

## **Auflösungserhöhung der Lorentzkraft-Anemometrie für schwach leitfähige Fluide durch Einsatz von Halbach-Magnet-Arrays**

### **High resolution Lorentzforce Velocimetry in weakly conducting fluids by use of Halbach-Magnet-Arrays**

**R. Ebert, A. Wiederhold, C. Resagk**

Technische Universität Ilmenau, Institut für Thermo- und Fluidodynamik, 98684 Ilmenau

Volumenstrommessung, nicht-invasiv, Lorentzkraft, schwach leitfähige Fluide  
Flow rate measurement, non-invasive, Lorentzforce, weakly conducting fluids

#### **Zusammenfassung**

Im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs „Elektromagnetische Strömungsmessung und Wirbelstromprüfung mittels Lorentzkraft“ wurde ein neues Strömungsmessverfahren entwickelt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird dabei anhand der Lorentzkraft, die auf ruhende externe Permanentmagneten wirkt, quantifiziert.

Dieses Anemometrie-Verfahren ist nicht-invasiv und damit auch auf heiße oder chemisch aggressive Schmelzen anwendbar. Zusätzlich bestehen keine Anforderungen an die Opazität des Fluids.

Das Lorentzkraft-Anemometer konnte auch für schwach leitfähige Fluide etabliert werden [1]. Bei einem quadratischen Strömungsquerschnitt von  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  werden bei einer Strömungsgeschwindigkeit von bis zu  $3 \text{ m/s}$  und einer Leitfähigkeit bis herab zu  $2 \text{ S/m}$  Lorentzkräfte im einstelligen  $\mu\text{N}$  Bereich an der  $1,5 \text{ m}$  langen Strömungsstrecke aufgelöst.

Ermöglicht wird diese u. a. durch den Aufbau eines optimierten Strömungskanals und Verwendung eines hochempfindlichen Kraftmesssystems, einer mechanischen Entkopplung sowie eines speziellen Magnetsystems: eines Halbach Arrays, dass bei gleichem Gewicht deutlich höhere magnetische Flussdichten bereitstellen kann.

#### **Einleitung**

Gerade bei sehr heißen, aggressiven oder hygienisch sensiblen Medien stellen herkömmliche invasive Volumenstrommessverfahren eine nur unzureichende Technologie dar. Diese Bedarfslücke kann durch die Lorentzkraft-Anemometrie, einer nichtinvasiven Messmethode, geschlossen werden. Hierbei werden mittels eines Primärfeldes mit der magnetischen Flussdichte  $B$ , dass durch Permanentmagnete bereitgestellt wird, die um die Strömungsstrecke angeordnet sind, Wirbelströme im Fluid erzeugt, die ihrerseits ein dem Primären entgegengesetztes Feld hervorrufen und wegen der Fluidbewegung mit der Geschwindigkeit  $v$  eine Kraft  $F$  in Strömungsrichtung auf die Permanentmagneten ausüben. Für Metallschmelzen konnte das Messverfahren bereits zur Industriereife entwickelt werden [2]. Es besteht auch in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie auf Grund hygienischer Vorgaben sowie etwa in mit Salzschnmelzen arbeitenden Kühlanlagen von Kraftwerken und in der Glasindustrie ein Bedarf an nichtinvasiver Volumenstrommessung. Bei diesen Medien liegt die Leitfähigkeit  $\sigma$

etwa fünf bis sechs Größenordnungen unterhalb der von flüssigen Metallen, was entsprechend der Gleichung

$$F \sim \sigma \cdot v \cdot B^2$$

zu ebenso viel kleineren resultierenden Kräften führt und damit große Anforderungen an die Messtechnik stellt. In einem Demonstrationsexperiment [3] konnte erstmals die Anwendbarkeit der Lorentzkraft-Anemometrie auch für schwach leitfähige Fluide gezeigt werden.

### Experimenteller Aufbau

Im Rahmen einer Forschungsarbeit [1] konnte ein Fluidumlaufkanal aufgebaut werden, an dem definierte Strömungsprofile entlang der Einlaufstrecke von kolben- bis parabolförmig mit einem Lorentzkraft-Anemometer vermessen werden können. Der Prinzipielle Aufbau kann Abb. 1 entnommen werden.

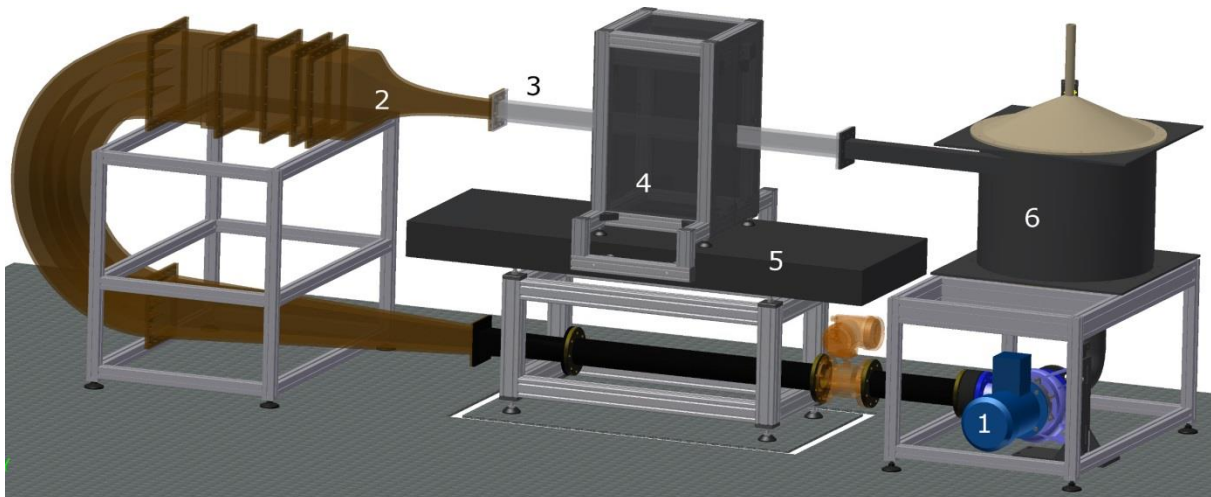


Abb. 1: Darstellung des experimentellen Aufbaus (1: Umlaufpumpe, 2: Düse, 3: Teststrecke, 4: Aufhängung für Lorentzkraft-Anemometer, 5: mechanische Entkopplung, 6: Beruhigungsbehälter)

Die Kraft auf das Magnetsystem in Strömungsrichtung wird durch eine elektromagnetische Kraftkompensationswaage gemessen. Eine Besonderheit stellt die Verwendung eines Halb-ach-Magnetarrays dar, dass durch geeignete Anordnung einzelner Permanentmagnete den magnetischen Fluss derart führt, dass bei gleichem Gesamtgewicht eine deutlich größere Flussdichte im Zwischenraum des Polschuhs entsteht und gleichzeitig Streufelder deutlich reduziert werden. Wegen des quadratischen Zusammenhangs von magnetischer Flussdichte und Kraftsignal kann bei gleichem Magnetgewicht die Empfindlichkeit des Anemometers beim Einsatz des Halb-ach-Arrays nahezu verdreifacht werden.

### Messergebnisse

Für verschiedene Leitfähigkeiten und Fluidgeschwindigkeiten wurde die resultierende Kraft gemessen. Als Medium kommt dabei Leitungswasser zum Einsatz, dessen Leitfähigkeit durch Zugabe von Speisesalz (NaCl) eingestellt werden kann. Zusätzlich wurde die Position des Messsystems entlang der Strömungstrecke variiert, sodass das Messverfahren für verschiedene Geschwindigkeitsprofile erprobt werden konnte. Dies ist von besonderer Wichtigkeit, um der Lorentzkraft-Anemometrie ein größeres Anwendungsfeld zu eröffnen, da das integrale Verfahren wegen unvermeidlicher Magnetfeldstärke-Inhomogenitäten unterschiedli-

che Bereiche des Fluidstroms verschieden stark wichtet. Bei Position „a“ (Abb. 2) wurde da-  
 rum in der Mitte der Einlaufstrecke und bei Position „c“ (Abb. 4) an deren Ende gemessen.  
 Für Position „b“ (Abb. 3) wurde das Kraftmesssystem genau zwischen „a“ und „c“ platziert.  
 Es zeigte sich, dass die Position und damit das Strömungsprofil nur geringen Einfluss auf  
 das Kraftsignal haben, der bei den Messungen im Rahmen der Messgenauigkeit verschwin-  
 det.

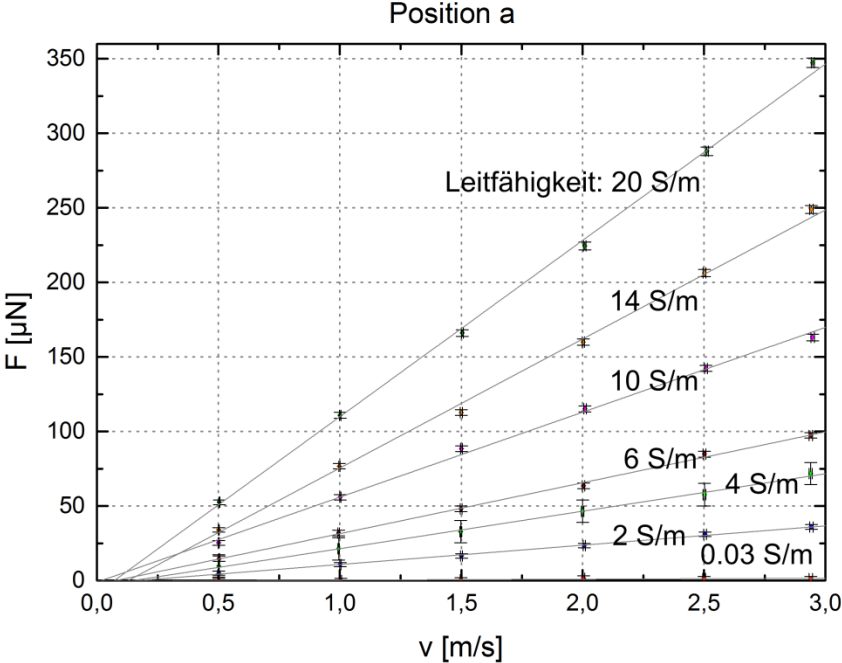


Abb. 2: Kraftsignal des Lorentzkraft-Anemometers in der Mitte der Einlaufstrecke für verschiedene Geschwindigkeiten und Leitfähigkeiten

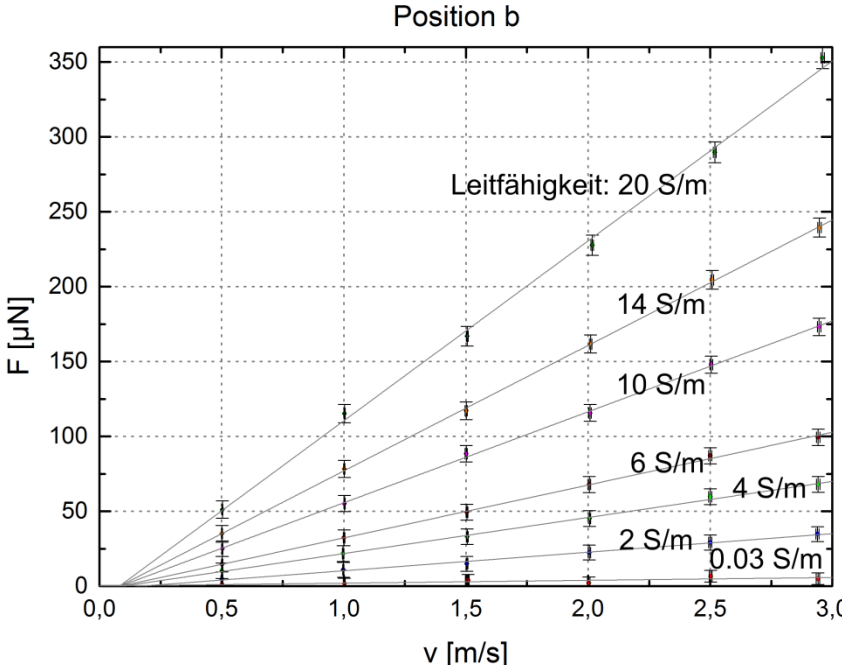


Abb. 3: Kraftsignal des Lorentzkraft-Anemometers zwischen Mitte und Ende der Einlaufstrecke für verschiedene Geschwindigkeiten und Leitfähigkeiten

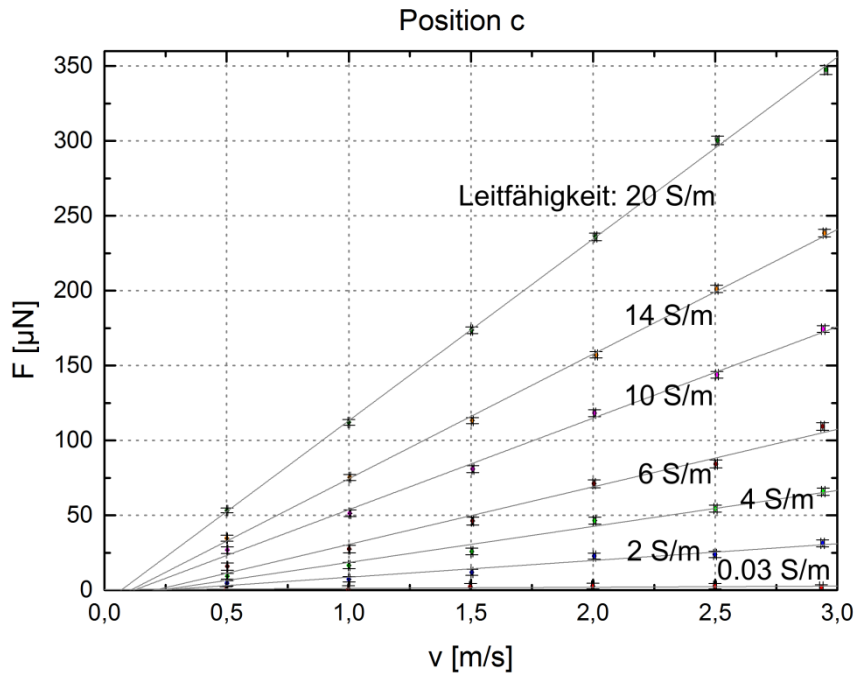


Abb. 4: Kraftsignal des Lorentzkraft-Anemometers am Ende der Einlaufstrecke für verschiedene Geschwindigkeiten und Leitfähigkeiten

Dies zeigt in besonderer Deutlichkeit Abb. 5, in der die durch lineare Regression ermittelten Anstiege der Abbildungen 2 bis 4 miteinander verglichen werden: Es fallen hier die wiederum durch Regression errechneten Geraden sehr dicht zusammen.

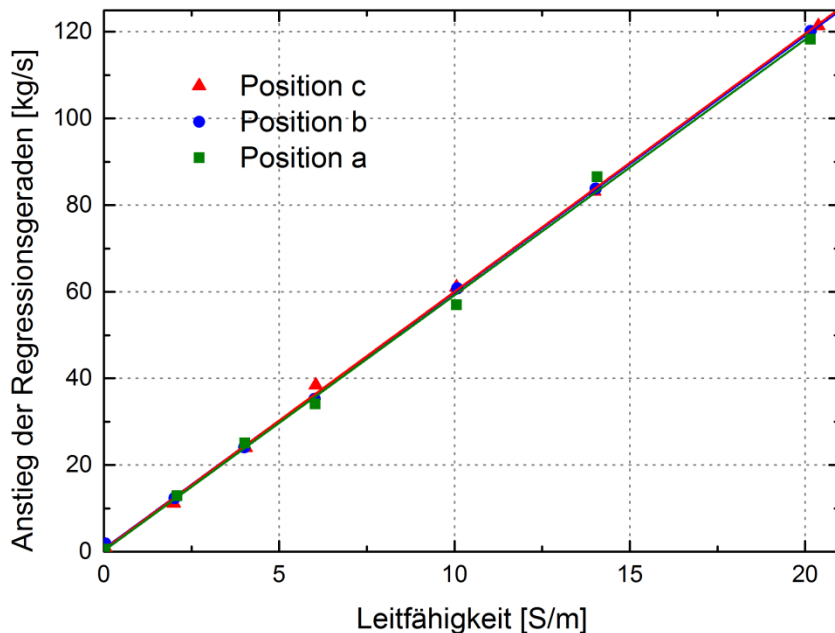


Abb. 5: Es wurden die Anstiege der in Abb. 2 bis 3 dargestellten Geraden über der Leitfähigkeit aufgetragen.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Mit Nutzung eines Halbach-Magnet-Arrays wurden die Parameter Fluidgeschwindigkeit, Leitfähigkeit sowie Messposition variiert. Es zeigt sich ein auch von der Theorie vorhergesagte Proportionalität zwischen dem Kraftsignal und der Fluidgeschwindigkeit sowie der Leitfähigkeit. Bei bisherigen Versuchen war der Einfluss des Geschwindigkeitsprofils des Fluids noch nicht erkennbar. Hierzu sollen weiteren Untersuchungen erfolgen, indem die tatsächliche Ortsabhängigkeit des Fluidprofils mittels eines Laser-Doppler-Anemometers bestimmt wird und an zusätzlichen Positionen, wie etwa kurz hinter der Düse am Beginn der Einlaufstrecke, Messungen mit dem Lorentzkraft-Anemometer aufgenommen werden.

## **Dankesworte**

Der Dank der Autoren gilt André Wegfraß, Christian Diethold und Michael Werner, die in langjährigen Vorarbeiten den verwendeten Wasserumlaufkanal, die Messelektronik sowie das Halbach-Magnetsystem aufgebaut haben und dank denen die aktuellen Untersuchungen erst durchführbar geworden sind.

Weiterhin danken die Autoren der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG), die im Rahmen des Graduiertenkollegs 1567 durch großzügige finanzielle Unterstützung diese Forschung erst ermöglicht hat.

## **Literatur**

- [1] Wegfraß, A., 2013, "Experimentelle Untersuchungen zur Anwendbarkeit der Lorentzkraft-Anemometrie auf schwach leitfähige Fluide", Dissertation, TU Ilmenau, p. 74
- [2] Weidemann, C., 2013: "Design and laboratory test of a Lorentz force flowmeter for pipe flows", Dissertation, TU Ilmenau, pp. 107-108
- [3] Wegfraß, A., Diethold, C., Werner, M. et. al., 2011: „Entwicklung einer neuen Durchflussmesstechnik zur Vermessung elektrisch schwach leitfähiger Fluide mittels Lorentzkraft Anemometrie“, Proceeding, 19. Fachtagung GALA, pp. 15-1 – 15-4