

CHARAKTERISIERUNG VON NACHLAUFSTRÖMUNGEN BIS $Ma = 2,5$ MIT DER FERNMIKROSKOPISCHEN HIGH-SPEED-PIV

CHARACTERIZATION OF BOUNDARY- AND WAKE-FLOWS UP TO $Ma = 2.5$ USING HIGH-SPEED LONG-RANGE MICRO - PIV

Martin Bitter, Rainer Hain, Jürgen Müller, Christian J. Kähler

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

Hochgeschwindigkeits-Mikro-PIV, Fernmikroskopie, Überschall
high-speed micro-PIV, long-range microscope, supersonic flow

Zusammenfassung

Zur Charakterisierung turbulenter Wirbelstrukturen im Nachlauf eines generischen Raketenmodells im Unter- und Überschall und der Untersuchung von Grenzschichten auf diesem Körper wurden Standard-PIV und Highspeed-Micro-PIV Messungen am Trisonischen Windkanal der Universität der Bundeswehr München (TWM) durchgeführt. Die erhobenen Daten sollen nicht nur zur Validierung von Strömungssimulationen eingesetzt werden, sondern sollen auch Aufschluss über die Dynamik der turbulenten Strukturen im Nachlauf liefern. Die Grenzschichten im Unter- und Überschall konnten mit der mikroskopischen Particle Image Velocimetry durch den Einsatz eines Fernmikroskops mit Single-Pixel-Auflösung gemessen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die angewandte Messtechnik in der Lage ist, Strukturen in der Strömung über einen großen Machzahlbereich aufzulösen.

Einleitung

Im Rahmen des großen interdisziplinären Forschungsprojektes SFB TR40, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert wird, sollen Fragestellungen zum Thema *Integration von Raketenantrieben in die Raketenstruktur von Raumtransportsysteme der nächsten Generation* behandelt werden. Hauptaugenmerk liegt dabei

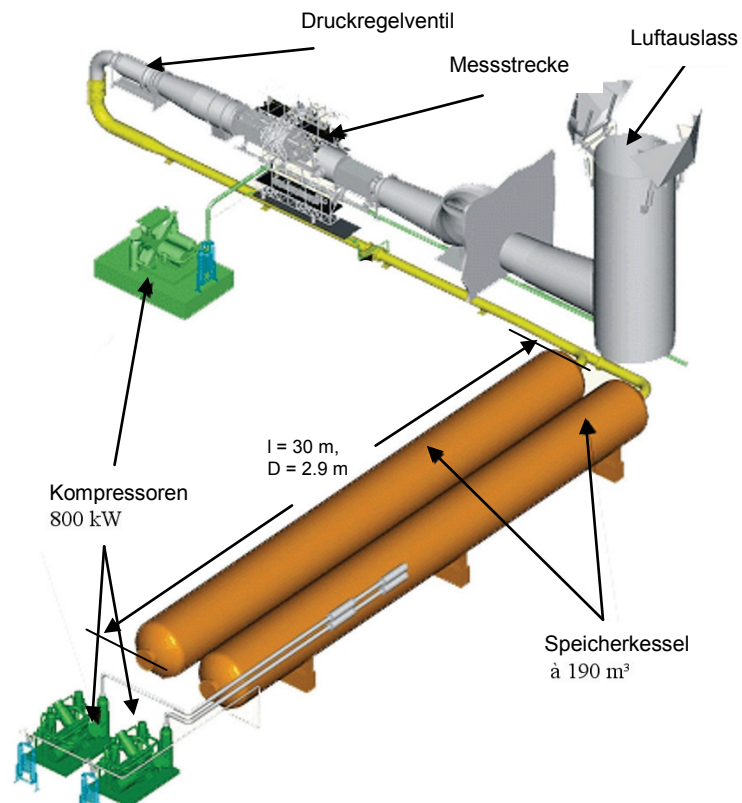


Abb. 1. Schematische Darstellung des Trisonischen Windkanals der Universität der Bundeswehr München (TWM) und dessen Infrastruktur

auf den mechanisch und thermisch hochbelasteten Komponenten im Heckbereich der Rakete, wie beispielsweise Brennkammer, Schubdüse oder die Struktur des Heckbereiches. Um eine Effizienzsteigerung zukünftiger Systeme zu erreichen, ist eine Optimierung des gesamten Systems angestrebt. Die Ergebnisse, die in diesem Bericht präsentiert werden, sind der erste Schritt, um die Interaktion zwischen der Schubdüse und den dynamischen Strukturen im Heckbereich zu untersuchen. Bis zum heutigen Zeitpunkt sind verschiedene Raketenkonfigurationen sowohl mit als auch ohne Abgasstrahlsimulation mit klassischer Messtechnik (Henckels et al. 2007) oder der Particle Image Velocimetry (Oudheusden et al. 2008) untersucht worden. In dieser Abhandlung wird die Anwendung von Standard - Particle Image Velocimetry (PIV) und deren Erweiterung zur fernmikroskopischen Hochgeschwindigkeits - PIV vorgestellt und die Leistungsfähigkeit des Systems am Trisonischen Windkanal (TWM) diskutiert. Nur mit einer solchen Erweiterung ist man in der Lage, den Anforderungen, die an die Daten zur Validierung moderner Rechenverfahren (DES, LES, URANS) gestellt werden, gerecht zu werden.

Aufbau und Durchführung

Untersuchungen mit der Standard-PIV und der fernmikroskopischen Highspeed-PIV wurden am Trisonischen Windkanal der Universität der Bundeswehr München durchgeführt, siehe Abb. 1. Hierbei handelt es sich um einen Blow-down-Kanal. Im Windkanal kann über ein Druckregelventil ein Totaldruckbereich von $p_t = 2...5$ bar eingestellt werden. Somit ist ein Reynoldszahlbereich von $Re = [7 - 80] \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ erreichbar. Der Machzahlbereich kann zwischen 0,3 und 3,0 stufenlos eingestellt werden. Die Messstrecke mit den Abmessungen $675 \text{ mm}^H \times 300 \text{ mm}^W$ kann sowohl mit festen als auch mit geschlitzten Wänden ausgestattet werden. Der benötigte Luftmassenstrom zum Betrieb des Kanals wird in 2 Kesseln zu je 190 m^3 bei einem Druck von 20 bar gespeichert. Somit wird ein maximaler Massendurchsatz von 240 kg/s bei $Ma = 1$ erzeugt. Die maximale Messzeit von bis zu 150 Sekunden wird bei $Ma = 3$ erreicht. Die Untersuchungen wurden an einem rotationssymmetrischen Plexiglasmodell durchgeführt. Eine Prinzipskizze des experimentellen Aufbaus ist in Abbildung 2 gezeigt. Das Modell der Länge $l = 317 \text{ mm}$ bestand aus einem stumpfen Kegel mit einem Nasenradius von $R = 10 \text{ mm}$ und einem Öffnungswinkel des Kegels von 36° und einem $l = 186 \text{ mm}$ langen zylindrischen Teil mit $d = 100 \text{ mm}$ Durchmesser. Das Modell wurde über eine 34 mm dicke Heckstielhalterung in der Messstrecke befestigt. Für die Standard-PIV

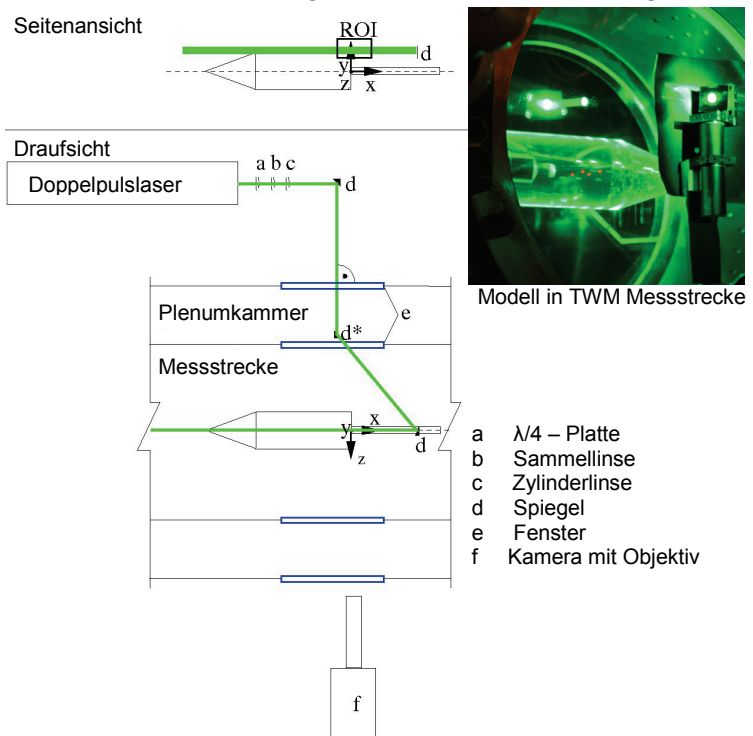


Abb. 2. Experimenteller Aufbau für PIV-Messungen am Trisonischen Windkanal (TWM)

Untersuchungen wurde eine *pco.SensiCam QE* CCD-Kamera mit 12 bit Dynamik und einer Auflösung von $1280 \times 1024 \text{ px}^2$ zusammen mit einem 50 mm *Zeiss Macro* Objektiv eingesetzt. Als Beleuchtungsquelle wurde ein *Litron Nd:YAG* Doppelpuls-Laser mit $2 \times 200 \text{ mJ}$ Pulsenergie, einer Strahldivergenz von $D < 2 \text{ mrad}$ und $t_p = 5 \text{ ns}$ Pulsdauer verwendet. Die Lichtschnittdicke für die Standard-PIV Untersuchungen lag bei ca. $s_l \approx 500 \text{ }\mu\text{m}$. Die High-

speed - Untersuchungen wurden mit einem *Quantronix* Darwin Duo Nd:YLF Doppelpuls laser mit $t_p \approx 120$ ns Pulsdauer und einer *Phantom V.12* CMOS-Kamera durchgeführt. Sämtliche Highspeed - Messungen wurden mit einer Bildaufnahme frequenz von 500 Hz gemacht. Es wurde ein Vergleich verschiedener optischer Komponenten hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz zu mikroskopischen PIV Untersuchungen gemacht.

	Standard PIV	HS- μ -PIV ^{Zeiss}	HS- μ -PIV ^{K2}
Ma	1,8; 2,1; 2,5	0,41; 0,7; 1,2; 1,8; 2,1; 2,5	0,41; 0,7
Re _D x10 ⁶	3,8 – 4,3	2,7 – 4,9	2,7; 4,0
ρ_t [bar]	3; 3,5	3; 3,5	3
Δt [μ s]	2,6	0,8	0,8
FOV [mm ²]	127 x 60	10 x 8	8 x 6
Abbildungsmaßstab M	1 : 18,4	1,6 : 1	2 : 1
Bildanzahl	250	2780	2780
Aufnahmefrequenz [Hz]	1	500	500

Tab. 1. Parameter für Standard- und μ -PIV Untersuchungen

Die Abbildungsqualität und Intensität der Partikelbilder eines *Zeiss* 100 mm Macro Objektiv in Verbindung mit vier *Kenko Pro300DG 2fach* Telekonvertern mit einer Gesamtbrennweite von $f = 1600$ mm wurde mit einem *Infinity K2* Fernmikroskop verglichen. Mit den verschiedenen optischen Systemen konnten Abbildungsmaßstäbe von 1,6:1 (*Zeiss*) bzw. 2:1 (*Infinity*) erreicht werden. Alle relevanten Testparameter sind in Tabelle 1 zusammen gestellt. Aufgrund von Dichteunterschieden während des Kanalbetriebes zwischen der bedruckten Plenumkammer und der äußeren Umgebung der Messstrecke ist ein senkrechter Durchgang des Laserstrahls durch die äußere Scheibe des Windkanals erforderlich, um eine Ablenkung des Lichtstrahls aufgrund der Änderung des optischen Weges infolge des Dichteunterschiedes zu verhindern. Der Spiegel d^* in Abbildung 2 wurde so eingestellt, dass der Laserstrahl nahezu unter dem Brewsterwinkel in die Messstrecke eintritt. Auf diese Weise können Intensitätsverluste, welche von Reflexionen verursacht werden, minimiert werden. Aus dem gleichen Grund wurde eine $\lambda/4$ -Platte zur Polarisation des Laserlichtes unmittelbar an den Austritt des Lichtstrahls aus dem Laser in den Strahlengang eingebracht. Die höhere Strahldivergenz des Highspeed-Lasers von $D \approx 8$ mrad führt zu einer minimalen Lichtschnittdicke von ca. $s_l \approx 1500$ μ m.

Tracerpartikel und Abbildungsqualität

Für Untersuchungen mit der mikroskopischen Particle Image Velocimetry ist eine hohe Tracerpartikelkonzentration mit homogener Verteilung eine der wichtigsten Voraussetzungen, um ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis und somit verlässliche Daten mit minimiertem systematischen Fehler bei gleichzeitig starker optischer Vergrößerung und geringer Lichtschnittdicke zu bekommen, Kähler et al. 2006a,b. In den durchgeführten Untersuchungen wurden die Tracerpartikel mit Hilfe von pneumatischen Seedinggeneratoren erzeugt, in-dem Luft mit Überdruck durch mit Lochdüsen versehene Lanzen in das Seedingfluid eingebracht wurde, siehe Kähler et al. 2002. Als

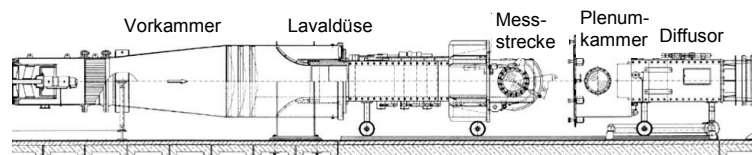


Abb. 3. Relevante Hauptbestandteile des TWM in der Nähe der Messstrecke

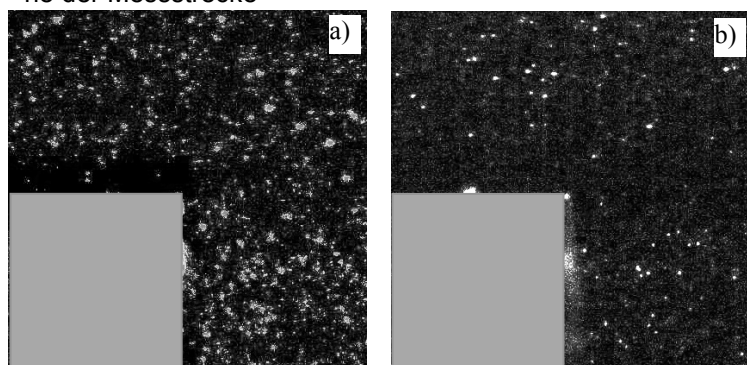


Abb. 4. 6×6 mm² Rohbild einer PIV Aufnahme bei Ma = 0,41: a) 100 mm *Zeiss* macro Objektiv + 4* 2fach Telekonverter; b) *Infinity K2* Fernmikroskop

Seedingfluid wurde DEHS (Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat) verwendet. Die Partikel wurden in die Vorkammer des Windkanals eingebracht, bevor die Strömung weiter stromab durch die im Kanal befindlichen Gleichrichter und Turbulenzsiebe beruhigt wird, vgl. Abbildung 3. Da für die homogene Seedingproduktion der Vordruck im Partikelgenerator konstant bleiben muss, wurde eine automatische Anpassung des Vordrucks an die wechselnden Totaldrücke innerhalb des Kanals während der einzelnen Versuche vorgesehen. In Abbildung 4 sind zwei Rohbilder dargestellt, welche die Partikelkonzentration an der Hinterkante des Modells jeweils aufgenommen mit dem 100 mm Zeiss Macro + 4* 2fach Telekonverter (links) und dem *Infinity K2* Fernmikroskop (rechts) bei $Ma = 0,41$ und $Re = 2,7 \cdot 10^6$ zeigen. Die Größe des Bildausschnitts betrug $6 \times 6 \text{ mm}^2$. Die höhere Partikelkonzentration in Abb. 4 a) ist auf die geringere effektive Blendenzahl im Vergleich zum Fernmikroskop zurückzuführen. Nachteilig

auf die Messgenauigkeit wirkt sich beim Einsatz von mehreren Telekonvertern die Änderung der Intensitätsverteilung der einzelnen Partikelbilder aus. Die Partikelbildgröße eines einzelnen Partikels kann für mikroskopische PIV bis 10 px betragen. Das Partikel sollte aber dennoch eine Gaußförmige Intensitätsverteilung aufweisen, damit die Verfahren zur Bestimmung der Partikelbildverschiebung zuverlässig mit sub-pixel-Genauigkeit angewandt werden können, (Kähler et al. 2006a). Das leichte Verschmieren der einzelnen Partikelbilder wird durch die längere Pulsdauer des Highspeed-Lasers im Vergleich zu einem Standard-PIV Laser verursacht. Dadurch kommt es zur Reduzierung der Messgenauigkeit, da die Verzerrung den Korrelationspeak ebenfalls verschmiert und somit der Gauß-Fit zur Bestimmung der Partikelbildverschiebung beeinträchtigt wird (Kähler et al. 2006a). Des Weiteren treten optische Verzerrungen und Intensitätsverluste durch die Windkanalscheiben innerhalb des optischen Weges auf.

Ergebnisse der PIV-Untersuchungen

Die zeitaufgelöste Charakterisierung der turbulenten Nachlaufströmung und die genaue Bestimmung der Stärke der entsprechenden Schubspannungen sind für die Validierung von Large-Eddy- (LES) und Unsteady Reynolds Averaging Navier-Stokes- (URANS) Simulationen von grundlegender Bedeutung. Die präzise Bestimmung dieser Strömungsparameter im Unter- und Überschall ist von großer Wichtigkeit für den Erfolg des Projektes. Der Einsatz moderner optischer Messmethoden kann als ein Weg zur Erreichung der Projektziele angesehen werden. Die folgenden Ergebnisse zeigen

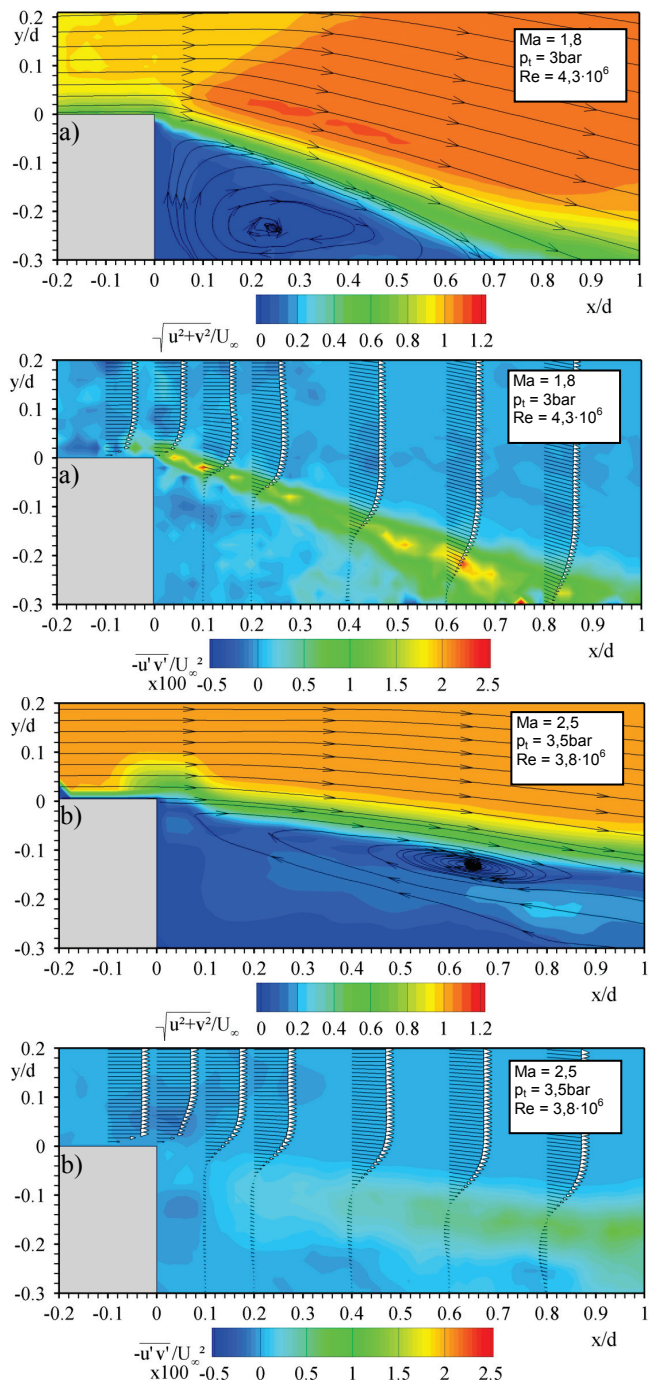


Abb. 5. Mittleres Geschwindigkeitsfeld und Reynoldsspannungen an der Hinterkante:(a) $Ma = 1,8$; (b) $Ma = 2,5$

erste Ansätze durch den Einsatz modernster optischer Komponenten und geben Hinweise für Verbesserungen bei zukünftigen Arbeiten.

Charakterisierung der Nachlaufströmung mit Standard-PIV

Für jeden Testfall wurden $N = 250$ Doppelbilder aufgenommen. Zur Auswertung wurde die *LaVision DaVis 7.2* Software verwendet. Der Algorithmus zur Auswertung der Partikelbildverschiebung war in diesem Fall eine normierte *multi-pass* Kreuzkorrelation mit Verkleinerung der Abfragefenster ($128 \times 128 \text{ px}^2 \rightarrow 64 \times 64 \text{ px}^2$) und 50 % Overlap. Die mittleren Geschwindigkeitsfelder und Verläufe der Reynoldsen Schubspannungen sind für zwei ausgewählte Beispiele in Abbildung 5 für $Ma = [1,8; 2,5]$ dargestellt. Es konnte gezeigt werden, dass selbst mit der in diesen Fällen geringen Doppelbildanzahl eine qualitativ gute Auflösung der Strömungsphänomene im Nachlauf erreicht werden kann. Die Größe des Rezirkulationsgebietes verdoppelt sich ungefähr mit Steigerung der Machzahl von $Ma = 1,8$ zu $Ma = 2,5$, wobei sich die Wiederanlegeposition im zweiten Fall außerhalb des Bildes befindet. Ein Anwachsen der Scherschicht, dargestellt durch die turbulente Schubspannungsverteilung $-\overline{u'v'}$, kann ebenfalls herausgestellt werden. Das Anfachen der Turbulenzproduktion in der Scherschicht im gleichen Maße wie in den vorangegangenen Fällen startet direkt am Ablösepunkt an der Hinterkante für $Ma = 1,8$ und setzt für $Ma = 2,5$ weiter stromab bei $x/d \approx 0,13$ ein. Die Schubspannungsverläufe werden für $Ma = 1,8$ strömungsmechanisch sinnvoll wiedergegeben. Für $Ma = 2,5$ macht sich allerdings die geringe örtliche Auflösung bemerkbar. Daraus wird ersichtlich, dass für qualitativ zuverlässige Messungen der turbulenten Schubspannungen und Aussagen über deren Verlauf der Einsatz eines Fernmikroskops zwingend erforderlich ist. Die Topologie der globalen Umströmung hingegen kann aus den mit der Standard-PIV gemessenen Daten gezeigt werden.

Ergebnisse der fernmikroskopischen Highspeed-PIV

In diesen Fällen wurden jeweils $N = 2780$ Doppelbilder in den 8 GB internen Speicher der Highspeed-Kamera aufgenommen. Aufgrund von Dunkelstromrauschen der Highspeed-CMOS-Kamera war eine Bildbearbeitung der Einzelbilder vor der Auswertung nötig. Dazu wurde zuerst vor jeder Messung ein Intensitätsabgleich der Kamera vorgenommen. Letzte ungewünschte Artefakte, die sich bei der Auswertung als störend erwiesen, wurden durch Subtraktion eines gleitenden Mittelwertes über die gesamte Bildanzahl von jedem Einzelbild eliminiert. Dabei wurde darauf geachtet, dass das Mittelwertbild aufgrund der hellen Partikel eine höhere mittlere Intensität als das Einzelbild aufweist. Dieser Offset wurde vor der Subtraktion des Mittelwertbildes von den Einzelbildern wieder ausgeglichen, um eine Deformierung der Partikelbilder oder gar eine Auslöschung einzelner Partikel mit geringerer Intensität zu vermeiden. Zusätzlich musste eine Wackelkorrektur mit sub-pixel-Ge-

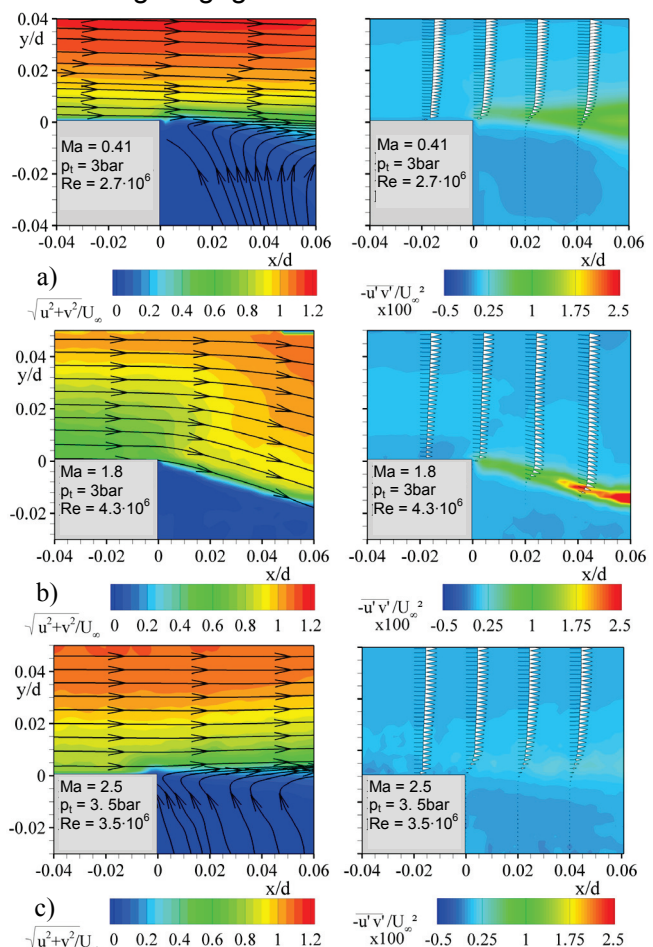


Abb. 6. Gemittelte Geschwindigkeitsamplituden (links) und turbulente Schubspannungsverteilungen (rechts) an der Hinterkante für diverse Machzahlen

naugigkeit, wie sie in DaVis implementiert ist, vorgenommen werden, um geringe transversale Bewegungen des Modells auszugleichen. Als erster Schritt wurde ein *multi-pass sum-of-correlation* Algorithmus mit Genauigkeit 2. Ordnung, Verkleinerung der Abfragefenster ($128 \times 128 \text{ px}^2 \rightarrow 32 \times 32 \text{ px}^2$) und 50% Overlap angewendet, um ein initiales Vektorfeld zu berechnen. Dieses Feld wurde für die Berechnung des finalen Vektorfeldes vorgegeben, wobei in diesem Fall ein normierter *multi-pass* Kreuzkorrelationsalgorithmus mit konstanter Größe der Abfragefenster ($64 \times 64 \text{ px}^2$) und 75 % Overlap verwendet wurde. Drei Ergebnisse einer subsonischen Strömung bei $Ma = 0,41$ und zweier Überschallströmungen bei $Ma = [1,8; 2,5]$ sind in Abbildung 6 dargestellt. Bei der subsonischen Strömung kann ein schnelles Anwachsen der Scherschicht innerhalb der ersten 6 % stromab des Modells festgestellt werden. Mit steigender Machzahl zu supersonischen Strömungen wird die Scherschicht dünner und das Anfachen der Turbulenzproduktion nimmt bis etwa $Ma \approx 2$ zu. Bis zu dieser Machzahl kann eine kontinuierliche Verkleinerung des Rezirkulationsgebietes festgestellt werden. Die Wiederanlegestelle verlagert sich zunehmend in Richtung der Hinterkante des Körpers. Für Strömungen $Ma > 2$ erfolgt ein Anwachsen des Ablösegebietes und die Wiederanlegeposition verschiebt sich stromab (vgl. auch Abb. 5.). Bei $Ma = 2,5$ ist analog zu den Standard-PIV-Messungen eine deutliche Reduzierung der turbulenten Schubspannungen an der Hinterkante im Vergleich zu $Ma = [0,41; 1,8]$ zu sehen. Eine Analyse zur Genauigkeit der Berechnung der Reynoldsen Normalspannungen in Bezug auf die Größe der finalen Auswertefenster soll im Folgenden noch diskutiert werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7 dargestellt. Die Kurven geben den Verlauf der Reynoldsen Normalspannungen $\overline{u'^2}$ entlang der Höhe der turbulenten Grenzschicht wieder. Hierfür wurden die lokalen Normalspannungswerte über $x/d = 1\%$ gemittelt und aufgetragen. Die durchgezogenen Kurven geben den Verlauf der Werte wieder, welche mit der *multi-pass* Kreuzkorrelation (Initialfeld aus *sum-of-correlation* vorgegeben), konstanter Größe der Auswertefenster von $64 \times 64 \text{ px}^2$ und 75 % Overlap bestimmt worden sind. Die gestrichelten Kurven zeigen die Ergebnisse des gleichen Auswertefensters mit konstanter Größe der Auswertefenster von $32 \times 32 \text{ px}^2$ und 50 % Overlap. Somit ist die effektive örtliche Auflösung in beiden Fällen die gleiche. Es kann ein deutlicher Offset zwischen beiden zusammengehörigen Kurven ausgemacht werden, welcher zu einem schein-

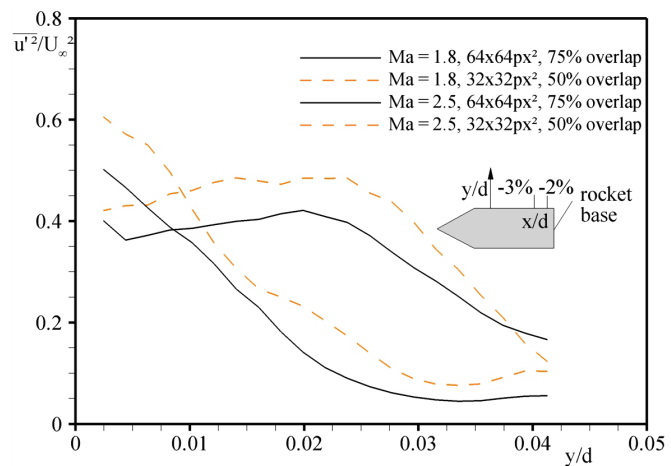


Abb. 7. Verlauf der Normalspannungen $\overline{u'^2}$ für verschiedene Machzahlen gemittelt über $x/d = 1\%$. Vergleich unterschiedlicher finaler Auswertefenstergrößen.

den Verlauf der Reynoldsen Normalspannungen $\overline{u'^2}$ entlang der Höhe der turbulenten Grenzschicht wieder. Hierfür wurden die lokalen Normalspannungswerte über $x/d = 1\%$ gemittelt und aufgetragen. Die durchgezogenen Kurven geben den Verlauf der Werte wieder, welche mit der *multi-pass* Kreuzkorrelation (Initialfeld aus *sum-of-correlation* vorgegeben), konstanter Größe der Auswertefenster von $64 \times 64 \text{ px}^2$ und 75 % Overlap bestimmt worden sind. Die gestrichelten Kurven zeigen die Ergebnisse des gleichen Auswertefensters mit konstanter Größe der Auswertefenster von $32 \times 32 \text{ px}^2$ und 50 % Overlap. Somit ist die effektive örtliche Auflösung in beiden Fällen die gleiche. Es kann ein deutlicher Offset zwischen beiden zusammengehörigen Kurven ausgemacht werden, welcher zu einem schein-

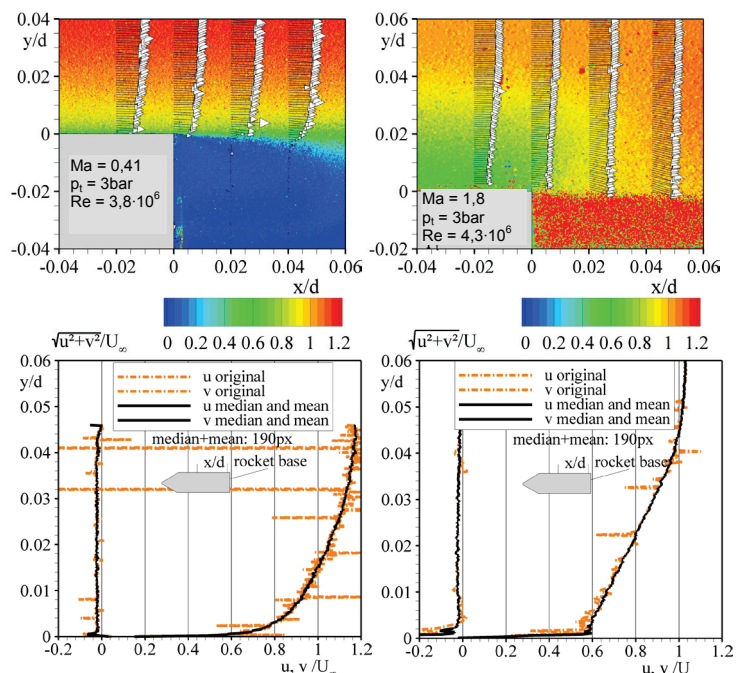


Abb. 8. oben: mittleres Geschwindigkeitsfeld aus Single-Pixel Auswertung, jeder 3. Vektor in y -Richtung dargestellt für $Ma = [0,41; 1,8]$. unten: Extrahierte Geschwindigkeitsprofile für u/U_∞ und v/U_∞ gemittelt über 130 px.

bar erhöhten Anfachen turbulenter Schwankungen innerhalb der Grenzschicht führt. Der Unterschied ist durch die Erhöhung des Rauschanteils durch die Verwendung von kleineren Abfragefenstern zu erklären, Raffel et al. 2007.

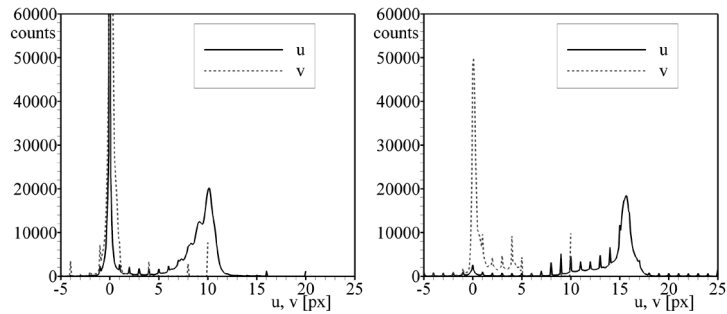


Abb. 9. Wahrscheinlichkeitsdichte-Verteilung (PDF) der Single-Pixel Auswertung: a) $Ma = 0,41$; b) $Ma = 1,8$

Single-Pixel Auswertung

Um die örtliche Auflösung der vorangegangenen Auswertalgorithmen zu erhöhen, sind Auswertungen mit der Single-Pixel Ensemble-Korrelation durchgeführt worden, Kähler et al. 2006a, b. Die gemittelten Geschwindigkeitsfelder jeweils einer Unterschall- und einer Überschallströmung ($Ma = [0,41; 1,8]$), welche eine ausreichend hohe Partikeldichte aufwiesen, sind in Abbildung 8 dargestellt. Zur besseren Anschauung ist nur jeder dritte Geschwindigkeitsvektor in y -Richtung an vier ausgewählten Positionen in x -Richtung gezeigt. Es kann festgestellt werden, dass der Rauschanteil entlang des Geschwindigkeitsprofils, abgesehen von einigen Ausreißern, gering ist. Die Auswertefehler im Nachlauf bei $Ma = 1,8$ sind auf die geringe Partikelkonzentration zurückzuführen. Um das Problem des Nachlaufseedings zu beheben, könnte lokales Seeding mit bspw. TiO_2 angewandt werden. In Abbildung 8 sind im unteren Teil jeweils auch die Grenzschichtprofile gezeigt. Die gestrichelten Kurven zeigen dabei das jeweilige Profil entlang von $x/d = 1$ px und die durchgezogenen Kurven ein über 130 px gemitteltes Geschwindigkeitsprofil. Für die Mittelung wurden 190 Geschwindigkeitswerte bei $y = \text{konstant}$ der Größe nach geordnet und anschließend die ersten und letzten 30 Werte aus der Mittelwertbildung ausgenommen. Trotz dieses Vorgehens ist auch hier noch eine leichte Welligkeit im Verlauf der Geschwindigkeitsverteilung entlang der Grenzschicht vorhanden. Eine höhere Seedingdichte und / oder eine größere Anzahl an Doppelbildern würden die Ergebnisse an dieser Stelle deutlich verbessern. Die *PDF*-Verteilungen für beide Fälle sind in Abbildung 9 dargestellt. Es wurde ein 3×3 Gauß-Fit unter Berücksichtigung der kleinsten Fehlerquadrate zur Bestimmung der Verschiebung angewendet. Das vorhandene Peak-locking ist ein bekanntes Artefakt bei der Single-Pixel-PIV-Auswertung, Kähler 1997. Es ist jedoch aufgrund der hohen Dynamik des Geschwindigkeitsbereiches von geringer Bedeutung.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass es sowohl mit der Standard-PIV als auch mit der fernmikroskopischen Highspeed-PIV möglich ist, Grenzschichten und großskalige Wirbelstrukturen im Unter- und Überschall aufzulösen. Hierbei ist die mit steigender Machzahl geringer werdende Partikeldichte eines der größten Probleme. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem gewählten Setup und dem tangentialen Lichtschnitt die Beleuchtung von einer ausreichend großen Anzahl an Partikeln für die mikroskopische PIV gegeben war. Es konnte ebenfalls gezeigt werden, dass das am TWM verwendete Highspeed-System in der Lage ist, die hinreichend große Anzahl an Doppelbildern, welche für die zuverlässige Bestimmung der Schubspannungsverläufe bei hohen Machzahlen notwendig ist, in kurzer Zeit aufzunehmen. Ein Anfachen der Turbulenzproduktion innerhalb der Scherschicht im Nachlauf konnte nachgewiesen werden. Es wird jedoch auch deutlich, dass nur mit dem hier erstmals angewendeten fernmikroskopischen Ansatz zuverlässige Daten ermittelt werden können. Klassische PIV-Aufnahme- und Auswertemethoden sind nicht in der Lage die turbulenten Schubspannungsverläufe aufgrund der geringen räumlichen Auflösung physikalisch sinnvoll wiederzugeben. Zukünftige Untersuchungen zur zeitlichen Auflösung der Strömungsphänomene im Nachlauf und zur Reduzierung des Peak-locking sowie der damit einhergehenden Genauigkeitssteigerung bei Single-Pixel Auswertungen sind geplant.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Projektes im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB – TR40.

Literatur

Henckels, A., Gülhan, A., Neeb, D., 2007: "An Experimental Study on the Base Flow Plume Interaction of Booster Configurations" *1st CEAS European Air and Space Conference*, Germany, Berlin, 10–13 September.

Kähler, C. J., 1997: „Ortsaufgelöste Geschwindigkeitsmessungen in einer turbulenten Grenzschicht“ Forschungsbericht der Deutschen Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, DLR–FB–97–32.

Kähler, C. J., Scholz, U., Ortmanns, J., 2006a: "Wall-shear-stress and near-wall turbulence measurements up to single pixel resolution by means of long-distance micro-PIV" *Experiments in Fluids*, **41**, 327–341.

Kähler, C. J., Scholz, U., 2006b: "Transonic jet analysis using long-distance Micro-PIV" *12th International Symposium on Flow Visualization – ISFV 12*, Germany, Göttingen, September 10–14.

Kähler, C. J., Sammler, B., Kompenhans, J., 2002: "Generation and control of particle size distributions for optical velocity measurement techniques in fluid mechanics" *Experiments in Fluids*, **33**, 736–742.

Oudheusden, B.W. van, Scarano, F., 2008: "PIV Investigation of Supersonic Base-Flow-Plume Interaction" *Topics in Applied Physics*, **112**, Springer Verlag, 465–474.

Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., Kompenhans, J., 2007: "Particle Image Velocimetry - A Practical Guide" Second Edition, Springer Verlag, Berlin