

Präzise Subpixel-Interpolation für die PIV/PTV-Bildanalyse

Holger Nobach, Nils Damaschke und Cam Tropea

Bei der Anwendung der Particle Image Velocimetry (PIV) oder der Particle Tracking Velocimetry (PTV) zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern strömender Medien hat die Bildverarbeitung entscheidenden Einfluss auf die zu erreichende Genauigkeit. Ausgehend vom prinzipiellen Ablauf der Bildverarbeitung werden einzelne Einflussgrößen untersucht und das Verarbeitungsverfahren optimiert. Die erreichbare Genauigkeit bei der Bestimmung der Positionsänderung beträgt für das beschriebene Verfahren in gradientenfreien Strömungen 0.01 pxl.

Einführung

Für die Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern mittels bildgebender Messverfahren wird die Positionsänderung kleiner Streupartikel zwischen zwei kurz aufeinanderfolgenden Aufnahmen erfasst. Sowohl die Particle Tracking Velocimetry (PTV), die die Positionsänderung einzelner Partikel nutzt, als auch die statistische Particle Image Velocimetry (PIV) sind prinzipiell in der Lage, Genauigkeiten zu erzielen, die weit besser als die räumliche Auflösung des Aufnahmesystems sind. In beiden Fällen werden Bildanalyseverfahren benötigt, die eine genaue Bestimmung der Subpixel-Position von Signalpeaks ermöglichen.

Bei der PTV werden die Subpixel-Positionen für alle gefundenen Teilchenabbildungen direkt aus den aufgenommenen Bildern bestimmt. Dazu ist ein geeignetes Interpolationsverfahren nötig. In einem weiteren Schritt erfolgt dann die Zuordnung der gefundenen Teilchen und die Bestimmung der Positionsänderung.

Bei der PIV-Bildanalyse wird das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion als mittlerer Verschiebevektor interpretiert. Hierbei werden oft Koordinatentransformationen und Geschwindigkeitsgradienten durch Subpixel-Interpolation und Resampling der Bilddaten berücksichtigt. Die genaue Bestimmung der Positionsänderung erfolgt dann ebenfalls mittels einer Subpixel-Interpolation, angewendet auf das Maximum in der Korrelationsebene.

Teilchenabbildung und Subpixel-Interpolation

Aufgrund der Gauß-ähnlichen Teilchenabbildung [WG91] wird sowohl bei der Bestimmung der Teilchenpositionen aus den Bilddaten (PTV) als auch bei der Maximumslokalisierung in der Korrelationsfunktion (PIV) üblicherweise ein zweidimensionales, quadratisches Polynom an die logarithmierten Intensitätswerte um das gefundene lokale Intensitätsmaximum angepasst. In diesem vereinfachten Modell der Bildentstehung wird oft die Ursache für die begrenzte Genauigkeit der Bildanalyse vermutet. Detaillierte Untersuchungen zu den Auswirkungen [Nob04] haben jedoch gezeigt, dass der entstehende Fehler nicht maßgeblich für das Verfahren ist. Bereits für Teilchenabbildungen mit Durchmessern von 3.5 pxl bewirken alle Bildentstehungsmodelle maximale systematische Fehler von unter 0.01 pxl.

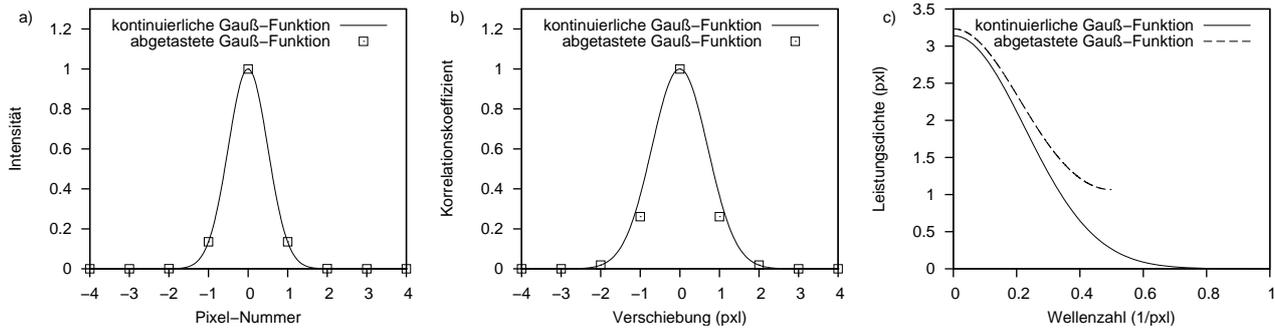


Abbildung 1: Auswirkung der Unterabtastung: a) abgetastete Gauß-Funktion, b) Autokorrelationsfunktion und c) spektrale Leistungsdichte

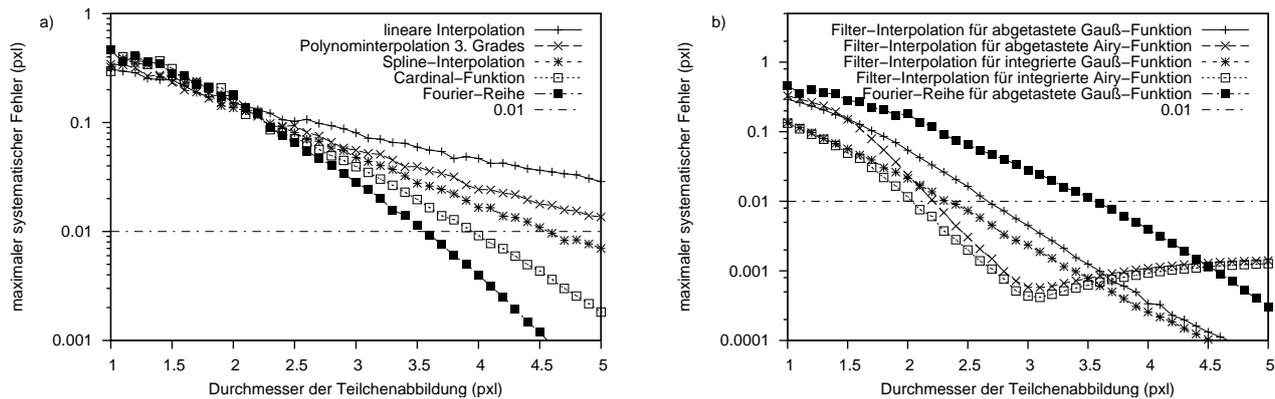


Abbildung 2: Systematischer Fehler der Subpixel-Positionsbestimmung nach Interpolation und Resampling der Bilddaten

Wesentlich größere Fehler entstehen durch die geringe räumliche Auflösung der Teilchenbilder, welche in praktischen Messungen Durchmesser von 2 bis 4 pxl aufweisen. Abb. 1 zeigt eine auf diese Weise abgetastete Gauß-Funktion mit der Breite von 2 pxl, ihre Autokorrelationsfunktion und ihr Leistungsdichtespektrum, welches deutliche Aliasing-Fehler aufweist. Die ursprüngliche Gauß-Funktion ist somit unterabgetastet, was wesentliche Konsequenzen für die Bildinterpolation und die Bestimmung der Kreuzkorrelationsfunktion hat.

Auswirkung der Unterabtastung auf die Interpolation

Wegen ihrer Robustheit und einfachen Realisierbarkeit ist für die Berechnung von Bildwerten zwischen den ganzzahligen Pixelpositionen die bilineare Interpolation weit verbreitet. Da diese Interpolationsvorschrift nicht den Gauß-ähnlichen Intensitätsverlauf der Teilchenabbildungen berücksichtigt, wird die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung hierdurch stark beschränkt (Abb. 2a). Mit höhergradigen Interpolationsvorschriften sind hier bessere Ergebnisse zu erwarten [Sca02]. Es wurden zusätzlich Polynome 3. Ordnung, kubische Splines mit 20 Stützstellen, eine Fourier-Reihe und eine Abwandlung dieser (cardinal function interpolation, [Hal79]) mit einem Hamming-Fenster untersucht. Zwar sind die Ergebnisse der höhergradigen Interpolationsvorschriften besser als die der linearen Interpolation, jedoch werden alle von der zu geringen Abtastung der Bilddaten beschränkt.

Bessere Ergebnisse lassen sich prinzipiell nur dann erreichen, wenn zusätzlich die Information über die Signalform der Teilchenabbildungen in Form einer modellbasierten Analyse eingeht. Zu diesem Zweck werden die Originalbilder zunächst mit einem Gauß-Filter geglättet. Hier-

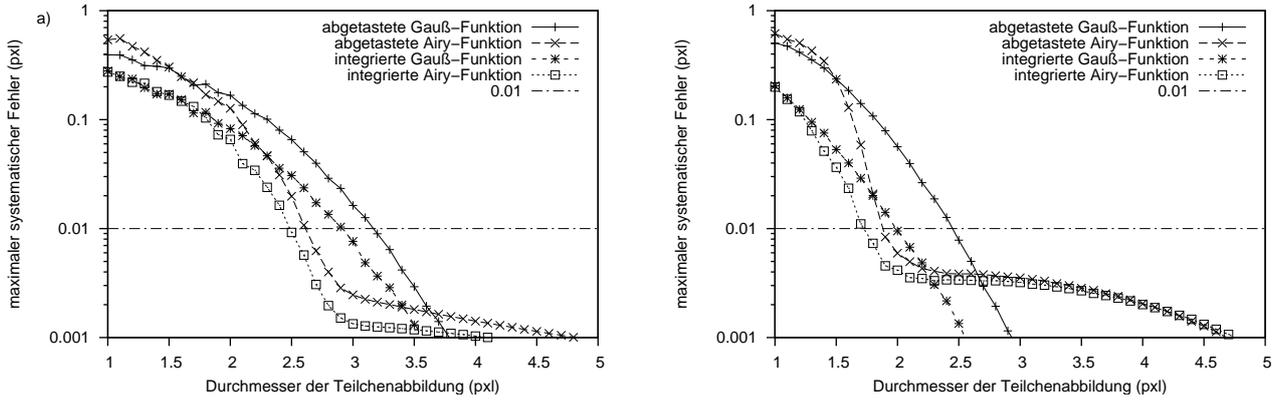


Abbildung 3: Systematischer Fehler der Subpixel-Bewegungsbestimmung nach der Kreuzkorrelation a) ohne Interpolation und b) mit dem Gauß-Filter

durch werden weder der Signaltyp noch die Position verändert. In Abb. 2b sind die Ergebnisse dieser Interpolation mit anschließender Bestimmung der Teilchenposition im Vergleich mit der zuvor besten Interpolationsvorschrift, der Fourier-Reihe, für verschiedene Intensitätsfunktionen zusammengefasst. Die Ergebnisse sind wesentlich genauer, und bereits ab Durchmessern der Teilchenabbildungen von 2.7 pxl sind die maximalen systematischen Fehler kleiner als 0.01 pxl.

Auswirkung der Unterabtastung auf die Korrelationsfunktion

In Abb. 1b ist die Autokorrelationsfunktion (AKF) der abgetasteten Gauß-Funktion im Vergleich zur AKF der kontinuierlichen Gauß-Funktion zu sehen. Während die Bestimmung der Teilchenpositionen mit dem Gauß-Modell für diesen idealisierten Fall zu exakten Ergebnissen führt, weicht die AKF der abgetasteten Funktion deutlich von der AKF der kontinuierlichen Funktion ab. Darüber hinaus wird auch der Signalcharakter verändert, so dass die konventionelle Subpixel-Interpolation in der Korrelationsebene zu systematischen Fehlern führt (Abb. 3a).

Neben der verbesserten Subpixel-Interpolation der Bilddaten bewirkt das oben eingesetzte Gauß-Filter eine Verbreiterung der Teilchenabbildung und führt somit zu einer Abschwächung der Unterabtastung. Damit wird gleichzeitig die Subpixel-Lokalisierung des Korrelationsmaximums genauer. Abb. 3b zeigt die maximalen systematischen Fehler bei der Bestimmung der Ortsveränderung. Für die abgetastete Gauß-förmige Intensität wird die Genauigkeit von 0.01 pxl bereits für Durchmesser der Teilchenabbildung von 2.5 pxl erreicht gegenüber 3.2 pxl ohne die Bildinterpolation. Für die anderen Intensitätsfunktionen wird diese Grenze bereits für Durchmesser unterhalb von 2 pxl unterschritten.

Verbessertes Verfahren

Bis hierher wurden nur die Auswirkungen der Teilchenabbildung durch die reale Optik und der Unterabtastung auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung der Teilchen aus den Bilddaten und der Ortsveränderung aus der Kreuzkorrelationsfunktion betrachtet. Die Verwendung eines Gauß-Filters zur Subpixel-Interpolation der Bilddaten führt in beiden Fällen zu einem deutlichen Genauigkeitsgewinn. Gleichzeitig führt das Filter zu einer Verbreiterung des Signals und damit zu einer erhöhten Rauschempfindlichkeit der Subpixel-Positionsbestimmung.

Weitere Ursachen für systematische und zufällige Fehler, wie der Hintergrund-Grauwert, das Abschneiden von Teilchenabbildungen an Bild- bzw. Segmentgrenzen, das Ein- bzw. Heraustreten von Teilchenabbildungen in bzw. aus dem betrachteten Bildausschnitt oder das Photonenrauschen wurden ebenfalls untersucht [Nob04] und führen zu einem verbesserten Algorithmus.

Zur Verringerung der Rauschempfindlichkeit nach der Filterung werden die Bilddaten (für PTV) bzw. die Korrelationsfunktion (für PIV) nachträglich unterabgetastet, so dass nur jede zweite Zeile und jede zweite Spalte für die Modellanpassung herangezogen wird. Für die Reduktion des Einflusses durch den Hintergrund-Grauwert wird ein Gauß-Modell mit einer zusätzlichen Konstanten an die Intensitätsverteilung angepasst. Während die Korrelationsfunktion sehr empfindlich gegenüber dem Abschneiden von Teilchenabbildungen an den Bildgrenzen ist, erweist sich die in der Bildverarbeitung weit verbreitete Normierung mit den lokalen Varianzen der miteinander korrelierten Bildausschnitte [WG91] als sehr robust [NLR01, Nob04]. Eine weitere Reduzierung dieses Einflusses sowie der Fehler durch das Ein- bzw. Heraustreten von Teilchenabbildungen wird durch die an den Geschwindigkeitsvektor angepasste symmetrische Verschiebung der Bildausschnitte erreicht. Sowohl die Modellanpassung an die Intensitätsverteilung als auch die Verschiebung der betrachteten Bildausschnitte werden iterativ optimiert.

Mit diesem Algorithmus konnte eine Genauigkeit von 0.01 pxl für gradientenfreie Strömungsfelder in weiten Parameterbereichen nachgewiesen werden.

Zusammenfassung

Mit dem dargestellten Verfahren kann die Genauigkeit der PTV- bzw. PIV-Bildanalyse wesentlich gegenüber konventionellen Verfahren erhöht werden. Die Genauigkeit von 0.01 pxl kann jedoch im Falle der PIV nur für gradientenfreie Strömungen erreicht werden. Beim Auftreten von Geschwindigkeitsgradienten wird in erster Näherung über den Bildbereich gemittelt. Bei genauerer Betrachtung werden aufgrund der Abtastung des Strömungsfeldes durch die Teilchen nur bestimmte Geschwindigkeitswerte erfasst, wobei eine zusätzliche Gewichtung durch unterschiedliche Teilchengrößen und der damit verbundenen unterschiedlichen Streulichtintensität erfolgt.

In diesem Fall kann eine vergleichbare Genauigkeit durch gleichzeitige Bestimmung der Geschwindigkeitsgradienten erreicht werden [Har02, Rau03]. Prinzipiell ist das oben dargestellte Verfahren für diesen Fall anzupassen, wobei die Geschwindigkeitsgradienten bei der Subpixel-Interpolation der Bilddaten einfließen.

Literatur

- [Hal79] HALL, E L.: *Computer Image Processing and Recognition*. New York : Academic, 1979
- [Har02] HART, D P.: PIV Processing Using Multidimensional Correlation. In: *Proc. 10th Int. Symp. on Flow Visualization*. Kyoto, Japan, 2002. – paper F0374
- [NLR01] NOGUEIRA, J ; LECUONA, A ; RODRIGUEZ, P A.: New source of peak locking to the window size: analysis and its removal. In: *Proc. 4rd Int. Workshop on PIV '01*. Göttingen, Germany, 2001. – paper 1013
- [Nob04] NOBACH, H: Accuracy of sub-pixel interpolation in PIV and PTV image processing. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik. 2004. – Forschungsbericht. Report No. 001/2004
- [Rau03] RAUFEISEN, A: *Realisierung einer multidimensionalen Korrelationsanalyse für die Particle Image Velocimetry*, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik, Diplomarbeit, 2003
- [Sca02] SCARANO, F: Iterative image deformation methods in PIV. In: *Meas. Sci. Technol.* 13 (2002), S. R1–R19
- [WG91] WILLERT, C E. ; GHARIB, M: Digital particle image velocimetry. In: *Exp. in Fluids* 10 (1991), S. 181–193