $M = 1:8$ ein, da wiederum der Einfluss der Inhomogenität der Oberfläche mit der Reduzierung der Auflösung sinkt. Es kann gezeigt werden, dass die Ergebnisse einer Variation der örtlichen Auflösung durch *binning* denen einer physikalischen Auflösungsänderung gleichbedeutend sind. Folglich kann die Oberfläche sehr hoch aufgelöst werden und *binning* als eine weitere Variante zur Reduzierung des Rauschens bei gleichzeitiger Erhaltung der Strömungsinformation eingesetzt werden.

B III) Variation der Ortsauflösung mittels Median – Filterung

Abschließend zur Optimierung der mit PSP gemessenen Druckverteilung soll die Anwendung des Median-Filters mit verschiedenen Blockgrößen auf das Druckbild zur Variation der örtlichen Auflösung untersucht werden. Wiederum wurde der Vergleich mit der physikalisch geänderten Auflösung bei Einsatz eines 50 mm Objektivs herangezogen. Abbildung 9 zeigt den Vergleich der entsprechenden Druckverläufe für die unterschiedlichen Filtergrößen. Es stellt sich analog zu B I) und B II) der zu erwartende Mittelungseffekt ein. Der Median-Filter der Größe 8 x 8 gibt den Druckverlauf, der bei der physikalischen Änderung des Abbildungsmaßstabes auftritt, am besten wieder. Damit wird die Bedeutung der digitalen Filterung für die PSP Messtechnik deutlich. Für die Glättung der Kurvenverläufe der im Folgenden gezeigten Ergebnisse wird der 8 x 8 Median-Filter eingesetzt.

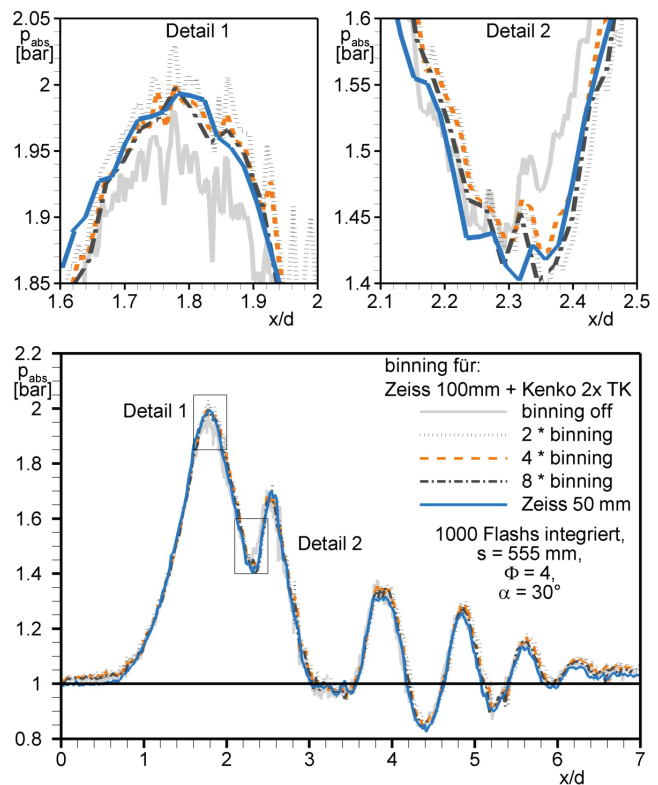


Abb. 8: Variation der örtlichen Auflösung durch Hardware *binning* entlang der Strahlhauptströmungsrichtung

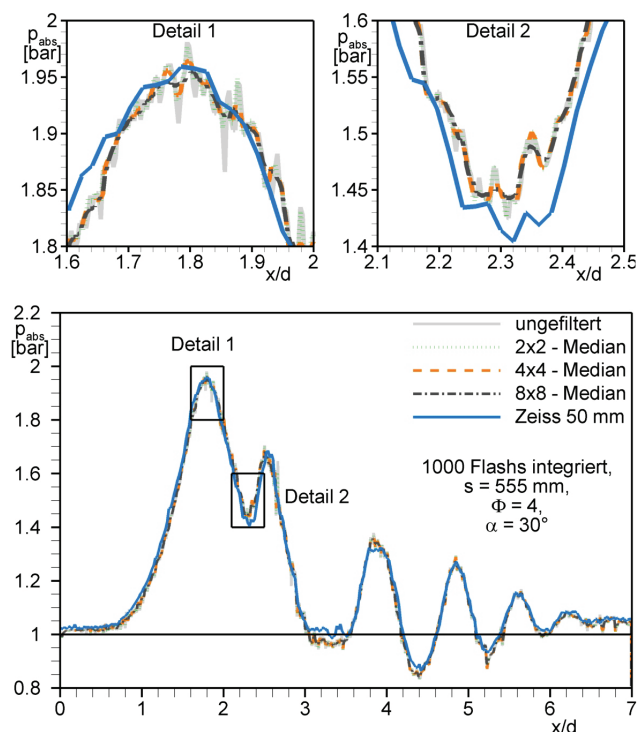


Abb. 9: Variation der örtlichen Auflösung durch Filterung der Druckbilder mit Median-Filtern verschiedener Blockgrößen

C) Strömungstopologie und Druckvariation

Im Folgenden soll die Anwendung der PSP Messtechnik zur Bestimmung der flächigen Druckinformation des Freistrahls bei Variation des Vordrucks vorgestellt werden. Zur Kontrolle der PSP-Druckverläufe wurde für $\Phi = [2, 3, 4]$ der Druckverlauf ebenfalls an den vorhandenen statischen Druckbohrungen bestimmt. Die zu vergleichenden Ergebnisse sind in Abbildung 10 gezeigt. Die PSP Druckverläufe geben an den Stellen der Druckbohrungen kein Signal, in diesen Stellen nur die Informationen der Druckbohrungen zur Verfügung stehen. Eine gute Übereinstimmung zwischen PSP und klassischer Druckmesstechnik kann gezeigt werden. Die Druckverläufe bei Variation des Druckverhältnisses Φ sowie die Topologie des Freistrahls sind in Abbildung 11 und 12 dargestellt. Die Aufnahmen wurden beim Abbildungsmaßstab $M = 3:4$ gemacht. Die Temperaturmessung erfolgte mit einem Pt1000 Sensor und entspre-

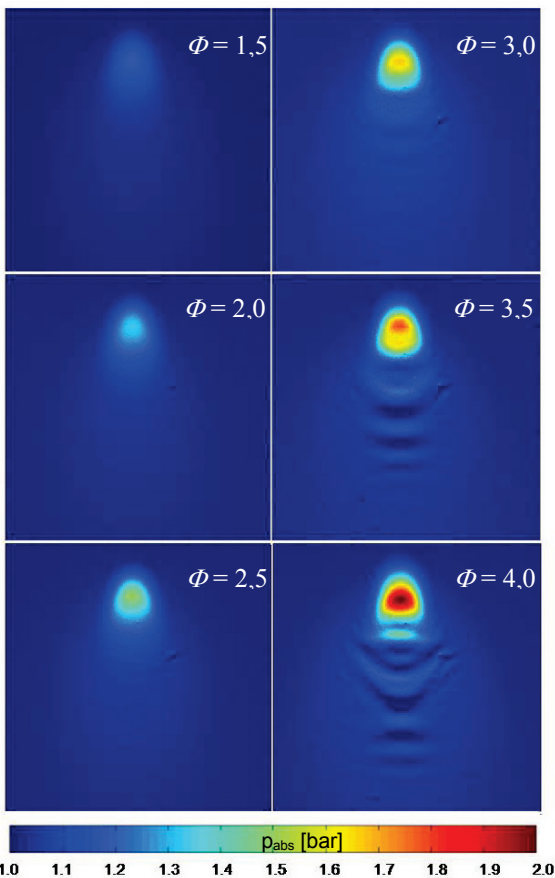


Abb. 12: Topologie des Freistrahls auf der Platte für verschiedene Druckverhältnisse Φ

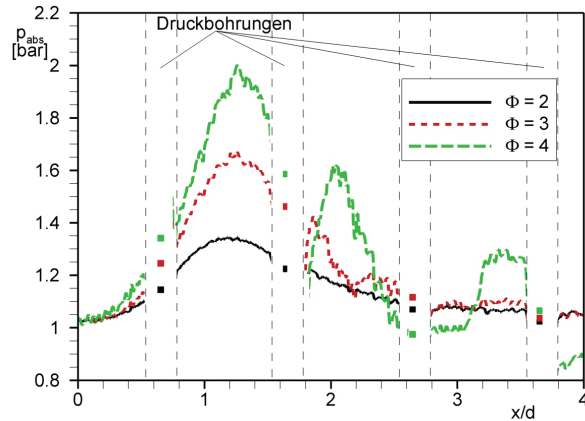


Abb. 10: Vergleich der Druckverläufe gemessen mit PSP (Kurven) und Druckbohrungen (Symbole)

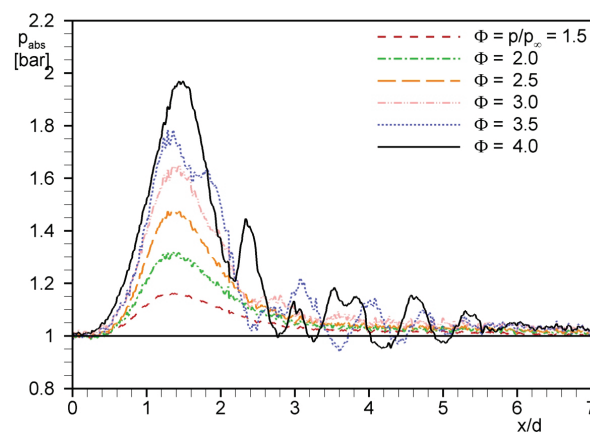


Abb. 11: Druckverlauf entlang der Strahlmittellachse für verschiedene Druckverhältnisse Φ

chender Anzeige im Druckmaximum des Strahls. Für $\Phi = 1,5 - 2,5$ handelt es sich um einen reinen Unterschall-freistrahls. Für $\Phi \geq 3,0$ sorgen Verdichtungs-stöße bei der Expansion des Strahls an der Düse für einen wellenartigen Nachlauf stromab des Strahls, siehe Crafton et al. 2006. Die Struktur des Nachlaufs ändert sich mit der Erhöhung des Vordrucks in der Vorkammer der Düse. Der Einfluss des Überschallfreistrahls auf der Oberfläche ist nach 6-7 Düsen-durchmessern vollständig abgeklungen. Das Druckmaximum, mit welchem der Strahl auf die Oberfläche auftrifft, liegt bei 30 % des Vorkam-mervordrucks. Für $\Phi \geq 4$ kann im Verlauf des Drucks eine Kopplung zweier lokaler Maxima mit einem lokalen Minimum festgestellt werden, wobei das erste der beiden Maxima eine größere Amplitude als das darauf folgende Maximum besitzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die PSP-Messtechnik für erste Tests erfolgreich an der *UniBwM* eingeführt werden konnte.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Das an der *UniBwM* vorhandene PSP-System konnte erfolgreich für erste makroskopische und mikroskopische Untersuchungen außerhalb eines Windkanals eingesetzt werden. Günstige Aufnahmeparameter für das System bei hoher örtlicher Auflösung konnten herausgearbeitet werden. Es zeigt sich, dass unter Verwendung von gepulsten UV-LEDs eine Belichtungszeit von $t_B = 2$ s und eine Bildanzahl $N > 50$ zuverlässige Ergebnisse liefern. Die Variation der Beleuchtungswinkel $25^\circ \leq \delta \leq 75^\circ$ führt zu keiner signifikanten Intensitätsänderung. Untersuchungen zur Variation der örtlichen Auflösung zeigen, dass im Hinblick auf mikroskopische Anwendungen eine hohe Güte der Modell- und Polymeroberfläche sichergestellt werden muss. Im Fall zu starker Störungen durch Unregelmäßigkeiten der Farbe kann die örtliche Auflösung auf verschiedene Weisen reduziert werden, um die Druckverteilungen zu glätten und die Messgenauigkeit zu steigern. Zukünftig soll die PSP-Messtechnik im Niedergeschwindigkeitswindkanal und im Trisonischen Windkanal des Instituts etabliert werden. Zudem soll die Anregung mit kontinuierlichem UV-Licht oder mittels Laser untersucht werden.

Literatur

Crafton, J., Carter, C., Sullivan, J. P., Elliot, G., 2006: „Pressure measurements on the impingement surface of sonic and sub-sonic jets impinging onto a flat plate at inclined angles“, *Exp. Fluids*, 40, pp. 697-707.

Crafton, J., Lachendro, N., Guille, M., Sullivan, J. P., 1999: „Application of Temperature and Pressure Sensitive Paint to an Obliquely Impinging Jet“, 37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, January 11. – 14., *AIAA 1999-0387*.

Khalil, G.E., Costin, C., Crafton, J., Jones, G., Grenoble, S., Gouterman, M., Callis, J. B., Dalton, L. R., 2004: „Dual-luminophor pressure-sensitive paint - I. Ratio of reference to sensor giving a small temperature dependency“, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 97, pp. 13-21.

Klein, C., Henne, U., Sachs, W. E., Engler, R. H., Egami, Y., Ondrus, V., Beifuss, U., 2007: „Application of Pressure-Sensitive Paint for Determination of Dynamic Surface Pressures on a Rotating 65° Delta Wing and an Oscillating 2D profile in Transonic Flow“, 22nd International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, Pacific Grove, June, 10. – 14.

Klein, C., Engler, R., Sachs, W., Henne, U., 2005: „Application of Pressure Sensitive Paint for Determination of the Pressure Field and Calculation of Forces and Moments of Models in a Wind Tunnel“, *Exp. in Fluids*, 39, pp. 475-483.

Liu, T. and Sullivan, J.P., 2004: „Pressure and Temperature Sensitive Paints“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K., Watanabe, S., 2006: „Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA“, *Meas. Sci. Technol.*, 17, pp. 359-366.

Parker, C. A., 1968: „Photoluminescence of Solutions“, Elsevier Publishing Co., Amsterdam-London-New York.

Peterson, J. I., Fitzgerald, R. V., 1980: „New technique of surface flow visualization based on oxygen quenching of fluorescence“, *Rev. Sci. Instrum.*, 51(5), pp. 670-671.

Stern, O., Volmer, M., 1919: „Über die Abklingungszeit der Fluoreszenz“. *Physikalische Zeitschrift*, 20, 183-188.

Tropea, C., Yarin, A. L., Foss, J. F., (Eds.), 2007: „Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Wolfbeis, O. S., Leiner, M. J. P., 1988: „Recent Progress in optical oxygen sensing“, *SPIE*, 906 Optical Fibres in Medicine III.