

Untersuchungen der Heckströmung eines generischen Raketenmodells im Unter-, Trans- und Überschall

Sven Scharnowski, Istvan Bolgar und Christian J. Kähler

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

Schlagworte: kompressible Heckströmung, PIV, Schlieren

Zusammenfassung

Am Trisonischen Windkanal München (TWM) wurden Particle Image Velocimetry (PIV) und Schlieren-Messungen an einem generischen Raketenmodell bei verschiedenen Machzahlen im Unter-, Trans- und Überschall durchgeführt, um das Zusammenspiel zwischen abgelöster/wiederanlegender Scherschicht und Düsenströmung zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Länge des Rezirkulationsgebietes stromab einer rückwärtsgewandten Stufe beim Übergang vom Unterschall in den Überschall wesentlich reduziert. Eine Interaktion zwischen Düsenströmung und abgelöster Außenströmung tritt bei der gewählten Düsenlänge nur im Unterschall und Transschall auf. Die Resultate ermöglichen die Auslegung einer optimierten Geometrie des Heckbereichs realer Trägerraketen.

Einleitung

Eine Trägerrakete zum Transport von Satelliten in erdnahe Umlaufbahnen, wie die europäische ARIANE 5, durchschreitet während ihres Aufstiegs den gesamten Machzahlbereich vom Stillstand bis in den hohen Hyperschall. Dabei ändern sich Dichte und Temperatur mit steigender Flughöhe kontinuierlich. Hieraus ergeben sich vielfältige Herausforderungen bezüglich mechanischer und thermischer Lasten für die Struktur. Die Geometrie der ARIANE 5 zeichnet sich im Heckbereich durch eine rückwärtsgewandte Stufe aus, die den Übergang zwischen Hauptkörper und Hauptmotor darstellt. Bei der Umströmung der Rakete löst die Grenzschicht an dieser Stufe ab. In der abgelösten Scherschicht entstehen Kelvin-Helmholtz-Wirbel, die mit der Düse des Hauptmotors in Wechselwirkung treten. Bei diesem sogenannten „Buffeting“ ist der hintere Teil der Düse des Hauptmotors starken dynamischen Lasten ausgesetzt, was die Flugeigenschaften negativ beeinflussen und bis zum mechanischen Versagen führen kann (Hannemann et al. 2011, Schrijer et al. 2014).

Numerische Simulationen und Messungen an generischen Modellen im Unterschall und Transschall bis $Ma \approx 0,8$ zeigen, dass die Strömung über eine zurückspringende Stufe durch ein großes Ablösegebiet gekennzeichnet ist, das starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegt (Driver et al. 1987, Simpson 1989, Bitter et al. 2011). Die mittlere Länge des Rezirkulationsgebietes beträgt hierbei etwa 5-7 Stufenhöhen h für ebene Konfigurationen (Bradshaw und Wong 1972, Eaton and Johnston 1981) und etwa 3 h für rotationssymmetrische Modelle (Deck und Thorigny 2007, Bitter et al. 2011, Weiss und Deck 2013, Schrijer et al. 2014, Scharnowski und Kähler 2015). Die Variation der Wiederanlegelinie beträgt beim ebenen Fall mehr als $\pm 2 h$ (Scharnowski et al 2015).

Im Transschallbereich, von $Ma \approx 0,8$ bis $Ma \approx 1,3$ sind die Dichte der Atmosphäre und die Geschwindigkeit relativ hoch, wodurch hier die größten mechanischen Lasten für die Raketendüse entstehen. Bei $Ma = 0,8$ kann die Dynamik des Rezirkulationsgebietes und seine Größe durch passive Strömungskontrollmaßnahmen signifikant reduziert werden (Bolgar et al. 2015, Scharnowski et al. 2015). Da jegliche zusätzliche Anbauten mit neuen Risiken verbunden sind und die Effizienz einer Trägerrakete beeinflussen können, ist es wichtig zu klären, für welchen Flugbereich solche passiven Strömungskontrollmaßnahmen erforderlich sind und gewinnbringend eingesetzt werden können. Insbesondere fehlen im Transschall- und Überschallbereich Informationen zur Größe und Dynamik des Ablösegebietes stromab einer rückwärtsgewandten Stufe. Aus diesem Grund untersucht diese Arbeit die Nachlaufströmung eines generischen Raketenmodells mit Treibstrahl im Trans- und Überschall. Sowohl PIV Messungen als auch 4-Farben-Schlierenaufnahmen geben Aufschluss über das Zusammenspiel von Außenströmung und Düsenströmung. Im Folgenden werden die Versuchsanlage und der Experimentelle Aufbau beschrieben sowie die wichtigsten Ergebnisse zu PIV und Schlierenmessungen diskutiert.

Versuchsaufbau

Der Trisonische Windkanal der Universität der Bundeswehr in München (TWM) arbeitet nach dem Blow-Down-Prinzip. Die um 1980 erbaute Anlage ist in Abb. 1 dargestellt. Drei Kompressoren (1 in Abb. 1) mit einer elektrischen Gesamtleistung von insgesamt 627 kW und einem Fördervermögen von ca. 4000 m³/h befüllen 2 Vorratskessel (2 in Abb. 1) mit einem Gesamtvolumen von 356 m³ mit entfeuchteter Luft von maximal 20 bar Überdruck. Zum vollständigen Befüllen der Kessel benötigen die Kompressoren ca. 105 min. Vor einem Versuchslauf wird die Plenumkammer um die Messstrecke (6) geschlossen, das Dach des Ausblasturmes (8) und das Sicherheitsventil (3) geöffnet. Während des Versuchslaufes kontrolliert das Druckregelventil (4) den Totaldruck in der Vorkammer und die Machzahl wird über die Lavaldüse (5) bzw. den Verstelldiffusor (7) eingestellt. In der Versuchsanlage können Machzahlen im Bereich von 0,15 bis 3,0 erzeugt werden. Der Totaldruck kann zwischen 1,2 bar und 5,0 bar liegen.

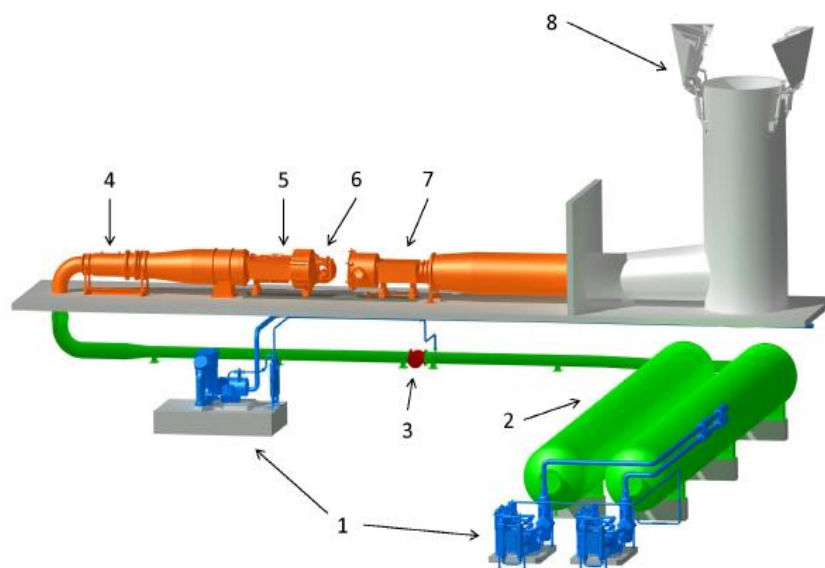


Abb. 1: Schematische Darstellung des Trisonischen Windkanals München (TWM). 1: Kompressoren, 2: Vorratskessel, 3: Absperrventil, 4: Druckregelventil, 5: Lavaldüse, 6: Messstrecke, 7: Verstelldiffusor, 8: Ausblasturm.

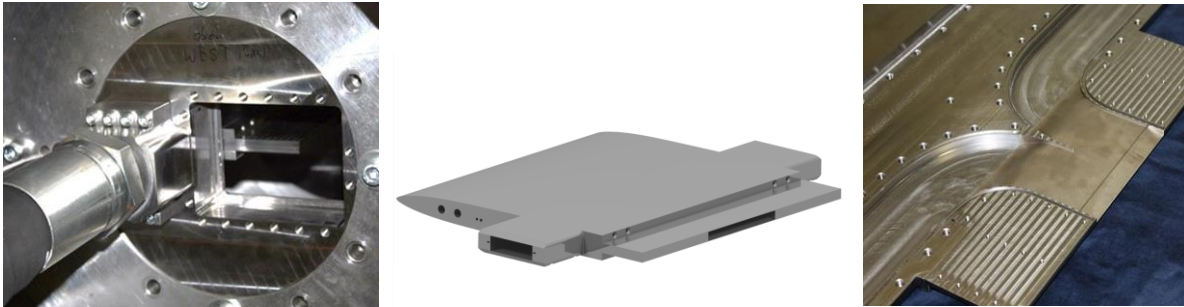


Abb. 2: Links: Seitenwand der Messtrecke mit Luftversorgung für das Raketenmodell. Mitte: Skizze des Modells. Rechts: Innenansicht des Modells mit Vorkammer und Düse.

Das untersuchte ebene Modell ist in Abb. 2 dargestellt. Es besteht aus einem 25 mm dickem und 255 mm langen Hauptkörper mit einer 150 mm langen Nase, die eine Stoßfreie Umströmung bis zu einer Anströmmachzahl von etwa $Ma = 0,8$ erlaubt (Statnikov et al. 2016). Der Hauptkörper geht mit einer rückwärtsgewandten Stufe an Ober- und Unterseite in eine 10 mm dicke und 50 mm lange ebene Platte über. Am Ende der Platte befindet sich die 9 mm hohe und 100 mm breite Austrittsebene einer zweidimensionalen schuboptimierten Düse. Der Hals der Düse hat eine Höhe von 3,04 mm und liegt 12,6 mm stromauf der Austrittsebene. Im Hauptkörper befindet sich die Düsenvorkammer, an die von beiden Seiten Schläuche (2 Zoll) zur Luftversorgung angeschlossen sind. Das Modell ist symmetrisch bezüglich der horizontalen sowie der vertikalen in Strömungsrichtung liegenden Ebene. Für alle hier dargestellten Versuche wurde für die Düsenströmung ein Totaldruck in der Düsenvorkammer von 6,0 bar verwendet.

Zur Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene wurden Particle Image Velocimetry (PIV) Messungen durchgeführt. Hierfür beleuchtete ein Doppelpuls-Laser mit 100 mJ pro Puls Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) Partikel mit etwa 1 μm Durchmesser, die der anströmenden Luft beigemischt wurden. Das Streulicht der Partikel wurde mit einem 50 mm Objektiv auf den Sensor einer sCMOS Kamera (2560 \times 2160 Pixel) abgebildet. Für 4 verschiedenen Machzahlen ($Ma = 0,8; 0,95; 2,0; 3,0$) wurden je 1000 PIV Doppelbilder mit einer Frequenz von 15 Hz aufgenommen. Der Zeitabstand zwischen zwei einzelnen Pulsen eines Doppelpulses betrug je nach Strömungsgeschwindigkeit zwischen 1,3 – 10 μs , um eine Verschiebung der Partikelbilder von etwa 15 Pixel in der Außenströmung zu erzeugen. Dadurch werden systematische Fehler durch gekrümmte Stromlinien (Scharnowski und Kähler 2013) und Bewegungen aus der Messebene heraus (Scharnowski und Kähler 2016) vermieden.

Die Datenbearbeitung beinhaltet eine Bildervorbereitung bestehend aus einer Bildverschiebung zur Korrektur von Schwingungen während der Versuchsläufe, dem Subtrahieren des Minimums aus je 5 aufeinanderfolgenden Bildern zur Unterdrückung von Hintergrundmustern und dem Ausgleichen von lokalen Intensitätsschwankungen. Das mittlere Strömungsfeld wurde dann aus über 1000 Doppelbilder gemittelten Korrelationsfunktionen bestimmt. Die räumliche Auflösung der Geschwindigkeitsfelder beträgt 400 μm (Kähler et al. 2012).

Der TWM ist mit einer 4-Farben-Schlierenoptik ausgestattet, die es ermöglicht, Dichteänderungen in der Messtrecke qualitativ sichtbar zu machen. Als Lichtquelle der Schlierenoptik dient eine 1,6 kW Xenonkurzbogenlampe, aus deren Spektrum die vier Farben rot, grün, blau und gelb mittels Bandpassfiltern extrahiert werden. Mit Hilfe einer vierseitigen Spiegelpyramide werden alle vier Farben nahezu überlagert. Ein vierfach-Kondensorsystem bildet die Lampe für jede Farbe auf einen separaten Spalt ab, wobei der Spalt für rot und grün horizontal und für gelb und blau senkrecht liegt. Dieses Spaltsystem steht im Brennpunkt eines Hohlspiegels mit einer Brennweite von 4000 mm, sodass das Licht nach dem Spiegel paral-

lel durch die Messtrecke des TWM läuft. Auf der anderen Seite der Messtrecke werden Änderungen in der Parallelität des Lichtes detektiert. Hierzu wird das austretende Licht mit einem weiteren Hohlspiegel fokussiert und im Fokus mittels Schlierenkanten analysiert. Aufgrund der Anordnung der Spalte und der Kanten erscheinen Dichteänderungen in horizontaler Richtung blau oder gelb (je nach Vorzeichen) und in vertikaler Richtung rot oder grün. Eine detaillierte Beschreibung zum Aufbau der Schlierenoptik findet man in Hampel (1984). Mit dieser Messtechnik können Scherschichten in kompressiblen Strömungen und Verdichtungsstöße sichtbar gemacht werden. Auch isentrope Kompressionen und Expansionen lassen sich mit Schlierenvisualisierungen erkennen.

Ergebnisse und Diskussion

Die mittleren Geschwindigkeitsfelder in Abb. 3 zeigen die erwartete Ablösung der ankommenden Strömung an der rückwärtsgewandten Stufe. Im Mittel bildet sich ein Rezirkulationsgebiet aus, das bei einer Anströmmachzahl von 0,8 erst am Ende der Düse wieder auf der Düse anlegt. Bei $Ma = 0.95$ und im Überschall verkürzt sich die Länge des Rezirkulationsgebietes erheblich, wodurch die Wechselwirkung zwischen dem hinteren Teil der Schubdüse und einer fluktuierenden wiederanlegenden Scherschicht deutlich reduziert wird. Aus der Abbildung wird klar, dass hohe subsonische sowie transsonische Machzahlen, aufgrund des langen Rezirkulationsgebietes, besonders hohe mechanische Lasten für die Schubdüse einer Trägerrakete darstellen.

In Abb. 3 ist auch zu sehen, wie sich der Zustand der Düsenströmung mit steigender Strömungsgeschwindigkeit ändert. Bei $Ma = 0,8$ liegt eine stark überexpandierte Düsenströmung vor. Überexpansionsstöße, die von der Düsenlippe ausgehen, komprimieren den Freistrah im ersten Teil. Nach der Durchkreuzung der Stöße steigt der statische Druck wieder über den der Außenströmung an, was eine Expansion zur Folge hat, die wiederum am Freistrahtrand reflektiert wird und dabei in eine isentropen Kompression übergeht. Dabei steigt der Druck erneut an und die nächste Expansion findet statt. Als Folge dieser wiederkehrenden Phänomene bildet ein regelmäßiges tonnenförmiges Muster im Freistrah aus. Bei einer Anströmmachzahl von $Ma = 0,95$ liegt immer noch eine überexpandierte Düsenströmung vor. Jedoch ist das Druckverhältnis zwischen Düsenströmung und Außenströmung geringer, wodurch die Stöße flacher verlaufen und das tonnenförmige Muster länger gestreckt ist. Im Überschall bei $Ma = 2,0$ und $3,0$ liegt eine unterexpandierte Düsenströmung vor, bei der der Druck im Freistrah noch oberhalb des Druckes der Außenströmung liegt. Dadurch kommt es an der Düsenlippe zu einer Nachexpansion, bei der die Strömung weiter beschleunigt wird und der Freistrah im Querschnitt zunimmt.

In den Schlierenbildern in Abb. 4 lassen sich die verschiedenen Düsenzustände ebenfalls erkennen. Durch die starken Dichteänderungen innerhalb der Scherschichten und Verdichtungsstöße wird das parallele Licht so stark abgelenkt, dass dunkle Bereiche entstehen.

Gegenüber den PIV Messungen wurden weitere Machzahlen bei den Schlierenmessungen untersucht. Bei $Ma = 0,88$ entstehen in der abgelösten Scherschicht stromab der Stufe Kelvin-Helmholtz-Wirbel, die soweit anwachsen, dass die Strömung erstmals lokal in den Überschall beschleunigt wird. Das Überschallgebiet endet mit schwachen nahezu senkrechten Verdichtungsstößen, wie sie in Abb. 4 bei $Ma = 0,88$ zu erkennen sind. Bei $Ma = 0,92$ ist der Heckbereich des Modells erstmals vollständig im Überschall. Im Nachlauf des Modells findet jedoch bis zur Anströmmachzahl 1,0 eine Verzögerung in den Unterschall durch senkrechte Verdichtungsstöße statt. Von $Ma = 1,4$ bis $Ma = 3,0$ bleibt die gesamte Modellumströmung im Überschall. Davon ausgenommen sind natürlich immer die Grenzschichten und die Rezirkulationsgebiete.

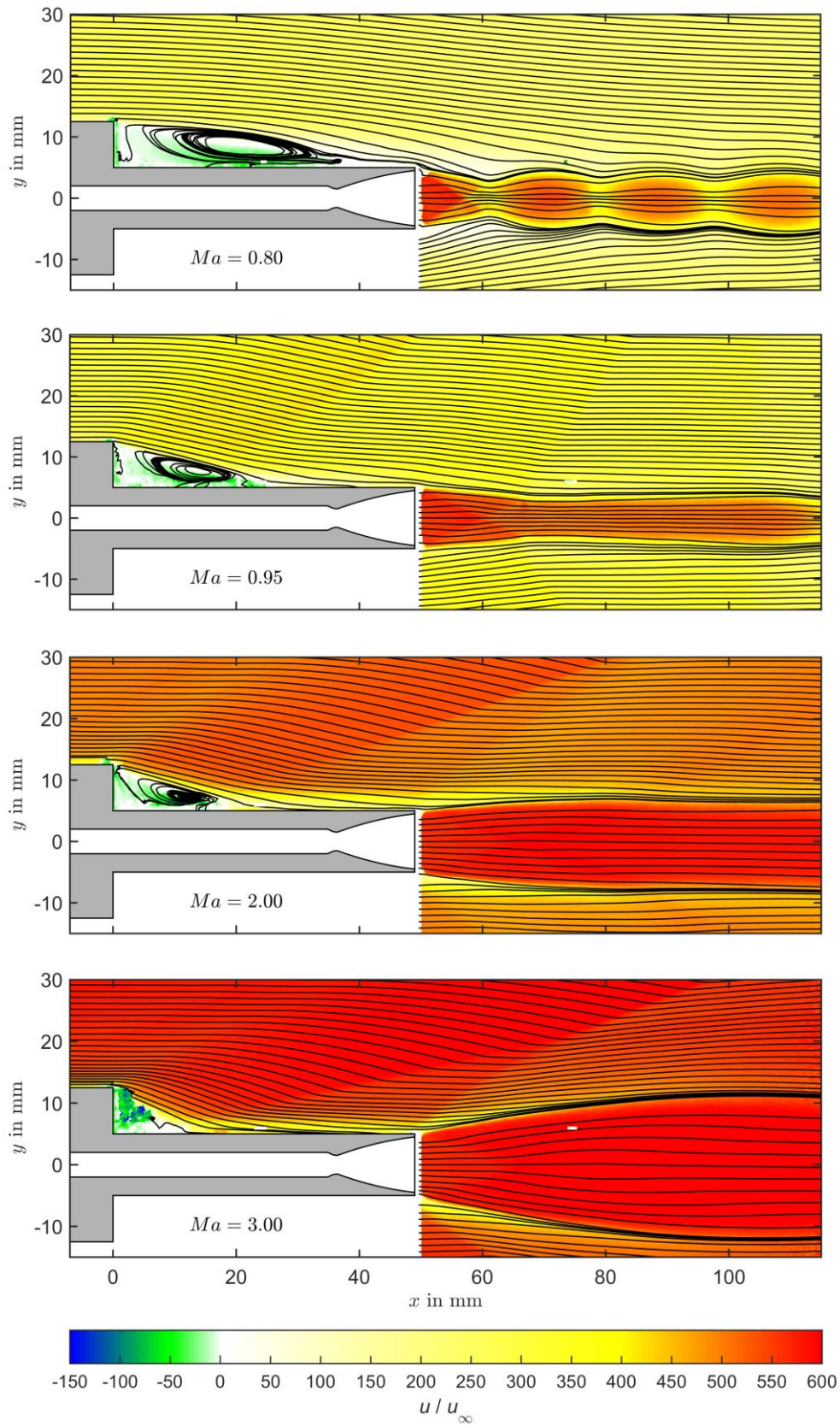


Abb. 3: Mittlere Geschwindigkeitsfelder des Heckbereiches eines generischen Raketenmodells mit Treibstrahl bei verschiedenen Machzahlen.

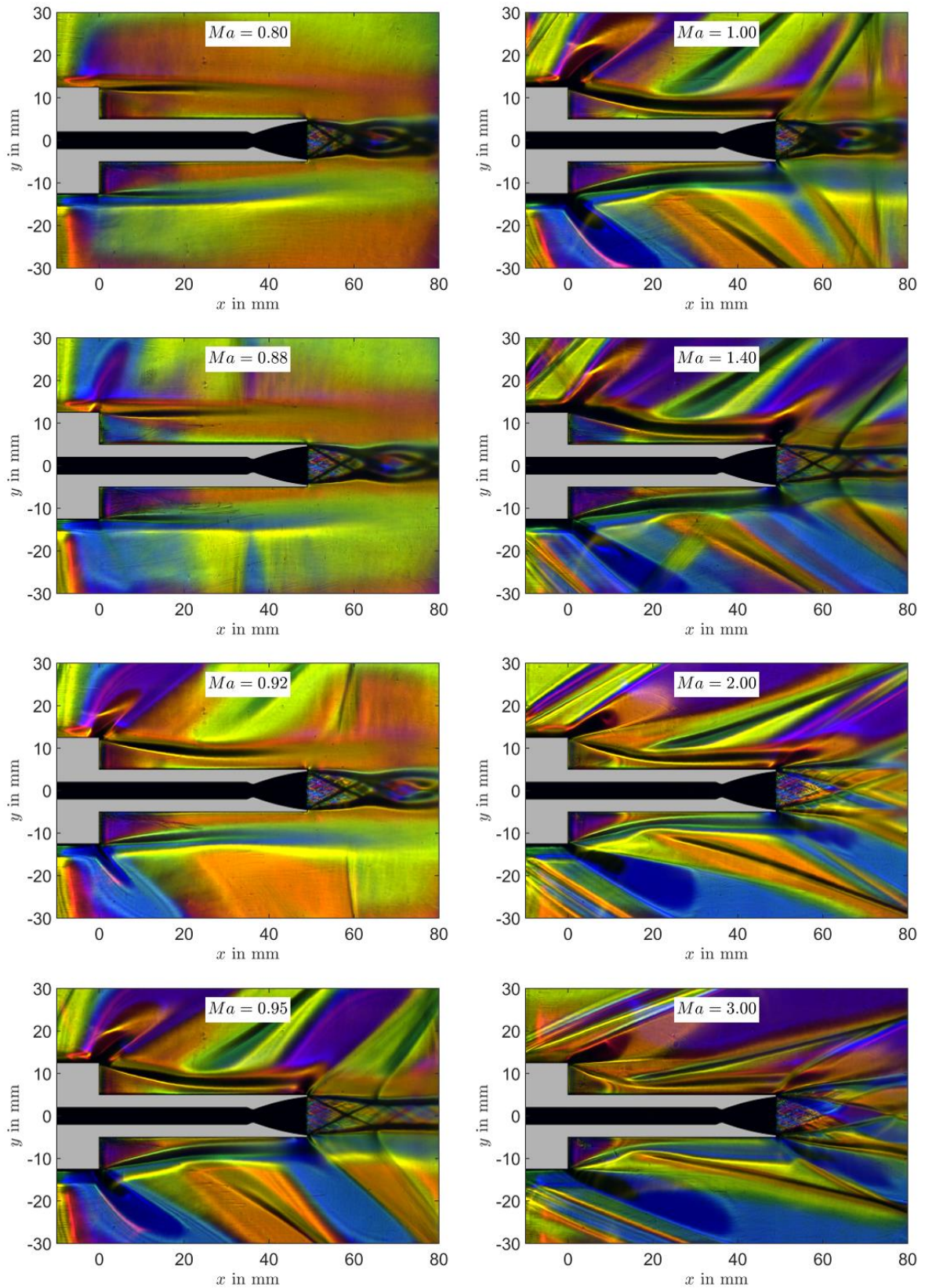


Abb. 4: Schlieren-Visualisierungen des Heckbereiches eines generischen Raketenmodells mit Treibstrahl bei verschiedenen Machzahlen.

Abbildung 4 verdeutlicht, dass die Scherschicht zwischen Außenströmung und Rezirkulationsgebiet im Überschall direkt nach der Stufe zur Düse umgelenkt wird. Hierdurch wird die Außenströmung beschleunigt und die Länge des Rezirkulationsgebietes reduziert. Im Bereich in dem die Scherschicht auf die Düsenoberfläche auftrifft wird sie durch einen schrägen Verdichtungsstoß umgelenkt und verzögert. Die Lage dieses Stoßes und damit die Länge des Rezirkulationsgebietes sind aus den Schlierenbildern zuverlässig erkennbar. Am Ende des Modells wird die Strömung erneut umgelenkt: Für Anströmmachzahlen von $Ma = 0,95$ bis $1,4$ kommt es zu einer Expansion, da die Düsenströmung überexpandiert ist und zusammenläuft. Für $Ma = 2,0$ und $3,0$ geht von der Düsenlippe ein Stoß aus, der die Strömung nach außen umlenkt.

Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen des Heckbereiches eines generischen Raketenmodells mit Treibstrahl zeigen, dass sich die Länge des Rezirkulationsgebietes beim Übergang vom Unterschall in den Überschall wesentlich reduziert. Daraus ergibt sich, dass Strömungskontrollmaßnahmen zur Reduzierung der Wiederanlegelänge nur im Unter- und Transschall notwendig sind. Die Ursache für diese Verkürzung des Rezirkulationsgebietes ist die Expansion der Überschallströmung an der Ecke der Stufe, die die Scherschicht zur Düse hin ablenkt. Die Kombination von PIV und Schlierenmessungen stellt für die durchgeführten Messungen eine sinnvolle Ergänzung dar. Während PIV im Unter und Transschall sehr gut anwendbar ist, erschwert das limitierte Folgeverhalten der Partikel die Messungen im Überschall. Bei der Schlierenmessung hingegen sind signifikante Dichteänderungen erforderlich, wodurch der sinnvolle Messbereich auf den Transschall und Überschall beschränkt ist. Die Erkenntnisse bezüglich der Länge des Rezirkulationsgebietes in Abhängigkeit der Machzahl können für die Auslegung der Geometrie realer Trägerraketen genutzt werden.

Dankesworte

Das dargestellte Forschungsprojekt wurde 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

- 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(4), 1019-1030.
- Bolgar, I., Scharnowski, S., & Kähler, C. J. (2015).** Control of the Reattachment Length of a Transonic 2D Backward-Facing Step Flow. In *Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows*, Stockholm, Sweden.
- Bradshaw, P., & Wong, F. Y. F. (1972).** The reattachment and relaxation of a turbulent shear layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 52(01), 113-135.
- Deck, S., & Thorigny, P. (2007).** Unsteadiness of an axisymmetric separating-reattaching flow: Numerical investigation. *Physics of Fluids (1994-present)*, 19(6), 065103.
- Driver, D. M., Seigmiller, H. L., & Marvin, J. G. (1987).** Time-dependent behavior of a reattaching shear layer. *AIAA journal*, 25(7), 914-919.
- Eaton, J. K., & Johnston, J. P. (1981).** A review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA journal*, 19(9), 1093-1100.

- Hampel, A. (1984).** Auslegung, Optimierung und Erprobung eines vollautomatisch arbeitenden Transonik-Windkanals, Dissertation, Hochschule der Bundeswehr München.
- Hannemann, K., Lüdeke, H., Pallegoix, J. F., Ollivier, A., Lambare, H., Maseland, J. E. J., Geurts, E. G. M., Frey, M., Deck, S., Schrijer, F. F. J., Scarano, F. & Schwane, R. (2011).** Launch Vehicle Base Buffeting-Recent Experimental and Numerical Investigations. In ESA Special Publication (Vol. 692, p. 101).
- Kähler, C. J., Scharnowski, S., & Cierpka, C. (2012).** On the resolution limit of digital particle image velocimetry. *Experiments in fluids*, 52(6), 1629-1639
- Scharnowski, S., Bolgar, I. & Kähler, C. J. (2015).** Control of the recirculation region of a transonic back-ward-facing step flow using circular lobes, 9th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP 9), Melbourne, Australia.
- Scharnowski, S., & Kähler, C. J. (2013).** On the effect of curved streamlines on the accuracy of PIV vector fields. *Experiments in Fluids*, 54(1), 1-11.
- Scharnowski, S., & Kähler, C. J. (2015).** Investigation of a transonic separating/reattaching shear layer by means of PIV. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 5(1), 30-34
- Scharnowski, S., & Kähler, C. J. (2016).** Estimation and optimization of loss-of-pair uncertainties based on PIV correlation functions. *Experiments in Fluids*, 57(2), 1-11.
- Schrijer, F. F. J., Sciacchitano, A., & Scarano, F. (2014).** Spatio-temporal and modal analysis of unsteady fluctuations in a high-subsonic base flow. *Physics of Fluids (1994-present)*, 26(8), 086101.
- Simpson, R. L. (1989).** Turbulent boundary-layer separation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 21(1), 205-232.
- Statnikov, V., Bolgar, I., Scharnowski, S., Meinke, M., Kähler, C. J., & Schröder, W. (2016).** Analysis of characteristic wake flow modes on a generic transonic backward-facing step configuration. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*.
- Weiss, P. E., & Deck, S. (2013).** Numerical investigation of the robustness of an axisymmetric separating/reattaching flow to an external perturbation using ZDES. *Flow, turbulence and combustion*, 91(3), 697-715.