

CHARAKTERISIERUNG DER INSTATIONÄREN LASTEN IM HECKBEREICH EINES GENERISCHEN RAUMTRANSPORTER- MODELLS MITTELS INSTATIONÄRER PRESSURE-SENSITIVE PAINT MESSTECHNIK

CHARACTERIZATION OF UNSTEADY LOADS IN THE WAKE OF A GENERIC SPACECRAFT USING FAST-RESPONDING PRESSURE-SENSITIVE PAINT

M. Bitter, T. Hara*, R. Hain, D. Yorita*, K. Asai*, C. J. Kähler

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

*Tohoku University, Department of Aerospace Engineering, Graduate School of Engineering
6-6-01 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

Schlagworte: instationäre PSP, transsonische Nachlaufströmung, Wirbeldynamik

Keywords: fast-responding pressure-sensitive paint, transonic wake flow, vortex dynamics

Zusammenfassung

In dieser Gemeinschaftsarbeit zwischen der *Universität der Bundeswehr München (UniBwM)* und der *Tohoku University* werden die Ergebnisse vorgestellt, welche mit instationären drucksensitiven Farben (iPSP) an einem generischen Raumtransportermodell im Unter- und Transschall im *Trisonischen Windkanal München* erzielt wurden. In zwei Versuchsreihen kam die iPSP-Messmethode unter Verwendung einer Polymer-/ Keramik-Trägerschicht in Kombination mit Platinkomplexen als aktive Schicht zum Einsatz. Es konnten Strömungsphänomene mit einer Frequenz bis zu 2 kHz zuverlässig bestimmt und gute Übereinstimmungen zwischen den Ergebnissen der klassischen (Drucksensoren) und optischen (iPSP) Druckmesstechniken erzielt werden. Erstmals konnte sowohl die Topologie des turbulenten Nachlaufs als auch das dynamische Verhalten kohärenter Strukturen bei $M_\infty = [0,3; 0,7]$ experimentell aufgelöst werden.

1 Motivation

Das Forschungsvorhaben zur Erarbeitung wirtschaftlicher und vor allem sicherer Konzepte für zukünftige Raummissionen, welches im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Trans-Regio 40 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft – DFG gefördert wird, wurde in vorangegangenen Untersuchungen bereits von den Bearbeitern motiviert, siehe u.a. Bitter et al 2011, Scharnowski und Kähler 2011. Innerhalb des Teilbereichs B ist am *Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik* der *UniBwM* die dynamische Charakterisierung der Strömungs-/ Struktur-Wechselwirkung im Heckbereich eines generischen Raumtransportermodells das zentrale Thema. Zur Beantwortung grundlegender strömungsmechanischer Fragestellungen wurden zwei Versuchsreihen vorbereitet und durchgeführt. Die Fragestellungen lauten im Einzelnen:

1. *Kann das dynamische Verhalten der kohärenten Strukturen im Nachlauf experimentell mit der Pressure-Sensitive Paint Messtechnik charakterisiert werden?*
2. *Wird die Dynamik von einer bestimmten Frequenz dominiert?*

3. Führt die Wechselwirkung zwischen der Grenzschicht und dem Nachlauf zu einer moden-artigen Verteilung von Druckschwankungen auf der Basis?

In dieser Arbeit soll sich auf die angewandten Methoden zur Beantwortung der Fragen 1 und 2 (dynamischen Charakterisierung der Strömungsstrukturen im Nachlauf) beschränkt werden.

2 Aufbau und Durchführung

2.1 Instationäre drucksensitive Farbe

Zur Klärung der Fragestellungen kam die radiometrische, instationäre Pressure-Sensitive Paint (iPSP-) Messmethode zum Einsatz. Eine Übersicht über die verschiedenen, aktuellen Ansätze zur optischen Bestimmung von Druckverteilungen ist in Liu und Sullivan 2005 zusammengestellt. Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde eine poröse Trägerschicht aus einer Polymer-/ Keramik-Verbindung verwendet, in die drucksensitive Luminophore verankert wurden. Angaben zur Herstellung sind in Gregory et al 2008 zu finden. Zur Erzeugung der Trägerschicht wurden 1,2 g destilliertes Wasser mit 1,73 g Titandioxid und 12 mg Dispergiermittel *Duramax D3005* versetzt und für ca. 1 Stunde verrührt. Anschließend wurde die Mischung mit 3,5 vol.-% der Emulsion *Rhoplex RH-8* versetzt. Aufgrund einer, im Vergleich zum Originalrezept, leicht abweichenden Größenverteilung beim Titandioxid wurde der Wasseranteil von 1,0 g auf 1,2 g erhöht. Die fertige Mischung wurde mit einer *SATA HVLP* Sprühpistole in mehreren Lagen auf das Modell aufgetragen. Die Dicke der Trägerschicht betrug ca. 15 μm . Als aktive Schicht wurden Platinkomplexe (PtTFPP) verwendet, von denen 4 mg in 20 ml Toluol gelöst und ebenfalls schichtweise mit der Sprühpistole aufgetragen wurden. Die Druck- und Temperaturabhängigkeit der Farbe wurde in einer statischen Kalibrierkammer bestimmt, siehe Bitter et al 2009. Sie betragen $p_{\text{sens}} = 54\% / 100\text{ kPa}$ beziehungsweise $T_{\text{sens}} = 2,3\% / \text{K}$. Aufgrund der hohen Temperaturabhängigkeit ist die genaue Kenntnis der Oberflächentemperatur zum Strömungszustand („wind-on“) und Referenzzustand („wind-off“) wichtig. Die Transferfunktion einer instationären drucksensitiven Farbe mit einer Polymer-/ Keramik-Trägerschicht wurde in Sugimoto et al 2012 charakterisiert. Es konnte gezeigt werden, dass bis zu einer Abtastrate von 2 kHz keine signifikante Änderung der Amplituden- und Phasenlage zu erwarten ist. Somit war keine Anpassung der hier vorgestellten Daten erforderlich.

2.2 Generisches Raumtransportermodell

Für die Bearbeitung des Teilprojekts sind die auftretenden Lasten im Heckbereich kurz nach dem Start (Machzahl $M_\infty = 0,3$) und unter transsonischen Bedingungen ($M_\infty = 0,7$) von besonderem Interesse, da in diesem Machzahlbereich die Strömungs-/ Struktur-Wechselwirkungen am signifikantesten sind und zu erheblichen Beschädigungen am realen Flugkörper führen können. Insbesondere die großskaligen Wirbelstrukturen, die vom Heckbereich ablösen, interagieren mit der Schubdüse und sorgen somit für hohe mechanische Belastungen. In Abbildung 2 ist das speziell für instationäre Druckmessungen entworfene Modell gezeigt, welches bei diesen Untersuchungen zum Einsatz kam. Das Modell wurde in Schalenbauweise ausgeführt, um eine Ausstattung mit statischen und instationären Druck- und Temperatursensoren zu ermöglichen. Das Modell beinhaltet 4, in Umfangsrichtung symmetrisch verteilte, statische Druckbohrungen zu Beginn des zylindrischen Teils sowie 4 statische Temperatursensoren - 2 im zylindrischen Teil und 2 in der Basis. Zudem befinden sich 13 instationäre

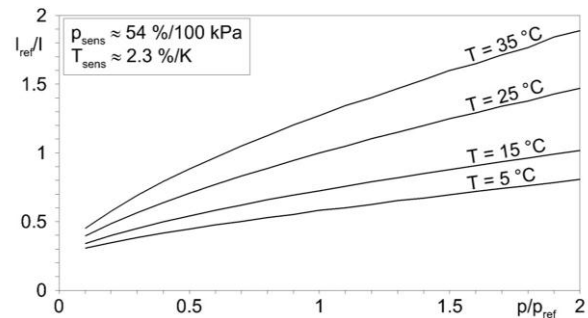


Abb. 1: Kalibrierkurven der instationären drucksensitiven Farbe auf einer Polymer-/ Keramik-Schicht; normiert bei $p_{\text{ref}} = 1000\text{ mbar}$, $T_{\text{ref}} = 25\text{ °C}$

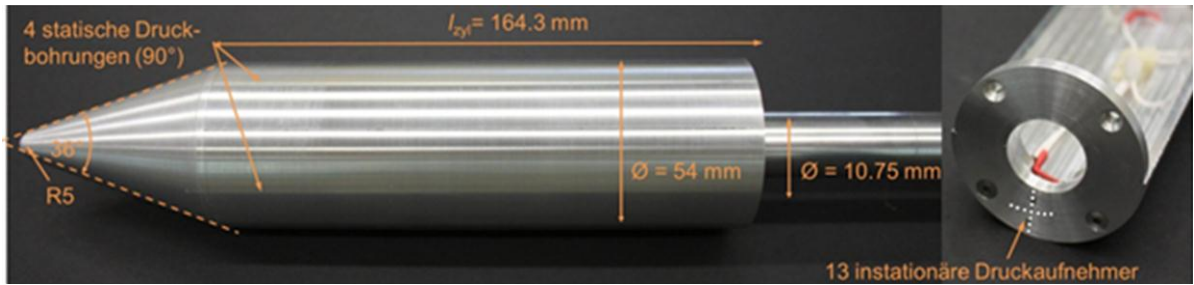


Abb. 2: Geometrische Abmessungen und messtechnische Ausstattung des generischen Modells eines zukünftigen Raumtransporters

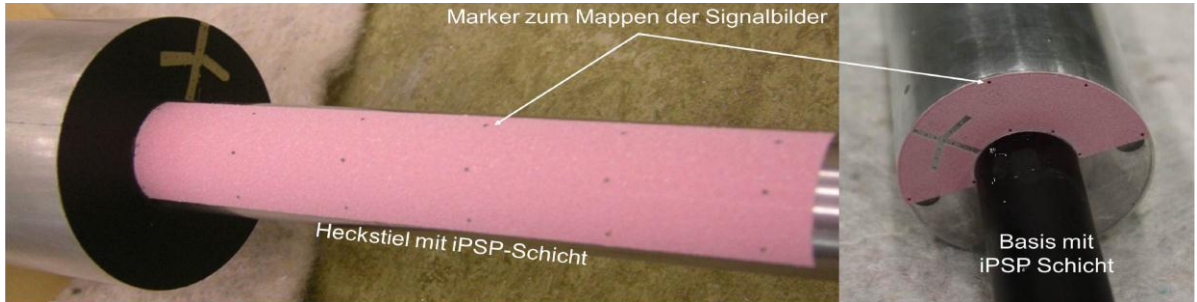


Abb. 3: Modell mit iPSP-Beschichtung; links: Beschichtung zur Klärung der Fragestellungen im Nachlauf, rechts: Beschichtung für die Charakterisierung der Basisströmung (nicht diskutiert).

Drucksensoren in der Basis des Modells, von denen 4 zur Bewertung der Messunsicherheit und zur Offset-Korrektur verwendet wurden. Eine Heckstielhalterung wurde verwendet, um eine symmetrische Umströmung des Modells zu gewährleisten. Der Nachteil dieser Modellaufhängung kann die Verzögerung oder gänzliche Verhinderung des Wiederaanlegens des turbulenten Nachlaufs sein. Die Untersuchungen in Bitter et al 2011 zeigen allerdings, dass dieses erst ab Anströmmachzahlen von $M_\infty > 2$ auftritt und im Unterschall kein Problem darstellt. Der Durchmesser der Heckstielhalterung von $d = 10,75$ mm entspricht dem maßstäblichen Durchmesser der Düse, welche sich hier im Original befindet. Die Länge der Düse würde etwa 1,2 Modelldurchmesser ($l \approx 65$ mm) betragen. Abbildung 3 zeigt das Modell mit der iPSP-Beschichtung für die beiden separaten Testreihen. Links ist die Beschichtung für die Nachlaufuntersuchungen und rechts die Beschichtung für die Charakterisierung der Basisströmung (in diesem Bericht nicht weiter diskutiert) gezeigt. Zur Vermeidung von Reflektionen und Sekundärbeleuchtung wurden angrenzende Flächen schwarz lackiert.

2.3 Aufbau und Durchführung im Windkanal

Zur Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellungen aus Abschnitt 1 wurden zwei unabhängige Testreihen im *Trisonischen Windkanal München* vorbereitet. Beim Windkanal

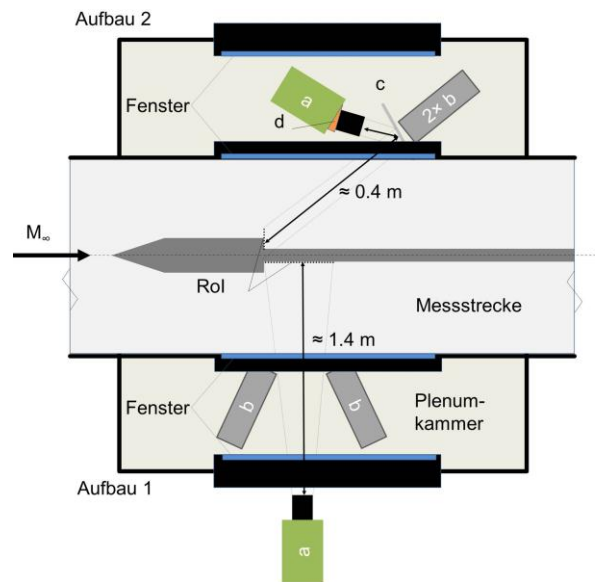


Abb. 4: Schematische Darstellung der Versuchsanordnungen für die Nachlaufuntersuchungen (Aufbau 1) und die Charakterisierung der Basisströmung (Aufbau 2) mit Kamera (a), Anregungs-LEDs (b), Umlenkspiegel (c) und Scheimpflugadapter (d). Darstellung nicht maßstabsgetreu.

Versuchsreihe (Rol)	Nachlauf			Basis	
Machzahl M_∞ [-]	0,3; 0,7				
Reynoldszahl Re_D [$\cdot 10^6$]	0,65; 1,0				
Totaldruck p_t [kPa]	170; 150				
stat. Druck p_s [kPa]	160; 107				
Abtaste rate Drucksensoren [kHz]	10				
iPSP Abtaste rate $f_{s,iPSP}$ [kHz]	1	2	4	1	2
FFT cut-off Frequenz f_c [Hz]	512	1024	2048	512	1024
Belichtungszeit t_i [μ s]	999	499	249	999	499
Objektiv	Zeiss Sonnar T 180 mm, F 5,6			Zeiss Makro T* 50 mm, F 4	
Bildausschnitt $W \times H$ [mm ²]	106,4 \times 32,2	80,5 \times 23,4	51,8 \times 17,6	31,4 \times 57,5	31,4 \times 57,5
Bildausschnitt $W \times H$ [px ²]	1184 \times 352	896 \times 256	576 \times 192	336 \times 768	336 \times 768
Arbeitsabstand [mm]	1400			400	
Vergrößerung M	1 : 4,5			1 : 4,6	
Bildanzahl N [$\cdot 10^3$]	12	24	44	21	21

Tab. 1: Versuchsparameter und Strömungsbedingungen für alle iPSP-Versuchsreihen

handelt es sich um einen blow-down Windkanal mit einer maximalen Messdauer von etwa 350 s bei $M_\infty = 3$. Während des Betriebs wird komprimierte Luft vom Speicherdruck von $p_t = 20$ bar auf $p_t = 1,2 \dots 5$ bar expandiert und in einer Düse beschleunigt. Der Machzahlbereich kann somit zwischen $M_\infty = 0,3 \dots 3,0$ eingestellt werden. Über eine Variation des Totaldrucks kann die Reynoldszahl in der Messstrecke zwischen $Re = (7 \dots 80) \cdot 10^6 / m$ eingestellt werden. Der Turbulenzgrad liegt im Unterschall bei $Tu \approx 1,2 \%$. Die Versuchsanordnungen sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Zur hier diskutierten Klärung der Fragestellungen wurde Aufbau 1 verwendet. Es kam eine *Phantom V.12* CMOS-Hochgeschwindigkeitskamera (a in Abb. 4) zum Einsatz. In Aufbau 1 wurde die Kamera außerhalb der Plenumkammer in ca. 1,4 m Entfernung zum Modell montiert. Zur Signaltrennung wurde ein Hochpassfilter mit einer Cut-off-Wellenlänge von $\lambda_c = 570$ nm und einer optischen Dichte $OD > 6$ eingesetzt, welcher vor dem Objektiv montiert worden ist. Zur Anregung der PSP wurden 2 *Luminus CBV-120 UV* Hochleistungs-LEDs (b) mit jeweils 10 W Lichtleistung eingesetzt. Diese wurden im cw-Modus betrieben. Jeweils eine sphärische Kollimatorlinse mit $F = -75$ mm Brennweite und einem Durchmesser von $D = 120$ mm vor den LEDs maximieren deren Intensität für kurze Integrationszeiten und sorgen für eine homogene Lichtverteilung. Die LEDs wurden in der Plenumkammer direkt an der Scheibe zur Messstrecke installiert. Die spezifischen Versuchsparameter und Aufnahmeconfiguration beider Versuchsreihen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Prinzipbedingt kommt es beim Betrieb des Windkanals während der Expansion der komprimierten Luft vom Druckspeicher in die Messstrecke zu extremen Temperaturänderungen der Modelloberfläche. Unter transsonischen Testbedingungen beträgt die Laufzeit des Kanals inklusive Regelprozess maximal 60 s. Eine homogene und stationäre Oberflächentemperatur kann unter den gegebenen Umständen nicht erreicht werden. Umso wichtiger ist eine präzise Kenntnis der Oberflächentemperatur auch aufgrund der hohen Temperatursensitivität der verwendeten drucksensitiven Farbe. Die Genauigkeit in der Temperaturbestimmung unter transsonischen Testbedingungen lag bei $\Delta T = 0.05$ K.

Nach Beendigung des Regelprozesses zur Einstellung der Strömungsbedingung, erfolgte ein Triggersignal, welches zum Start der Bildaufnahme, zum Öffnen des LED-Shutters und zum Start der Sensordatenerfassung genutzt wurde. Alle Komponenten liefen zu dem Zeitpunkt bereits im Loop- bzw. cw-Modus, wodurch ein stabiler Betriebszustand sichergestellt wurde. Die ebenfalls in Tabelle 1 gegebenen iPSP-Aufnahmeraten wurden entsprechend der Strömungsgeschwindigkeit angepasst, um eine aus Scharnowski und Kähler 2011 erwartete, auf den Modelldurchmesser bezogene, reduzierte Frequenz (Strouhalzahl) von $St_D = f \cdot D / U_\infty \approx 0,21$ auflösen zu können. Die Aufnahmeraten lagen bei $f_{s,iPSP} = [1; 2; 4]$ kHz.

3 Ergebnisse

3.1 Analyse der Modellbewegung

Für zuverlässige Messungen mit drucksensitiven Farben, welche über kein Referenzmolekül zur Korrektur von Schwankungen in der Beleuchtung verfügen, ist eine zeitlich und örtlich stabile Anregung eine wichtige Voraussetzung, siehe Liu und Sullivan 2005. Um darüber hinaus die Bestimmung möglicher charakteristischer Frequenzen mit größtmöglicher Genauigkeit durchführen zu können, ist eine Abschätzung systembedingter charakteristischer Frequenzen (Vibrationen der Beleuchtung, Modellbewegung, ...), zwingend notwendig. Die Heckstielhalterung des Modells stellt keine ideal-starre Aufhängung dar, wodurch eine Oszillation des Modells während der Versuche hervorgerufen wird. Die Auswertung der Bewegung eines in der Modelloberfläche befindlichen Markers ist in Abbildung 5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Modell eine spiralförmige Nick- und Gierbewegung mit einer Amplitude von maximal 0,5 mm vollführt (oben in Abb. 4). Die Fourier-Transformation des Zeitsignals (unten in Abb. 4) liefert die Resonanzfrequenz des Modells von $f_r = 39,2$ Hz. Die aufgrund der Modellbewegung zustande kommende, indirekte Verschiebung des Beleuchtungsmusters zwischen den beiden relevanten Strömungszuständen ($I_{\text{wind-off}} / I_{\text{wind-on}}$) betrug etwa ± 1 % bezogen auf den Modelldurchmesser. Aus Abbildung 5 wird ebenfalls ersichtlich, dass die Amplituden des horizontalen Bewegungsspektrums, im Bereich hochfrequenter Schwingungen, etwa zwei Größenordnungen über denen der restlichen Spektren liegen. Die für diese Auswertung zugrunde liegenden Daten wurden mit der Versuchsanordnung 2 (vgl. Abbildung 4) gewonnen. Das Spektrum der Modellbewegung beinhaltet in diesem Fall ebenfalls die Spektren der an der Messtrecke montierten Kamera und des Umlenkspiegels. Somit ergibt sich neben der Eigenfrequenz des Modells ein weiterer dominanter Peak bei $f \approx 170$ Hz. Es konnte jedoch in weiteren Analysen gezeigt werden, dass die Modellbewegung auf das Intensitätsverhältnis ($I_{\text{wind-off}} / I_{\text{wind-on}}$) lediglich einen Einfluss von $\Delta(I_{\text{wind-off}} / I_{\text{wind-on}}) \leq 0,3$ % hat und somit gegenüber den restlichen Einflussfaktoren nur unwesentlich zur Beeinflussung der Messgenauigkeit beiträgt. Im Spektrum des Windkanals (schwarz), welches über die Auswertung des Zeitsignals eines Markers an der Windkanalwand während eines Kanallaufs gewonnen wurde, zeigen sich neben dominanten, niederfrequenten Schwingungen auch ausgeprägte Peaks bei $f \approx [100, 200, 400]$ Hz, welche wahrscheinlich auf die hydraulische Ansteuerung des Regelventils zur Einhaltung des Totaldrucks im Windkanal zurückzuführen sind. Weitere Tests bei wechselnden Versuchsbedingungen zeigten, dass diese Charakteristik unabhängig von Strömungsparametern wie Mach- und Reynoldszahl konstant bleibt.

Die Heckstielhalterung des Modells stellt keine ideal-starre Aufhängung dar, wodurch eine Oszillation des Modells während der Versuche hervorgerufen wird. Die Auswertung der Bewegung eines in der Modelloberfläche befindlichen Markers ist in Abbildung 5 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Modell eine spiralförmige Nick- und Gierbewegung mit einer Amplitude von maximal 0,5 mm vollführt (oben in Abb. 4). Die Fourier-Transformation des Zeitsignals (unten in Abb. 4) liefert die Resonanzfrequenz des Modells von $f_r = 39,2$ Hz. Die aufgrund der Modellbewegung zustande kommende, indirekte Verschiebung des Beleuchtungsmusters zwischen den beiden relevanten Strömungszuständen ($I_{\text{wind-off}} / I_{\text{wind-on}}$) betrug etwa ± 1 % bezogen auf den Modelldurchmesser. Aus Abbildung 5 wird ebenfalls ersichtlich, dass die Amplituden des horizontalen Bewegungsspektrums, im Bereich hochfrequenter Schwingungen, etwa zwei Größenordnungen über denen der restlichen Spektren liegen. Die für diese Auswertung zugrunde liegenden Daten wurden mit der Versuchsanordnung 2 (vgl. Abbildung 4) gewonnen. Das Spektrum der Modellbewegung beinhaltet in diesem Fall ebenfalls die Spektren der an der Messtrecke montierten Kamera und des Umlenkspiegels. Somit ergibt sich neben der Eigenfrequenz des Modells ein weiterer dominanter Peak bei $f \approx 170$ Hz. Es konnte jedoch in weiteren Analysen gezeigt werden, dass die Modellbewegung auf das Intensitätsverhältnis ($I_{\text{wind-off}} / I_{\text{wind-on}}$) lediglich einen Einfluss von $\Delta(I_{\text{wind-off}} / I_{\text{wind-on}}) \leq 0,3$ % hat und somit gegenüber den restlichen Einflussfaktoren nur unwesentlich zur Beeinflussung der Messgenauigkeit beiträgt. Im Spektrum des Windkanals (schwarz), welches über die Auswertung des Zeitsignals eines Markers an der Windkanalwand während eines Kanallaufs gewonnen wurde, zeigen sich neben dominanten, niederfrequenten Schwingungen auch ausgeprägte Peaks bei $f \approx [100, 200, 400]$ Hz, welche wahrscheinlich auf die hydraulische Ansteuerung des Regelventils zur Einhaltung des Totaldrucks im Windkanal zurückzuführen sind. Weitere Tests bei wechselnden Versuchsbedingungen zeigten, dass diese Charakteristik unabhängig von Strömungsparametern wie Mach- und Reynoldszahl konstant bleibt.

3.2 Dynamische Charakterisierung des turbulenten Nachlaufs

Um eine Aussage treffen zu können, ob die iPSP-Messmethode in der Lage ist, die dynamischen Vorgänge mit geringen Amplituden im Nachlauf präzise nachzuweisen und charakte-

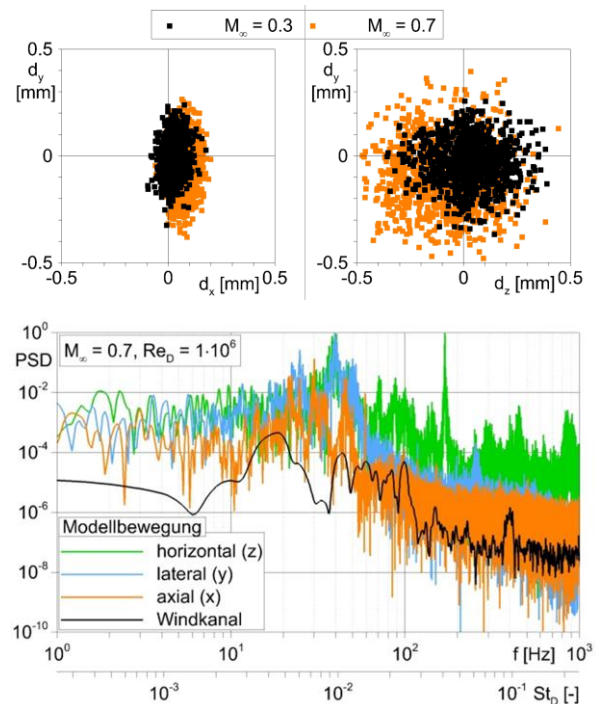


Abb. 5: Amplituden (oben) und Frequenzspektrum (unten) der Modellbewegung und des Windkanals ohne Modell (schwarz). Die Resonanzfrequenz des Modells beträgt $f_r = 39,2$ Hz.

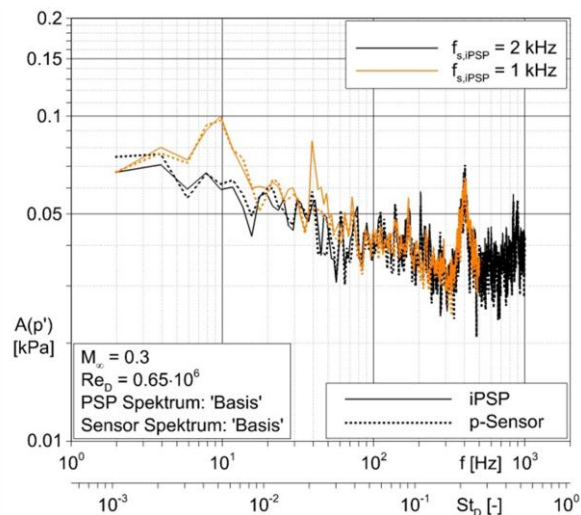


Abb. 6: Vergleich der Amplitudenspektren der Druckschwankung p' auf der Basis zwischen Drucksensoren (unterbrochene) und iPSP (durchgezogene) für unterschiedliche Abtastraten (farblich codiert), $M_\infty = 0,3$; $Re_D = 0,65 \cdot 10^6$

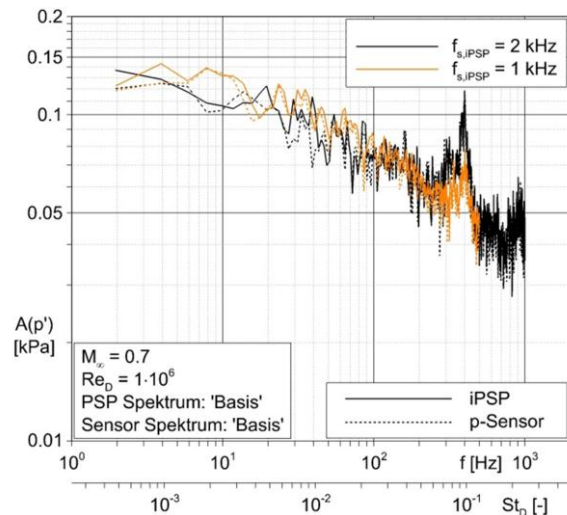


Abb. 7: Vergleich der Amplitudenspektren der Druckschwankung p' auf der Basis zwischen Drucksensoren (unterbrochene) und iPSP (durchgezogene) für unterschiedliche Abtastraten (farblich codiert), $M_\infty = 0,7$; $Re_D = 1 \cdot 10^6$

ristische Frequenzen aufzulösen, wurden zunächst die Amplitudenspektren der iPSP mit den Spektren der instationären Drucksensoren verglichen. Hierfür wurden die in diesem Bericht nicht näher diskutierten iPSP-Messdaten auf der Modellbasis verwendet. In der Nähe des relevanten Drucksensors wurde das Zeitsignal der Druckschwankungen $p'(t) = p_s(t) - p_{avg}$ aus den iPSP-Daten extrahiert. Zur besseren Vergleichbarkeit der Amplituden von $p'(t)$ ist das Signal des instationären Drucksensors, welches mit 10 kHz abgetastet wurde, an die jeweiligen Abtastrate der iPSP-Messung zusammengefasst worden. Die cut-off Frequenz f_c für die Fouriertransformation wurde ebenfalls entsprechend der iPSP Abtastrate gewählt und ist in Tabelle 1 gegeben. Alle 4 zur Offset-Korrektur genutzten Drucksensoren zeigen das gleiche Spektrum, weswegen aus Gründen der Übersichtlichkeit nur der bei $r/D = 0,85$ platzierte Sensor 3 im Folgenden zu Vergleichen mit der iPSP herangezogen. In den Abbildungen 6 und 7 sind die Amplitudenspektren der Druckschwankung p' in Kilo-Pascal über der Frequenz f für $M_\infty = 0,3$ sowie für $M_\infty = 0,7$ dargestellt. Variationen der iPSP-Abtastraten sind farblich codiert. Die durchgezogenen Verläufe zeigen die Spektren der iPSP und die unterbrochenen Verläufe die der instationären Drucksensoren. Die gute Übereinstimmung zwischen den Spektren der iPSP mit denen der Drucksensoren sowohl in der Amplitude als auch der Lage der charakteristischen Frequenzen zeigt, dass man mit Hilfe der iPSP-Messmethode in der Lage ist, die Strömungsphänomene mit geringen Amplituden präzise aufzulösen. Es bildet sich bei $M_\infty = 0,3$ jeweils ein dominanter Peak bei $f \approx 400$ Hz aus, der mit der, aus Scharnowski und Kähler 2011 erwarteten, Frequenz des charakteristischen Wirbelabwerfens bei einer reduzierten Frequenz von $St_D = 0,21$ gut harmonisiert. Bei $M_\infty = 0,7$ bilden sich dominante Peaks bei $f \approx 908$ Hz und wiederum bei $f \approx 400$ Hz aus. Der Peak bei $f \approx 908$ Hz entspricht ebenfalls der Frequenz des charakteristischen Wirbelabwerfens bei $St_D = 0,21$. Wie bereits anhand der Spektren in Abb. 5 erörtert, ist der Peak bei $f \approx 400$ Hz auf das hydraulische Regelventil des Windkanals zur Einhaltung des Totaldrucks zurückzuführen. Nachdem das Potenzial der iPSP-Messmethode zur präzisen Auflösung charakteristischer Frequenzen demonstriert wurde, soll im Folgenden die dynamische Charakterisierung der Nachlaufströmung diskutiert werden. Dafür wurden die lokalen Amplitudenspektren der Druckschwankungen p' in axialer Richtung entlang der Düse (Heckstielhalterung) bewertet. In den Abbildungen 8 und 9 sind die Ergebnisse der Nachlaufuntersuchungen für $M_\infty = 0,3$

und $M_\infty = 0,7$ dargestellt. Die Auswertung erfolgte analog zu Nakakita 2007. Im oberen Bereich der entsprechenden Abbildung ist das Amplitudenspektrum in Abhängigkeit der axialen Position x / D farblich codiert dargestellt. Bei von $M_\infty = 0,7$ (Abb. 9) wurde das Amplitudenspektrum aus 2 Versuchen mit unterschiedlichen Abtastraten zusammengesetzt. Da zum Erreichen der höheren Abtastrate $f_{s,iPSP} = 2000$ Hz der Bildausschnitt der Kamera verkleinert werden musste, erstreckt sich das Amplitudenspektrum zwischen $f = 1000 \dots 2000$ Hz über einen kleineren Bereich entlang x / D . Im unteren Teil der Abbildungen 8 und 9 befindet sich jeweils eine Gesamt- und Detailansicht der ensemble-gemittelten Druckverteilung im Nachlauf. Es wird ersichtlich, dass die charakteristischen Frequenzen des dominanten Wirbelabwerfens, $f \approx 405$ Hz bei $M_\infty = 0,3$ und $f \approx 908$ Hz bei $M_\infty = 0,7$, über einen großen Bereich entlang des Nachlaufs auftreten. In Bereichen nahe der Basis ist eine geringe Dynamik feststellbar. Die kohärenten Strukturen sind aufgrund ihrer Größe und Konvektionsgeschwindigkeit zu träge, um in diesem Bereich für eine starke Interaktion mit der Düse (dem Heckstiel) zu sorgen. Im Bereich der mittleren Wiederanlegeposition des Nachlaufs befindet sich das Gebiet mit der größten Dynamik und den stärksten Amplituden, in dem, zusätzlich zur Ablösefrequenz der dominanten kohärenten Strukturen, ein breites Frequenzspektrum nachweisbar ist. Diese mittleren Positionen des Wiederanlegens befinden sich bei $M_\infty = 0,3$ etwa bei $x / D \approx 1,15$ und im Fall von $M_\infty = 0,7$ etwa bei $x / D \approx 1,3$. Die Düse endet am Original bei $x / D = 1,2$ und ist somit offensichtlich einer starken dynamischen Belastung während der Startphase ($M_\infty \leq 0,7$) ausgesetzt. In den Spektren in Abbildung 8 und 9 werden ebenfalls die vom Windkanal aufgeprägten Störungen mit der Frequenz um $f \approx 400$ Hz ersichtlich, vgl. Abschnitt 3.1. Die rasterförmig auftretende, punktuelle Störung in der gemittelten Druckverteilung besonders in Abbildung 8 ist auf die Marker für die Bildverzerrung zurückzuführen, an deren Stelle kein PSP-Signal zur Verfügung stand. Die Standardabweichung der Differenz zwischen den iPSP-Daten und den Sensordaten betrug im Fall der Nachlaufuntersuchungen $\sigma \approx 3$ %. Hauptsächlich aufgrund der hohen Temperaturabhängigkeit und da sich im Heckstiel kein

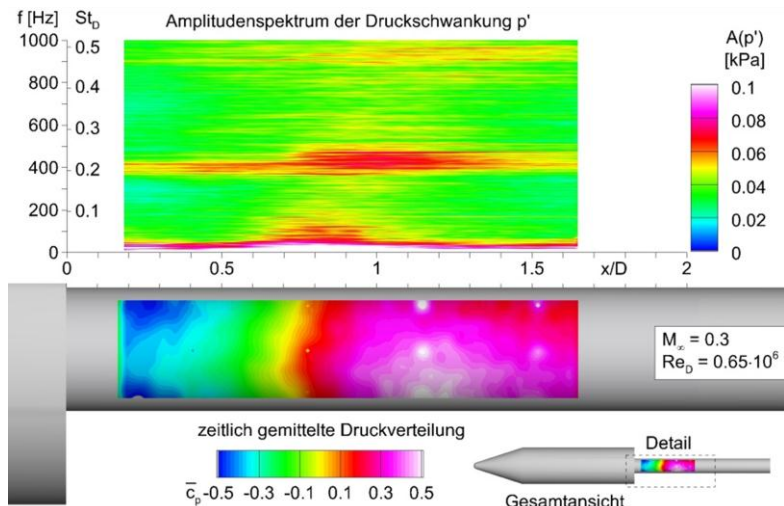


Abb. 8: oben: Amplitudenspektrum der Druckschwankung p' im Nachlauf bei $M_\infty = 0,3$; unten: zeitlich gemittelte Druckverteilung \bar{c}_p entlang der Heckstielhalterung im Nachlauf.

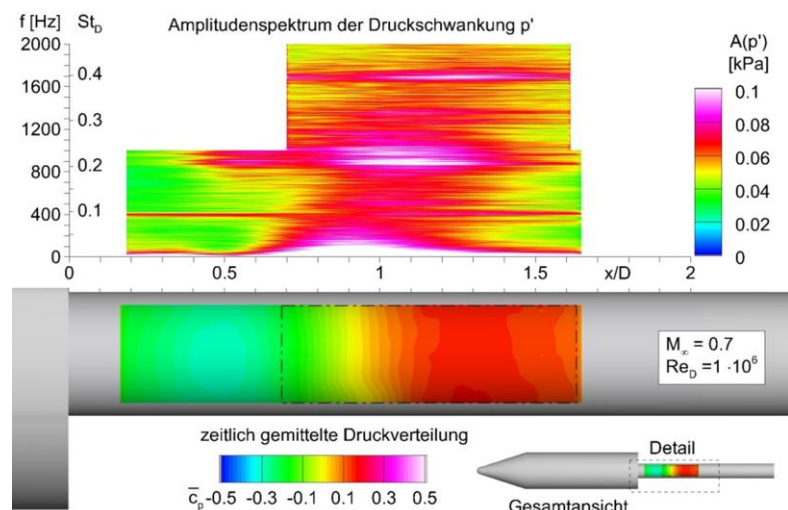


Abb. 9: oben: Amplitudenspektrum der Druckschwankung p' im Nachlauf bei $M_\infty = 0,7$; unten: zeitlich gemittelte Druckverteilung \bar{c}_p entlang der Heckstielhalterung im Nachlauf.

Die kohärenten Strukturen sind aufgrund ihrer Größe und Konvektionsgeschwindigkeit zu träge, um in diesem Bereich für eine starke Interaktion mit der Düse (dem Heckstiel) zu sorgen. Im Bereich der mittleren Wiederanlegeposition des Nachlaufs befindet sich das Gebiet mit der größten Dynamik und den stärksten Amplituden, in dem, zusätzlich zur Ablösefrequenz der dominanten kohärenten Strukturen, ein breites Frequenzspektrum nachweisbar ist. Diese mittleren Positionen des Wiederanlegens befinden sich bei $M_\infty = 0,3$ etwa bei $x / D \approx 1,15$ und im Fall von $M_\infty = 0,7$ etwa bei $x / D \approx 1,3$. Die Düse endet am Original bei $x / D = 1,2$ und ist somit offensichtlich einer starken dynamischen Belastung während der Startphase ($M_\infty \leq 0,7$) ausgesetzt. In den Spektren in Abbildung 8 und 9 werden ebenfalls die vom Windkanal aufgeprägten Störungen mit der Frequenz um $f \approx 400$ Hz ersichtlich, vgl. Abschnitt 3.1. Die rasterförmig auftretende, punktuelle Störung in der gemittelten Druckverteilung besonders in Abbildung 8 ist auf die Marker für die Bildverzerrung zurückzuführen, an deren Stelle kein PSP-Signal zur Verfügung stand. Die Standardabweichung der Differenz zwischen den iPSP-Daten und den Sensordaten betrug im Fall der Nachlaufuntersuchungen $\sigma \approx 3$ %. Hauptsächlich aufgrund der hohen Temperaturabhängigkeit und da sich im Heckstiel kein

Drucksensor zur Offset-Korrektur befand, ist die Messunsicherheit in diesem Fall relativ hoch. Zum Vergleich dazu liegt die Messunsicherheit im Fall der Basisuntersuchungen lediglich bei $\sigma \leq 0,4 \%$.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Gemeinschaftsarbeit konnte die Leistungsfähigkeit der instationären Pressure-Sensitive Paint (iPSP)-Messmethode zur experimentellen Charakterisierung der turbulenten Nachlaufströmung eines generischen Raumtransportermodells im *Trisonischen Windkanal München* im Unterschall bei den Machzahlen $M_\infty = [0,3; 0,7]$ erfolgreich demonstriert werden. In der hier diskutierten Versuchsreihe ist es mit Hilfe der iPSP-Messmethode unter Verwendung einer Polymer-/ Keramik-Trägerschicht in Kombination mit PtTFPP als drucksensitive Moleküle gelungen, charakteristische Frequenzen in der Strömung bis $f = 2000$ Hz zuverlässig und mit hoher örtlicher Auflösung zu bestimmen. Der Vergleich mit instationären Drucksensoren zeigt die Verlässlichkeit der Ergebnisse mit einer mittleren Messunsicherheit von $0,4 \leq \sigma \leq 3 \%$. Zielführend auf die wissenschaftlichen Fragestellungen konnten anhand der Ergebnisse die erwarteten Frequenzen des dominanten Wirbelabwerfens bei beiden Machzahlen nachgewiesen werden. Die dominanten Frequenzen liegen bei $f \approx [405; 908]$ Hz für $M_\infty = [0,3; 0,7]$, was einer erwarteten reduzierten Frequenz von $St_D \approx 0,21$ entspricht. Ebenfalls ist es gelungen, die Dynamik der kohärenten Strukturen im Ablösegebiet besonders an der Position des Wiederanlegens zu bestimmen. Da die Anlegeposition auf der Düse liegt und eine Verkürzung der Düse zur Reduzierung der Lasten ausgeschlossen ist, sollen zukünftig an einem zwei-dimensionalen Modell mit Treibstrahlsimulation Möglichkeiten zur Strömungsbeeinflussung und weiterführende Untersuchungen zur Charakterisierung der Strömungs-/ Struktur-Interaktion mit zeitlich und örtlich hoch auflösenden Geschwindigkeits- und Druckmesstechniken durchgeführt werden. Daraus sollen effiziente Mechanismen zur Reduzierung der dynamischen Lasten im Nachlauf abgeleitet werden.

Dankesworte

Das dargestellte Forschungsprojekt wurde teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB – TR40 (Technologische Grundlagen für den Entwurf thermisch und mechanisch hochbelasteter Komponenten zukünftiger Raumtransportsysteme) unterstützt.

Literatur

- [1] Bitter, M., Klein, C., Kähler, C.J., 2009: „PSP und μ PSP Untersuchungen zur Freistrahlm/Wand-Interaktion im Unter- und Überschall“, 17. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Erlangen, Deutschland
- [2] Bitter, M., Scharnowski, S., Hain, R., Kähler, C.J., 2011: “High repetition-rate piv investigations on a generic rocket model in sub- and supersonic flows”, *Experiments in Fluids*, 50, pp. 1019–1030
- [3] Gregory, J.W., Asai, K., Kameda, M., Liu, T., Sullivan, J.P., 2008: “A review of pressure-sensitive paint for highspeed and unsteady aerodynamics”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 222, pp. 249–290
- [4] Liu, T., Sullivan, J.P., 2005: “Pressure and Temperature Sensitive Paints”, *Experimental Fluid Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [5] Nakakita K., 2007: “Unsteady pressure distribution measurement around 2d-cylinders using pressure-sensitive paint”, 25th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Miami, Florida, USA
- [6] Scharnowski, S., Kähler, C.J., 2011: “Investigation of the wake dynamics of a generic space launcher at $Ma = 0.7$ by using high-repetition rate PIV”, 4th European Conference for Aerospace Sciences, Saint Petersburg, Russia
- [7] Sugimoto, T., Kitashima, S., Numata, D., Nagai, H., Asai, K., 2012: “Characterization of frequency response of pressure-sensitive paints”, 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Nashville, Tennessee, USA