

Particle Image Velocimetry bei hydrodynamischen Instabilitäten

Instabilitäten im Cavity

Instabilität ist der Mechanismus mit dem eine Flüssigkeit starken Kräften begegnet und neue Strömungsformen bildet
(Lugt 1979).

Klingen Störungen einer Strömung mit der Zeit ab, so wird die Strömung stabil genannt. Hingegen wird beim Anwachsen der Störung bzw. beim nicht Abklingen der Störung für $t \rightarrow \infty$ von einer Instabilität der Strömung gesprochen. Aus der Instabilität resultiert eine neue Strömungsstruktur. Meistens führt Instabilität zu Turbulenz. Zwischen dem ersten Auftreten von Instabilität (primäre Instabilität) und dem Umschlag zu turbulenten Strömungsformen können aber andere stabile Strömungsstrukturen bestehen.

Die ersten entscheidenden Untersuchungen zu hydrodynamischen Instabilitäten wurden von v. Helmholtz (1868), Lord Rayleigh (1879) und Lord Kelvin (1880) veröffentlicht. Den Umschlag in die Turbulenz untersuchte Reynolds (1883) an Rohrströmungen. Eine grundlegende Arbeit zur Stabilität bei hydrodynamischen Strömungen wurde von Taylor (1923) veröffentlicht. Er untersuchte Strömungen im konzentrischen Zylinderspalt im sog. Taylor-Zylinder. Ab einer kritischen Rotationsrate geht die Grundströmung zunächst in ein System regelmäßiger Wirbel über. Wird die Rotationsrate weiter erhöht, so bilden sich andere stabile Strömungsstrukturen bis hin zur Turbulenz aus.

Neben einem Taylor-Zylinder verfügt das Labor des Instituts für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung über ein weiteres klassisches Experiment, in dem experimentelle

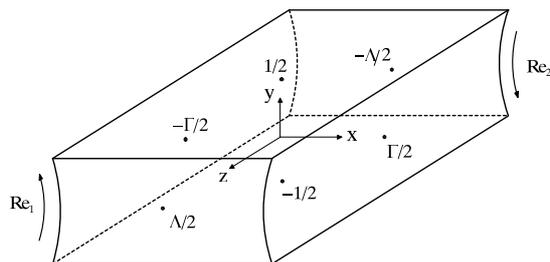


Figure 1: Die Geometrie des Cavity.

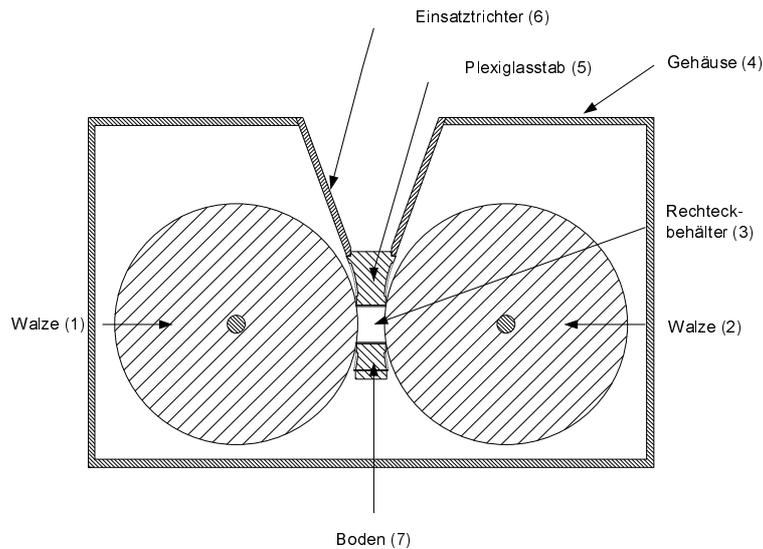


Figure 2: Prinzipskizze des experimentellen Aufbaus.

Untersuchungen isothermer Strömungsinstabilitäten durchgeführt werden können, das lid-driven-Cavity. Es handelt sich hierbei um einen geschlossenen Rechteckbehälter in dem die Strömung durch die Bewegung zweier gegenüberliegender Wände angetrieben wird. Die bewegten Wände werden im experimentellen Aufbau durch Zylinder großer Radien realisiert. Die Geometrie des Cavity und der prinzipielle experimentelle Aufbau sind den Abbildungen 1 und 2 zu entnehmen. In Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung der Wände und der Stärke des Antriebs werden stationäre Wirbel erzeugt, deren Eigenschaften durch Geometrie und Wandgeschwindigkeit festgelegt sind. Das Maß für die Antriebsstärke sind in diesem Fall die Reynoldszahlen. Bei der Erhöhung der Antriebsstärke über eine kritische Reynoldszahl hinaus werden diese einfachen quasi-zweidimensionalen Strömungen durch hydrodynamische Instabilitäten dreidimensional und/oder zeitabhängig.

Aufgrund seiner einfachen Geometrie stellt das Cavity, ein sowohl numerisch als auch experimentell besonders intensiv untersuchtes System dar. Analogien hinsichtlich der technischen Anwendung lassen sich in der Trocknungs- und in der Beschichtungstechnologie finden. Außerdem findet das Thema als dreidimensionales Benchmark System für numerische Berechnungen wachsende Bedeutung.

Die Strömungsstrukturen werden qualitativ, als auch quantitativ untersucht. Qualitative Untersuchungen erfolgen durch Visualisierung. Dem Öl, welches als Experimentfluid verwendet wird, werden dazu geeignete Partikel zugesetzt. Die Bewegung der Partikel kann dann mit Hilfe einer Lichtschnittbeleuchtung beobachtet und fotografiert werden. Quantitative Untersuchungen werden mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) und

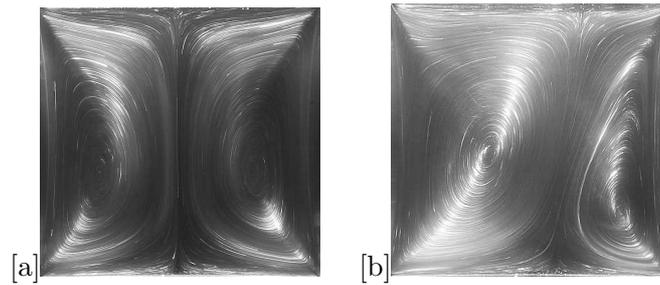


Figure 3: Fotos der x, y -Ebene des Cavity beim parallelen Antrieb. Beide Seitenwände bewegen sich nach unten. (a) Quasi-zweidimensionale Grundströmung (b) Stationäres dreidimensionales Muster (Cp-Mode)

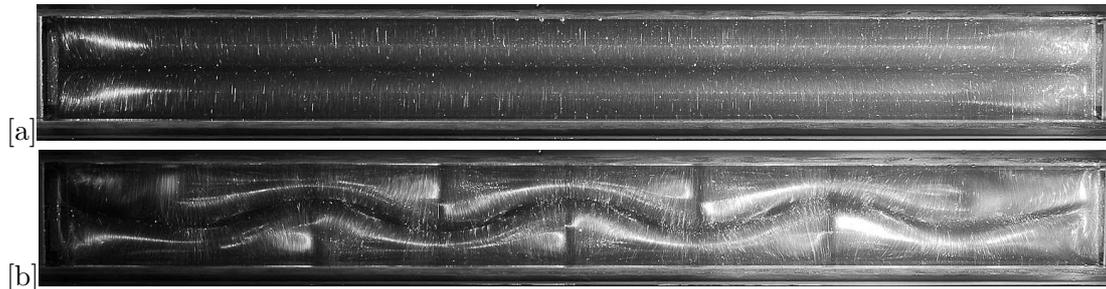


Figure 4: Fotos der x, z -Ebene des Cavity beim parallelen Antrieb. Die Seitenwände (oben und unten im Bild) bewegen sich in die Bildebene hinein. (a) Quasi-zweidimensionale Grundströmung (b) Stationäres dreidimensionales Muster (Cp-Mode)

einem Particle Image Velocimetry-System (PIV-System) durchgeführt. Beim LDA handelt es sich um ein lokales, optisches Geschwindigkeitsmessverfahren, welches bei einer hohen zeitlichen Auflösung punktuelle berührungslose Messungen ohne Störung der Strömung ermöglicht. Das PIV-System ist ebenfalls ein optisch arbeitendes Geschwindigkeitsmessverfahren bei dem die Geschwindigkeit in einer gesamten Ebene erfasst werden kann. Durch die Bildrate der CCD-Kamera ist bei dem PIV-System die zeitliche Auflösung jedoch beschränkt. LDA und PIV ergänzen sich damit gegenseitig.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen als Beispiel die quasi-zweidimensionale Strömungsstruktur und die nach Überschreiten der kritischen Reynoldszahl stabile stationäre dreidimensionale Strömungsstruktur (Mode C^p) für den parallelen Antrieb. Beim parallelen Antrieb bewegen sich beide Wände in die gleiche Richtung. Die quasi-zweidimensionale Grundströmung besteht somit aus zwei gegensinnig rotierenden Hauptwirbeln. Die primäre Instabilität führt zu einer periodischen sinusförmigen Verschiebung der Wirbelzentren der beiden Hauptwirbel in z -Richtung. Diese Verschiebung ist auf dem Foto b in Abbildung 4 als Sinuswelle zu erkennen.

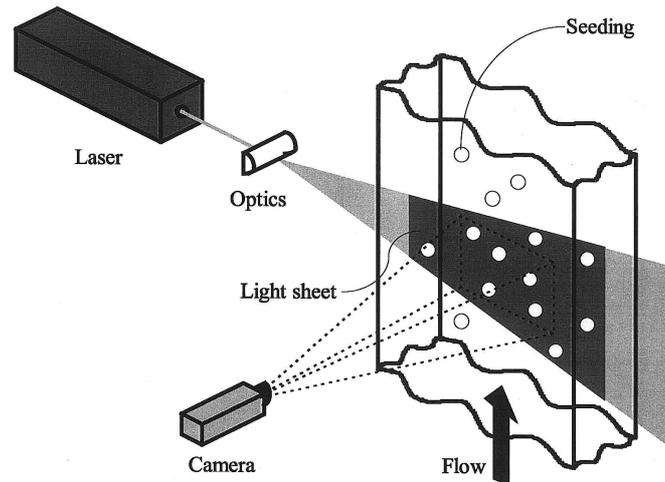


Figure 5: Das Prinzip des PIV-Verfahrens. (DantecDynamics 2000)

Particle Image Velocimetry (PIV)

Bei dem vorhandenen System über das ein kurzer Überblick gegeben wird, handelt es sich um ein Dantec FlowMap®PIV System der Firma Dantec Dynamics (DantecDynamics 2000)

Particle Image Velocimetry ermöglicht die Bestimmung von Geschwindigkeitsvektorfeldern in einer Ebene einer Strömung. Mit dem im Folgenden betrachteten 2D-PIV-System werden die beiden Geschwindigkeitskomponenten in der Ebene ermittelt. Das Prinzip von PIV Messungen ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt. Es basiert auf der einfachen Formel: Geschwindigkeit ist Weg pro Zeit.

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

Ein Ausschnitt der mit Partikeln versetzten Strömung wird mit einem Lichtschnitt beleuchtet, der durch einen gepulsten Laser erzeugt wird. Eine Kamera, die normal zum Lichtschnitt angeordnet ist, nimmt während der Lichtpulse Bilder auf. So entstehen Momentaufnahmen der Partikel, die der Strömung folgen. Die Pulse des Lichtschnitts sind mit der Kamera synchronisiert, so dass zu jedem Lichtpuls eine Aufnahme erfolgt. Die aufgenommenen Doppelbilder werden in rechteckige Bereiche aufgeteilt, die sog. Interrogation Areas (Abbildung 6) und von der Software vergleichend ausgewertet. Bei jedem Interrogation Area werden die Doppelbilder Pixel für Pixel kreuzkorreliert um einen mittleren Partikelverschiebungsvektor und damit, über die bekannte Zeit, die Geschwindigkeit zu ermitteln. Dieser Vorgang wird für alle Interrogation Areas durchgeführt und liefert als Ergebnis ein Geschwindigkeitsvektorfeld der untersuchten Strömung. Ausgehend von diesem Vektorfeld können dann weitere Analysen

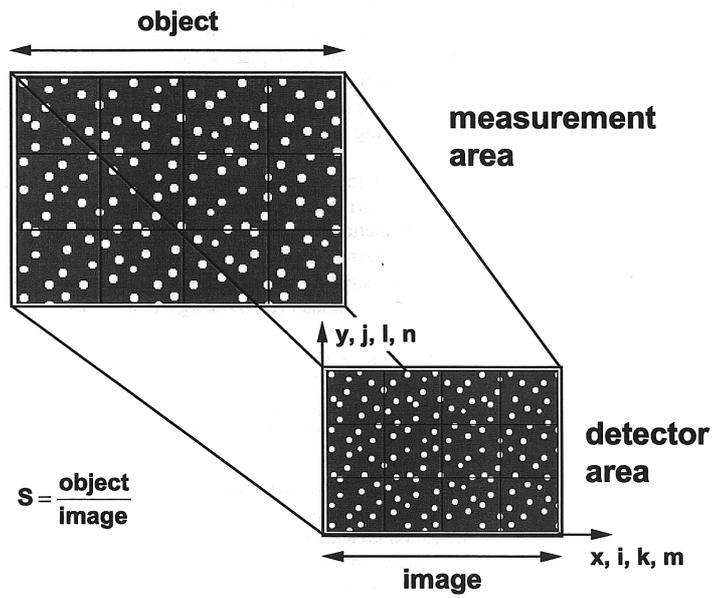


Figure 6: Bild- und Objektebene aufgeteilt in Interrogation Areas. (DantecDynamics 2000)

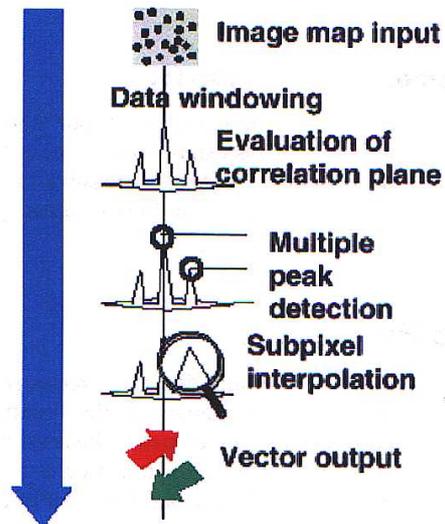


Figure 7: Bearbeitungsstufen der Korrelation. (DantecDynamics 2000)

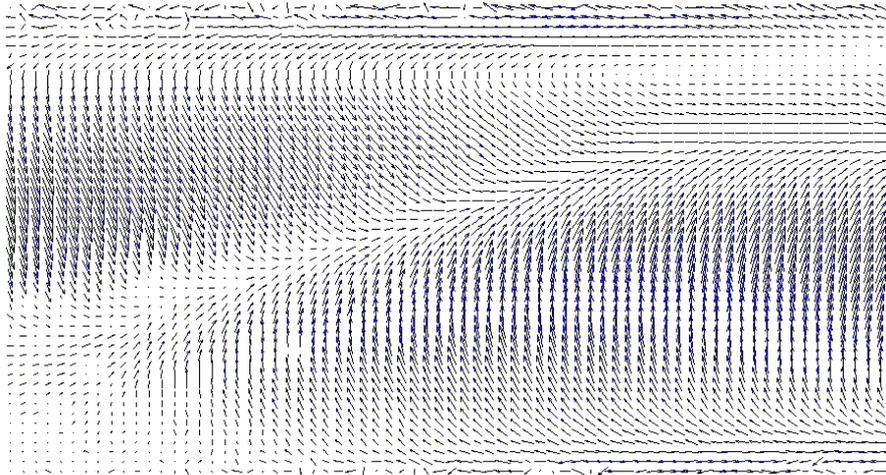


Figure 8: PIV-Vektormap (stationäre 3D-Strömung im parallel symmetrisch angetriebenen Cavity).

durchgeführt werden, um z.B. Stromlinien oder eine Darstellung der Vortizität zu erhalten. Die einzelnen Schritte der Korrelation sind Abbildung 7 zu entnehmen. Ein Beispiel eines sich ergebenden Geschwindigkeitsvektorfeldes ist in Abbildung 8 gezeigt.

Der Ablauf einer PIV Messung lässt sich in Stichworten wie folgt beschreiben:

- Seeden (das Einbringen von Seedingpartikeln in die Strömung)
- Beleuchten des Messvolumens
- Aufnehmen der Bilddaten
- Verarbeiten der aufgenommenen Daten
- Auswerten der verarbeiteten Daten

Systemkomponenten

Das PIV System besteht aus drei wesentlichen Komponenten:

- Beleuchtungssystem
- Aufnahmesystem
- Auswertesystem (FlowMap®: Prozessor)

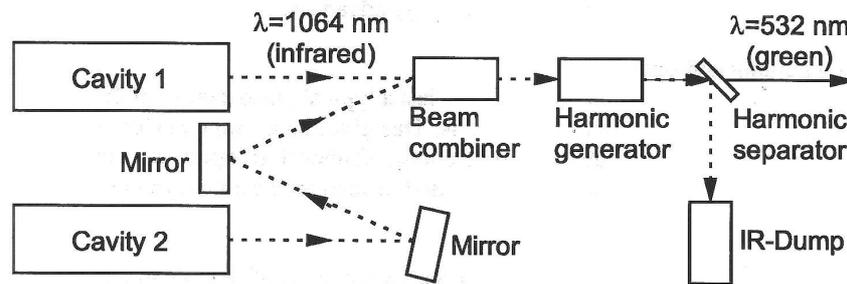


Figure 9: Prinzipieller Aufbau des Doppelpulslasers. (DantecDynamics 2000)

Diese werden durch den PC für die Weiterverarbeitung der Daten ergänzt.

Beleuchtungssystem

Zur Beleuchtung steht ein Laser der neuesten Generation mit regelbarer Ausgangsleistung zur Verfügung. Es handelt sich um einen gepulsten 200mJ Doppelkammer SOLO PIV 200XT Nd:Yag Laser mit bis zu 15 Hz Wiederholfrequenz pro Kammer. Der Laser emittiert grünes Laserlicht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 532\text{nm}$. Die Pulsdauer beträgt zwischen 3-5 ns.

Der Laser eignet sich aufgrund seiner hohen Energiedichte besonders gut für PIV-Messungen mit Mikropartikeln, bei denen eine hohe Beleuchtungsintensität erforderlich ist. Für Messungen bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten sind kurze Puls-Zeiten notwendig, die von Doppelpulslasern erreicht werden. Zudem ist die Variationsmöglichkeit der Pulsabstände bei zwei Kammern besser.

Die Empfindlichkeit von CCD-Kameras ist im blau-grünen Spektrum am höchsten, deshalb ist ein Laser, der grünes Licht emittiert, am Besten geeignet. (Blaue Laser erreichen meist deutlich geringere Lichtstärken als grüne Laser).

Der Aufbau des verwendeten Lasers ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

Aufnahmesystem

Als Aufnahmesystem dient eine Kamera mit hoher Auflösung, die empfindlich und rauscharm ist. Es wird eine Double-Shutter FlowSense mit 2Mega Pixel Auflösung, 30Hz (bis 208Hz) Single Frame in Kombination mit einem 60 mm Nikon Objektiv verwendet. Die CCD-Kamera hat eine Auflösung von 1600x1200 Pixel.

Auswertesystem

Ein Dantec FlowMap®-Prozessor verarbeitet die Bilddaten. Zur Steuerung dient die Prozessorsoftware zusammen mit der FlowManagerSoftware auf dem PC.

Der Prozessor ist modular aufgebaut und enthält folgende Bauteile:

- Korrelationseinheit (bis zu 4 Stück) zur
 - Datenerfassung
 - Korrelationsebeneevaluierung
 - Filterung
 - Mehrfachpeakerkennung
 - Vektorvermessung mit Subpixel Auflösung
- Dateneingangspuffer (bis zu 4 Stück)
- Synchronisationseinheit

Die Synchronisation und Steuerung der beiden Laser, sowie der Kamera erfolgt durch die Synchronisationseinheit.

Seeding-Partikel

Bei der PIV-Messung wird die Geschwindigkeit der dem Fluid zugesetzten Partikel gemessen, die sich mit der Strömung mitbewegen und nicht direkt die Geschwindigkeit der Strömung. Damit die gemessene Geschwindigkeit der Partikel möglichst gut mit der Geschwindigkeit der Strömung übereinstimmt, müssen die Partikel bestimmten optischen und strömungsmechanischen Anforderungen genügen. Bei der Auswahl der Partikel stehen die zu untersuchende Strömung und das zur Verfügung stehende Beleuchtungssystem im Vordergrund. Die Partikel müssen der Strömung möglichst gut folgen, ohne die Stoffeigenschaften der Strömung wesentlich zu beeinflussen. Im Prinzip können alle Partikel benutzt werden, die der Strömung ausreichend folgen und genügend Licht streuen.

Für PIV Messungen wird eine hohe Lichtintensität benötigt. Gründe hierfür sind erstens der große Bereich den der Lichtschnitt abdecken muss und zweitens die Aufnahme der Partikel unter einem Winkel von 90° zur Lichtquelle. Zudem benötigt die CCD Kamera eine hohe Lichtintensität, um ausreichend Kontrast zu erzielen. Grundsätzlich sollten die Partikel so groß wie möglich gewählt werden um möglichst viel Licht zu streuen. Die Partikelgröße ist aber durch das erforderliche Partikelfolgevermögen begrenzt. Auf dem

Kamerabild müssen die Partikel mindestens 2, besser 3 Pixel abdecken, um Partikelpositionen und -verschiebungen zuverlässig bestimmen zu können. Außerdem sollten die Partikel annähernd die gleiche Dichte haben wie das Fluid.

Die Partikelkonzentration ist wichtig, um eine entsprechende statistische Auswertung vornehmen zu können. Bei der Auto- oder Kreuzkorrelation, werden immer Korrelationen zwischen der Startposition einiger Partikel und der Endposition anderer Partikel auftreten. Diese zufälligen Korrelationen können als Signal rauschen betrachtet werden. Es müssen ausreichend Partikelpaare in jeder Interrogation Area vorhanden sein um sicherzustellen, dass die Signalkorrelation stärker ist als das Rauschen. Ungefähr 10-25 Partikel pro Interrogation Area sind notwendig.

Außerdem soll die maximale Partikelverschiebung innerhalb einer Interrogation Area kleiner als ein Viertel ihrer Seitenlänge sein, da mit zunehmender Partikelverschiebung die Messfehler zunehmen. Bei einer ausreichenden Partikeldichte kann aber auch eine höhere Partikelverschiebung ermöglicht werden.

Die Partikel beeinflussten eine Strömung also durch:

- Partikelform
- Partikelgröße
- Relative Dichte von Partikel und Fluid
- Konzentration der Partikel im Fluid
- Massekräfte der Partikel untereinander

und sollen folgende Eigenschaften haben:

- der Strömung gut folgen
- gute Lichtstreuungseigenschaften
- leicht zu erzeugen
- günstig
- ungiftig und Oberflächen weder chemisch noch mechanisch angreifen
- nicht flüchtig oder schwer verdunsten
- chemisch inaktiv
- rein

Sicherheitshinweise !!

Der verwendete PIV Doppelpuls laser emittiert grünes Laserlicht. Es besteht die Möglichkeit, dass das austretende Laserlicht einen Infrarotanteil enthält, so dass selbst Streustrahlung für das menschliche Auge äußerst schädlich ist. Die natürlichen Schutzmechanismen des Auges helfen nichts, weil mit sehr kurzen Laserpulsen gearbeitet wird. Bei Betrieb des Doppelpuls lasers müssen deshalb immer Laserschutzbrillen getragen werden, die sowohl gegen grünes (495-570nm), als auch infrarotes (770-...) Laserlicht schützen.

!!! Experimentatoren müssen Schutzbrillen tragen !!!

- Nicht in den Laserstrahl sehen!
- Nichts Reflektierendes in den Laserstrahl halten (Uhren, Ringe)!
- Der Laser darf nur vom ausgewiesenen Personal bedient werden!

References

DantecDynamics (2000), *FlowManager software and Introduction to PIV Instrumentation - Software User's guide*, Dantec Dynamics A/S.

Lord Kelvin (1880), 'On a disturbing infinity in Lord Rayleigh's solution for waves in a plane vortex stream', *Nature* **23**, 45-46.

Lord Rayleigh (1879), 'On the instability of jets', *Proc. London Math. Soc.* **10** p. 4.

Lugt, H. J. (1979), *Wirbelströmung in Natur und Technik*, Braun, Karlsruhe. ISBN 3-7650-2028-1.

Reynolds, O. (1883), 'On the motion of water', *Proc. R. Soc. Lond.* **35**, 84-99.

Taylor, G. I. (1923), 'Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders', *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* **223**, 289-343.

v. Helmholtz, H. (1868), *Über discontinuierliche Flüssigkeitsbewegungen*, Monatsberichte der königlichen Akademie der Wissenschaften Berlin, 215.