

Kernspintomografie zur Strömungsmessung

Magnetic Resonance Imaging vor Flow Measurements

Sven Grundmann

Lehrstuhl Strömungsmechanik
Universität Rostock

Kernspintomografie, MRV, Messtechnik
Magnetic resonance imaging, MRV, measurement technique

Zusammenfassung

Die Messung dreidimensionaler Geschwindigkeitsfelder mithilfe von Kernspintomografie mit üblichen klinischen Kernspintomografen ist eine noch verhältnismäßig unbekannte Messmethode, die in ihrer Entwicklung zwar bereits weit fortgeschritten ist, aber noch immer viel unerschlossenes Potenzial für die strömungsmechanische Forschung und Entwicklung birgt. In diesem Beitrag wird eine kurze Einführung in die Messtechnik gegeben, um deren Möglichkeiten und den aktuellen Entwicklungsstand zu skizzieren.

Einleitung

Weitestgehend unbemerkt von den Ingenieurwissenschaften wurden im Bereich der medizinischen Physik Verfahren zur Strömungsmessung mithilfe von Kernspinresonanztomografie entwickelt. Diese Messverfahren (MRV/MRI – Magnetic Resonance Velocimetry/Imaging) bieten eine hohe Datendichte im dreidimensionalen Raum kombiniert mit überraschend kurzen Messzeiten für gleich mehrere Messgrößen: Dreidimensionale Datensätze von Geschwindigkeit, Temperatur, Turbulenz und Konzentrationsverteilungen [1].

In Kombination mit modernen Rapid-Prototyping Herstellungsverfahren für die zu untersuchenden Modelle, erlaubt die Kernspintomografie den Aufbau des Experiments, die Durchführung und die Datenbereitstellung innerhalb weniger Tage. Nahezu beliebig komplexe Geometrien und Strömungen (inkompressibel, nicht reagierend) können ohne aufwendige Maßnahmen, wie sie für heutige laser-optische Messmethoden notwendig sind, untersucht werden.

Messprinzip

Das gesamte Messprinzip beruht auf der Beeinflussung und anschließenden Messung von Eigenschaften des quantenmechanischen Spins – in der Regel der Protonen in Wasserstoffkernen. Die Spins vollführen eine Präzessionsbewegung um eine Achse, welche durch Anlegen eines starken äußeren Magnetfeldes im Raum ausgerichtet wird. Durch zeitliche und räumliche Modulation dieses Magnetfeldes, sowie durch hochfrequente elektromagnetische Pulse kann diese Präzessionsbewegung koordiniert werden und physikalische Eigenschaften des Fluides in den von den Spins selbst ausgesendeten elektromagnetischen Signalen kodiert werden. Die zu messenden physikalischen Eigenschaften können Einfluss auf die Frequenz der Präzessionsbewegung nehmen oder eine Verschiebung des Phasenwinkels

der Präzessionsbewegung hervorrufen. Durch geeignete Sequenzen von Magnetfeldgradienten und Hochfrequenzpulsen können diese Veränderungen als räumliche Information dekodiert werden und auf diese Weise dreidimensionale Datensätze für die Messgrößen erzeugt werden.

Messapparatur

Generell sind bildgebende Kernspintomografen für diese Art von Messungen geeignet. Dazu zählen größere und kleinere Laborgeräte, aber auch herkömmliche Ganzkörperscanner, wie sie in vielen Kliniken oder Radiologiepraxen zu finden sind. Die Geräte müssen mit speziellen Sequenzen (Messprogrammen) betrieben werden, um die gewünschte Information extrahieren zu können.

Die Verwendbarkeit der klinischen MRT Scanner macht das Messverfahren grundsätzlich leicht verfügbar, sofern geeignete Sequenzen installiert sind und eine Apparatur zur Bereitstellung und Konditionierung der Strömung durch das zu vermessende Modell zur Verfügung steht.

Kernspintomografen benötigen eine Abstimmung der Sende- und Empfangselektronik auf die jeweilige Frequenz der zu messenden Präzessionsfrequenzen, welche wiederum von der Magnetfeldstärke des Scanners abhängt. Grundsätzlich lassen sich daher auch die Spins von Gasen manipulieren und messen, jedoch ist die räumliche Dichte der Spins in Gasen rund drei Größenordnungen kleiner als in Flüssigkeiten. Das führt zwangsläufig zu geringen Signal-Rausch-Abständen weshalb üblicherweise Flüssigkeiten als Arbeitsmedium verwendet werden.

Bei der Verwendung von klinischen Kernspintomografen für MRV Messungen bietet sich Wasser als Medium an, da die Geräte für die Frequenzen der Präzessionsbewegung des Wasserstoffatoms im Wassermolekül abgestimmt sind. Dennoch ist es möglich mit diesen Geräten Lipide zu vermessen. Grundsätzlich ist es also möglich zwei Flüssigkeiten, Wasser und Öl, gleichzeitig im Modell zu messen und in den erhobenen Daten beide Medien klar voneinander zu unterscheiden.

Die Verwendung von Wasser als Arbeitsmedium erfordert eine Skalierung der Strömung, bzw. des Modells gemäß der Reynoldszahl. Als Faustregel zur Abschätzung kann bei Verwendung der originalgeometrie (Maßstab 1:1) eine Geschwindigkeit, bzw. ein Volumenstrom um den Faktor 1/15 verringert angenommen werden, wenn eine Luftströmung durch eine Wasserströmung abgebildet werden soll. Gegebenenfalls auftretende Kompressibilitätseffekte können selbstverständlich nicht berücksichtigt werden, jedoch zeigt die Arbeit von Yapa et al. [8] dass diese Effekte je nach Problemstellung sogar bei größeren Machzahlen ($\sim 0,7$) noch recht gering ausfallen.

Messbare Größen

Im Bereich der Ingenieurwissenschaften ist die Magnetresonanztomografie bereits vielfach zur Messung von 3D3C Geschwindigkeitsverteilungen verwendet worden z.B. [1,2]. Bei diesen Messungen werden in einem dreidimensionalen kartesischen Raster die Geschwindigkeiten in die drei Raumrichtungen gemessen. Es muss betont werden, dass es sich hierbei um zeitlich gemittelte Daten handelt und keine zeitabhängigen Geschwindigkeitsverläufe gemessen werden können.

Die Messungen können in herkömmlichen Tomografen mit einer räumlichen Auflösung von 0,4mm aufwärts durchgeführt werden. Dabei können in der Größenordnung von 10^6 Vektoren anfallen. Je nach erforderlichem Signalrauschabstand braucht es dafür zwei bis zehn einzelne Scans, von denen jeder 5-20 Minuten dauert.

Die Messungen können in laminaren oder in turbulenten Strömungen durchgeführt werden. In turbulenten Strömungen kommt es zu einer Verringerung der Signalmagnitude durch die permanent wechselnde Geschwindigkeit (-sverteilung) in den einzelnen Voxeln. Dieser Effekt kann zur Bestimmung der Standardabweichung der Geschwindigkeit herangezogen werden, und so einige Komponenten des Reynoldsspannungstensors [3] ermittelt werden.

Dem Arbeitsmedium Wasser muss zusätzlich ein Kontrastmittel in geringer Konzentration hinzugefügt werden, um die signalerzeugenden quantenmechanischen Prozesse zu beschleunigen. Sind die Messsequenzen auf die Verwendung dieses Kontrastmittels abgestimmt, ist Wasser ohne Kontrastmittel nicht sichtbar für den Scanner. Dieser Umstand ermöglicht es, mit zwei Pumpen und zwei Wasserreservoirs zu arbeiten, um zwei Volumenströme zu fördern, von welchen einer kein Kontrastmittel enthält und somit kein Signal liefert. In den räumlichen Daten kann man anhand der Signalstärke auf das Mischungsverhältnis zwischen Wasser mit und ohne Kontrastmittel in jedem Punkt schließen und auf diese Weise Konzentrationsmessungen [4] durchführen sowie Mischungsprozesse beobachten. Besonders im Hinblick auf Kühlungsaufgaben, wie z.B. Filmkühlung von Turbinenschaufeln, liefern derartige Konzentrationsmessungen wertvolle Informationen.

Während die Konzentrationsmessungen oft als Ersatz für Temperaturmessungen durchgeführt werden, übt die Temperatur des Mediums ebenfalls einen Einfluss auf die Eigenschaften der Spins aus. Verschiedene Verfahren ermöglichen die Verschlüsselung der Temperatur im gemessenen Signal, und stellen eine gleichzeitige Temperaturfelderfassung zusammen mit der Geschwindigkeitsfeldmessung in Aussicht [5]. Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung von kernspintomografischen Temperaturfeldmessungen für technische Anwendungen.

Die Datenaufnahme zur Messung eines Datensatzes kann über eine geeignete Triggerung über viele Zyklen eines periodischen Vorganges verteilt werden [6]. Auf diese Weise können auch periodische Strömungen phasengemittelt mit großer Datendichte und verhältnismäßig geringem Aufwand gemessen werden.

Anwendungsbeispiel

An der TU Darmstadt wird ein 1-Zylinder Verbrennungsmotor betrieben und dabei werden Strömungsmessungen im laufenden Betrieb mit PIV durchgeführt [3]. Zu diesem Zweck wurde der Motor mit einem Quarzglas-Zylinder versehen um die optische Zugänglichkeit zu gewährleisten. Auf diese Weise können im Betrieb des Motors laseroptische Messungen im Brennraum durchgeführt werden.

Um darüber hinaus auch die Strömung in den Einlasskanälen untersuchen zu können, wurde ein 1:1 Modell dieses Motors im Laser-Sinter-Verfahren aus Polyamid hergestellt. Das Modell wurde ohne Kolben gebaut, um ein stationäres Durchströmen zu ermöglichen. Es wurde zunächst eine feste Ventilstellung gewählt, die einem Kurbelwellenwinkel von 270° bTDC (before top dead center) entspricht. In dieser Stellung wird im Motor allein durch die Druckdifferenz (Unterdruck im Zylinder) frische Luft in den Brennraum gesaugt. Der Volumenstrom zu diesem Zeitpunkt ist vom Vorbildmotor bekannt.

Das Modell wird stationär mit Wasser durchströmt und mittels MRV vermessen [7]. Der Volumenstrom für diese Situation wurde gemäß der Reynoldszahl umgerechnet und dem Modell stationär aufgeprägt. Der Vergleich der Messdaten des stationär durchströmtem MRV-Modells mit den phasengemittelt erhobenen PIV-Daten des Motors im Betrieb zeigt sehr gute Übereinstimmungen in einem Bereich bis ca. 20mm unterhalb des Zylinderkopfes [7]. Darunter wird der Einfluss des fehlenden Kolbens zu groß. Die Strömung knapp unterhalb und im gesamten Bereich oberhalb der Ventile darf als vorbildgetreu angesehen werden. Abbildung 1 und 2 zeigen ausgewählte Ergebnisse der MRV-Messungen.

Abbildung 1 zeigt die Strömung innerhalb des Zylinders sowie im Einlasskanal. Dargestellt sind die Geschwindigkeits-Magnituden im Mittelschnitt eines Einlassventils ($z=19\text{mm}$). Anhand der zusätzlich eingeblendeten Geschwindigkeitsvektoren ist die Strömungsrichtung in dieser Schnittebene gut zu erkennen.

Unterhalb des Ventils ist ein großes Totwassergebiet mit aufgeprägten Rezirkulationszonen zu erkennen. Die dreidimensionalen Daten zeigen in diesem Bereich einen ringförmigen Wirbel direkt unterhalb des Ventiltellers. Im linken Bildteil ist zusätzlich eine Strömungsablösung stromab des Einsaugkanals zu sehen welche weit bis in den Ventilspalt hineinreicht. Diese Ablösung ist in Abbildung 1 nur in einem zweidimensionalen Schnitt zu sehen. Der vollständige Datensatz ermöglicht eine räumliche Darstellung der gesamten Ausdehnung dieser Ablöseblase.

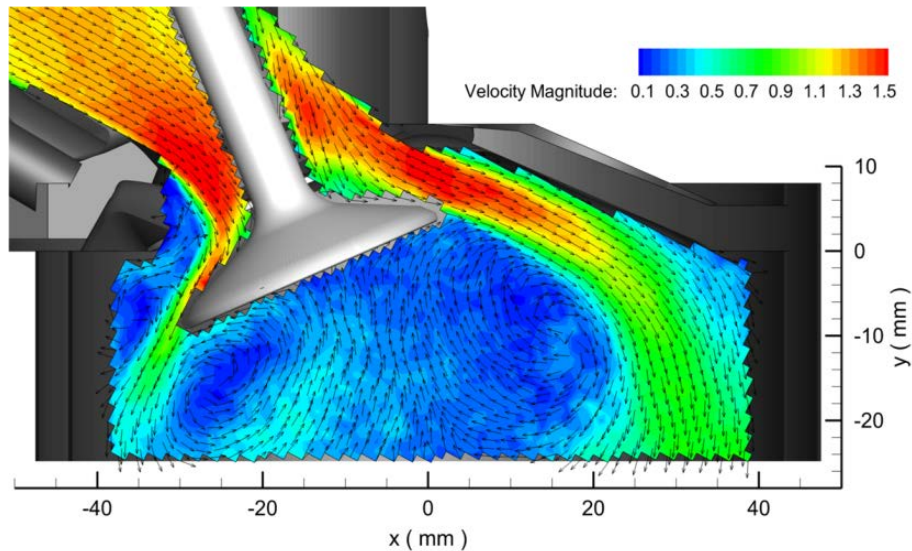


Abbildung 1: Schnittbildansicht eines umströmten Einlassventils

Abbildung 2 zeigt dieses Ablösegebiet mithilfe von fünf verschiedenen Iso-Geschwindigkeitszonen. Zur Orientierung sind beide Einlassventile und nur einer der beiden Ventilsitzringe abgebildet. Die Iso-Geschwindigkeitsflächen stellen Rezirkulationszonen unterschiedlicher Geschwindigkeitsmagnitude dar. Im Vordergrund ist die aus Abbildung 1 bekannte Strömungsablösung zu sehen. Deutlich zu erkennen sind auch Rezirkulationszonen, die sich stromaufwärts bis in den Ventilsitzring ausdehnen.

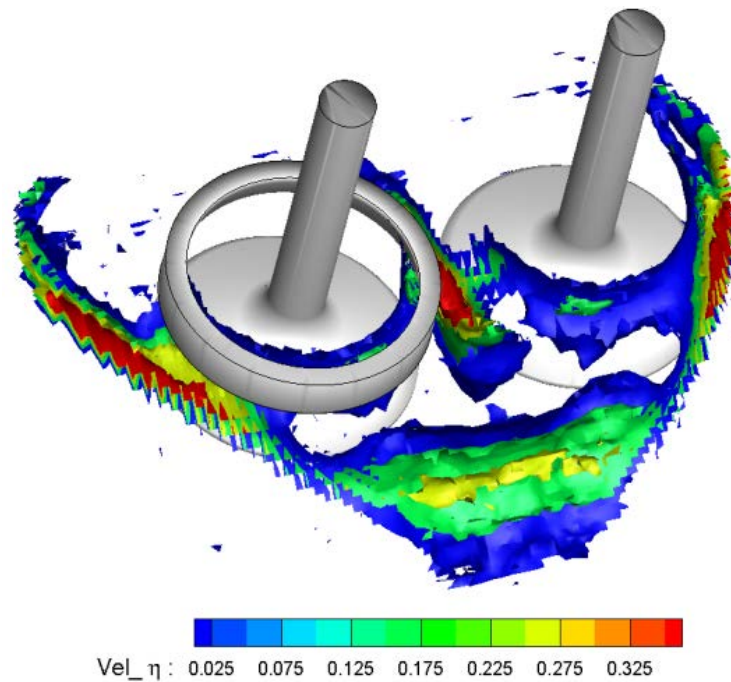


Abbildung 2: Fünf Iso-Geschwindigkeitszonen stellen die Rezirkulationszone in Ventilspalt und Zylinder dar.

Literatur

- [1] Elkins, C. and Alley, M.: Magnetic resonance velocimetry: applications of magnetic resonance imaging in the measurement of fluid motion. *Experiments in Fluids* 43, 823-858 (2007)
- [2] Grundmann, S., Sayles, E., Elkins, C. and Eaton, J.: Sensitivity of an asymmetric 3d diffuser to vortex-generator induced inlet condition perturbations. *Experiments in Fluids*, DOI: 10.1007/s00348-011-1205-0 (2011)
- [3] Elkins, C., Alley, M., Saetran, L. and Eaton, J.: Three-dimensional magnetic resonance velocimetry measurements of turbulence quantities in complex flow. *Exp Fluids* (2008)
- [4] Benson, M., Elkins, C. and Eaton, J.: Measurements of 3d velocity and scalar field for a filmcooled airfoil trailing edge. *Experiments in Fluids* 51, 443-455 (2011)
- [5] Elkins, C., Markl, M., Iyengar, A., Wicker, R. and Eaton, J.: Full-field velocity and temperature measurements using magnetic resonance imaging in turbulent complex internal flows. *Journal of Heat and Fluid Flow* 25, 702-710 (2004)
- [6] Wassermann, F.; Hecker, D.; Jung, B.; Markl, M.; Seifert, A. and Grundmann, S.: Phase-Locked 3D3C-MRV Measurements in a Bistable Fluidic Oscillator. *Experiments in Fluids*, vol. 54, No. 3, pp 1-15 (2013)
- [7] Freudenhammer, D; Baum, E; Peterson, B.; Böhm, B; Jung, B. and Grundmann, S.: Volumetric intake flow measurements of an IC engine using Magnetic Resonance Velocimetry. *Experiments in Fluids*, Volume 55, Number 5, (2014)
- [8] Yapa, S.; D'Atri, J.; Schoech, J.M.; Elkins, C.; Eaton, J.: Comparison of magnetic resonance concentration measurements in water to temperature measurements in compressible air flows. *Experiments in Fluids*, Volume 55, Number 11, (2014)