

Messung der Geschwindigkeitsverteilung in einem schlanken Überschall-Längswirbel mit der Laser-Doppler-Anemometrie

M. Klaas, W. Althaus, W. Schröder

Lehrstuhl für Strömungslehre und Aerodynamisches Institut, RWTH Aachen
Wüllnerstr. zw. 5 u. 7, D-52062 Aachen, <http://www.aia.rwth-aachen.de>

Zusammenfassung

Mit Hilfe eines angestellten Rechteckflügels mit Doppelkeilprofil wurde im Überschallwindkanal des Aerodynamischen Instituts ein schlanker Überschall-Längswirbel erzeugt, bei dem durch Variation des Anstellwinkels das Drallverhältnis verändert wurde. Die Profile der axialen und tangentialen Geschwindigkeitskomponenten des Wirbels wurden mit Hilfe eines 2D-Laser-Doppler-Anemometers für zwei verschiedene Machzahlen ($Ma_\infty = 2.0$ und $Ma_\infty = 2.5$) sowie unterschiedliche Drallverhältnisse und Abstände der Messebene zum Wirbelerzeuger vermessen. Die ermittelten Geschwindigkeitsprofile zeigen sowohl eine gute Übereinstimmung mit den analytischen Geschwindigkeitsverläufen eines isoenergeten Burgers-Wirbels als auch mit in der Literatur vorhandenen experimentellen und numerischen Ergebnissen.

1 Einleitung

Ähnlich wie in inkompressiblen Strömungen (Althaus et al. [1]) kann ein Längswirbel auch im Überschall durch einen positiven Druckgradienten, z.B. durch einen schrägen oder senkrechten Verdichtungsstoß, zum Aufplatzen gebracht werden. Dies führt zu drastischen Veränderungen der Wirbelstruktur, was in der Praxis z.B. unerwünschte Betriebszustände von Turbomaschinen zur Folge haben kann. So haben Untersuchungen von Schleichriem et al. [8] gezeigt, dass das Wirbelaufplatzen für das bei hohen Lasten auftretende Pumpen transsonischer Turbokompressoren verantwortlich sein kann. Weitere Beispiele sind die Beeinträchtigung der Manövrierfähigkeit eines mit hohem Anstellwinkel im Transschall oder Überschall fliegenden Flugzeuges oder die Blockierung oder Leistungsreduzierung eines Triebwerkes, falls das Wirbelaufplatzen im Triebwerks-Überschalleinlauf auftritt.

Zur Untersuchung der wesentlichen Einflußparameter auf den Aufplatzvorgang und die Aufplatzform sind in den letzten Jahren eine Reihe von experimentellen und numerischen Untersuchungen durchgeführt worden, z.B. Cattafesta & Settles [2], Détery et al. [3], Kalkhoran et al. [4], Smart et al. [9] sowie Klaas et al. [5] und Thomer et al. [10]. Dabei zeigte sich, dass die Machzahl, die Stoßstärke und das Drallverhältnis des Wirbels die wichtigsten Parameter für die Interaktion darstellen. Bei einem Großteil der bisher durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurden qualitative Messverfahren zur Strömungssichtbarmachung eingesetzt. Für die Validierung numerischer Simulationen der Stoß-Wirbel-Interaktion werden jedoch quantitative Messergebnisse benötigt, wie sie z.B. mit Hilfe laseroptischer Geschwindigkeitsmessungen vor und hinter dem Stoß ermittelt werden können.

Détery et al. [3] vermaßen mit Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) einen Längswirbel, der im konvergenten Unterschallteil einer Laval-Düse erzeugt wurde, so dass Wirbel mit niedrigem Drallverhältnis und uniformem Axialgeschwindigkeitsprofil untersucht werden konnten. Smart et al. [9] hingegen erzeugten den Wirbel mit einem Rechteckflügel mit Doppelkeilprofil, welcher im divergenten Überschallteil der Laval-Düse positioniert wurde. Die tangentiale und axiale Geschwindigkeitsverteilung des so erzeugten Blattspitzenwirbels wurde mit einer 5-Loch-Sonde gemessen. In Anlehnung an die vorangegangenen experimentellen Arbeiten von Smart et al. führte Rizzetta [7] numerische Simulationen der Erzeugung eines Längswirbels mittels eines Rechteckflügels mit Doppelkeilprofil durch, wobei sich gute Übereinstimmungen bezüglich der tangentialen Geschwindigkeitskomponente, teilweise jedoch deutliche Abweichungen in den Ergebnissen für die radiale und axiale Komponente ergaben.

Trotz der grundlegenden Bedeutung der Geschwindigkeitsverteilung im Wirbelkern für den Aufplatzvorgang existiert bisher nur eine geringe Anzahl quantitativer Messungen, welche im wesentlichen

den inkompressiblen sowie den kompressiblen Unterschallbereich bzw. im Überschallbereich Wirbel mit geringem Drallverhältnis abdecken. Ziel dieser Arbeit ist daher die Ermittlung des Geschwindigkeitsprofils schlanker Überschall-Längswirbel mit niedrigen und hohen Drallstärken als Basis für fortführende experimentelle Untersuchungen der Stoß-Wirbel-Interaktion. Die experimentell ermittelten Daten sollen darüber hinaus zur Validierung von numerischen Simulationen der Wechselwirkungen dienen.

2 Versuchsaufbau

Überschall-Windkanal

Die experimentellen Untersuchungen wurden am $15 \times 15 \text{ cm}^2$ -Überschallkanal des Aerodynamischen Institutes durchgeführt (Krause [6]). Im Überschallbereich kann die Machzahl mit Hilfe austauschbarer Düsensätze mit fester Geometrie variiert werden. Bei einer Querschnittsfläche der Messstrecke von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ (Länge der Messstrecke: 18 cm) liegen die erreichbaren Messzeiten je nach Machzahl zwischen $t_{\text{mess}} = 20 \text{ s}$ und 60 s. Die durch einen Trockenfilter aus Silicagel mit einer verbleibenden Restfeuchte von weniger als 5% in die Messstrecke geleitete Luft wird direkt aus der Umgebung angesaugt. Daher gilt für alle an diesem Kanal durchgeführten Experimente, dass Totaldruck und -temperatur durch die Umgebungsbedingungen festgelegt werden. Abbildung 1 zeigt eine schematische Darstellung des Windkanals.

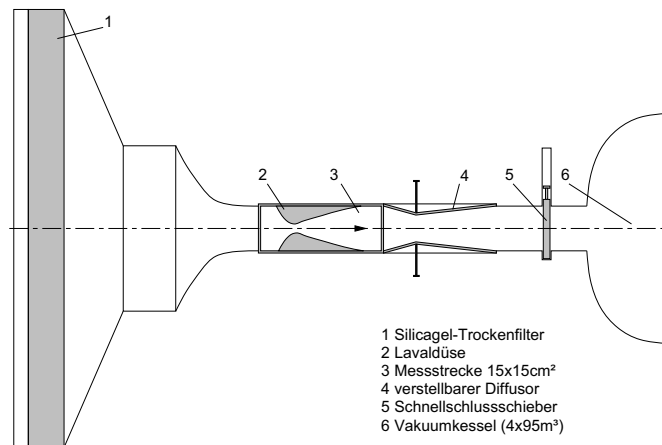


Abbildung 1: Schematischer Grundaufbau des Überschallwindkanals

Wirbelerzeugung und Messprogramm

Abbildung 2 zeigt schematisch den verwendeten Wirbelerzeuger, das zugrunde liegende Koordinatensystem sowie die stromab des Wirbelgenerators gelegenen Messebenen. Der schlanke Überschall-Längswirbel wird durch einen Rechteckflügel mit Doppelkeilprofil generiert, von dessen Ende er sich als Blattspitzenwirbel löst. Der Wirbelgenerator (VG, „vortex generator“) besitzt einen halben Keilwinkel von $\beta_{\text{VG}} = 12^\circ$, eine Profiltiefe von $l_{\text{VG}} = 25 \text{ mm}$ und eine Spannweite von $s_{\text{VG}} = 75 \text{ mm}$. Der Anstellwinkel des Doppelkeilprofils ist innerhalb eines Bereiches von $\alpha_{\text{VG}} = \pm 20^\circ$ stufenlos verstellbar, so dass die Zirkulation und damit die Stärke des Wirbels über einen weiten Bereich hinweg variiert werden kann.

Die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Wirbelkerns wurde für die Anströmmachzahlen $Ma_\infty = 2.0$ und $Ma_\infty = 2.5$ vermessen. Mit den als Ruhegrößen zu verwendenden Umgebungsbedingungen ($T_0 = 293 \text{ K}$, $p_0 = 1015 \text{ hPa}$, $a_0 = 343 \text{ m/s}$) ergeben sich daraus auf die Sehnenlänge des Doppelkeilprofils bezogene Reynoldszahlen von $Re = 2.60 \cdot 10^5$ bzw. $Re = 1.75 \cdot 10^5$. Insgesamt wurden Experimente bei fünf verschiedenen Drallverhältnissen des Wirbels sowie drei axialen Abständen der Messebene zum Wirbelerzeuger durchgeführt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die variierten

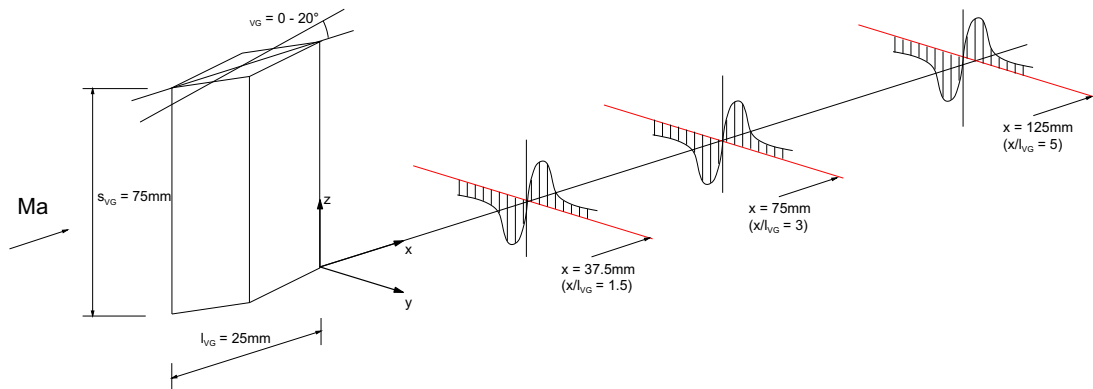


Abbildung 2: Schematische Skizze des Wirbelerzeugers und der Messebenen

Parameter.

Für jede der untersuchten Kombinationen wurde eine quer zur Hauptströmungsrichtung auf der Kanalmittelebene liegende Messreihe (y -Richtung, $z=0$) mit einer Breite von etwa zwei Profiltiefen ($-25 \text{ mm} \leq y \leq 25 \text{ mm}$ bzw. $-1 \leq y/l_{VG} \leq 1$) durchfahren. Um die maximale Tangentialkomponente bestimmen zu können, wurde der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten in der unmittelbaren Umgebung des Wirbelkerns reduziert.

Ma_∞ [-]	α_{VG} [°]	x [mm]	x/l_{VG} [-]
2.0	0, 3, 6	37.5, 75	1.5, 3
2.5	1, 3, 6, 12	37.5, 75, 125	1.5, 3, 5

Tabelle 1: Parameter der Wirbelvermessung

Messtechnik

Zur Messdatenerfassung und -auswertung diente ein 2-Komponenten-LDA-System der Firmen TSI und ILA. Auf der Sendeseite setzt sich dieses System aus einem Ar^+ -Laser (Lexel 3500-5, $P_{\max} = 5W$) sowie Strahlteiler- und Sendeoptik vom Typ TSI Model 91007 zusammen. Die für die Beobachtung in Vorwärtsrichtung auf der gegenüberliegenden Seite des Windkanals justierte Empfangsoptik (ebenfalls TSI) befindet sich gemeinsam mit den sendeseitig montierten Komponenten auf einem Traversiertisch mit einer Positioniergenauigkeit von $\pm 10 \mu m$. Dadurch wird sichergestellt, dass die zuvor bestimmten Messpunkte mit hoher Wiederholgenauigkeit angefahren werden können. Die Auswertung der Photomultipliersignale erfolgt mit Hilfe der Software Flowpoint (ILA GmbH) sowie der dazugehörigen 2-Kanal-Messkarte.

Als Tracermedium kam sowohl ein mit Hilfe eines TSI-Six-Jet-Atomizers erzeugtes Aerosol als auch ein durch einen Laskin-Generator zerstäubter Tröpfchennebel zum Einsatz. In beiden Fällen lag der mittlere Teilchendurchmesser der auf der Basis von DEHS hergestellten Tracerpartikel bei ca. $1 \mu m$.

3 Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der tangentialen und axialen Machzahlen Ma_ϕ und Ma_x im Bereich des Wirbelkerns für Anstellwinkel des Wirbelgenerators von $\alpha_{VG} = 0^\circ, 3^\circ$ und 6° für zwei axiale Abstände zum Wirbelgenerator bei einer Anströmmachzahl von $Ma_\infty = 2.0$. Zum Vergleich der einzelnen Messungen wurde für alle Messreihen das Wirbelkernzentrum als der Punkt definiert, bei dem die Tangentialgeschwindigkeit ihren Nulldurchgang hat.

Für $\alpha_{VG} = 0^\circ$ ergibt sich bei beiden Abständen sowohl eine vernachlässigbare tangentiale als auch eine im wesentlichen der freien Anströmung entsprechende axiale Geschwindigkeit. Letztere zeigt insbesondere nur einen schwachen Abfall bei $y = 0$ mm, was durch den Impulsverlust in der sich auf dem Doppelkeil entwickelnden Grenzschicht hervorgerufen wird. Mit steigendem Anstellwinkel entsteht eine Machzahlverteilung Ma_ϕ , die der eines schlanken Wirbels entspricht. Dabei nimmt das Maximum mit steigendem Anstellwinkel zu. Mit fortschreitendem Abstand vom Wirbelgenerator ($x = 75$ mm, Abbildung 3(c)) bleibt dieses annähernd konstant. Parallel dazu entsteht bei der axialen Machzahl eine mit wachsender Anstellung zunehmende Nachlaufdele in unmittelbarer Umgebung des Wirbelkerns. Durch diese Anstellwinkelabhängigkeit ist das Defizit in der axialen Machzahl direkt an die Entwicklung der Tangentialgeschwindigkeit gekoppelt. Definiert man den Wirbelkerndurchmesser als den Abstand zwischen den Punkten maximaler Tangentialgeschwindigkeit, so ergibt sich, dass der Durchmesser des Wirbels bei $\alpha_{VG} = 3^\circ$ bei $d_V \approx 3.5$ mm liegt. Für einen Anstellwinkel $\alpha_{VG} = 6^\circ$ ergibt sich ein Durchmesser $d_V \approx 6$ mm.

In Abbildung 4 sind die Verläufe der Geschwindigkeitsprofile für die Anstellwinkel von $\alpha_{VG} = 1^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ und 12° bei drei Abständen zum Doppelkeil aufgetragen. Wie bei $Ma_\infty = 2.0$ ist auch hier bis zu einer Lauflänge von $x = 75$ mm keine signifikante Abnahme der tangentialen Geschwindigkeitskomponente zu erkennen. Erst bei $x = 125$ mm sinkt diese soweit ab, dass das Drallverhältnis des Wirbels deutlich reduziert wird. Der Wirbelkerndurchmesser liegt durchgängig zwischen $d_V \approx 2.5$ mm und $d_V \approx 5$ mm und nimmt mit steigendem Anstellwinkel des Doppelkeils sowie zunehmendem Abstand zum Doppelkeil in Strömungsrichtung zu. Die gemessenen Werte stimmen gut mit den von Kalkhoran et al. [4] bzw. Smart et al. [9] gefundenen Durchmessern überein. Ursächlich für die Verringerung der Tangentialgeschwindigkeit können sowohl viskose Effekte als auch die Zunahme des Wirbelkerndurchmessers sein, welche aus Gründen der Drehimpulserhaltung eine Reduzierung der Geschwindigkeit nach sich ziehen muss. Das Tangentialgeschwindigkeitsprofil ist für schwache Wirbel nahezu symmetrisch bezüglich des Betrages von Ma_ϕ und zeigt erst bei höheren Anstellwinkeln eine leichte Verschiebung zu negativen Werten hin.

Das in den Abbildungen 4(b), (d) und (f) dargestellte Axialgeschwindigkeitsprofil zeigt in der Umgebung des Wirbelkerns eine durch den Anstellwinkel des Doppelkeils hervorgerufene Asymmetrie, welche mit zunehmendem Winkel stärker wird und bei allen untersuchten Positionen beobachtet werden kann. Darüber hinaus ergibt sich wie auch bei $Ma_\infty = 2.0$ ein mit wachsendem Anstellwinkel sich deutlicher ausbildendes Minimum, womit auch hier eine Kopplung zwischen den beiden Komponenten vorliegt. Für $x = 37.5$ mm läßt sich in den Außenbereichen der jeweiligen Messreihen ($y \geq 10$ mm) zusätzlich eine Überhöhung des Geschwindigkeitsprofils beobachten, welche von dem vom Doppelkeil abgehenden Stoß- und Expansionsfächern hervorgerufen wird. Demgegenüber nähert sich der Verlauf von Ma_x bei $x = 75$ mm bei allen Anstellwinkeln asymptotisch dem Wert der freien Anströmung Ma_∞ an. Dieses deutet darauf hin, dass sich die Messebene in einem Gebiet im Nachlauf des Doppelkeils befindet, welches nicht direkt von Stößen oder Expansionsfächern durchquert wird.

In Abbildung 5 ist das Drallverhältnis des Wirbels, $\tau = \arctan(|Ma_\phi/Ma_x|)$ in Abhängigkeit vom Anstellwinkel des Wirbelgenerators, α_{VG} , und der axialen Position der Messebene dargestellt. Bedingt durch den stark asymmetrischen Verlauf der axialen Machzahl Ma_x bei $Ma_\infty = 2.5$ und $x = 37.5$ mm (Abbildung 4(b)) zeigt auch das zugehörige Drallverhältnis eine deutlich einseitige Überhöhung. Diese Asymmetrie ist bei den höheren Abständen wesentlich schwächer ausgeprägt. Analog zum Verlauf der Tangentialgeschwindigkeit bleibt das Drallverhältnis vom Betrag her i. a. bis $x/l_{VG} = 3$ bei beiden untersuchten Machzahlen nahezu konstant, bevor es für $Ma_\infty = 2.5$ in größerer Entfernung ebenfalls

absinkt. Im direkten Vergleich liegen die bei $Ma_\infty = 2.0$ ermittelten Drallverhältnisse durchgängig unterhalb der korrespondierenden Werte bei der höheren Machzahl. Im Vergleich mit den Experimenten von Smart et al. [9] ist das hier ermittelte Drallverhältnis deutlich symmetrischer, zeigt jedoch auch einen mit zunehmendem Anstellwinkel steigenden Betrag.

Die gemessenen Tangentialgeschwindigkeitsprofile können durch den analytischen Verlauf eines isoenergeten Burgers-Wirbels angenähert werden, wie er z.B. von Thomer et al. [11] bei der numerischen Simulation der Stoß-Wirbel-Interaktion verwendet worden ist und z.B. bei Rizzetta [7] bzw. Détery et al. [3] gefunden werden kann. Gemäß $v_\phi(r) = (\Gamma_0/r) \cdot (1 - \exp[-\lambda(r/r_c)^2])$ besitzt ein solcher Burgers-Wirbel eine steil bis zum Wirbelkernradius zunehmende und in den Außenbereichen exponentiell abfallende Tangentialgeschwindigkeit, was mit den hier gefundenen Ergebnissen übereinstimmt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe eines 2-Komponenten-LDA-Systems wurde am $15 \times 15 \text{ cm}^2$ -Überschallkanal des Aerodynamischen Institutes das Geschwindigkeitsprofil eines von einem Rechteckflügel erzeugten Blattspitzenwirbels vermessen. Um eine Datenbasis für zukünftige experimentelle und numerische Untersuchungen zu schaffen, wurde das Drallverhältnis und der axiale Abstand der Messebene zum Wirbelerzeuger variiert.

Der Wirbel besitzt ein mit zunehmendem Anstellwinkel des Doppelkeils und mit wachsender Machzahl steigendes Drallverhältnis. Für einen konstanten Anstellwinkel ergibt sich, dass höhere Drallverhältnisse für größere Machzahlen erreicht werden, und dass eine Abnahme erst bei größeren ($x/l_{VG} \geq 5$) Lauflängen zu beobachten ist. Die Tangentialgeschwindigkeit des Wirbels steigt analog zum Drallverhältnis mit wachsenden Anstellwinkeln und höher werdenden Machzahlen.

Es konnte gezeigt werden, dass der experimentell erzeugte Wirbel die Struktur eines asymmetrischen, isoenergeten Burgers-Wirbels besitzt. Weiterhin ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse sowohl mit den zitierten experimentellen Arbeiten als auch mit numerischen Untersuchungen zur Stoß-Wirbel-Wechselwirkung.

Darüber hinaus wird anhand der Verläufe der tangentialen und axialen Geschwindigkeitskomponenten deutlich, dass diese bei der Erzeugung eines Blattspitzenwirbels mit Hilfe eines Rechteckflügels mit Doppelkeilprofil nicht unabhängig voneinander variiert werden können. Da neben der tangentialen Geschwindigkeitskomponente die Nachlaufdüse im Bereich des Wirbelkerns das Drallverhältnis des Wirbels bestimmt, werden im Rahmen zukünftiger Experimente Wirbelgeneratoren untersucht werden, bei denen die Stärke der Nachlaufdüse entkoppelt von den übrigen Parametern verändert werden kann. Dadurch wird der Einfluss des Defizites in der axialen Machzahl auf die Stoß-Wirbel-Interaktion untersucht werden können.

Literatur

- [1] ALTHAUS, W.; BRÜCKER, C. und WEIMER, M.: *Breakdown of slender vortices*. In: Fluid vortices, Chapter IX, Ed. S. I. Green, Kluwer Academic Publishing S. 373–426, 1995.
- [2] CATTAFESTA, L. N. und SETTLES, G. S.: *Experiments on Shock/Vortex Interaction*. AIAA Paper 92-0315, 1992.
- [3] DÉLERY, J. M.: *Aspects of vortex breakdown*. Progress in Aerospace Sciences 30, S. 1–59, 1994.
- [4] KALKHORAN, I. M.; SMART, M. K. und BETTI, A.: *Interaction of Supersonic Wing-Tip Vortices with a Normal Shock*. AIAA Journal 34(9), S. 1855–1861, 1996.
- [5] KLAAS, M.; THOMER, O. und SCHRÖDER, W.: *Experimental and Computational Investigation of Oblique Shock-Vortex Interaction*. AIAA Paper 2002-3305, 2002.

- [6] KRAUSE, E.: *Versuchsanlagen*. Abhandlungen aus dem Aerodynamischen Institut der RWTH Aachen, Heft 25 S. 17–31, 1980.
- [7] RIZZETTA, D. P.: *Numerical Investigation of Supersonic Wing-Tip Vortices*. AIAA Journal 34(6), S. 1203–1208, 1996.
- [8] SCHLECHTRIEM, S. und LÖTZERICH, M.: *Breakdown of Tip Leakage Vortices in Compressors at Flow Conditions Close to Stall*. ASME Paper 97-GT-041, 1997.
- [9] SMART, M. K.; KALKHORAN, I. M. und BENTSON, J.: *Measurements of Supersonic Wing Tip Vortices*. AIAA Journal 33(10), S. 1761–1768, 1995.
- [10] THOMER, O.; KLAAS, M. und SCHRÖDER, W.: *Interaction Between Longitudinal Vortices and Normal and Oblique Shocks*. Fifth World Congress on Computational Mechanics, Vienna, Austria (WCCM V), 2002.
- [11] THOMER, O.; KLAAS, M. und SCHRÖDER, W.: *Oblique shock-vortex interaction*. Proceedings of the annual Conference of the Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM), 2002.

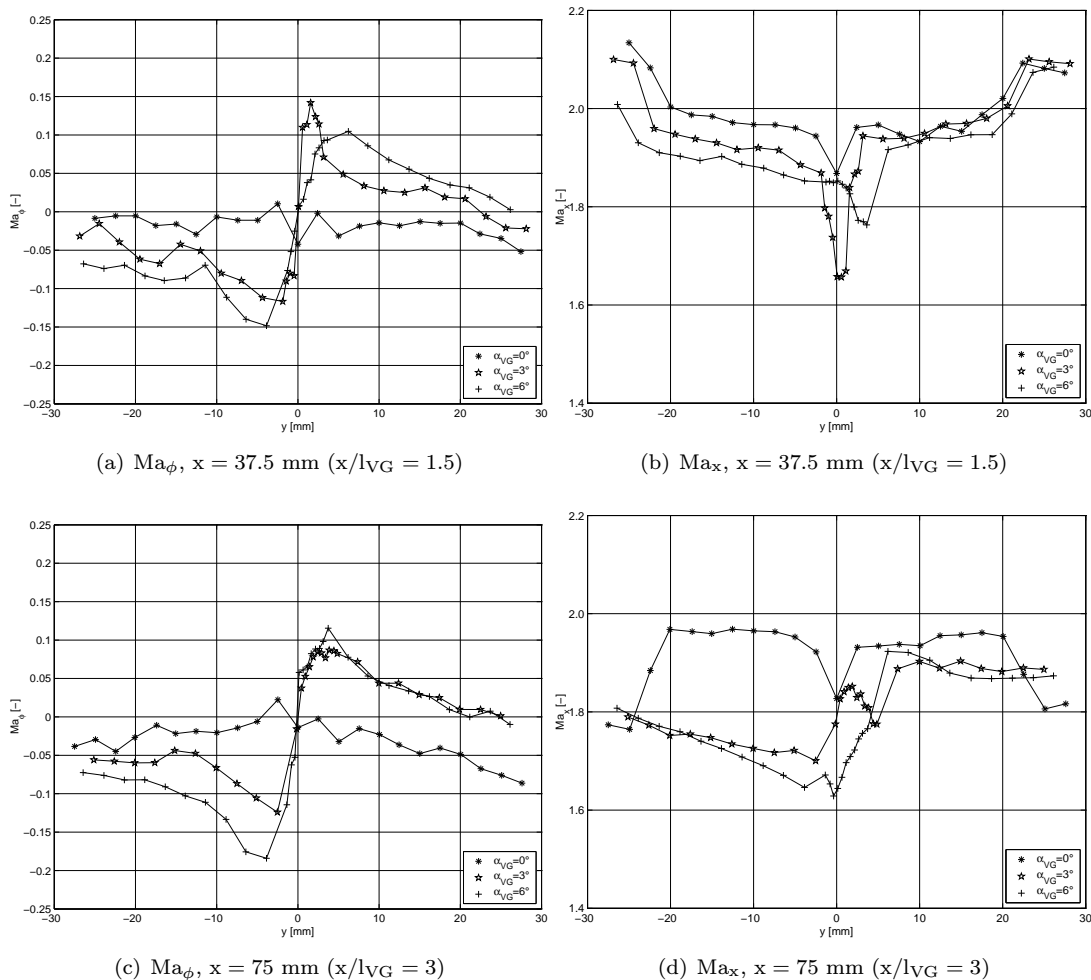


Abbildung 3: Verlauf der tangentialen und axialen Machzahlen Ma_ϕ und Ma_x entlang der Linie $-25 \text{ mm} \leq y \leq 25 \text{ mm}$ für verschiedene axiale Abstände zum Wirbelgenerator bei einer Anströmmachzahl von $Ma_\infty = 2.0$

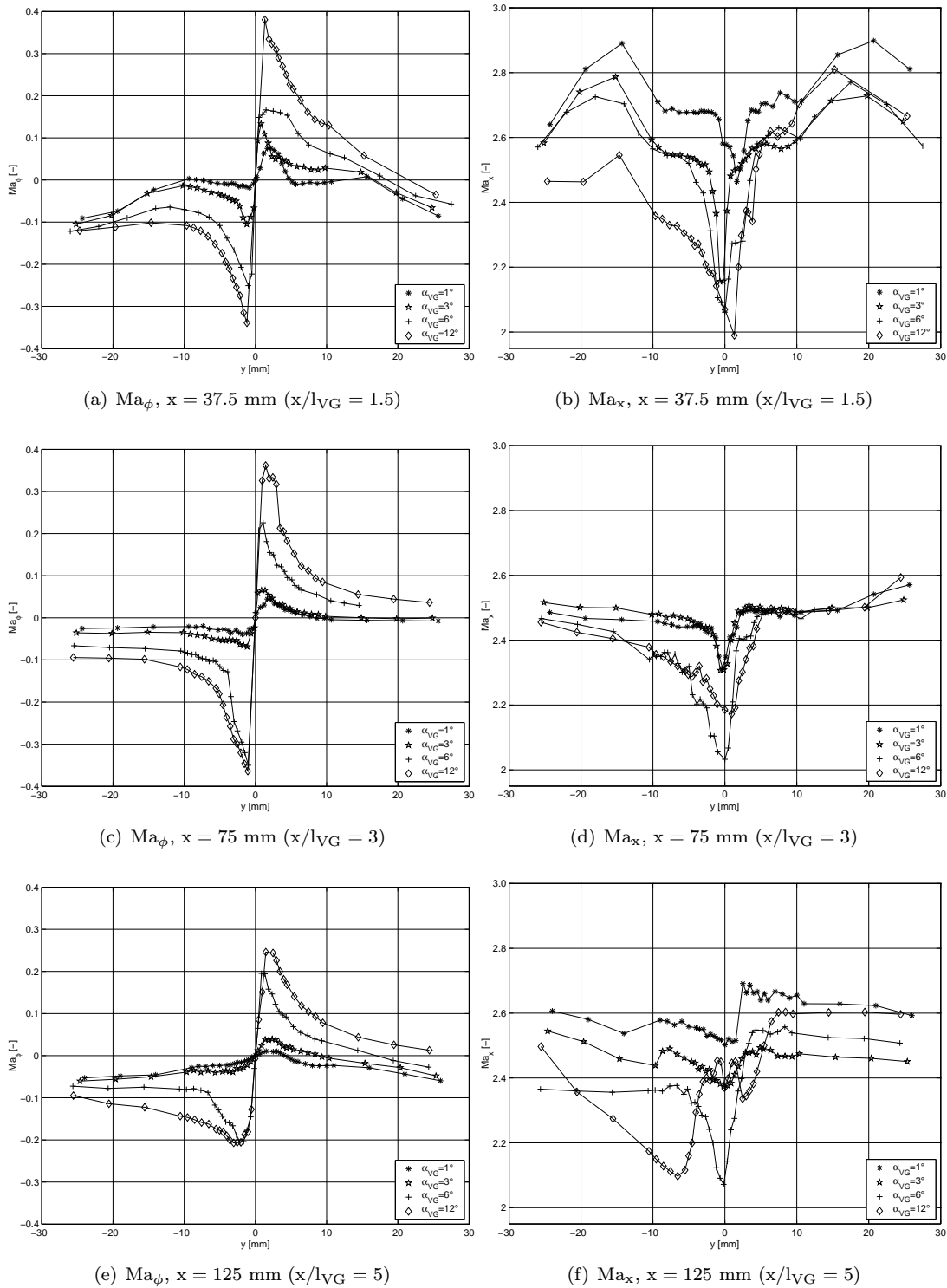


Abbildung 4: Verlauf der tangentialen und axialen Machzahlen Ma_ϕ und Ma_x entlang der Linie $-25 \text{ mm} \leq y \leq 25 \text{ mm}$ für verschiedene axiale Abstände zum Wirbelgenerator bei einer Anströmmachzahl von $Ma_\infty = 2.5$

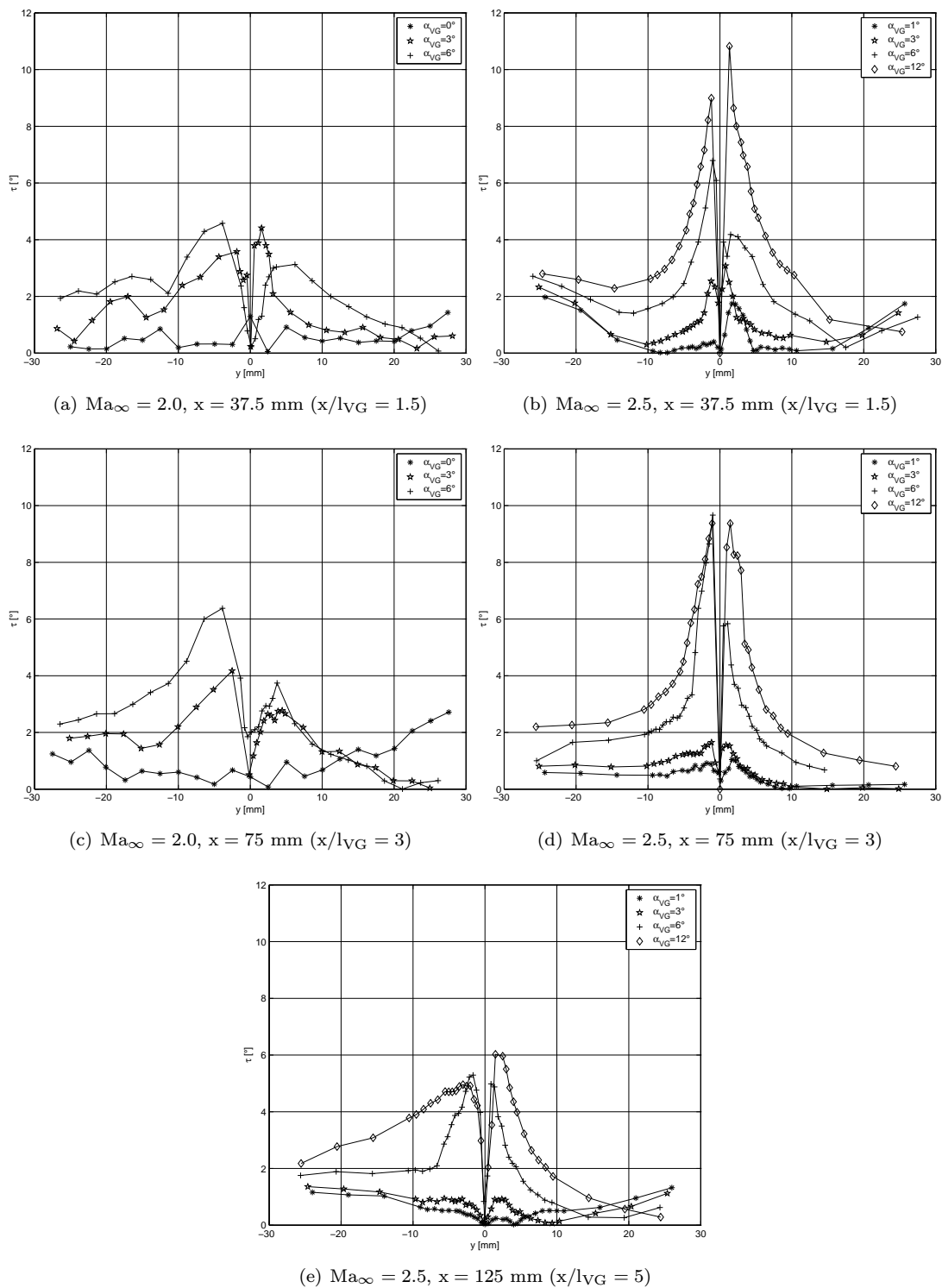


Abbildung 5: Verlauf des Drallverhältnisses $\tau = \arctan(|Ma_\phi/Ma_x|)$ entlang der Linie $-25 \text{ mm} \leq y \leq 25 \text{ mm}$ für verschiedene axiale Abstände zum Wirbelgenerator bei Anströmmachzahlen von $Ma_\infty = 2.0$ und $Ma_\infty = 2.5$