

# MHD-Generator

09.11.2009 – 04.12.2009

## PPG 5

Michele Collodo, Andreas Glossner,  
Karl-Christoph Gödel, Bastian Hacker,  
Maria Obst, Alexander Wagner, David Winnekens  
Tutor: Xiaoyue Jin

[http://pp.physik.uni-erlangen.de/groups/ws0910/ppg5/ppg5\\_start.html](http://pp.physik.uni-erlangen.de/groups/ws0910/ppg5/ppg5_start.html)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Konstruktion und Aufbau</b>	<b>3</b>
3.1	Konstruktion des Magnetfelds . . . . .	3
3.2	Aufbau der Zelle . . . . .	4
3.3	Aufbau der Messapparatur . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Messungen und Ergebnisse</b>	<b>7</b>
4.1	Leitfähigkeit von Salzwasser . . . . .	7
4.2	Magnetfeld . . . . .	8
4.3	Zellspannung und -strom . . . . .	8
4.4	Wassergeschwindigkeit und Druck . . . . .	10
4.5	Umkehrung des Effekts, Nutzung als Wasserpumpe . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Autorenverzeichnis</b>	<b>12</b>

dumdidum

# 1 Einleitung

Die Frage der Energieerzeugung hat in der Physik der letzten Jahrhunderte immer eine bedeutende Rolle gespielt. Eine vielversprechende Möglichkeit schien das Ausnutzen von magnetischen Feldern. Die ersten Überlegungen zu solchen Generatoren machte Michael Faraday schon 1832. Später wurden immer mehr Arten entdeckt, Magnetfelder zur Stromerzeugung zu nutzen. Zur Anwendung kommen hier sowohl statische als auch veränderliche Magnetfelder. Der wohl bekannteste MHD-Generator ist der Dynamo, der bis heute oft zur Energiegewinnung eingesetzt wird. Doch der Effekt lässt sich auch auf viel größeren Skalen wiederfinden. So erzeugt zum Beispiel die Erde ihr schützendes Magnetfeld mit dem Dynamoprinzip. Auch für die Erzeugung und Beschleunigung stellarer Jets gibt es magnetohydrodynamische Modelle.

## 2 Theorie

Das Prinzip des MHD-Generators beruht auf der Lorentzkraft,

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}),$$

die in einem Magnetfeld auf eine bewegte Ladung wirkt. Wird also eine leitende Flüssigkeit durch ein möglichst homogenes, starkes Magnetfeld geschickt, welches senkrecht zur Flussrichtung gerichtet ist, werden positive und negative Ladung entsprechend der Rechten-Hand-Regel in entgegengesetzte Richtungen abgelenkt. Bringt man dann in jeder dieser Richtungen je eine Elektrode an, kann man eine Spannung abgreifen und hat so eine Generatorzelle konstruiert.

## 3 Konstruktion und Aufbau

### 3.1 Konstruktion des Magnetfelds

Im Vorfeld der eigentlichen Messungen an der Zelle wurde die möglichst optimale Konstruktion des Magnetfelds ermittelt. Ziel war es bei einer Feldstärke von rund  $0.1T$  ein möglichst im gesamten Bereich der Zelle homogenes Feld zu erhalten. Zunächst wurden verschiedene Permanentmagneten eingesetzt, die jedoch allesamt unbefriedigende Ergebnisse lieferten. Die eingesetzten Stabmagneten erzielten eine maximale Feldstärke von  $0.07T$ , das der zur Verfügung stehenden Hufeisenmagneten war noch wesentlich niedriger. Die größte Feldstärke wurde an Ringpermanentmagneten ( $B \approx 0.3T$ ) gemessen; dieser Wert fiel jedoch schon im Abstand von

wenigen *mm* stark ab ( $1/r^3$ -Abhängigkeit) und war deshalb ebenfalls ungeeignet. Folglich wurde ein Aufbau mit Elektromagneten gewählt. Zum Einsatz kamen dabei vier Spulen mit je 1000 Windungen (Anordnung siehe Abb. 1).

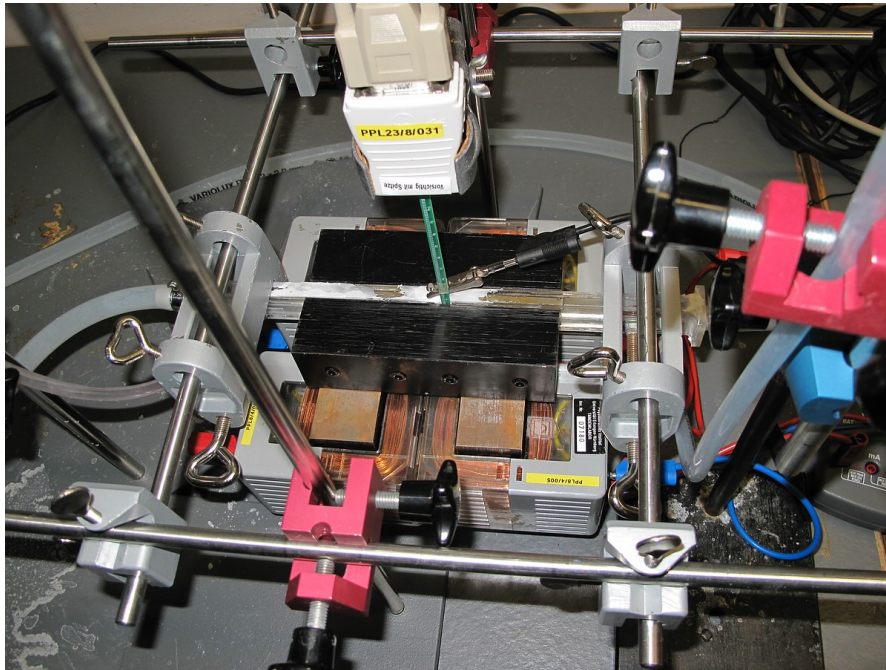


Abbildung 1: Anordnung der vier Spulen zum Erzeugen des Magnetfelds

Zunächst wurde eine kurze Messung zur Ermittlung der Abhängigkeit der Magnetfeldstärke vom Abstand zwischen den beiden Eisenjochen durchgeführt. Zu erwarten war wegen

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot N \cdot I}{\mu \cdot d + 2 \cdot \pi \cdot R}$$

in etwa eine  $1/d$ -Abhängigkeit, wobei  $\mu$  die Materialkonstante des Eisens,  $N$  die Windungszahl,  $d$  der Abstand zwischen den beiden Eisenjochen und  $R$  der Radius der „Gesamtpule“ ist. Die „Gesamtpule“ ist dabei die gesamte Anordnung der vier Einzelspulen und kann in erster Näherung als kreisförmig angenommen werden. Permanentmagneten nicht geeignet, Vormessung B-Feld: Verschiedene Abstände, Geometrie des Feldes, Schaltung der Spulenpaare

### 3.2 Aufbau der Zelle

Platten, Anschlüsse, Abstände



Abbildung 2: Vormessung ohne Zelle zur B-Feldstärke, die Plastikstäbe dienen zum Einstellen verschiedener Spaltbreiten

### 3.3 Aufbau der Messapparatur

Nachdem die Zelle in der Werkstatt fertiggestellt worden war, wurde die restliche Versuchsanordnung aufgebaut. Der MHD-Generator sollte folgende Komponenten enthalten:

- Eine Pumpe mit einem Reservoir an gesättigtem Salzwasser
- die Zelle, platziert in einem möglichst homogenen Magnetfeld
- Möglichkeiten zur Messung der Magnetfeldstärke sowie des lokalen Drucks in der Zelle.

Die Pumpe wurde bereits im Vorraus im Versandhandel bestellt. Die ersten Vorabrechnungen hatten ergeben, dass eine Wassergeschwindigkeit im Bereich von  $1\text{m/s}$  messbare Ergebnisse liefern würde. Daher entschieden wir uns für eine Teichpumpe, die mit 220V Netzspannung betrieben wird und dabei laut Herstellerangaben bei einer Leistung von 16W ca.  $1000\text{ l}$  Wasser pro Stunde bis zu einer Förderhöhe von 1,7m transportieren soll. Da davon auszugehen war, dass diese nicht für den Einsatz in hoch konzentriertem Salzwasser geeignet ist, wurde der komplette Kreislauf am Ende jedes Arbeitstages mit Leitungswasser gespült um Langzeitschäden vorzubeugen.

Beim Aufbau der gesamten Apparatur des MHD-Generators musste mehreren Faktoren besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden:

- Die Bereiche mit anliegenden Spannungen sollten getrennt von den wasserführenden Bauteilen installiert werden.
- Der Zelle muss waagrecht eingebaut sein, damit die Druckmessung nicht beeinflusst wird.
- Der Aufbau sollte genau reproduzierbar sein, um eine Vergleichbarkeit der Messungen zu erreichen.
- Bei einem Durchlauf sollten möglichst viele Parameter gleichzeitig erfasst werden können.

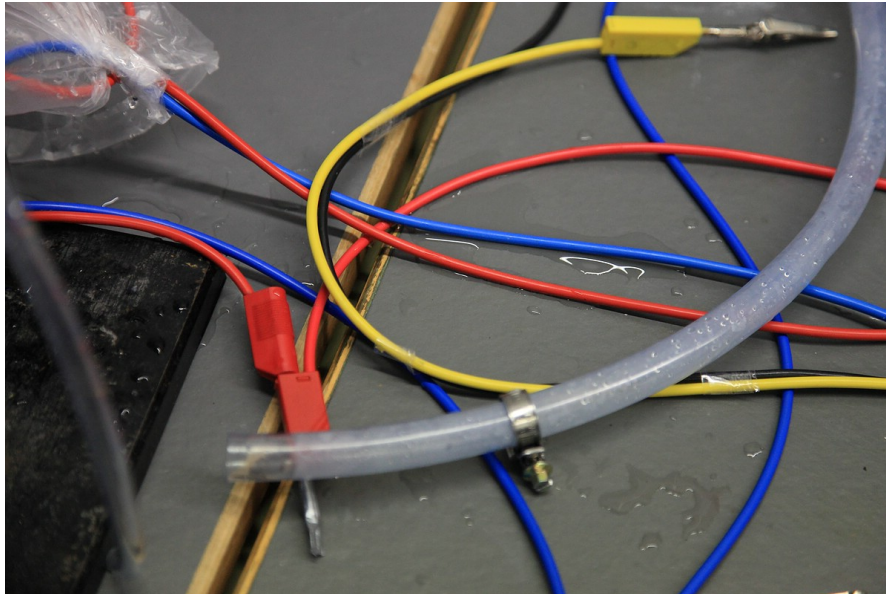


Abbildung 3: Trennung der wasser- und stromführenden Bereiche

Wie bereits beim ersten Projekt, erschien auch hier eine Konstruktion aus Stativstangen am Sinnvollsten. Die Zelle wurde an einem quadratischen Rahmen aus Stangen, Winkelverschraubungen, sowie Klemmen fixiert und konnte von oben in das Magnetfeld gesenkt werden. So war auch ein Umbau bei Bedarf relativ einfach möglich. Eine vollständige Trennung der strom- und wasserführenden Teile ist aufgrund des MHD-Prinzips nicht möglich. Daher befanden sich die Spulen und Eisenkerne mit den Stromanschlüssen in einer Plastikhülle, die genügend Spielraum bot, um zwischen den Kernen die Zelle zu fixieren.

Nachdem bei ersten Vormessungen entweder die Zelle oder die Magnetfeldsonde zwischen den Spulen platziert waren, entschieden wir uns auch die tangentielle B-Feld Sonde dauerhaft in den Kreislauf zu integrieren, um die Messwerte zusammenhängend aufzuzeichnen. Zwei dünne Abstandshalter stellten dabei sicher, dass die empfindliche Sonde nicht zwischen den Magneten zerdrückt wird.



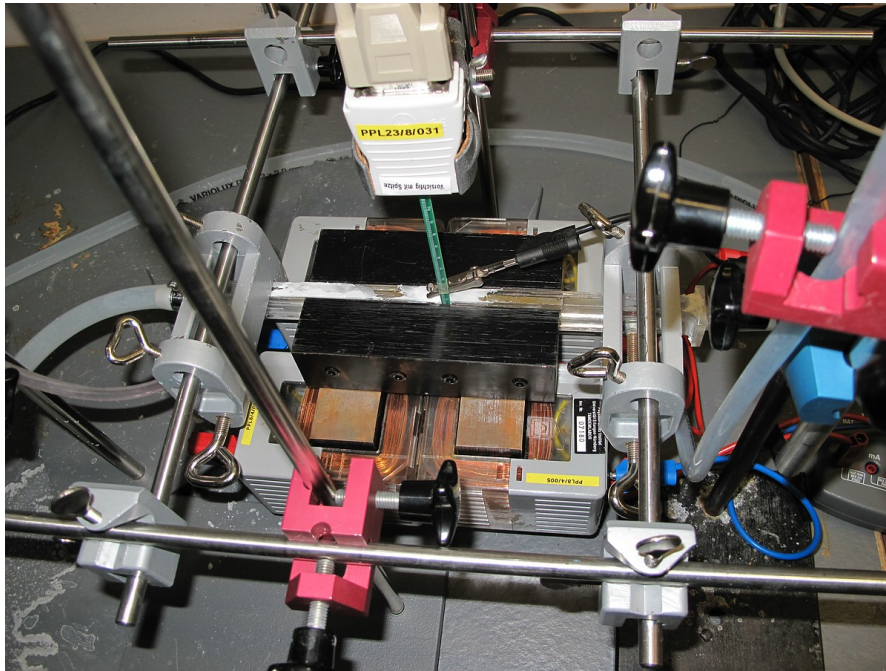


Abbildung 4: Die Magnetfeldsonde, eingeklemmt zwischen Spulenkernen und Zelle. Die Plastiktüte um die Spulen wurde aus optischen Gründen entfernt.

Zur Bestimmung des lokalen Drucks, kamen zwei dünne Schläuche als Steigrohre zum Einsatz, welche an den Seitenrändern der Zelle angeschlossen waren. An diesen konnte der unterschiedliche Wasserstand abgelesen werden. Um eine einheitliche Ausgangshöhe zu erhalten, kam als Messbasis eine Wasserwaage zum Einsatz. Die Steigrohre wurden ebenfalls in die Konstruktion eingespannt.

Strom und Spannungsmesswerte, sowie die Magnetfeldstärke wurden durch das Cassy Lab System mit entsprechenden Verstärker und Anschlussboxen über die Zeit aufgetragen und zur Auswertung aufgezeichnet. Für die Messung des, an der Spule angelegten, Stroms im Bereich von bis zu 2A, war der Messbereich ausreichend, es waren jedoch keine Adapter verfügbar, um den an der Zelle abfallenden Strom zu verstärken. Daher kam auch hier wieder der Umweg über einen einstellbaren Widerstand mit anschließender Spannungsmessung zum Zuge.

## 4 Messungen und Ergebnisse

### 4.1 Leitfähigkeit von Salzwasser

Die interessantesten Messungen gibts hier, Widerstand der Zelle

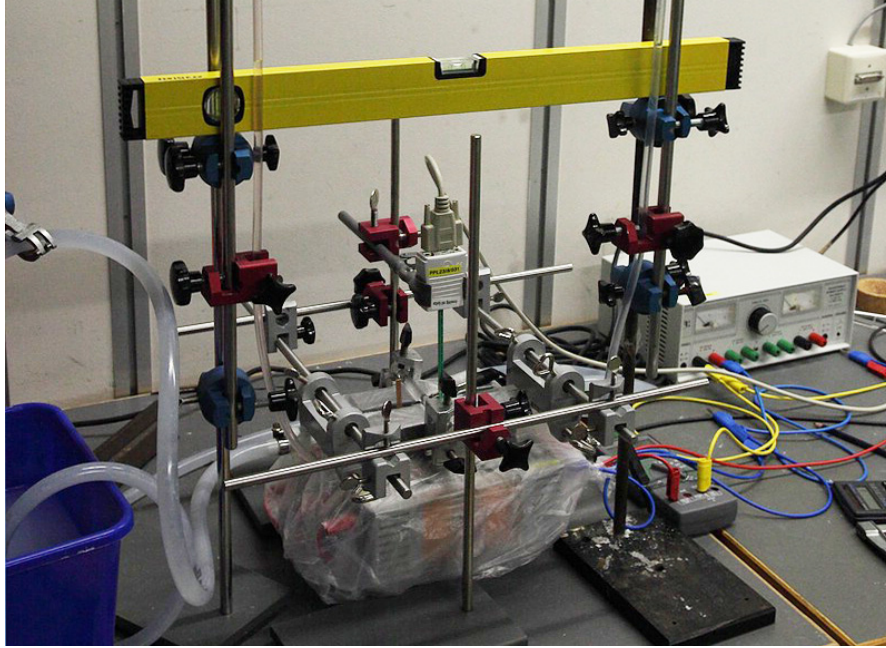


Abbildung 5: Der komplette Aufbau des MHD-Generators, im Eimer links befindet sich die Pumpe mit dem Wasservorrat

## 4.2 Magnetfeld

Abhängigkeit der Zellspannung vom B-Feld

## 4.3 Zellspannung und -strom

Prinzipiell dient ein Generator dazu, elektrische Leistung zu erzeugen, und das kann er nur wenn mit der induzierten Spannung ein ein Strom fließt. Wie es sich gezeigt hat, erhalten wir bei der verwendeten Fließgeschwindigkeit von  $v = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  leider nur Ströme im  $\mu\text{A}$ -Bereich. Deshalb wäre die Messung über ein Amperemeter recht schwierig gewesen und wir haben uns für eine indirekte Methode entschieden.

Das verwendete Voltmeter des Cassy-systems besitzt einen Innenwiderstand von  $R_U = 100 \text{ k}\Omega$ . Sein Stromfluss ergibt sich ganz einfach nach dem ohmschen Gesetz. Zusätzlich wurden nun verschiedene Lastwiderstände  $R_L$  parallel geschaltet und der Gesamtstrom in der Schaltung bzw. Zelle ist folglich

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{(R_U^{-1} + R_L^{-1})^{-1}} = U \cdot \left( \frac{1}{R_U} + \frac{1}{R_L} \right) \quad (1)$$

Die Apperatur zeigte bei der Messung wieder eine zeitabhängige Offsetspannung



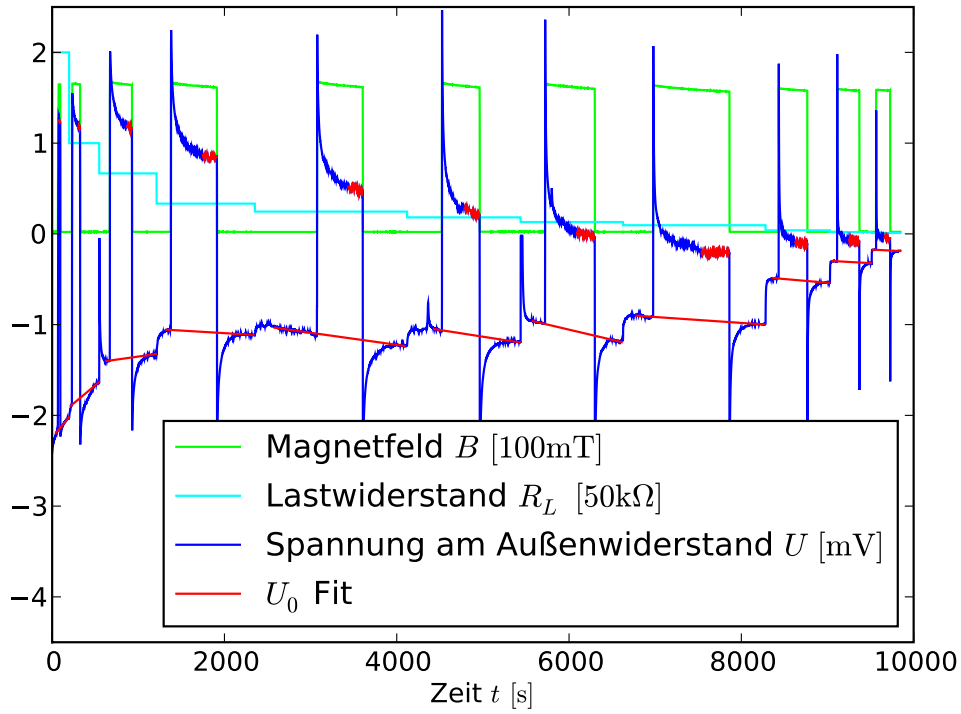


Abbildung 6: Spannungswerte am Außenwiderstand in Abhängigkeit vom Widerstand und dem Magnetfeld

in der gleichen Größenordnung des Signals, welche daher unbedingt zu eliminieren war. Hierzu wurde jeweils der gewünschte Lastwiderstand angeklemmt, dann ein stabiler Spannungsverlauf abgewartet. Sobald dieser vorhanden war, wurde das Magnetfeld aktiviert und wieder gewartet. Hier konnte es schon 10 Minuten dauern, bis das Signal asymptotisch wurde. Daraufhin wurde das Magnetfeld wieder deaktiviert und ein letztes mal gewartet. In Abb. 6 ist der resultierende Spannungsverlauf dargestellt. Die Offsetspannung konnte nun (als rote Linien dargestellt) in den Graphen gefittet und die Differenzen zu den höheren Spannungswerten gemessen werden. Die Spannungswerte wurden punktwise durch das vorherrschende – nicht ganz konstante – Magnetfeld geteilt und dann für jeden Widerstandswert gemittelt. Die Ausgabe des hierzu erstellten Pythonprogramms findet sich in Tabelle 1, wobei die Strom- und spannungswerte wieder mit der mittleren Flussdichte von 160 mT hochgerechnet sind.

Die so ermittelten Spannungs- und Stromwerte sind in Abb. 7 aufgetragen. Aus den Daten errechnet sich nun, dass die Zellspannung unter gegebenen Umständen bei  $U = (3,7 \pm 0,2) \text{ mV}$  lag und der Eigenwiderstand der Zelle in diesem Span-

Tabelle 1: Ausgewertete Spannungs- und Stromwerte bei  $B = 160 \text{ mT}$

$R_L \text{ [k}\Omega\text{]}$	$R \text{ [k}\Omega\text{]}$	$U \text{ [mV]}$	$I \text{ [}\mu\text{A]}$
$\infty$	100.00	3.16	0.032
100	50.00	2.79	0.056
50	33.33	2.51	0.075
20	16.67	1.93	0.116
14	12.28	1.65	0.134
10	9.09	1.35	0.149
7	6.54	1.10	0.168
5	4.76	0.78	0.164
2	1.96	0.42	0.215
1	0.99	0.24	0.244
0.5	0.50	0.14	0.275

nungsbereich bei

$$R_Z = (15,7 \pm 1,7) \text{ k}\Omega \quad (2)$$

mit einer Kovarianz der beiden Werte von  $0,33 \text{ mV k}\Omega$ . Einen derart hohen Widerstandswert hatten wir nicht erwartet. Bei unserer Zellgeometrie von  $1,8 \text{ cm} \times 7,5 \text{ cm}^2$  ergibt dies einen Leitwert von

$$\sigma = \frac{d}{R A} = (0,00153 \pm 0,00017) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\Omega \text{m}} \quad \text{bei } U \approx 3 \text{ mV} \quad (3)$$

Dies ist erstaunlich wenig, wenn man bedenkt dass der Leitwert von Leitungswasser in etwa bei  $0,05 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  und von Salzwasser sogar bei  $5 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$  liegen sollte. Das Ergebnis geht also konform mit unseren anderen Erkenntnissen zur Leitfähigkeit von Salzwasser, dass diese für geringe Gleichspannungen deutlich verringert ist.

Für unseren MHD-Generator bedeutet das konsequenterweise, dass mit den gegebenen Parametern keine sinnvolle Stromerzeugung möglich ist. Wie im Abschnitt 4.1 festgestellt wären dazu Spannungen in der Größenordnung ab  $1 \text{ V}$  notwendig, wozu man das Produkt aus Magnetfeld, Elektrodenabstand und Fließgeschwindigkeit um den Faktor 300 erhöhen müsste. Das ist großtechnisch wohl machbar, liegt aber außerhalb unserer Verbesserungsmöglichkeiten.

#### 4.4 Wassergeschwindigkeit und Druck

... Wirkungsgrad gibts keinen, weil die Druckmessung zu schwierig war.

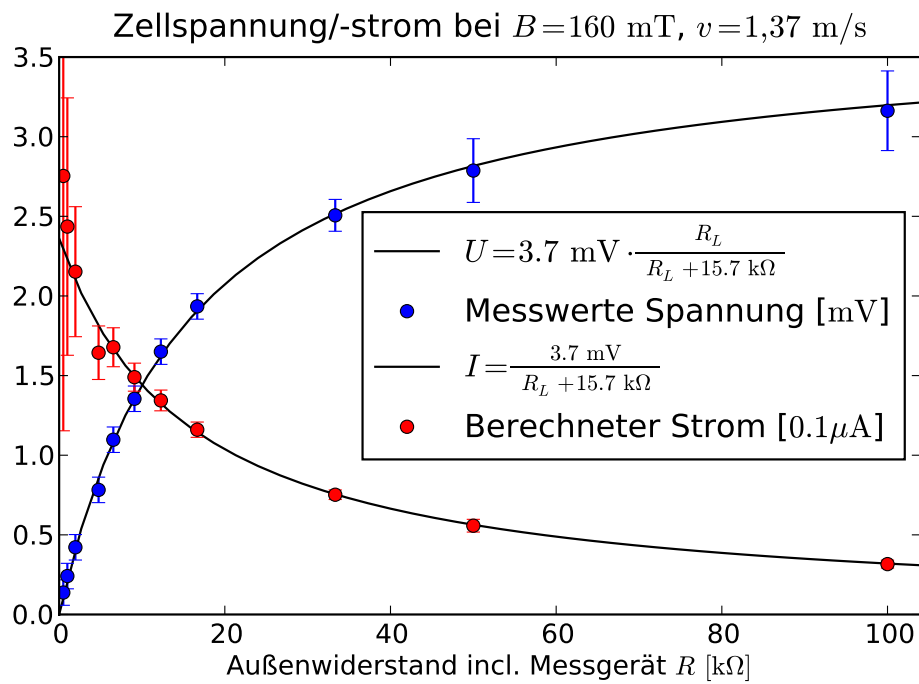


Abbildung 7: Spannung und Strom an der Zelle

#### 4.5 Umkehrung des Effekts, Nutzung als Wasserpumpe

Wird sogar als Antriebstechnik für Schiffe getestet (Magnetohydrodynamischer Antrieb bei Wikipedia)

## 5 Fazit

## 6 Autorenverzeichnis

<i>Autor</i>	<i>Kapitel</i>
Michele Collodo	Widerstandsmessung
Andreas Glossner	Magnetfeldmessung
Karl-Christoph Gödel	Bau der Zelle
Bastian Hacker	Strommessung
Maria Obst	Einleitung und Theorie
Alexander Wagner	Versuchsaufbau und Bilder
David Winnekens	Umkehrung des Effekts und Fazit