

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

Inhaltsverzeichnis

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. Die hierbei entstehende Spannung ist

$$U = B \cdot v \cdot d,$$

wobei d den Abstand zwischen den beiden Elektroden und v die Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeit bezeichnet. Der gemessene Strom ist dann

$$I = v \cdot B \cdot A \cdot \sigma,$$

wo A die Fläche einer Elektrode und σ die Leitfähigkeit der Flüssigkeit ist. Daraus ergibt sich eine Leistung des Generators von

$$P = U \cdot I = B^2 \cdot v^2 \cdot A \cdot d \cdot \sigma.$$

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. ??).

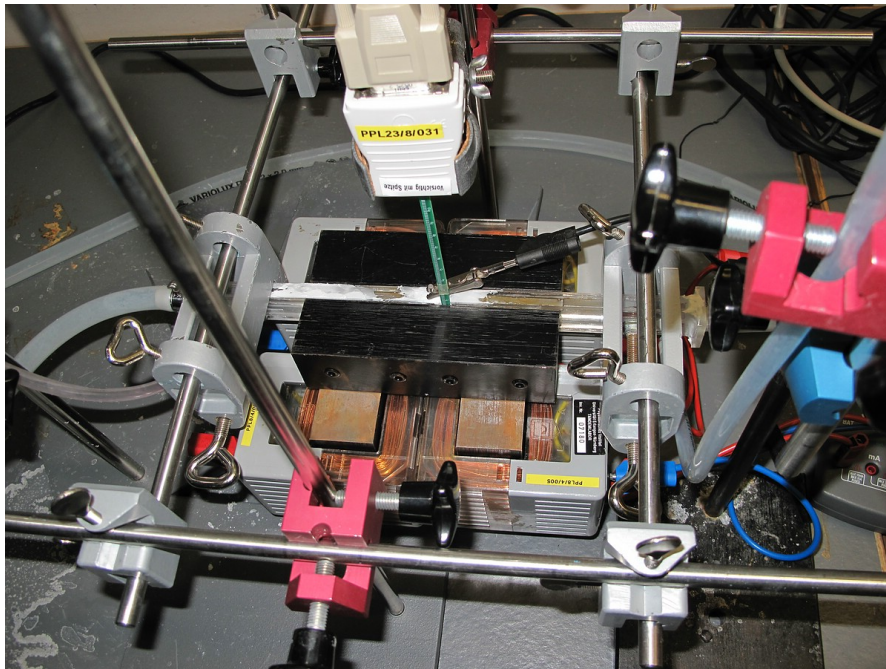


Abbildung 1: Anordnung der vier Spulen zum Erzeugen des Magnetfelds

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 μ 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



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

3.2 Aufbau der Zelle

Bei der Planung der Zellengeometrie mussten verschiedene Eigenschaften abgewägt werden, um eine möglichst hohe Leistung der Zelle zu erhalten. Es gilt:

$$P \propto B^2 \cdot v^2 \cdot d \cdot A_{\text{Elektrode}}$$

Wobei B die Flussdichte des Magnetfeldes des Elektromagneten, v die Durchflussgeschwindigkeit durch die Zelle, d den Abstand der Elektroden und $A_{\text{Elektrode}}$ die Elektrodenfläche bezeichnen. Bei einer begrenzten Pumpenleistung und damit einem konstanten maximalen Volumendurchsatz $V = A_{\text{Durchfluss}} \cdot v = \text{const}$ ist die Geschwindigkeit v indirekt proportional von der Durchflussfläche $A_{\text{Durchfluss}} = d \cdot b$ abhängig. Die Breite b der Zelle sollte klein gehalten werden, um ein möglichst starkes Magnetfeld zu gewährleisten. Deshalb wurde versucht eine hohe, schmale und dünnwandige Zelle zu konstruieren. Unter Berücksichtigung der Geometrie des B-Feldes und mit Absprache der Werkstatt, ergab sich folgender Aufbau der Durchflusszelle:

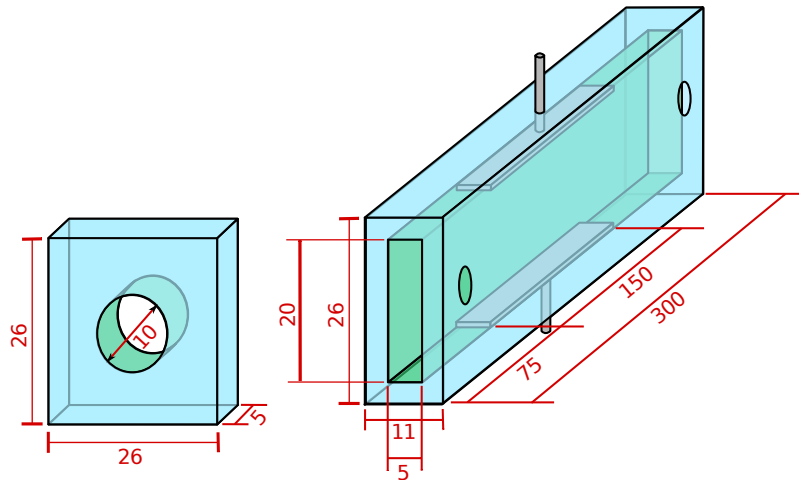


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Durchflusszelle (alle Angaben in mm)

Als Elektrodenmaterial wurde zuerst Aluminium angedacht. Erste Versuche zeigten jedoch starke chemische Reaktionen mit der Salzwasserlösung, weshalb die Elektroden dann aus Edelstahl gefertigt wurden. An den in Abbildung ??? zu erkennenden Löchern wurden Schlauchstutzen aus Kunststoff angebracht, um vorne und hinten den Durchlaufschlauch und seitlich dünnere Schläuche zur Druckmessung befestigen zu können. Die mechanische Werkstatt fertigte zwei Durchflusszellen aus Plexiglas, die jedoch leider beide nicht wasserdicht waren. Mit Hilfe von Silikon konnten die Leckstellen abgedichtet werden.

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 Voraus im Versandhandel bestellt. Die ersten Vorabrechnungen hatten ergeben, dass eine Wassergeschwindigkeit im Bereich von 1 m/s messbare Ergebnisse liefern würde. Daher entschieden wir uns für eine Teichpumpe, die mit 220V Netzspannung betrieben wird und dabei laut Hersteller-

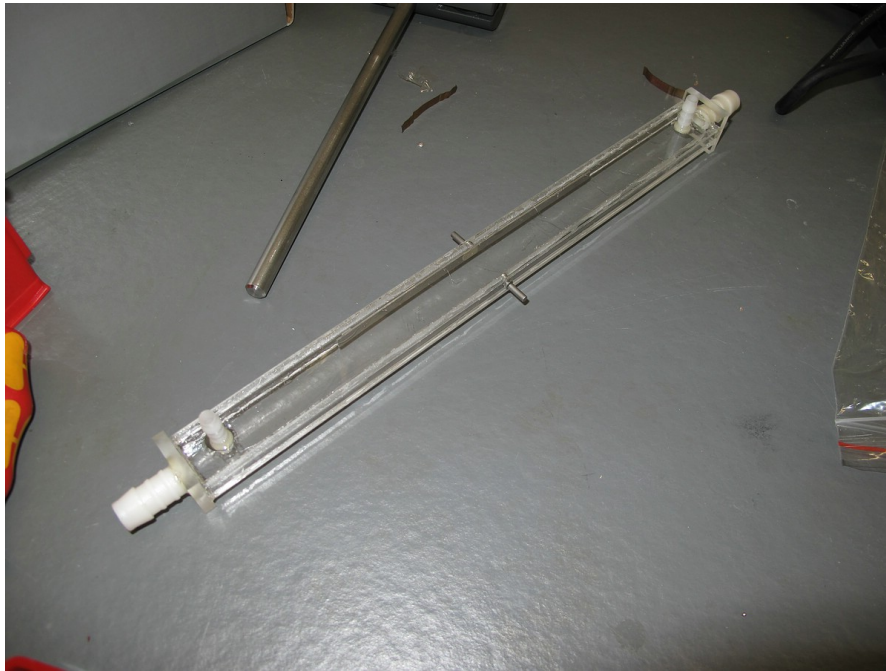


Abbildung 4: Die fertige Durchflusszelle

angaben bei einer Leistung von 16W ca. 1000 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.

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 ein-

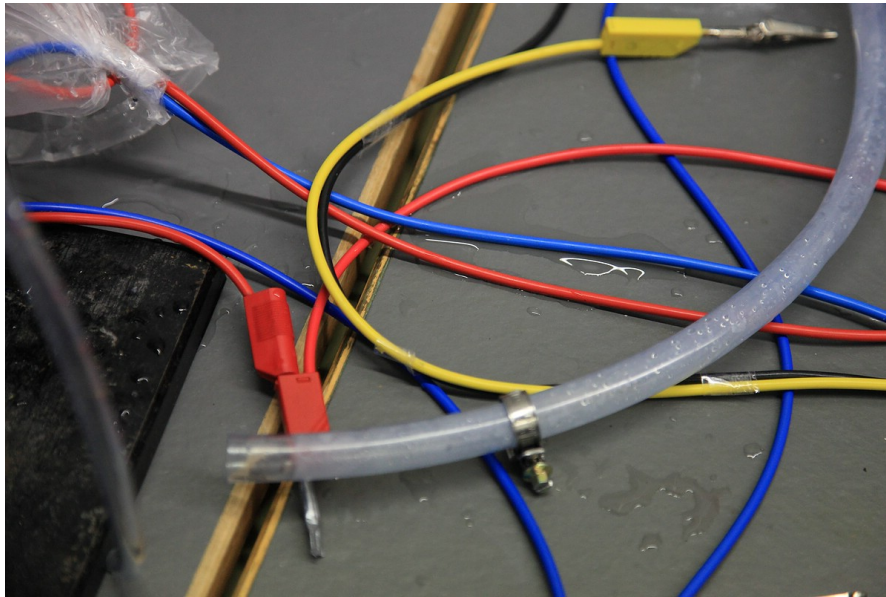


Abbildung 5: Trennung der wasser- und stromführenden Bereiche

fach 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.

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.

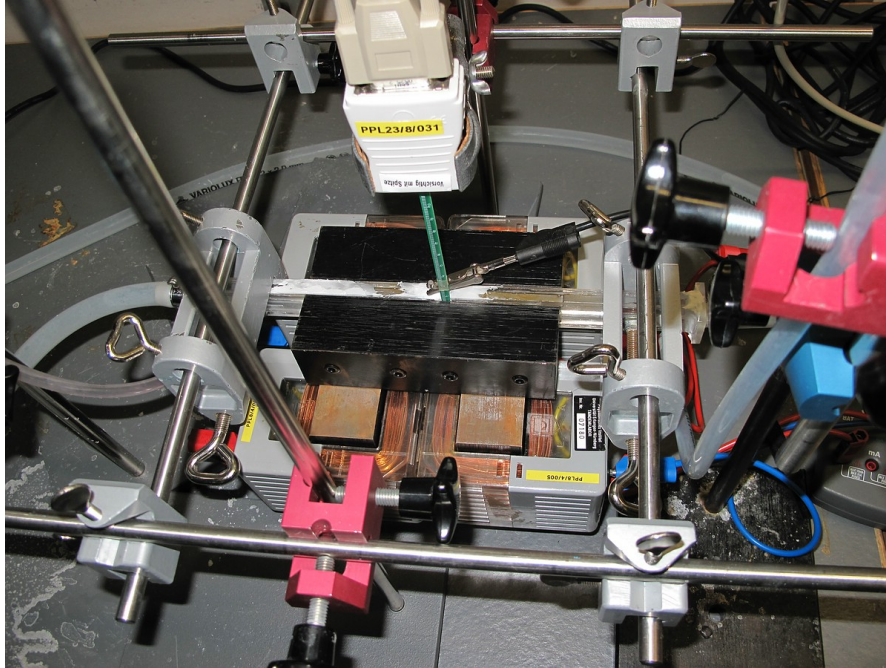


Abbildung 6: Die Magnetfeldsonde, eingeklemmt zwischen Spulenkernen und Zelle. Die Plastiktüte um die Spulen wurde aus optischen Gründen entfernt.

4 Messungen und Ergebnisse

4.1 Leitfähigkeit von Salzwasser

Die interessantesten Messungen gibts hier, Widerstand der Zelle

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 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 μA -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.

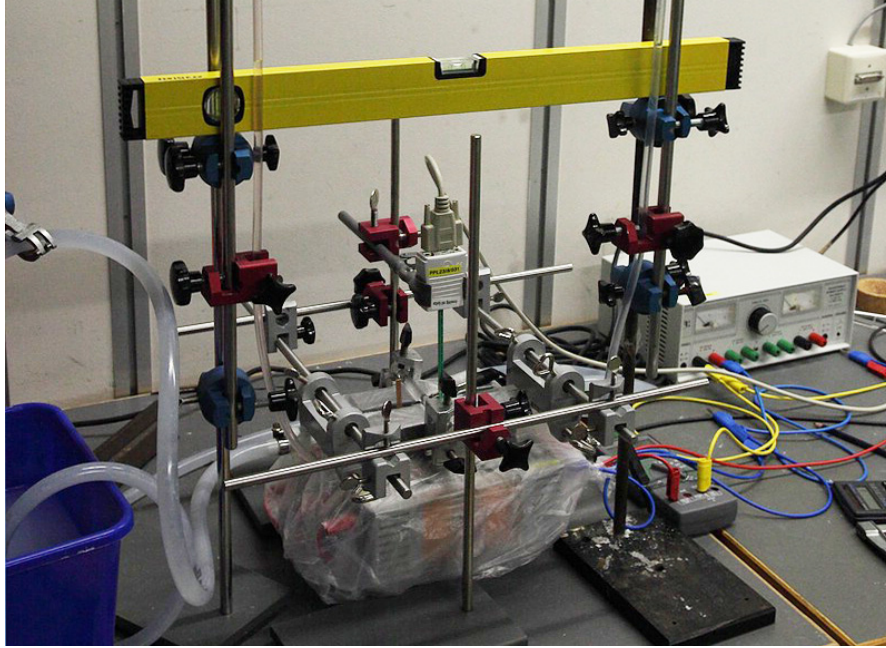


Abbildung 7: Der komplette Aufbau des MHD-Generators, im Eimer links befindet sich die Pumpe mit dem Wasservorrat

Zusätzlich wurden nun verschiedene Lastwiderstände R_L parallel geschalten 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 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. ?? 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 punktweise durch das vorherrschende – nicht ganz konstante – Magnetfeld geteilt und dann für jeden Widerstandswert gemittelt. Die Ausgabe des hierzu erstellten Pythonprogramms findet sich in Tabelle ??, wobei die Strom- und spannungswerte wieder mit der mittleren Flussdichte von 160 mT hochgerechnet sind.

Die so ermittelten Spannungs- und Stromwerte sind in Abb. ?? aufgetragen. Aus

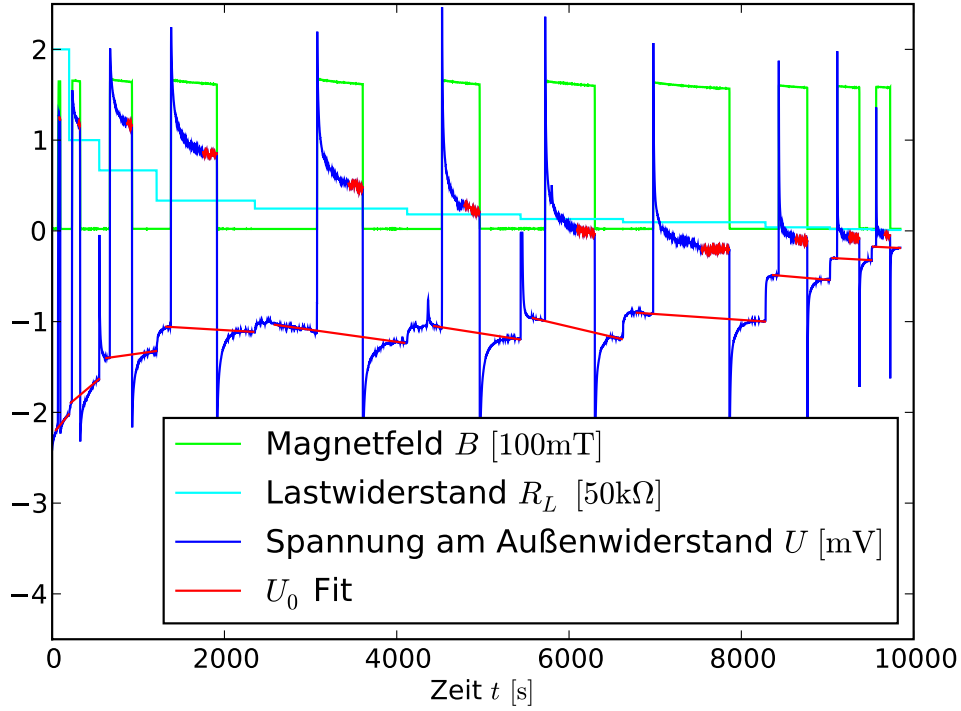


Abbildung 8: Spannungswerte am Außenwiderstand in Abhängigkeit vom Widerstand und dem Magnetfeld

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 Spannungsbereich 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 ?? festgestellt wären dazu Spannungen in der Größenordnung ab 1 V not-

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

$R_L \text{ [k}\Omega\text{]}$	$R \text{ [k}\Omega\text{]}$	$U \text{ [mV]}$	$I \text{ [}\mu\text{A]}$
∞	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

wendig, 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

Zur Bestimmung des Wirkungsgrads des MHD-Generators wäre eine Druckdifferenzmessung vor und hinter den Elektroden nötig gewesen. Es wurde versucht dies mit Hilfe der Steighöhe in den beiden seitlich angebrachten Schläuchen zu bestimmen. Leider waren die Schwankungen im Pumpbetrieb wesentlich stärker als der zu messende Steighöhenunterschied. Eine Wirkungsgradbestimmung war somit unmöglich.

Zur Bestimmung der Abhängigkeit der generierten Spannung von der Durchflussgeschwindigkeit durch die Zelle, musste ein Weg gefunden werden die Pumpe, die eigentlich einen konstanten Fluss lieferte zu drosseln. Ein mitgeliefertes Ventil konnte verwendet werden, um den Volumendurchsatz der Pumpe zu reduzieren. So war es möglich verschiedene Geschwindigkeiten durch die Zelle zu realisieren. Um den Betrag der Durchflussgeschwindigkeit zu ermitteln wurde die Zeit t genommen, die die Pumpe benötigte um ein konstantes Volumen $V = 400 \text{ ml}$ mit Wasser zu füllen. Um statistische Fehler zu minimieren wurde dies bei eingestelltem Ventil mehrmals durchgeführt und über die Zeitwerte gemittelt. Mit Hilfe des Volumendurchsatzes konnte dann die Durchflussgeschwindigkeit v in der Zelle mit Querschnitt $A_{\text{Durchfluss}}$ ermittelt werden:

$$v = \frac{\text{Volumendurchsatz pro Zeit}}{A_{\text{Durchfluss}}}$$

Der Querschnitt der verwendeten Zelle betrug $A_{\text{Durchfluss}} = 0.5 \text{ cm} \cdot 2.0 \text{ cm} =$

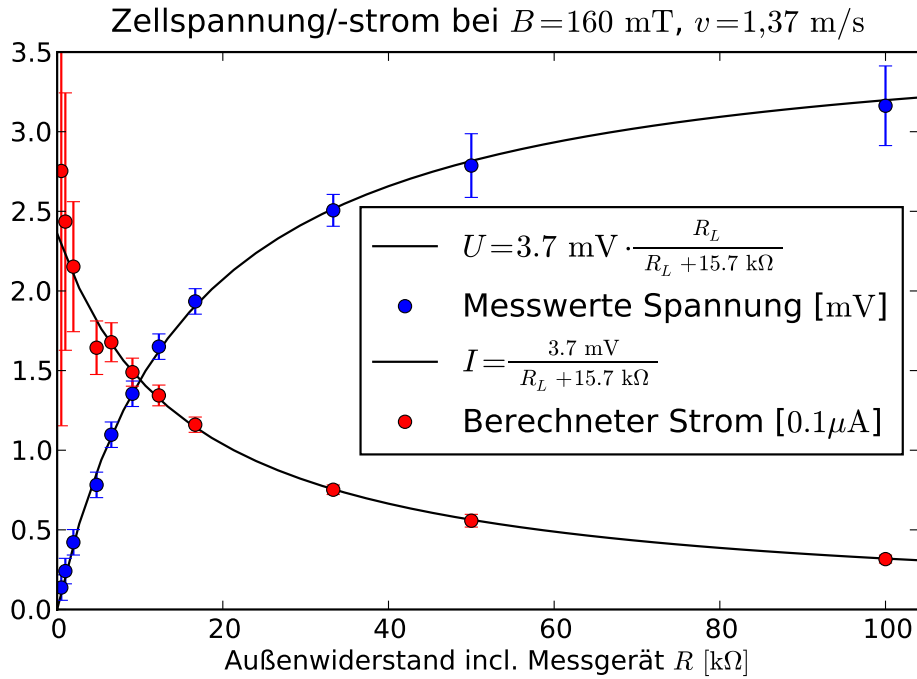


Abbildung 9: Spannung und Strom an der Zelle

1.0 cm^2 .

Die Unsicherheit der Geschwindigkeit ist durch das manuelle Stoppen der Zeitwerte bedingt und wird auf etwa $\Delta v = 7\% \cdot v$ geschätzt. Natürlich wird die Durchflussgeschwindigkeit innerhalb der Zelle eigentlich durch eine parabelförmige Geschwindigkeitsverteilung beschrieben, die aber hier in guter Näherung als konstant angenommen wird.

Für die verschiedenen Durchflussgeschwindigkeiten konnte mit Hilfe des Cassy Lab Systems Spannung und B-Feld über die Zeit gemessen werden. Es wurde darauf geachtet, dass sich die Spannungskurve bereits 'eingependelt' hatte, um keine Störung durch die elektrochemischen und kapazitiven (???) Prozesse zu messen. Bei jeder Geschwindigkeit wurde die Referenzspannung, d.h. die Spannung bei ausgeschaltetem B-Feld (nur Restmagnetisierung des Eisenjochs) gemessen und dann mehrmals das Magnetfeld ein- und ausgeschaltet. Folgender Verlauf wurde beispielsweise für $v = 0.68 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ aufgezeichnet:

Aus diesen Daten konnte für jede Geschwindigkeit der Spannungsunterschied und der Anstieg des B-Feldes ermittelt werden.

Um Spannungswerte bei leicht verschiedenen Magnetfeldern (unterschiedliche Magnetisierung des Eisenjochs) vergleichen zu können, wurde der Quotient aus

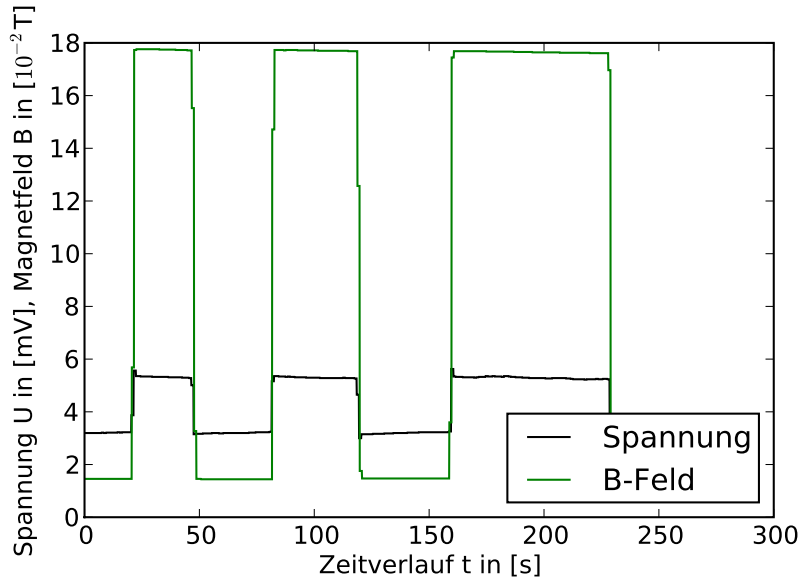


Abbildung 10: Spannungs- und B-Feld-Verlauf für $v = 0.68 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Tabelle 2: Messwerte zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Spannung

$v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	$\frac{\Delta U}{\Delta B} \left[\frac{\text{mV}}{\text{T}} \right]$
0.35	6.69
0.48	8.98
0.68	12.96
0.80	15.11
0.96	18.29

Spannung und B-Feld über der Durchflussgeschwindigkeit aufgetragen:

Das theoretische Modell für die Spannung ergibt sich aus der Lorentzkraft für geladene Teilchen in einem homogenen Magnetfeld:

$$F = Q \cdot v \cdot B = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d}$$

$$U = B \cdot d \cdot v$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta B} = d \cdot v$$

Die lineare Abhängigkeit von Strom und Geschwindigkeit ist hervorragend erkennbar. Die Steigung der Fit-Geraden gibt laut Theorie den Abstand d der Elektroden an. Sie beträgt $19 \frac{\text{mV}}{\frac{\text{T}}{\frac{\text{m}}{\text{s}}}} = 19 \text{ mm}$ und stimmt damit sehr gut mit dem Abstand der Edelstahlplatten in unserer Zelle (20 mm) überein.

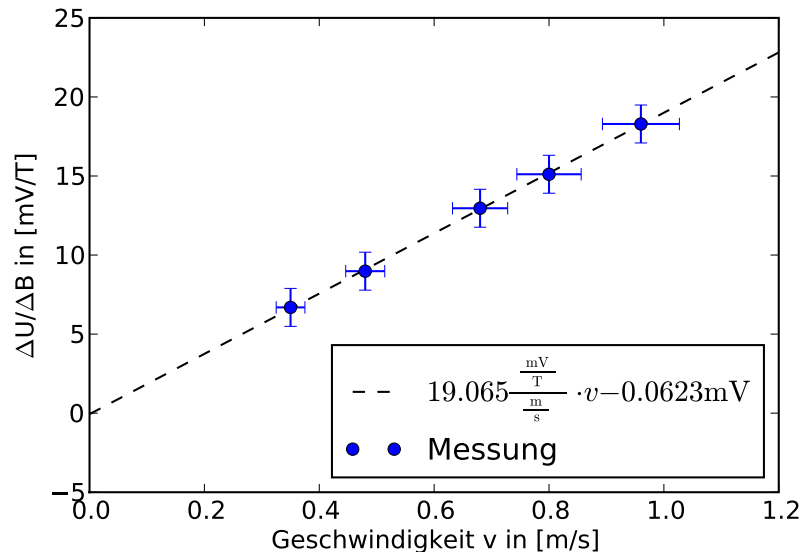


Abbildung 11: Abhängigkeit von Durchflussgeschwindigkeit und generierter Spannung

4.5 Umkehrung des Effekts, Nutzung als Wasserpumpe

Eine andere Nutzung des magnetohydrodynamischen Effekts als die der Stromerzeugung entsteht dadurch, wenn man nun nicht fließendes Wasser benutzt, sondern bei Anwesenheit eines äußeren magnetischen Feldes Strom durch die Zelle schickt. Es ist somit quasi die Umkehrung des MHD-Generators und erzeugt einen Wasserfluss, welcher entweder als Antrieb oder Pumpe genutzt werden kann. So wurde in den 90er Jahren ein Schiff mit einem MH-Antrieb als Prototyp gebaut, welches allerdings aufgrund einiger Schwierigkeiten nicht über eine Geschwindigkeit von 15km/h hinaus kam.¹ Eine vielversprechendere Weiterführung des Gedankes ist der Magnetoplasmadynamische Antrieb, welcher nicht Wasser sondern Plasma als Medium benutzt und mit welchem bereits Austrittsgeschwindigkeiten des Plasmas von 40km/s erreicht wurden.²

Bei der Durchführung unseres Versuches lösten wir den Schlauch von der Pumpe und legten beide Enden in den Wasserbehälter, um den Fließwiderstand durch die Pumpe hindurch zu eliminieren. Wir legten ein magnetisches Feld von $B = (150 \pm 1) \text{ mT}$ an und schickten einen Strom von $I = (1,125 \pm 0,02) \text{ A}$ durch die Zelle. Die Dichte des Salzwassers wurde zuvor mithilfe einer Waage und eines Messbechers zu $\rho = (1,125 \pm 0,02) \frac{\text{kg}}{\text{l}}$ bestimmt.

Es stellte sich jedoch heraus, dass man an den Enden der Schläuche keinen

¹http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetohydrodynamischer_Antrieb

²http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetoplasmadynamischer_Antrieb

Wasserfluss spüren konnte, da der Fließwiderstand des Systemes anscheinend trotz Herausnahme der Pumpe noch zu groß war.

Um dennoch die theoretisch erreichbare Fließgeschwindigkeit des Wassers bestimmen zu können, wurden die beiden Schlauchenden verstopft, wodurch sich in den Steigrohren vor und nach den Elektroden der Zelle ein Pegelunterschied ergab. Dieser betrug $\Delta h = (2,8 \pm 0,2) \text{ mm}$. Zur Verifizierung, dass dies auch wirklich auf dem nachzuweisenden Effekt beruht, wurde die Stromrichtung umgekehrt, was zur Folge hatte, dass wieder der gleiche Pegelunterschied Δh entstand, jedoch war nun, wie erhofft, der höhere Pegelstand in dem Steigrohr, in welchem zuvor noch der kleinere war.

Aus diesem Pegelunterschied lässt sich nun der Druckunterschied Δp berechnen:

$$\Delta p = g \cdot \rho \cdot \Delta h = (31 \pm 2) \text{ Pa}$$

Hierbei entspricht $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ der Schwerebeschleunigung.

Nach dem Gesetz von Bernoulli

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{Fluss}^2 + p = \text{const}$$

kann man nun die nominelle Fließgeschwindigkeit berechnen und erhält

$$v_{Fluss} = (0,23 \pm 0,06) \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

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