

Fakultät für Physik und Astronomie  
SOWAS-Projekt  
Gruppe L

# MAGNETISCH INDUKTIVER DURCHFLUSSMESSER

Stefan Bendig, Djamal Gandhi, Richard Hess, Christian Lütke Stetzkamp  
Projektleiter: Joscha Denzel

## Einführung & Motivation

Das Ziel des Versuches ist es, den aus dem Grundpraktikum bekannten Hall-Effekt auf leitfähige Flüssigkeiten zu übertragen. Dazu wird eine leitfähige Flüssigkeit durch ein Rohr gepumpt und senkrecht dazu ein Magnetfeld angelegt. Auch hier kommt es zu einer Trennung der Ladungsträger. Dies kann zum Beispiel dafür verwendet werden den Durchfluss durch ein Rohr zu bestimmen.

## Grundlagen

In einem mit Flüssigkeit gefüllten Rohr werden bewegte Ladungsträger im Magnetfeld  $\mathbf{B}$  durch die Lorentzkraft abgelenkt. Dadurch entstehen Partialladungen und es baut sich ein elektrisches Feld  $\mathbf{E}$  auf, bis sich Lorentzkraft  $\mathbf{F}_L$  und elektrische Feldkraft  $\mathbf{F}_E$  im Gleichgewicht befinden:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_L &= q \mathbf{v} \times \mathbf{B} & (1) & \quad q: \text{Ladung} \\ \mathbf{F}_L &= \mathbf{F}_E & & \quad v: \text{Durchflussgeschwindigkeit} \\ q \mathbf{v} \times \mathbf{B} &= q \mathbf{E} & & \\ \text{Annahme: } \mathbf{v} &\perp \mathbf{B} & & \\ \mathbf{v} \mathbf{B} &= \mathbf{E} & (2) & \\ \text{Annahme: } \mathbf{E} &\text{ entspricht ungefähr dem Feld eines Plattenkondensators: } \mathbf{E} = U/(d \mathbf{k}) & & \\ U &= k \mathbf{E} d & & \quad d: \text{Rohrdurchmesser} \\ \Rightarrow U &= k \mathbf{v} \mathbf{B} d & (3) & \quad k: \text{(geometr.) Korrekturfaktor} \end{aligned}$$

Ziel: Nachweis  $U \sim v$ ;  $U \sim B(I)$

**Problem:**  $\mathbf{B}$  lässt sich im Rohr nicht messen, da keine Hall-Sonde in das mit Flüssigkeit gefüllte Rohr eingebracht werden kann. Unter Verwendung der Permeabilitätskonstante  $\mu$  gilt für das Magnetfeld einer Spule der Länge  $L$  mit Windungszahl  $n$  und dem Spulenstrom  $I_{\text{mag}}$ :

$$\mathbf{B} = (\mu n I_{\text{mag}}) / L$$

Durch Einsetzen von  $\mathbf{B}$  in  $U$  kann nun ein proportionaler Zusammenhang aufgestellt werden:

$$U \sim I_{\text{mag}}$$

Mit einer neuen Proportionalitätskonstante  $c$  folgt:

$$U = k c I v d \quad (4)$$

## Versuchsaufbau

Plexiglasrohre in den Durchmessern von  $(24,0 \pm 0,1)$  mm und  $(52,0 \pm 0,1)$  mm werden senkrecht durchbohrt und Kupferelektroden eingedreht. Dann werden die Rohre je einzeln über Schläuche mit einer, durch einen Trenntrafó regelbaren, Pumpe verbunden. Mittels Spulen mit Eisenkernen und Polschuhen wird ein näherungsweise homogenes Magnetfeld, senkrecht zur Elektrodenebene, angelegt. An die Elektroden wird ein Mikrovoltmeter angeschlossen. Nun wird durch die Rohre eine leitfähige Flüssigkeit gepumpt.



Abb. 1: theoretischer Aufbau

Abb. 2: Aufbau: Wasserdurchflusloses Rohr zwischen Spulen

## Messungen

An beiden Rohren wurde jeweils gemessen:

- Durchflussgeschwindigkeit  $v$  bei unterschiedlichen Pumpleistungen
- magnetische Flussdichten  $\mathbf{B}$  bei unterschiedlichen Stromstärken  $I_{\text{mag}}$  (zur Verifizierung von  $U \sim I_{\text{mag}}$ )
- Elektrodenspannungen im Leitungswasser und Salzwasser bei unterschiedlichen Pumpleistungen ( $\mathbf{B} = \text{const.}$ )
- Elektrodenspannungen im Salzwasser bei unterschiedlichen Magnetfeld-Stromstärken ( $v = \text{const.}$ )

## Herausforderungen

**Im Aufbau:**

Erzeugung eines starken homogenen Magnetfeldes, dichter Anschluss der Rohre an die Zuleitungsschläuche und Anschluss einer ausreichend leistungsstarken Pumpe

**Bei der Messung:**

Störungen durch umgebende EM-Felder und die Notwendigkeit die Magnetfeldkonfiguration bei jedem Flüssigkeitswechsel neu aufzubauen, weshalb sich das Magnetfeld jeweils leicht geändert hat.

## Ergebnisse

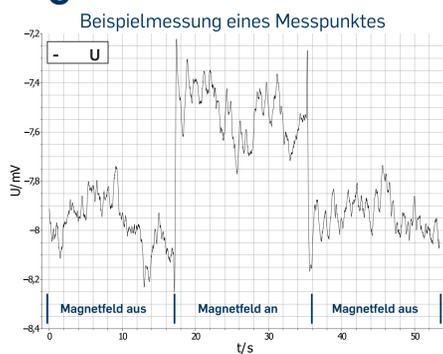


Abb. 3: Die Elektrodenspannung  $U$  im zeitlichen Verlauf steigt sprunghaft an, sobald das Magnetfeld angeschaltet wird

NaCl- und Leitungswasser bei  $I_{\text{mag}} = (2,5 \pm 0,1)$  mm am 24 mm Rohr

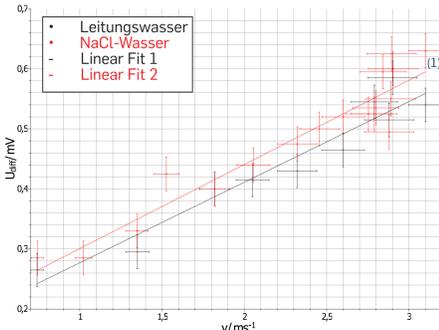


Abb. 4: Elektrodenspannung  $U_{\text{eff}} (= U_{\text{Magnetfeld an}} - U_{\text{Magnetfeld aus}})$  ist proportional zur Durchflussgeschwindigkeit  $v$

NaCl- und Leitungswasser bei  $I_{\text{mag}} = (2,5 \pm 0,1)$  mm am 52 mm Rohr

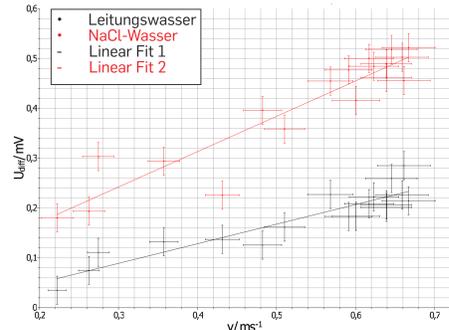


Abb. 5: Elektrodenspannung  $U_{\text{eff}} (= U_{\text{Magnetfeld an}} - U_{\text{Magnetfeld aus}})$  ist proportional zur Durchflussgeschwindigkeit  $v$

Elektrodenspannungen bei verschiedenen Magnetfeldströmen bei maximaler Pumpleistung

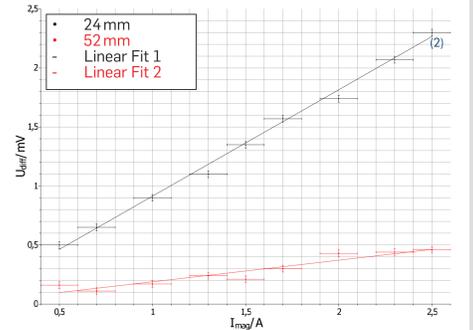


Abb. 6: Elektrodenspannung  $U_{\text{eff}} (= U_{\text{Magnetfeld an}} - U_{\text{Magnetfeld aus}})$  ist proportional zum Magnetfeldstrom  $I_{\text{mag}}$  und ist daher wegen  $I_{\text{mag}} \sim \mathbf{B}$  auch proportional zu  $\mathbf{B}$

## Auswertung

Bei allen durchgeführten Messungen wurden die gesuchten Proportionalitäten nachgewiesen. Um nun die Steigungen zu vergleichen, werden die konstant gehaltenen Koeffizienten  $k$  und  $c$  (4) zu  $A_{\text{eff}}$  zusammengefasst. Der Versuch wurde mehrmals auf- und abgebaut. Dadurch kam es bei exakt gleichen Voraussetzungen ( $I_{\text{mag}}$ ,  $v$ ) zu unterschiedlichen Messwerten (vergleiche Abb. 4 Punkt 1 und Abb. 6 Punkt 2). Hier wird, unter Annahme von Determinismus, vorausgesetzt, dass diese Unterschiede durch kleine Veränderungen der Magnetfeldkonfiguration erzeugt werden und sie deshalb für den Vergleich der Steigung irrelevant sind. Um diesen Fehler auszugleichen wurde ein Renormierungsfaktor  $\kappa$  eingeführt.

	$R^2$	$\kappa$	$\frac{A_{\text{eff}}}{\kappa} / \frac{mV}{Amm \cdot ms^{-1}} \cdot 10^{-3}$
24 mm Leitungswasser	0,93	1	$2,23 \pm 0,22$
24 mm NaCl-Wasser	0,91	1	$2,33 \pm 0,22$
52 mm Leitungswasser	0,85	$0,6 \pm 0,1$	$5,0 \pm 1,0$
52 mm NaCl-Wasser	0,87	1	$5,5 \pm 0,4$
24 mm Variation B	0,996	$4 \pm 1$	$3,0 \pm 0,8$
52 mm Variation B	0,90	1	$5,3 \pm 0,5$

Tabelle 1: Vergleich der effektiven Steigungen  $A_{\text{eff}}$  der Fits  $U(v)$  und  $U(I)$ , Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und Renormierungsfaktor  $\kappa$

$$U = A_{\text{eff}} I v d$$

## Fazit

**Der Versuch zeigt die Physik gut und die Ergebnisse haben eine hohe Güte.**

Es passen alle Koeffizienten eines Rohres zusammen, sie liegen in ihren gegenseitigen Fehlerintervallen. Die einzelnen Koeffizienten für die verschiedenen Rohre unterscheiden sich. Dies ist allerdings auch physikalisch nachvollziehbar, da sich das Magnetfeld dadurch ändert, dass die Polschuhe beim größeren Rohr weiter auseinander sind. Auch der Korrekturfaktor  $k$  hängt stark von der Geometrie ab. Diese ändert sich zwischen den verschiedenen Rohren nicht nur dadurch, dass sie einen anderen Durchmesser haben, sondern auch dadurch, dass die Elektroden unterschiedlich weit in die Rohre eingebracht sind. Es wird besonders deutlich, dass die Leitfähigkeit, wie hergeleitet (2), nicht relevant ist, sobald eine gewisse Leitfähigkeit überschritten ist.

Es gibt noch einige Möglichkeiten den Versuch in der Zukunft zu verbessern und noch weitere Ergebnisse zu erhalten:

Durch ein homogeneres, stärkeres Magnetfeld und eine linear regelbare Pumpe mit größerem Durchfluss sind die Näherungen besser, der Signal-Rausch Abstand ist größer und es kann über mehr Größenordnungen gemessen werden. Mit einer besseren Abschirmung und erdbaren Mikrovoltmetern kann außerdem der Einfluss durch äußere EM-Felder verringert werden und die Genauigkeit erhöht werden.

## Referenzen

- [1] Handbuch der Durchflussmessung (diverse Autoren), Verlag: Bailey, Fischer und Porter
- [2] Durchflussfibel (diverse Autoren), Verlag: FLOWTEC AG
- [3] Physik, Autoren: Gerthsen, Kneser, Vogel, Springer Verlag

## Danksagungen

- Herrn D. Meyer für seine stets hilfreichen Beratungen
- Herrn T. Domanski und Herrn K. Ulrich für ihre Hilfe bei jedweden technischen Problemen
- Joscha Denzel für die vielen Gespräche und seine stete Hilfe bei der Realisierung unseres Projektes

## Kontakt

Stefan.Bendig@rub.de  
Djamal.Gandhi@rub.de  
Richard.Hess@rub.de  
Christian.LuetkeStetzKam@rub.de