

RÄUMLICHES PTV IN GASSTRÖMUNGEN UND ANSÄTZE ZUR KORREKTUR DES BEGRENZTEN PARTIKELFOLGEVERMÖGENS

J. Frey*, **T. Putze****, **R. Grundmann***

Technische Universität Dresden

*Institut für Luft- und Raumfahrttechnik, **Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

Mommsenstraße 13, 01062 Dresden

Zusammenfassung

Der Vortrag behandelt die jüngsten Arbeiten auf dem Gebiet der räumlichen Strömungsmessung mittels 3D-PTV an der TU Dresden. Diese sind Bestandteil des DFG-Programms SPP-1147 „Bildgebende Messverfahren“.

Als Messaufbau dient ein dem Leitexperiment (Zylinderstumpf mit Endscheibe) nachempfundenen Fall. Die stereoskopische Erfassung des räumlichen Strömungsfeldes erfolgt durch virtuelle Mehrkamerasysteme mit Strahlteilern und einer Einzelkamera. Durch eine photogrammetrische Auswertung lassen sich die Bahnen der Partikel im Raum bestimmen.

Bei PTV-Messungen in Luft und anderen Gasen führen oft relativ große Dichteunterschiede zwischen strömendem Medium und Partikel (Styroporkugeln) zu Abdrifteffekten. Mit Hilfe eines Korrekturansatzes, welcher die Gesamtbeschleunigung eines Partikels mit seinem Schlupf gegenüber der Strömung korreliert, soll der tatsächliche Geschwindigkeitsvektor der Strömung im Messpunkt ermittelt werden. In einem Freifallversuch, bei dem die Re-Zahl über Druck und damit Dichte der Umgebungsluft in einer Kammer variiert wird, erfolgt eine Kalibrierung des Partikelschlupfes. Eine einfache Vergleichsrechnung liefert eine Abschätzung der Abweichung der Partikelbahnen von den Strom- bzw. Streichlinien.

Im Weiteren soll der Einfluss der Streuung des Partikeldurchmessers minimiert werden, indem die Teilchen sowohl im Fallversuch, als auch bei der eigentlichen Messung nach ihrer Größe klassifiziert werden.

Einleitung

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1147 "Bildgebende Messverfahren" wird vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IFP) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Luft- und Raumfahrttechnik (ILR) an der Vervollkommnung des 3D-PTV für Gasströmungen gearbeitet. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf einer Anpassung der Versuchstechnik an die Bedingungen in Luft, wo gegenüber Wasser im allgemeinen von größeren Messvolumina und kontrastärmeren Partikeln auszugehen ist. Geeignete Lichtquellen müssen gefunden werden, die eine gute Ausleuchtung bei Vermeidung von unerwünschten thermischen Effekten erlauben. Vor allem aber sind möglichst auftriebsneutrale und gut reflektierende Partikel zu suchen. Zum anderen muss die mathematische bzw. programmtechnische Auswertung angepasst werden.

Das Hauptproblem liegt in der Lösung von Mehrdeutigkeiten bei der Zuordnung der Partikelpositionen in den Teilbildern. Das kann durch multiokulare Kamerasysteme,

räumliche und zeitliche Zuordnung der Partikelabbilder sowie wahrscheinlichkeitbasierte Ansätze zur Vorhersage des Aufenthaltsortes der Partikel erfolgen.

Im Vordergrund des Vortrages steht ein Korrekturansatz des immer noch mäßigen Partikelfolgevermögens.

Grundlagen und Einordnung des Messverfahrens

Räumliches Particle Tracking Velocimetry (3D-PTV) ist das derzeit einzige Messverfahren, welches die zeitgleiche Bestimmung eines räumlichen Geschwindigkeitsfeldes in allen drei Komponenten gestattet. Es basiert auf der Verfolgung der Bewegungen einzelner Partikel, welche der Strömung zugegeben werden. Mit Hilfe stereoskopischer Optiken, die entweder mehrere Kameras oder geeignete Strahlteiler umfassen, wird das Strömungsfeld photographisch erfasst. Im Zuge einer photogrammetrischen Auswertung werden einzelne Partikel in den Teilbildern detektiert und ihr Aufenthaltsort im Raum bestimmt. Die Möglichkeit, Teilchen über längere Zeit zu verfolgen und dreidimensionale Trajektorien zu erzeugen, erlaubt außerdem eine Lagrange'sche Betrachtung des Strömungsfeldes. Aus den Ableitungen der Teilchenbahnen lassen sich die Geschwindigkeitskomponenten und Beschleunigungen ermitteln.

Experimenteller Aufbau

Als Referenzfall wurde eine dem Leitexperiment des DFG-Schwerpunktprogramms 1147 „Bildgebende Messverfahren“ entsprechende Anordnung gewählt. Diese umfasst einen Zylinder mit einem Verhältnis Durchmesser/Länge von 1:2 sowie einseitiger Endscheibe, den sog. Zylinderstumpf. Installiert ist der Aufbau in einem Strömungskanal mit geschlossener Messstrecke, der Anblasgeschwindigkeiten von bis zu 7 m/s erlaubt. Die bei einem Zylinderdurchmesser von 110 mm erreichten Re-Zahlen liegen mit etwa $4 \cdot 10^4$ allerdings noch nahezu eine Größenordnung unter denen beim Leitexperiment.

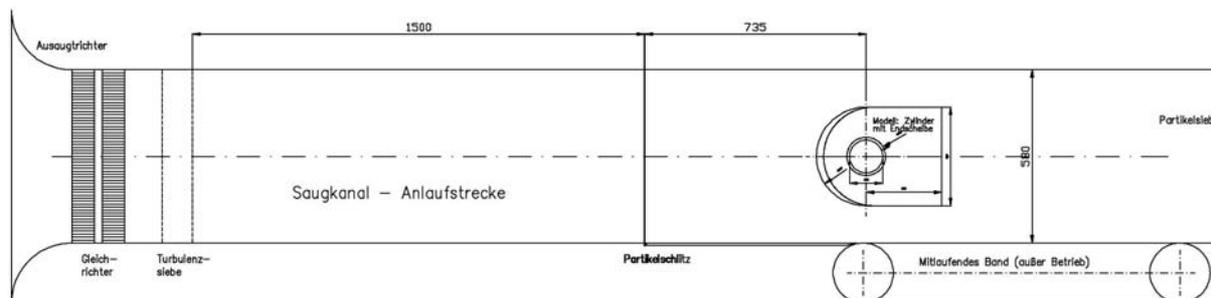


Abb. 1: Versuchsaufbau am ILR der TU Dresden

Mit Hilfe konventioneller Verfahren, wie Laserlichtschnitt, Druck-, Hitzdraht- und Konzentrationsmessungen wurde eine umfangreiche Datenbasis zur vergleichenden Auswertung der Ergebnisse geschaffen. Besonders die Ausbreitungsmessungen sollen dem Vergleich mit den Teilchenbahnen aus dem PTV dienen, wobei die Konzentration des Tracergases (Methan) ein direktes Maß für die Wahrscheinlichkeit des Aufenthaltsortes der Partikel ist. Es zeigt sich eine interessante Tendenz der Konzentrationsfahne zur Endscheibe hin, die mit einem „Einbruch“ des Kopfwirbels in den Nachlauf zu erklären ist, jedoch in dieser Stärke nicht erwartet wurde.

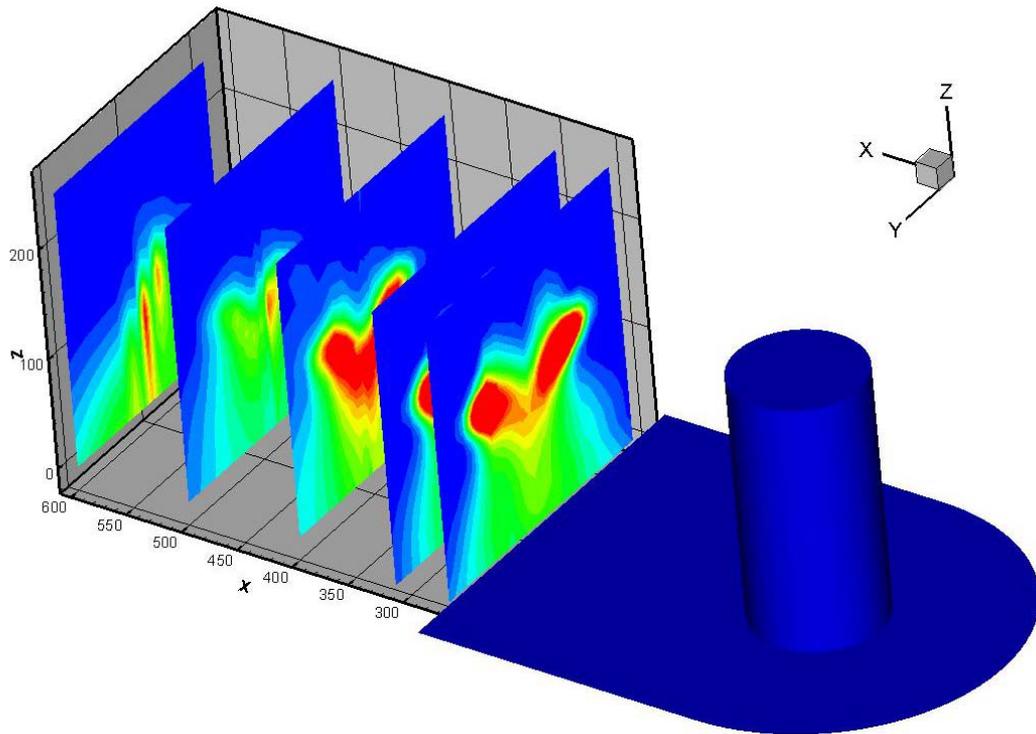


Abb. 2: Ergebnis der Konzentrationsmessungen, Ausbreitung der Methanfahne

Durch den im Saugbetrieb arbeitenden Kanal stellen sich in der Messtrecke für die Partikelzuführung günstige Druckverhältnisse ein, sie kann entweder weit stromauf oder direkt in den Nachlauf des Zylinders erfolgen. Tracergas kann durch eine Öffnung in der Staulinie des Zylinders zugeleitet werden.

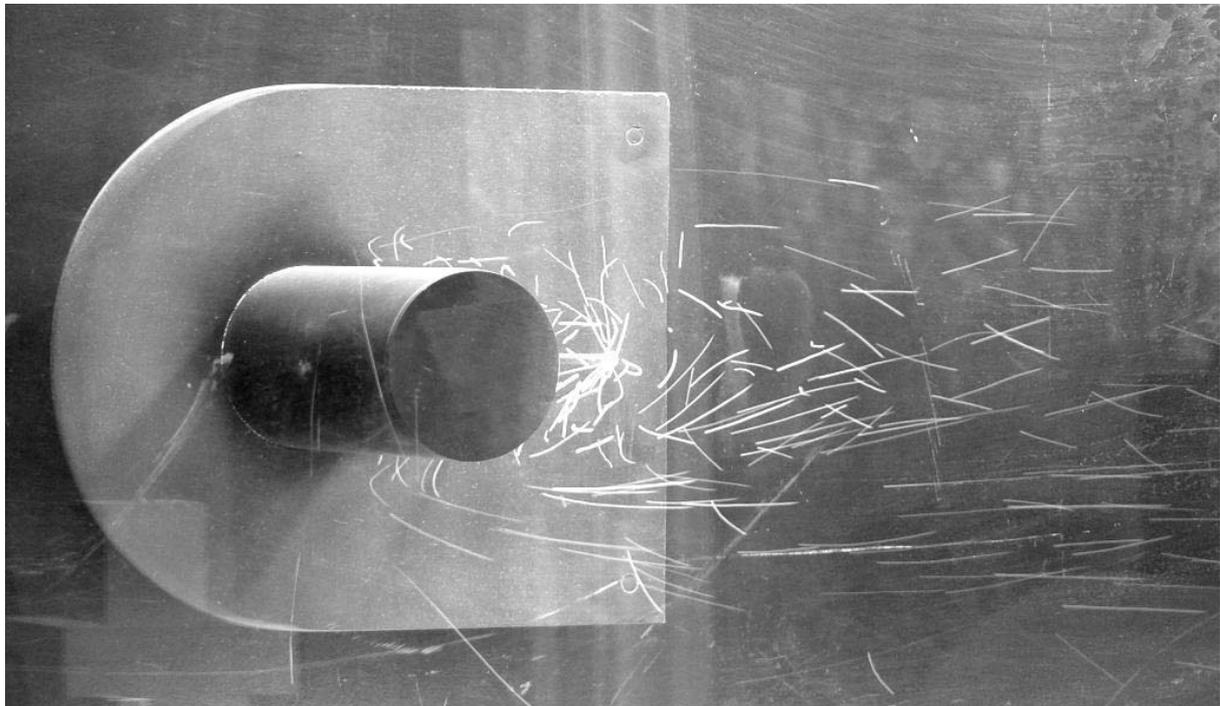


Abb. 3: Zugabe von Styropor-Partikeln in den Zylindernachlauf

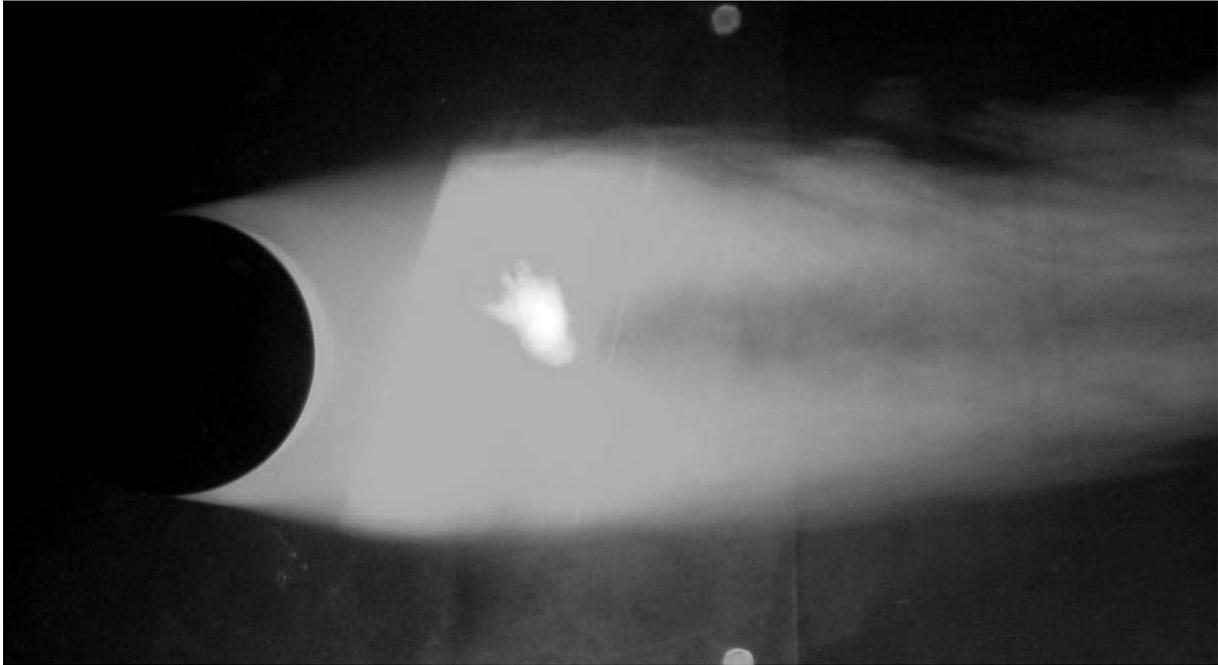


Abb. 4: Visualisierung des Zylindernachlaufes mit Nebel im Laser-Lichtschnitt

Die stereoskopische Optik besteht aus einem Spiegelsystem, welches das Bild einer einzelnen Hochgeschwindigkeitskamera in vier virtuelle Kamerabilder teilt (Abb. 5). Dadurch werden Synchronisationsprobleme vermieden.

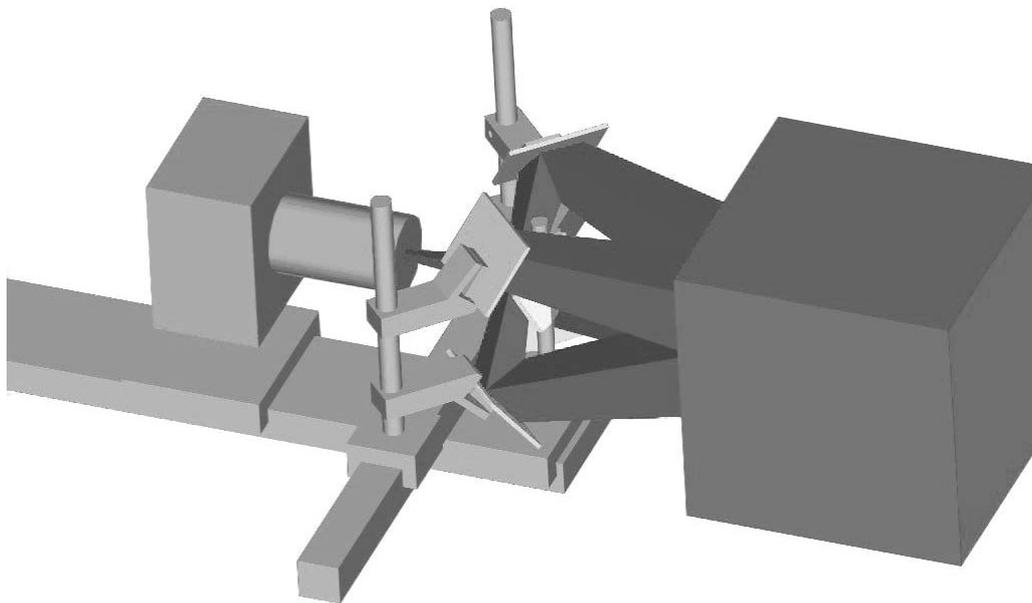


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau des virtuellen Vierkameranensystems

Zur weitgehenden Eliminierung von Mehrdeutigkeiten sowie zur Plausibilitätskontrolle erfolgt die räumliche Zuordnung aus insgesamt vier Teilbildern. Über Ansätze zum Verlauf der Teilchenbahn soll eine zeitliche Vorhersage des wahrscheinlichen Aufenthaltsortes eines Partikels möglich sein. Weiterhin ist geplant, die Partikel anhand charakteristischer Merkmale, wie Größe und Helligkeit, zu unterscheiden, um so die Zuverlässigkeit der Zuordnung zu erhöhen.

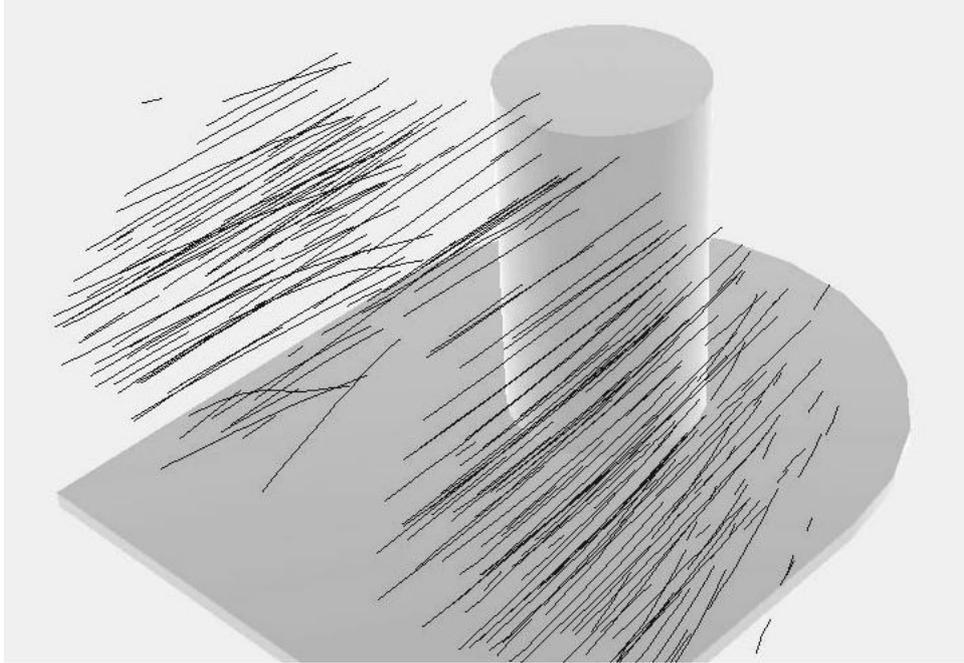


Abb. 6: Ausgewertete Teilchenbahnen der Zylinderumströmung

Korrekturansatz

Die Notwendigkeit der Erkennung und Zuordnung einzelner Partikel in den Teilbildern sowie das große Messvolumen stellen besonders in Gasströmungen hohe Anforderungen bezüglich Beleuchtung und Partikelauswahl. Neben der Installation starker Lampen, die zu ggf. unerwünschten thermischen Nebeneffekten in der zu vermessenden Strömung führen können, sind relativ große Partikel zu verwenden, welche ein Eigensinken aufweisen, das oft nicht zu vernachlässigen ist. Im vorliegenden Fall fiel die Wahl auf Kügelchen aus Schaumpolystyrol, sog. Styropor. Diese sind in verschiedenen Körnungen erhältlich, verwendet wurden bisher solche mit 0.1 bzw. 0.5 mm Durchmesser. Gegenüber den ebenfalls in Erwägung gezogenen, nahezu völlig auftriebsneutralen heliumgefüllten Seifenblasen haben sie den Vorteil wesentlich unkomplizierterer Handhabung sowie Robustheit und liefern deutlich mehr Streulicht.

Der hier dargestellte Korrekturansatz zielt auf die Bestimmung des Schlupfes des einzelnen Partikels ab. Mit dessen Hilfe soll aus dem Geschwindigkeitsvektor des Partikels auf den der Strömung zurückgerechnet werden.

Das 3D PTV liefert die räumlichen Teilchenbahnen der Einzelpartikel, aus denen neben den momentanen Geschwindigkeiten auch die Beschleunigungsvektoren ermittelt werden können. Der Gesamtbeschleunigungsvektor muss wiederum mit dem Schlupf eines Partikels direkt zusammenhängen. Die im vorliegenden Fall verwendeten Partikel erreichen im freien Fall eine Geschwindigkeit von weniger als 1 m/s. Die sich daraus ergebende Reynoldszahl in der Größenordnung 10^1 lässt vermuten, dass die Annahme laminarer Umströmung mit $c_w \sim 1/Re$ gerechtfertigt sei, was eine lineare Abhängigkeit von Widerstand und Geschwindigkeit bedeutete. Ein solcher Umstand erleichterte das Problem insofern, als das Kraft- und Geschwindigkeitskomponenten getrennt betrachtet und durch Superposition überlagert werden können.

Bestimmung des „ballistischen Koeffizienten“ eines Partikels durch einen Fallversuch

Die Bestimmung des Eigensinkens erfolgt in einem einfachen Fallversuch, bei dem das PTV selbst als Messverfahren dient. Zur Überprüfung der Annahme laminaren Widerstandverhaltens wurde die Re-Zahl in einer Unterdruckkammer variiert.

Die Annahme einer von der Dichte unabhängigen Fallgeschwindigkeit lässt sich anhand des Fallversuches nicht bestätigen, es zeigt sich aber auch bei weitem nicht der andere Extremfall eines konstanten Widerstandsbeiwertes (Abb. 8). Das bedeutet, dass der Zusammenhang zwischen Widerstand des Partikels und Reynoldszahl in einem aufwändigeren Versuch genau kalibriert werden muss. Weiterhin kann das Superpositionsprinzip wegen der Nichtlinearität auf die einzelnen Geschwindigkeits- und Kraftkomponenten nicht zur Anwendung kommen, sondern es ist immer der Gesamtbeschleunigungsvektor eines Partikels zu betrachten.

Die Fallgeschwindigkeit der Partikel weist immer noch eine gewisse Streuung auf, die zu einer entsprechenden Unsicherheit in der Korrektur führt. Neben der Verwendung engerer Sortiergruppen soll versucht werden, die Partikel anhand ihrer Größe zu klassifizieren und so den Schlupfvektor genauer bestimmen zu können. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass er auch zur Lösung von Mehrdeutigkeiten in der spaziotemporalen Zuordnung herangezogen werden kann, was bei einer stärkeren Vereinheitlichung der Partikel nicht gegeben ist.

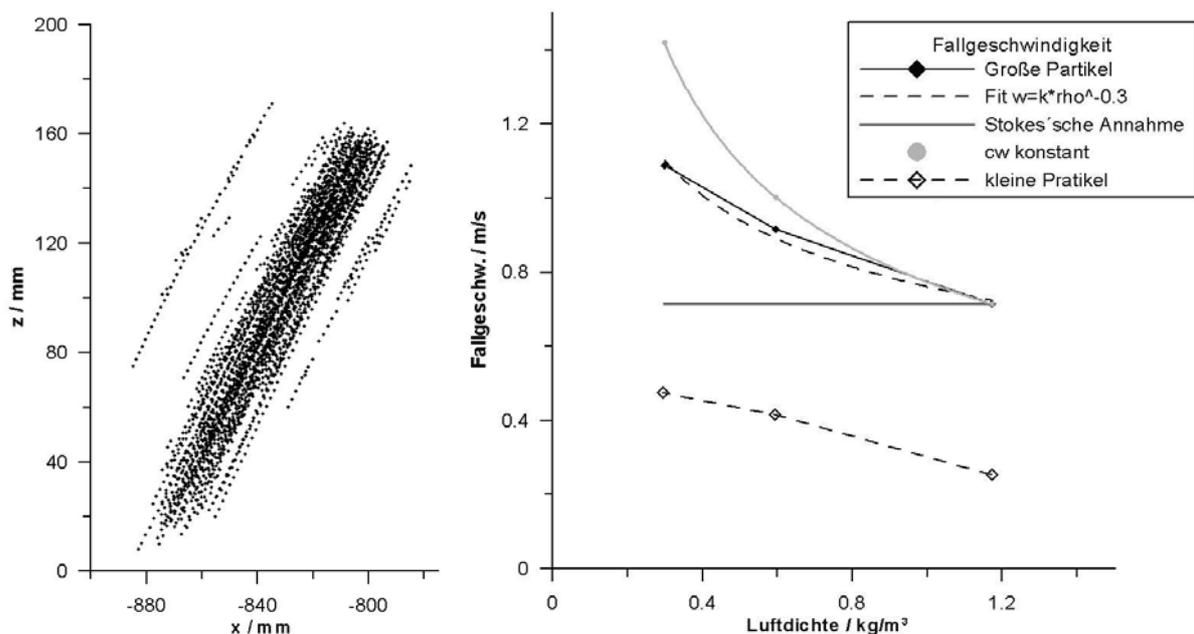


Abb. 7, 8: Auswertung des Fallversuches: Partikelpositionen im Koordinatensystem; Fallgeschwindigkeit abhängig von der Luftdichte

Vergleichsrechnung zur Lagrange'schen Betrachtungsweise

Auch nach einer Korrektur ist es nicht möglich, die Streichlinien der eigentlichen Strömung vollständig zu rekonstruieren. Dadurch gerät die angedachte Möglichkeit einer entsprechenden Betrachtungsweise in Gefahr. Mithilfe einer einfachen Vergleichsrechnung, welche die Partikelbahnen modelliert, kann der Grad der Rekonstruierbarkeit in Abhängigkeit vom Partikelfolgevermögen abgeschätzt werden. Die Beschränkung auf eine Potentialströmung scheint dabei statthaft, da in abgelösten Strömungen ohnehin keine

Teilchenbahnen reproduzierbar sind. Weiterhin wurde zur einfacheren Erfassung der prinzipiellen Zusammenhänge von der Stokes'schen Annahme ausgegangen.

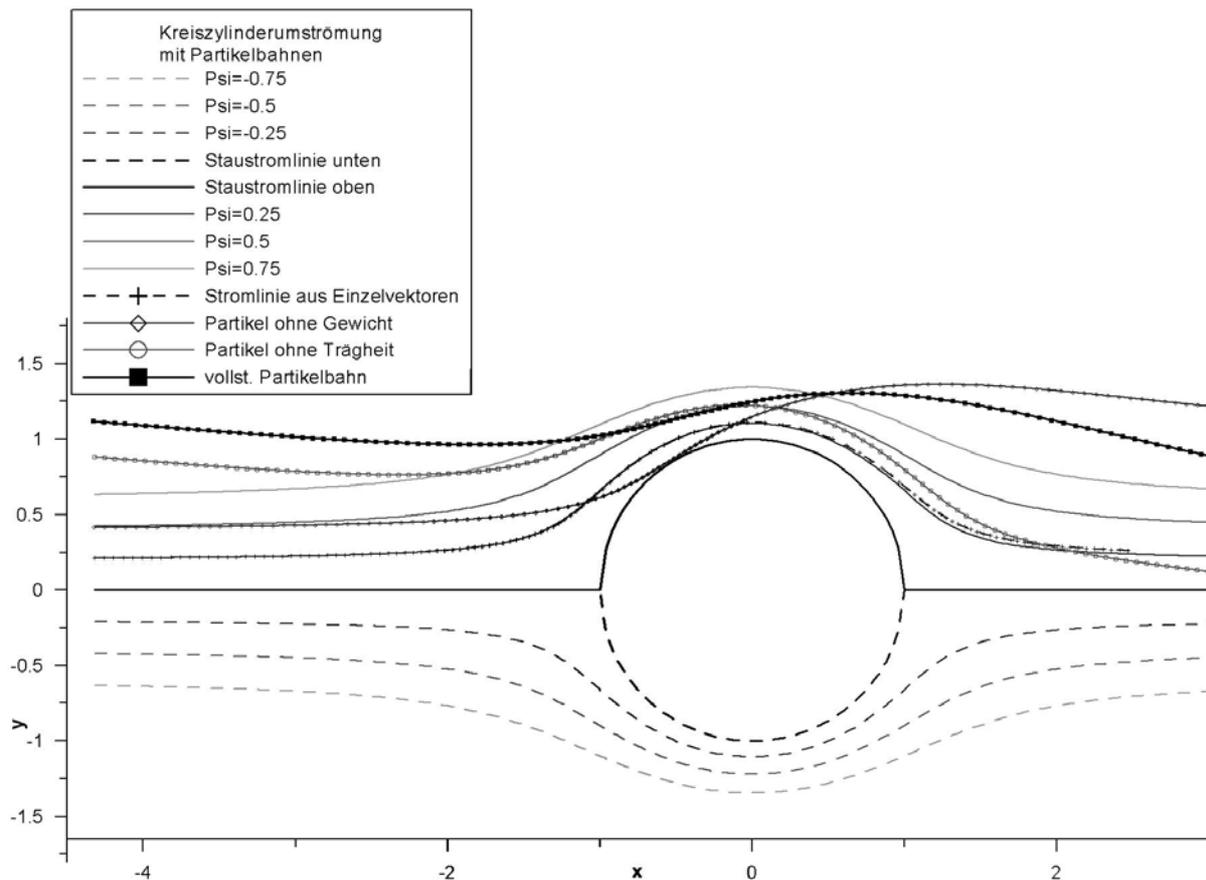


Abb. 9: Nachgerechnete Partikelbahnen, es wurden sowohl Partikel ohne Schlupf modelliert, als auch solche mit nur Trägheits- oder Gewichtsabdrift, letztlich mit vollständiger Modellierung

In Abb. 9 ist als Endergebnis die Trajektorie eines Partikels angegeben, das unter den Ausgangsbedingungen des vorliegenden Experiments (Eigensinken des Partikels etwa ein Zehntel der Anströmgeschwindigkeit) auf der Stromlinie $\Psi=1.6$ eingeschossen worden wäre.

Literatur

- Maas, H.-G., Grün, A., Papantoniou, D., 1993: Particle tracking in threedimensional turbulent flows – Part I: Photogrammetric determination of particle coordinates, Experiments in fluids, Vol. 15, pp.133-146
- Netsch, Th., 1995: Dreidimensionale Particle Tracking Velocimetry, Dissertation, Universität Heidelberg
- Willneff, J., Grün, A., 2002: A new spatio-temporal matching algorithm for 3D-particle-tracking velocimetry, The 9th international symposium on transport phenomena and dynamics of rotating machinery, Honolulu, Hawaii, USA, february 10-14, 2002
- Putze, T., 2004: Einsatz einer Highspeedkamera zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern in Gasströmungen, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, Band 13, S. 325-332
- Putze, T., Hoyer, K., 2005: Modellierung und Kalibrierung eines virtuellen Vier-Kamerasystems auf Basis eines verstellbaren Spiegelsystems, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2005, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg