

1 Einführung

- Optische Strömungsmesstechnik basiert auf Gesetzen der geometrischen / physikalischen Optik
- Erfordert lichtdurchlässige Fluide / Behälterwände
- Bestimmung der Bewegung über Teilchen im Fluid (Tracer)

Eulersche Betrachtung

- Ortsfest
- Änderung der Strömungsgrößen an bestimmter Stelle wird betrachtet, Teilchen ziehen vorbei
- Ziel: quantitative Beschreibung einer Strömung in jedem Punkt zu jeder Zeit
- PIV, LDV

Lagrangische Betrachtung

- Massen- / Teilchenfest
- Einzelnes Teilchen wird in zeitlicher Bewegung im Raum verfolgt
- Ziel: Ermittlung von Bahnlinien in betrachtetes Feld
- PTV, Strömungsvisualisierung

2 Strömungsvisualisierung und Ähnlichkeitsbetrachtung

Reynolds visualisierte erstmals turbulente-laminare Übergang mit Farbfäden

Textilfadenmethode bei Luftströmungen

- Befestigung von Seiden- oder Nylonfäden auf Oberfläche
- Fäden richten sich in Strömungsrichtung aus und sind nur bei stationärer, laminarer Strömung völlig ruhig

~~Anstrichmethode zur Oberflächenvisualisierung bei Luft- und Wasserströmungen~~

Anstrichmethode zur Oberflächenvisualisierung bei Luft- und Wasserströmungen

- Aufbringung Suspension aus feinhörnigen Titanweiß und Petroleum auf eine schwarze Oberfläche
- Suspension fließt längs der Strömung entlang der Oberfläche, Petroleum verdunstet, Titanweiß formiert sich zu Linien

Lichtschnittverfahren bei optisch gut zugänglichen Strömungen

- Zugabe von Partikeln in die Strömung
- Ausleuchtung 2D-Ebene des Strömungsfelds (Holographie / Laserlichtschnitt)
- Von Teilchen gestreutes Licht mit Kamera aufnehmen

Rauchliniennmethode zur Visualisierung von Luftströmungen

- Rauch wird aus feinen Röhren vor dem Modell in die Strömung eingebracht
- Anpassung der Rauchgeschwindigkeit an lokale Strömungsgeschwindigkeit
- Geeignet zur Sichtbarmachung laminarer Strömungen

Rauchdrahtmethode zur Visualisierung von Luftströmungen

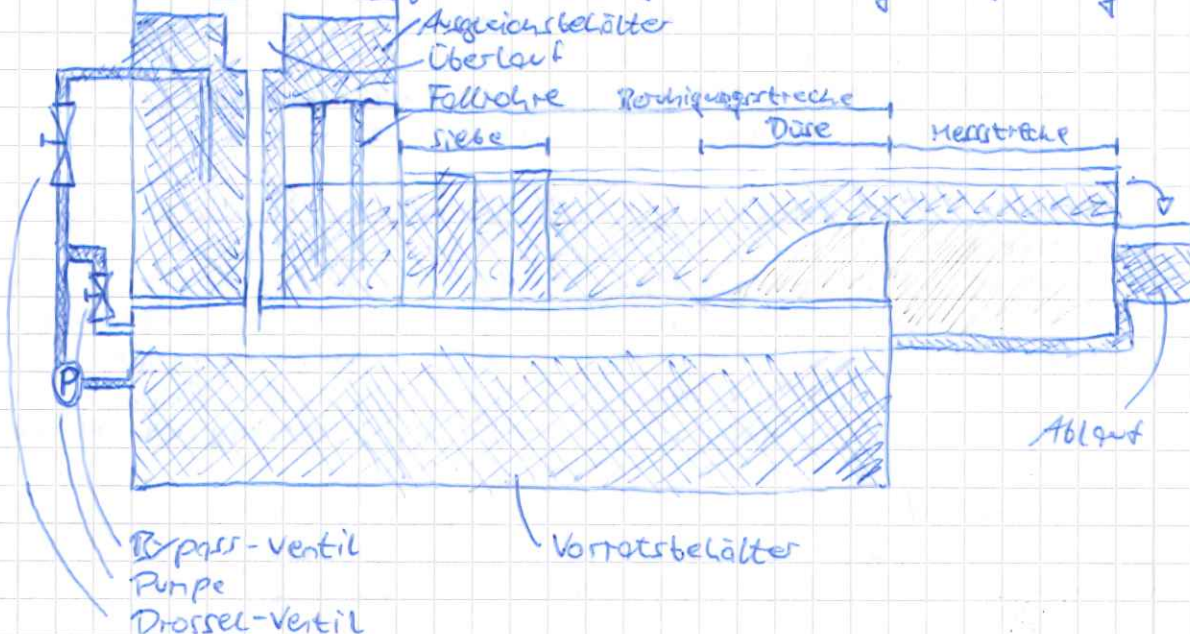
- Elektrisch erhitzter Draht wird senkrecht zur Strömung eingebracht
- Öltröpfchen laufen am Draht herab und zerfallen in kleine Tröpfchen
- Von jedem Öltröpfchen geht eine Streichlinie aus.

Es existieren unterschiedliche Methoden zur Ermittlung der Ähnlichkeitskennzahlen, mit denen zwischen Modell und Realität geredet wird

- Dimensionsanalyse
- Kräfte- / Energieverhältnisse
- Methode der Differentialgleichung

3 Visualisierung einer Turbinenströmung mit Farbstoffen

Aufbau eines Flachbett-Wasserkanals zur Strömungsuntersuchung



Es wird eine Farbe in die Anströmung und eine andere Farbe über Bohrungen in die Grenzschicht eingebracht, sodass die Ablöselinie sich herausbilden kann. Dabei muss Strömungsgeschwindigkeit und damit Druck der Farbe den der Strömung entsprechen. Bei Grenzschicht leichter Überdruck nötig (Geschw. 0) Winkel der Einbringung schwach zur Wand üblich, Farbe kann auch auf Modelloberfläche aufgetragen werden Ziel der Untersuchung meistens Grenzschicht + Sekundärströme der G

Visualisierung in Ringgitter Wasserkanal

- + Sekundärströmungen aufgrund der radiale Druckgradienten erforschen
- + Eine komplette Turbinenstufe kann untersucht werden
- Aufwändiger Umbau bei neuer Messstrecke
- Schwieriger Zugang zur Strömung
- Farbeinbringung vorwiegend über Wanddruckbohrungen

4 Visualisierung einer Verdichtungsströmung mit Farbstoffen

- Laminare Strömung benötigt, damit Farbfäden erkennbar und nicht Farbwolke bilden
- Wesentliche Ähnlichkeitskennzahl ist Reynoldszahl $Re = \frac{\rho c L}{\eta}$

Grundlegender Vorgehen bei Strömungsvisualisierung mit Farbfäden

~~unter Verwendung geeigneter Farbstoffe~~

~~unter Verwendung geeigneter Farbstoffe~~

- Festlegung des Farbstoffes (Lebensmittelfarbe / fluoreszierend, ...)
- Festlegung geeigneter Mischung (Farbkonzentration / dichte)
- Regulierung des Farbdurchflusses für lokale Strömungsgeschw.
 - Veränderung der geometrischen Höhe des Vorratsbehälter
 - Regulierung durch Ventile / Druckbehälter
- Möglichst kleine Windstärke der Rohre aus gut
- koronare Wirbelströme verhindern ($80 < Re < 200$)

4. Visualisierung einer Verdichterströmung mit Farbstoffen

Vorgehensweise bei pastöser Farbe auf Modelloberfläche

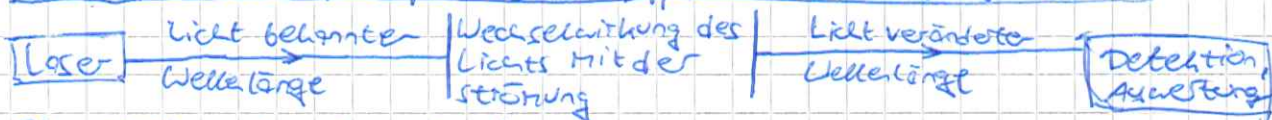
1. Fertlegung einer geeigneten Mischung des Farbstoffs
2. Zähflüssige Farbe in eine Spritze einbringen und diese an die Sonde mit möglichst großen Außendurchmesser anschließen
3. Aufbringen von Punkten oder Streifen auf die Modelloberfläche
4. Wandschubspannungen erzeugen nach einiger Zeit Wandschubspuren

Vorgehensweise beim Anbringen von Wundbohrungen

1. Genaue Planung notwendig
 2. Geeignete Farbmischung, nicht zu zähflüssig
 3. Farbe tritt mit geringem Überdruck an
- Gut nutzbar bei schlechter Zugänglichkeit (Ringumströmung)

Strömungsvisualisierung ermöglicht ~~unmittelbar~~ ^{nur} die Bestimmung qualitativer Größen

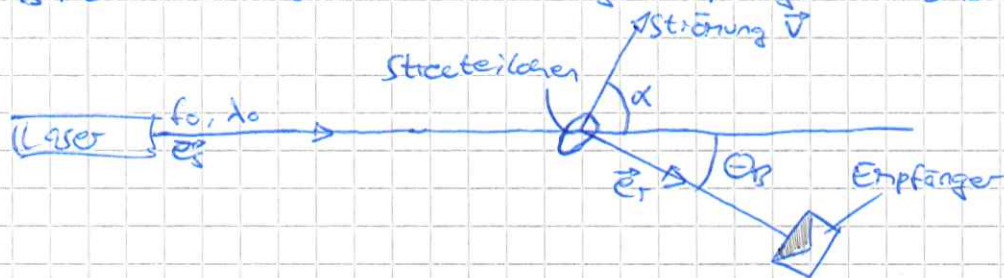
5. Das Physikalische Prinzip der Laser-Doppler-Velocimetrie LDV



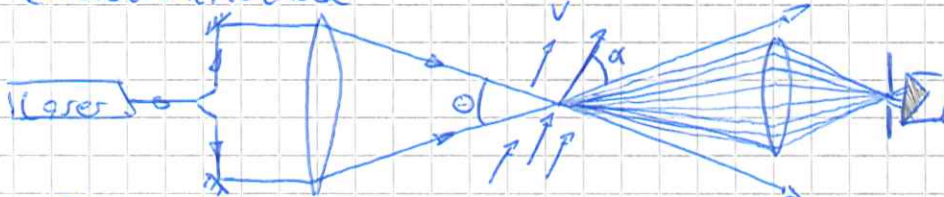
Physikalische Grundlage der Laser

- Quelle von besonders parallelem, intensivem, monochromatischem Licht
- Laserlicht wird über Spiegel und Planspiegel in das Laseraktive Material zurückgeschickt, Abstand zw. Spiegeln vielfaches von $\frac{\lambda}{2}$ für stehende Welle

Bei LDV sind streuteilchen bewegte Empfänger und Sender von Licht

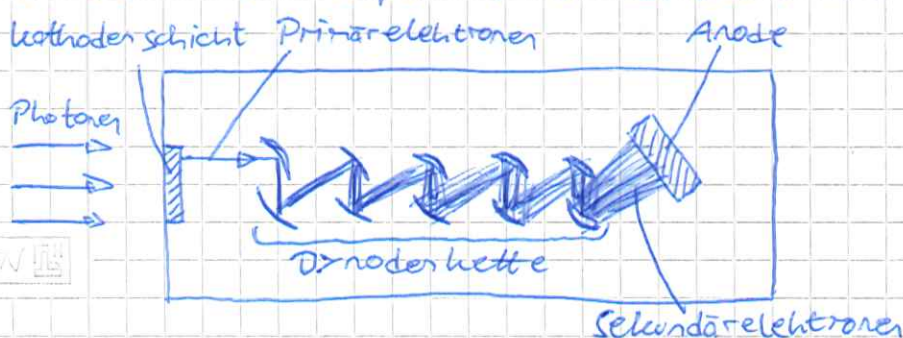


Zweistrahlmethode



- Es besteht eine lineare Zunahme zur Dopplertfrequenz und Strömungsgeschw.
- Dopplertfreq $\leftarrow$ Lichtfreq $\rightarrow$ Überlagerungsprinzip zur Bestimmung der Dopplertfreq anwenden (Zweistrahl-Anordnung)
- keine Kalibrierung nötig

Skizze Photomultiplier / Sekundärelektronenvervielfacher

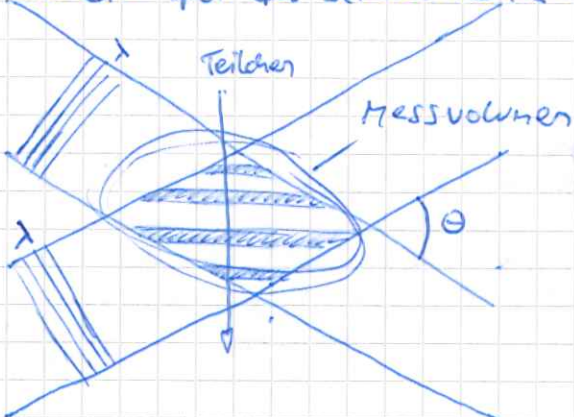


6. Messsysteme der Laser-Doppler-Velocimetrie LDV

Das Messvolumen des Zweistrahl-LDV ist ein Ellipsoid. Intensität des Laserstrahls entspricht Glockenkurve. Im Bereich des Durchmessers liegt die Hauptintensität des Lasers.

Interferenzstreifenmethode um die Teilchengeschwindigkeit herzuweisen liefert den gleichen Zusammenhang wie die Herleitung über den Dopplereffekt.

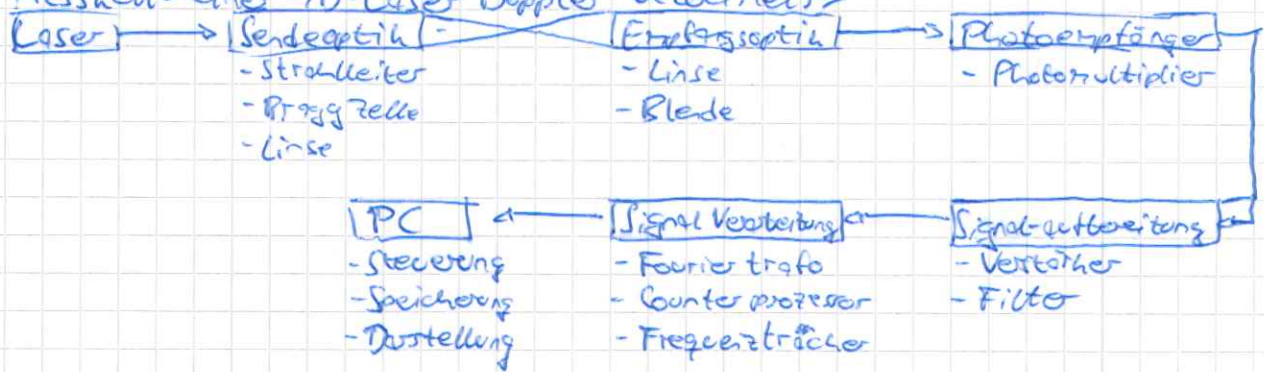
Dopplersignal des Empfängers ist unterschiedlich, je nachdem wo die Spur des Streuteilchens durch das Messvolumen führt.



Richtung des Teilchens ist mit diesem Aufbau nicht bestimmbar
→ Bragg-Zelle um einen der beiden Laser auf andere Frequenz zu bringen - Interferenzmuster bewegt sich

- Signalweg über Sekundärelektronenvervielfacher (Photomultiplier)
- Bestimmung der Frequenz über FFT / Frequenztrucker / Counter

Messkette einer 2D-Laser Doppler Velocimetrie



Dreidimensionale Messsysteme der LDV

- Laser mit mehreren nutzbaren Wellenlängen inkl. Farbtrenner
- Drei Strahlteiler, drei Bragg-Zellen
- Zwei Sende- / Empfangsoptiken
- drei Photomultiplier mit Farbfiltern
- drei Signalprozessoren
- ein PC

- | | |
|--|--|
| + Berührungs- / Nachwirkungsfrei | - optische Transparenz nötig |
| + Lineare Proportionalität zwischen Messgröße und störungsgesam. | - Streuteilchen erforderlich |
| + keine Kalibrierung notwendig | - Apparativer Aufwand |
| + Hohe räumliche, zeitliche Auflösung | - nur stationäre / periodische Störungen |
| | - Brechung an Grenzflächen und Wände berücksichtigen |

7 Anwendung der Laser Doppler Velocimetry LDV

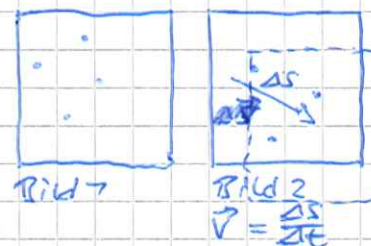
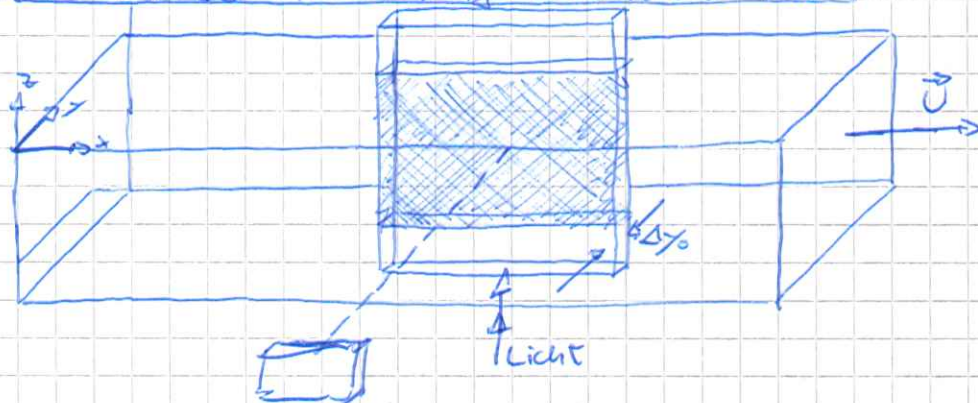
Strahlengang verändert sich beim Eintritt in die Flüssigkeit nach Brechungsgesetz. Bei verändertem Schnittwinkel und Wellenlänge verändert sich der Interferenzstreifenabstand Δx nicht. Schnittwinkel- und Wellenlängeänderungen gleichen sich aus.

Aber: Verschiebung des Messvolumens um ΔF bzw. $\Delta F + \Delta G$

Bei nicht senkrechter Anordnung: Fehlerhafte Überlagerung des Laserstrahls und ungleichmäßiger Interferenzmuster, Messvolumen.

und: Strahl wird beim Brechen breiter (auch bei senkrechter Anordnung)

8 Methodik der Particle Image Velocimetry PIV



Teilchen werden durch einen Lichtschnitt angeregt

Streulicht wird zu zwei kurz aufeinanderfolgenden Zeiten aufgenommen

Analyse der Bilddaten zur Ermittlung der Geschwindigkeitsvektoren

→ instationäre Geschwindigkeitsfeldmessung

Vorgehen:

- Aufnahme zweier kurz aufeinander folgender Partikelbildern
- Korrelation der Bilder
- Bestimmung des Geschwindigkeitsschnefeldes anhand der Partikelverschiebung von einem zum nächsten Bild
- Lokaler Geschwindigkeitsvektor $\frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \vec{V}$

Partikel folgen Strömung am besten, wenn

- Dichte der Partikel möglichst dichte des Fluids
- Partikel möglichst klein

Starker Einfluss von Beobachtungsrichtung und Partikelgröße auf Intensität
Höhere Streulichtintensität in Luft - kleinere Partikel möglich

- Luft: Öltröpfchen mit $d \approx 7 \mu m$
- Fluid: Silberbeschichtete Glaskugeln mit $d \approx 70 \mu m$

Für präzises, sehr kleines Δt : zwei Laser überlagert, um jeweils den gleichen Lichtschnitt zu liefern

keine Verfolgung einzelner Partikel sondern Identifizierung ähnlicher Muster
Mittelung über Größe des Teilbildes

Mit Kalibrierung des Messbereichs können die Bilddaten in Abmessungen in der Messstrecke umgerechnet werden

Dritte Geschw. Komponente mit Prinzip der stereoskopischen Betrachtung

BRANDENBURG

Fehler: In-Plane loss of pairs; Out-of-plane loss of pairs; Velocity bias; Zu niedrige Partikelkonzentration; Streulicht.

9 Anwendung der Particle Image Velocimetry PIV

Möglichkeit zur Erhöhung der Auswertegenauigkeit durch eine Multi-Pass-Korrelation

- 1st Pass, um ungefähre Strömungsgerade zu finden
- 2nd Pass mit in und entgegen Strömungsrichtung verschobenen Interrogation Areas (IAs) mit mehreren gefundenen Partikeln - genauer

Vergleich LDV und PIV: Wann was anwenden?

Randbedingungen an die Messtechnik	LDV	PIV
Geringe optische Zugänglichkeit	X	
Optische Verzerrungen einfach beherscher		X
Globale Messung		X
Hohe zeitliche Auflösung	X	
Hohe Genauigkeit	X	
Lasermesstechnik	X	
Geringe Messdauer		X

10 Endoskopische Anwendung der Particle Image Velocimetry am Turbinenprüfstand

Zusammenfassung der Methodik der PIV

1. Belichtung erfolgt über einen Doppelpuls
2. Zeitsynchrone Bildaufnahmen der Strömung
3. Auswertung einzelner Interrogation Areas (IAs)
4. Bestimmung der Verschiebung Δx der Partikelmuster in den IAs über eine Korrelation (± evtl. Multi Pass)
5. Verschiebung in den IAs liefert lokale Geschwindigkeitsvektoren in der Ebene

Wichtige Aspekte bei der Integration der PIV in den Turbinenprüfstand

- Möglichst geringe Modifikation am Versuchsträger und Prüfstand
↳ Bereits vorhandene Fenster nutzen
- Montage und Demontage des PIV ohne Demontage des Versuchsträgers
- Dichtigkeit der Anlage voll wichtig!

Herausforderungen beim Einsatz der PIV am Turbinenprüfstand

- Schwierige optische Zugänglichkeit
- Schatten durch Rotorbewegung
- Vibrationen
- Strömung muss lokal gereedet werden (Störung der seeding Polys)

Vorteile der PIV

- Stationäre Geschwindigkeitsfelder sind sehr schnell erfassbar
- Berührungs- und Richtwirkungsfrei
- Brechungs-, Verzerrungseffekte können durch Kalibrierung einfach berücksichtigt werden
- Alle drei Geschwindigkeitskomponenten über System mit zwei Kameras

Nachteile der PIV

- Transparenz des Fluids und Behälterwände nötig
- Streuteilchen erforderlich
- Sehr hohe zeitliche Auflösung nur mit Lasersystemen möglich
↳ Lasersystem ist Bottleneck (nur ja qua sehr hohe Intensität haben)

11 Methodik der Particle Tracking Velocimetry PTV

~~Wichtige Merkmale der Particle Tracking Velocimetry~~

Einführung Eulersche Beschreibung

- Ortsfeste Betrachtung
- Änderungen der Strömungsgrößen an fester Stelle, während Teilchen vorbeiziehen
- Messmethoden PIV, LDV

Einführung Lagrangesche Beschreibung

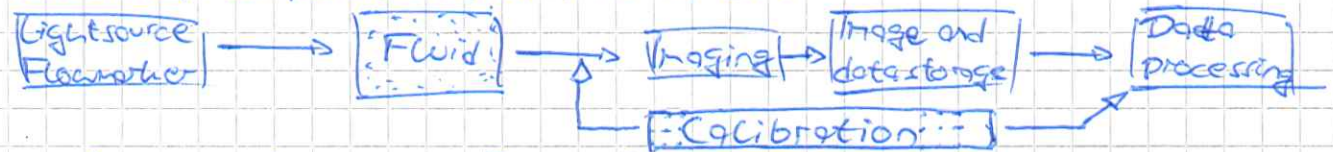
- Teilchenfeste Betrachtung
- Einzelnes Teilchen wird in seiner Bewegung im Raum verfolgt
- Messmethode PTV

Methoden zur Auswertung von Partikelbildern

- Particle Tracking Velocimetry (PTV)
- Particle Image Velocimetry (PIV)
- Laser Speckle Velocimetry (LSV)

↓ Partikelkonzentration

Wesentliche Komponenten eines PTV Systems



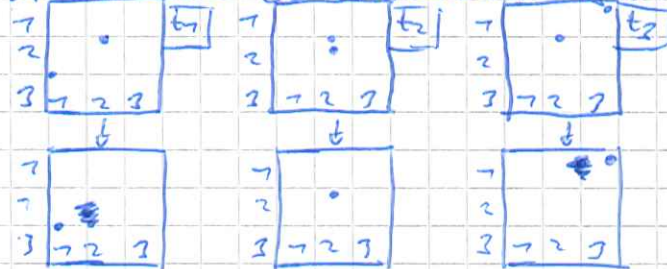
1. Seeding der Strömung mit Tracer-Partikeln
2. Aufnahme der beleuchteten Tracer-Partikel mit mehreren synchronisierten Kameras (Innere + äußere Orientierung muss bekannt sein)
3. Erfassung der Partikelpositionen im Raum über photogrammetrische Verfahren
4. Verfolgung der Partikel im Messvolumen
5. Dreidimensionale Bahnlinien und Geschwindigkeitsvektoren

Verfolgung von Partikeln basiert auf begrenzter Geschw. Durchleuchtung.
3D-Sukzessive Flußabwärts der letzten bekannten Position.

Lokaler Geschw.vektor aus lokaler Partikelverschiebung und Bildfrequenz

12 Anwendung der Particle Tracking Velocimetry PTV

An ICA wird der Bildverarbeitung "Image Averaging" vorgeschaltet



Falls $h_{22,t_1} = h_{22,t_2} = h_{22,t_3} : \bar{h} = 0$

Alle unbeweglichen Partikel (starr, tote Pixel) werden ignoriert.

Zusammenfassung

- An Strömungsgeschwindigkeit angepasste Bildsequenzen von mind. 3 Kameras
- Mit Streulicht versetzter Strömungsraum kann ohne Laser beleuchtet werden (billo)
- Erfolgreiches Tracking liefert lange Bahnlinien (Lagrangesche Betrachtung)
- Anzahl Geschwindigkeitsvektoren kleiner als bei PIV
- Geschwindigkeitsvektoren sind ungleichmäßig verteilt
- Voll dreidimensionales Verfahren

~~Glasgow~~

~~Strahlung Erde H/T~~

~~Bewegung feuchter Luftmassen~~

~~Berg / Talwind~~

~~Polargesetz~~

~~Windgeschw. über Stadt, Land $\rightarrow$ stabile Schichtung~~

~~Fürbutterespektion~~

~~Kapitalprozess~~

~~Angestellte verbleibe Platte~~

~~(Druckkraft einzeichnen)~~

~~Staupunkt bei Parallelströmung an der Wand~~

~~$\rightarrow$ Wind gilt wie Spreizung in Potentialtheorie~~

~~Bedensattel bei Grenzschichtströmung $\rightarrow$ Ablösung~~

~~Corioliskraft~~

~~Geostrophischen Wind zeichnen~~

~~Waben spirale~~

~~Glasgow Funktionen, Strahlung der Erde~~

~~Berg / Talwind~~

~~Föhn~~

~~Corioliskraft~~

~~Ekman spirale~~

~~Höhenprofil Stadt / Land~~

~~Angestellte Platte~~

~~Fürbutterespektion~~

~~Strömungszahl~~

~~Diagramm zeichnen und beschreiben~~