

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

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
3	Konstruktion und Aufbau	4
3.1	Konstruktion des Magnetfelds	4
3.2	Aufbau der Zelle	8
3.3	Aufbau der Messapparatur	9
4	Messungen und Ergebnisse	12
4.1	Leitfähigkeit von Salzwasser	12
4.1.1	Vormessungen	12
4.1.2	Messung an der Zelle	14
4.2	Magnetfeld	15
4.3	Zellspannung und -strom	18
4.4	Wassergeschwindigkeit und Druck	20
4.5	Umkehrung des Effekts, Nutzung als Wasserpumpe	23
5	Fazit	24
6	Autorenverzeichnis	25

Der Magnetohydrodynamische (MHD) Generator wandelt die Bewegungsenergie von geladenen Teilchen in elektrische Leistung um. Ziel des Projekts war es, diesen Effekt an einer selbst gebauten Zelle mit strömendem Salzwasser nachzuweisen. Hierzu wurde mit Hilfe von vier Spulen ein Magnetfeld von 160 mT erzeugt und die durch den Effekt entstandene Spannungen an zwei längsseitig angebrachten Elektroden abgenommen. Die theoretischen Zusammenhänge haben sich dabei alle experimentell sehr gut nachweisen lassen, die Spannungswerte an der Zelle waren jedoch vergleichsweise niedrig. Zur praktischen Einsetzbarkeit müsste noch die Leitfähigkeit des Fluids gesteigert werden.

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 zum Magnetohydrodynamischen Generator, kurz MHD-Generator, machte Michael Faraday schon 1832. Er führte Experimente an der Waterloo Bridge in London durch und entdeckte den zugrunde liegenden Effekt des MHD-Generators, indem er die Spannung maß, die vom Fluß der Themse im Erdmagnetfeld erzeugt wurde.

140 Jahre später wurde mit einer Leistung von 25 MW der bisher größte MHD-Generator in der Sowjetunion fertiggestellt und ans Moskauer Stromnetz angeschlossen. Zur Zeit gibt es die Aussicht, diesen Effekt in Kern- oder Fusionskraftwerken zu nutzen, in welchen flüssiges Metall als Fluid genutzt werden soll.

2 Theorie

Das Prinzip des MHD-Generators beruht auf der Lorentzkraft,

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}), \quad (1)$$

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 Ladungen 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

$$U = B \cdot v \cdot d, \quad (2)$$

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

$$I = v \cdot B \cdot A \cdot \sigma, \quad (3)$$

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

$$P = U \cdot I = B^2 \cdot v^2 \cdot A \cdot d \cdot \sigma. \quad (4)$$

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 0,1 T, 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 0,07 T, die der zur Verfügung stehenden Hufeisenmagneten war noch wesentlich niedriger. Die größte Feldstärke wurde an Ringpermanentmagneten ($B \approx 0,3 \text{ T}$) 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).

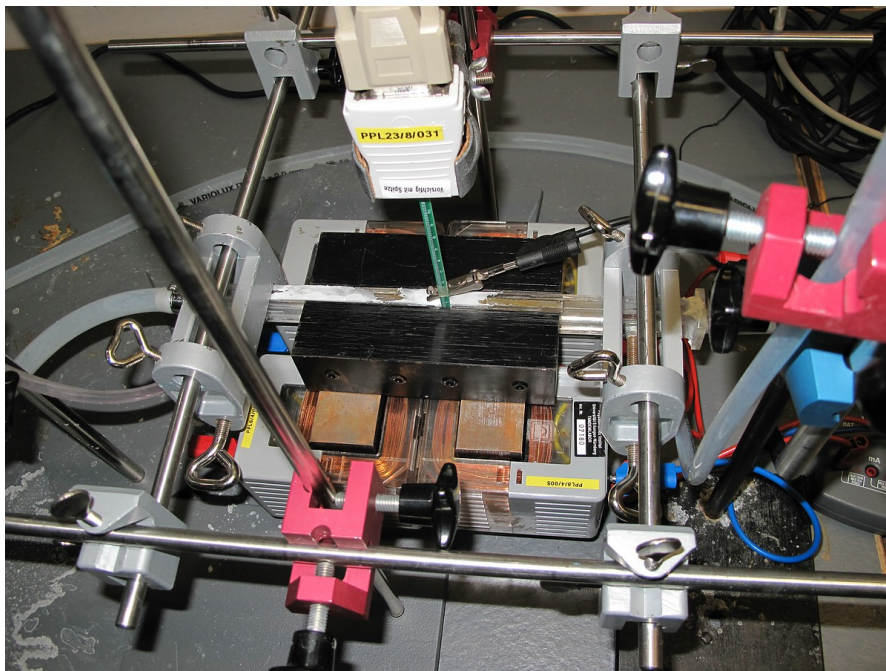


Abbildung 1: Anordnung der vier Spulen zum Erzeugen des Magnetfelds

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

erwarten war wegen

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{d + 2\pi R/\mu} \quad (5)$$

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 Einzelpulen und kann in erster Näherung als kreisförmig angenommen werden.

Wie in Abb. 2 gut sichtbar, hat sich diese Annahme zumindest qualitativ bestätigt. Bei der angelegten Spannung von 1 A und einem Radius der Gesamtanordnung von 8,5 cm ergibt sich für $N = 2992$ die eingezeichnete Fitkurve. Der N -Wert weicht zwar deutlich von den tatsächlichen 1000 Wicklungen ab, dies dürfte jedoch auf die von einer idealen kreisförmig Geometrie abweichende Anordnung sowie die recht ungenauen Messwerte zurückzuführen sein.

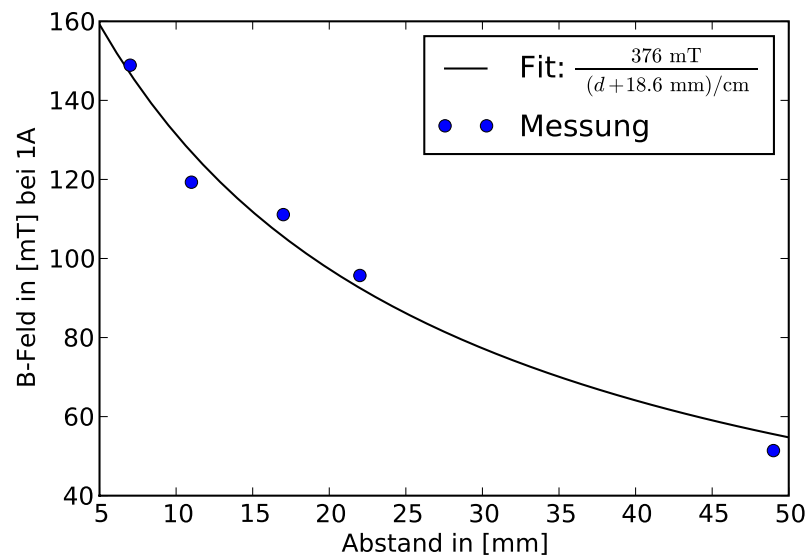


Abbildung 2: Abhängigkeit der Magnetfeldstärke vom Abstand zwischen den beiden Eisenjochen

In Folge der vorliegenden Messergebnisse wurde der Abstand zwischen den beiden Eisenjochen beim eigentlichen Versuch dann möglichst klein gewählt (auf 1,1 cm, was der Zellbreite entspricht).

Um die Geometrie des Magnetfeldes zu ermitteln, wurde ein weiterer Versuch im Vorfeld durchgeführt. Dazu wurde die magnetische Feldstärke bei drei verschiedenen Abständen ($d_1 = 1,5$ cm, $d_2 = 2,5$ cm, $d_3 = 3,5$ cm) jeweils an verschiedenen Punkten zwischen den beiden Eisenjochen gemessen. Die Messpunkte lagen dabei



Abbildung 3: Vormessung ohne Zelle zur B-Feldstärke. Die Plastikstäbe dienen zum Einstellen verschiedener Spaltbreiten

im homogenen Bereich des Magnetfeldes, durch den später auch das Salzwasser in der Zelle fließen sollte. Ausnahme waren zwei Messungen 1 cm links und rechts des Eisenjochspaares sowie eine Messung im Abstand 2 cm über dem Zentrum des homogenen Bereichs (d.h. knapp 1 cm über den Eisenjochen).

Wie in Abb. 4 gut erkennbar ist, war das Magnetfeld bei allen drei Abständen im für die Zelle relevanten Bereich sehr homogen und damit gut geeignet für die weiteren Messungen. Außerdem zeigte sich, dass mit dem gewählten vier-Spulen-Aufbau bei einem Abstand von $d_1 = 1,5$ cm ein Magnetfeld von rund 82 mT erreicht werden konnte, was für einen mit den gegebenen Möglichkeiten nachweisbaren Effekt völlig ausreichte. Der relativ deutliche Abfall der Feldstärke schon knapp 1 cm über den Eisenjochen auf rund 58 mT konnte ignoriert werden, da sich die angefertigte Zelle bei allen folgenden Messungen vollständig im Bereich des homogenen Magnetfelds befand.

In einer letzten Vormessung wurde noch der Zusammenhang zwischen der an den Spulen angelegten Stromstärke und der Magnetfeldstärke ermittelt. Von den untersuchten Theorien passte dabei beim Ermitteln der Fitkurve am besten das arctan-Modell von Süß et al., Theoretische Grundlagen der Elektrotechnik 1¹. Dabei ergab sich die in Abb. 5 erkennbare Fitkurve.

¹Theoretische Grundlagen der Elektrotechnik 1; Süße, Burger, Diemar, Marx, Ströhla; S. 142 ff.

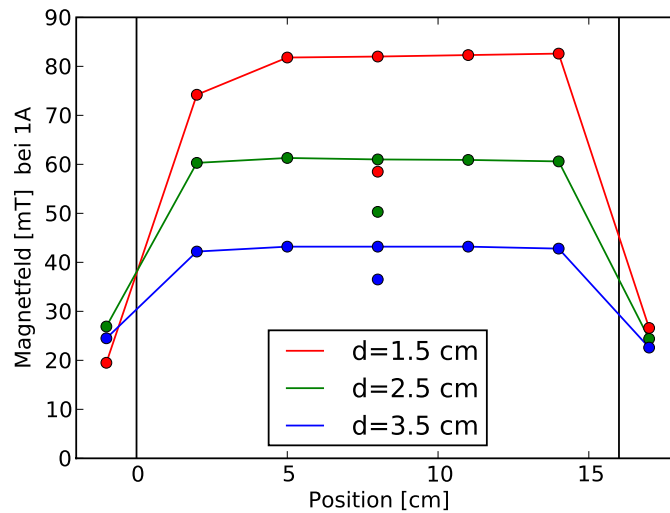


Abbildung 4: Stärke des Magnetfeldes entlang der Achse (Messung mittig, einzelne Punkte am oberen Rand)

Gewählt wurde dabei ein Jochabstand von 1 mm, was der Breite der verwendeten Hallsonde entspricht. Keine Rolle spielte erwartungsgemäß, ob die Schaltung der dabei verwendeten Netzgeräte (bei Strömen bis zu 1.5 A 2 Netzgeräte, über 1.5 A 3 Netzgeräte) an zwei parallel geschalteten Spulenpaaren oder an zwei voneinander unabhängigen Spulenpaaren erfolgte.

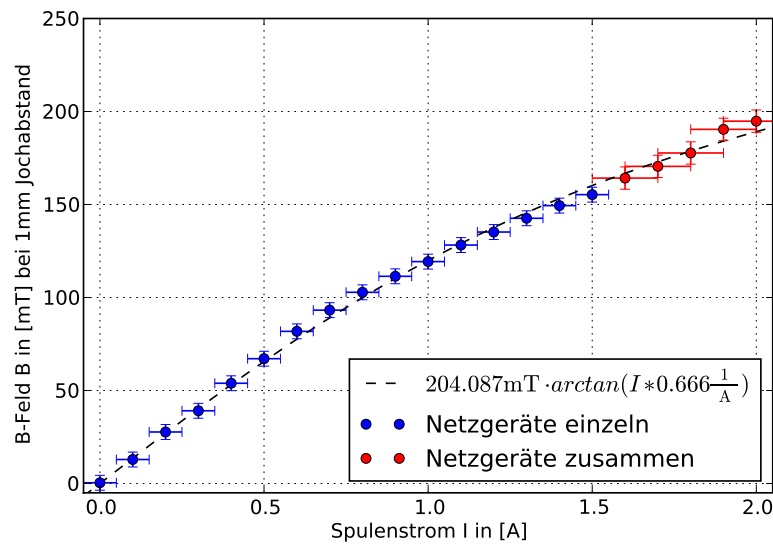


Abbildung 5: Abhängigkeit der Magnetfeldstärke von der an den vier Spulen angelegten Stromstärke

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:

$$P \propto B^2 \cdot v^2 \cdot d \cdot A_{\text{Elektrode}} \quad (6)$$

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 bezeichnet. Bei einer begrenzten Pumpenleistung, und damit einem konstanten maximalen Volumendurchsatz $V = A_{\text{Durchfluss}} \cdot v = \text{const.}$, ist die Geschwindigkeit v indirekt proportional zu der Durchflussfläche $A_{\text{Durchfluss}} = d \cdot b$. 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:

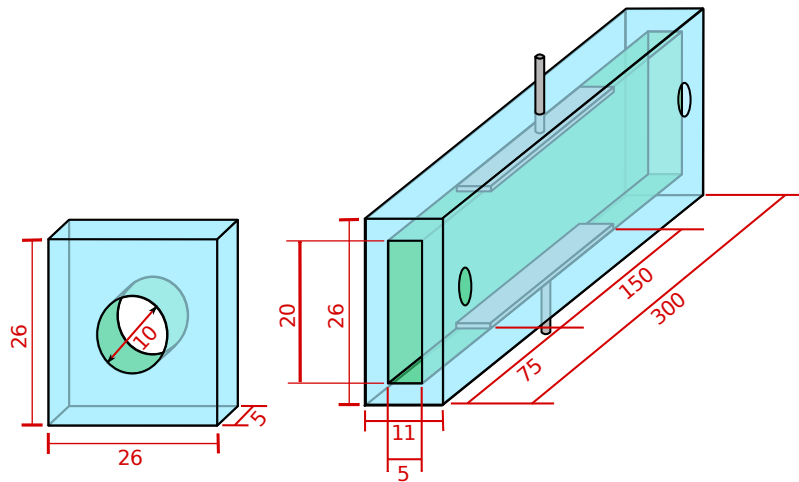


Abbildung 6: Schematischer Aufbau der Durchflusszelle (alle Angaben in mm)

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 Abb. 7 zu erkennenen 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.

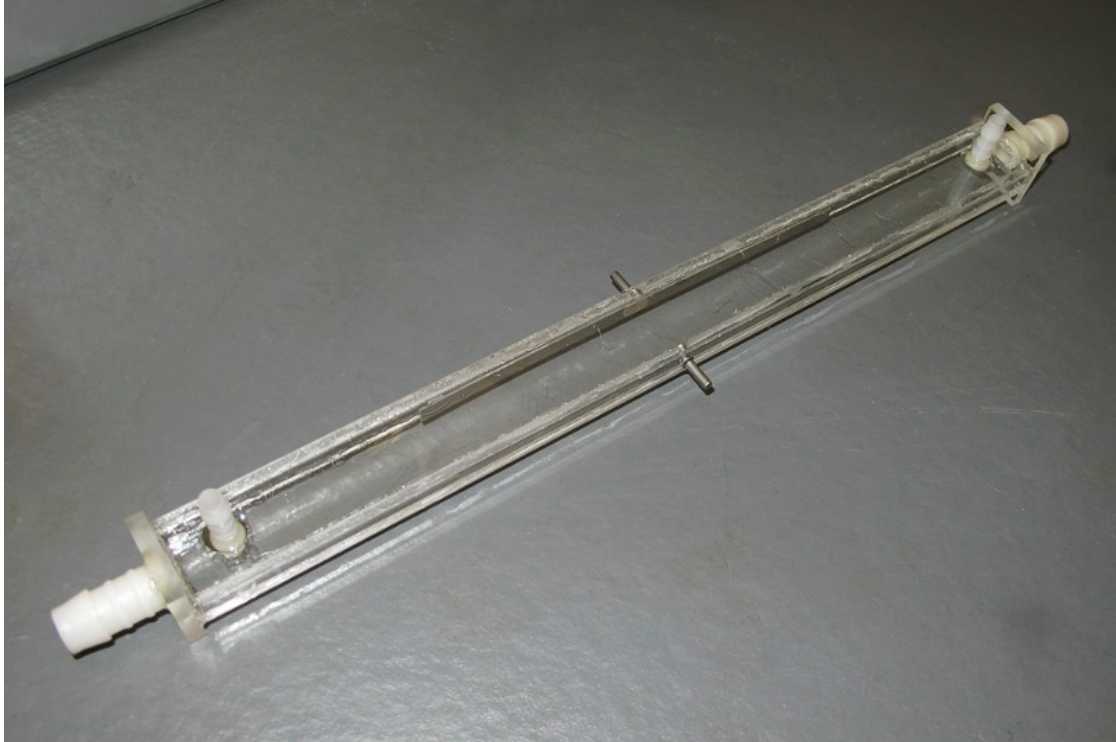


Abbildung 7: Die fertige Durchflusszelle mit Elektroden. Die seitlichen Stützen dienen der Druckmessung.

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 m/s messbare Ergebnisse liefern würde. Daher entschieden wir uns für eine Teichpumpe, die mit 220 V Netzspannung betrieben wird und dabei laut Herstellerangaben bei einer Leistung von 16 W 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.
- Die Zelle muss waagrecht eingebaut sein, sodass 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.

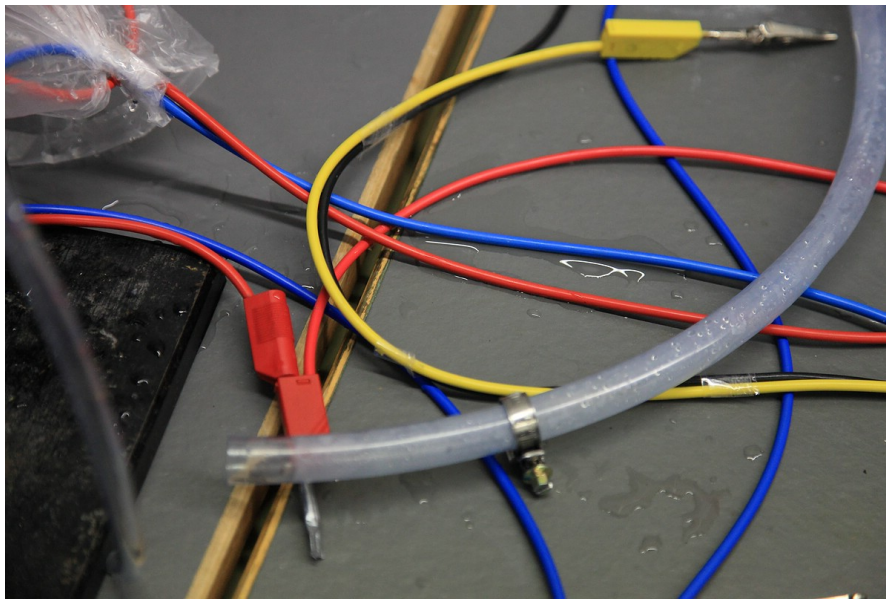


Abbildung 8: Trennung der wasser- und stromführenden Bereiche

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 tangentiale

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.

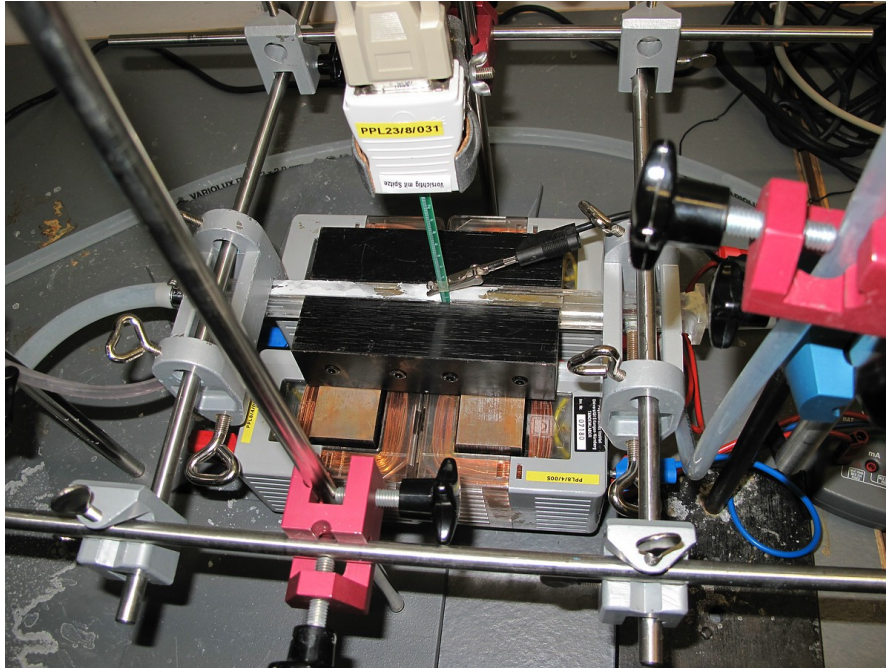


Abbildung 9: Die Magnetfeldsonde zwischen Spulenkernen und Zelle. Die Plastiktüte um die Spulen wurde für das Photo entfernt.

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 entsprechendem 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.

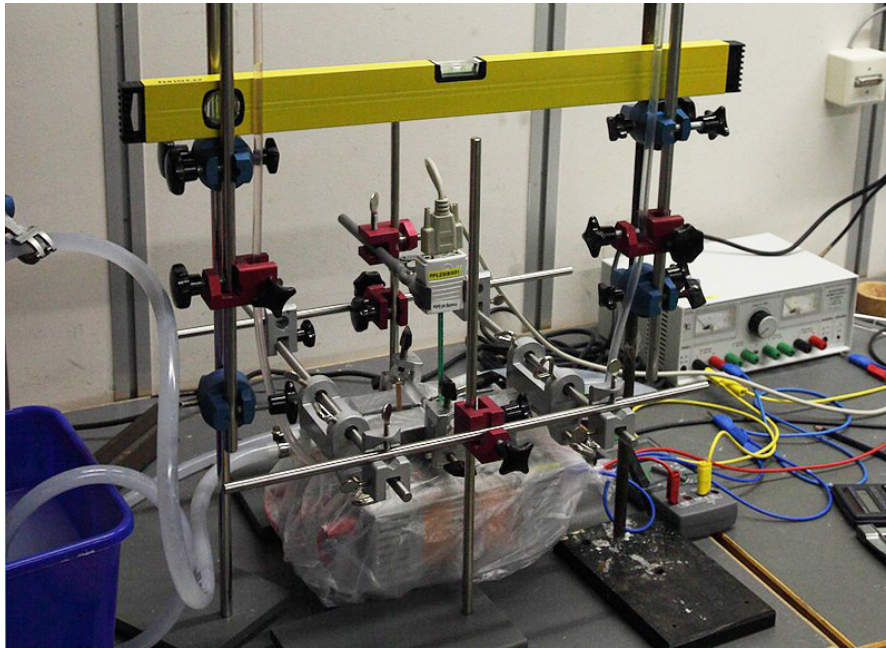


Abbildung 10: Der komplette Aufbau des MHD-Generators, im Eimer links befindet sich die Pumpe mit dem Wasservorrat.

4 Messungen und Ergebnisse

4.1 Leitfähigkeit von Salzwasser

Um die Größenordnung der Leistung des MHD-Generators abschätzen zu können, ist es zunächst besonders wichtig den Leitwert von Salzwasser zu kennen.

4.1.1 Vormessungen

In einer ersten Vormessung wurden hierfür in einem mit Salzwasser gefüllten, quaderförmigen Bassin mit den Maßen $14,3\text{ cm} \times 14,3\text{ cm} \times 1,4\text{ cm}$ Aluminiumelektroden an zwei entgegengesetzte Stirnflächen angebracht. An diesen Elektroden wurde eine variable Spannung angelegt und der resultierende Strom aufgezeichnet. Die durch ein starkes Schwanken der Spannungswerte um bis zu $\pm 30\text{ mV}$ erschwerte Messung wurde anschließend für verschiedene Salzkonzentrationen wiederholt (siehe Abbildung 11).

Deutlich zu erkennen ist der erwartete Zusammenhang zwischen Leitwert und Salzkonzentration. Der Widerstand liegt jeweils in der Größenordnung von $10\ \Omega$, der spezifische Widerstand somit im Bereich von $1\ \frac{\Omega}{\text{m}}$. Leider sind die Ergebnisse der Messungen aufgrund der Unregelmäßigkeiten nicht besonders signifikant, sodass

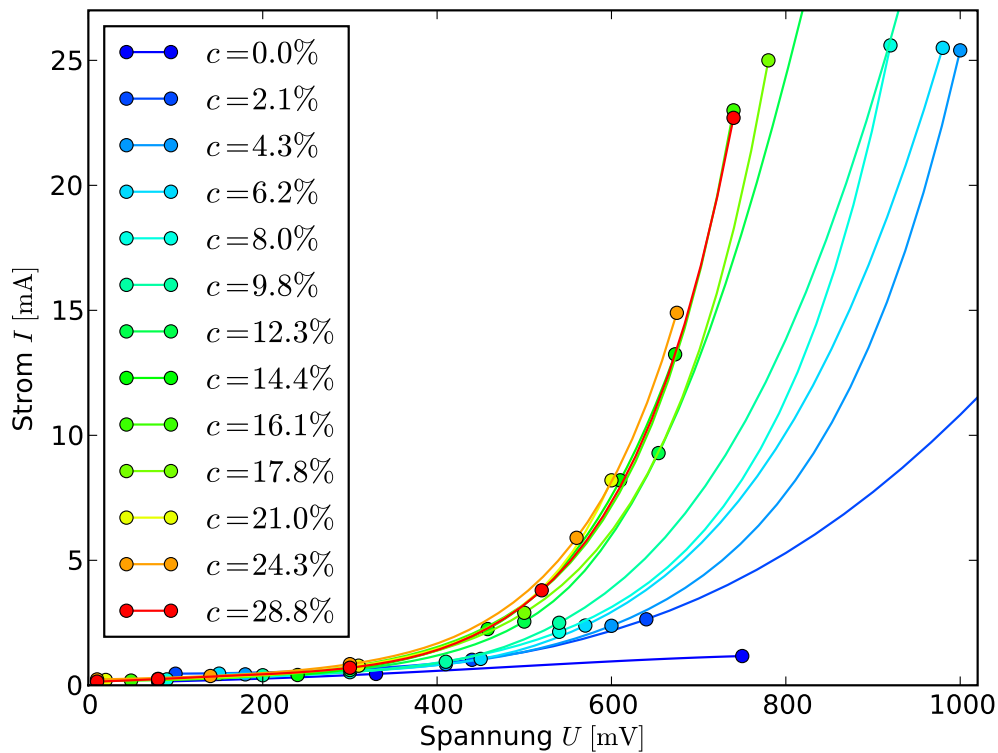


Abbildung 11: Widerstand von Salzwasser bei verschiedenen Konzentrationen

jeweils nur über die Größenordnung der Messwerte eine Aussage getroffen werden kann.

Diese Vormessung wurde nochmal nach dem Vier-Punkt-Messverfahren wiederholt, welches sicherstellt, dass die Fehler der Kontaktwiderstände an den Klemmen eliminiert werden. Bei diesem Verfahren wird die Spannungsmessung über separate, nicht stromführende Kontakte ausgeführt, um Übergangswiderstände zu minimieren. Zudem konnten dank unseres Betreuers Messapparaturen aus dem Labor des Physikalischen Instituts III verwendet werden. Bei den nun eingesetzten Kupferelektroden zeigte sich ein deutlich nicht-ohmscher Widerstand. Bei Variation der Spannung ergab sich ein nichtlinearer und nichteinmal monotoner Stromverlauf, sondern nur eine Art unsaubere Hysterese. Mit den Aluminelektroden aus der ersten Vormessung hatten wir ein ähnliches Ergebnis. Deutlich sauberer war allerdings die Kennlinien mit Edelstahlelektroden, trotzdem war immernoch eine verkleinerte und monotone Hystereseform erkennbar. Die Ursache für diese Nichtlinearität sehen wir in elektrochemischen Prozessen, da sie offensichtlich vom verwendeten Elektrodenmaterial abhängig ist. Aufgrund dieser Ergebnisse entschieden wir uns dafür auch bei unserer finalen Zelle Edelstahlelektroden zu verwenden.

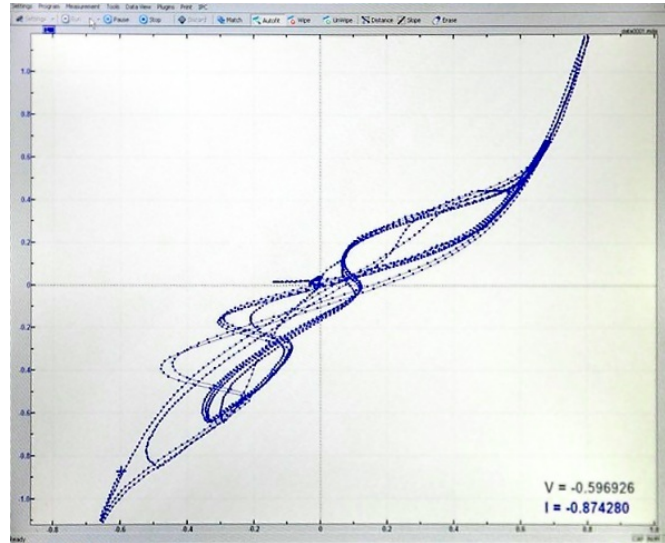


Abbildung 12: U – I Kennlinie der Salzlösung bei automatischem zeitabhängigen Stromverlauf.

Der spezifische Widerstand konnte bei dieser zweiten Vormessung und einer Salzkonzentration von 15% auf einen Bereich von $100 \frac{\Omega}{\text{m}}$ abgeschätzt werden.

4.1.2 Messung an der Zelle

Um schließlich einen für unseren endgültigen Messaufbau validen Widerstandswert zu erhalten, führten wir die Messungen noch einmal an der eigentlich verwendeten Zelle durch. Es wurde wieder nach dem Vier-Punkt-Verfahren gemessen, nun allerdings nicht mehr mit den professionellen Messgeräten, sondern mit dem Cassy-System. Im Messprozess wurde ein bekannter Strom in der Größenordnung des eigentlich zu messenden MHD-Effekts an die Zelle angelegt und die resultierende Spannung aufgezeichnet. Das Ergebnis ist die I - U -Kennlinie in Abbildung 13. Diese setzt sich zusammen aus einem Bereich mit ansteigendem Strom (unten) sowie mit absinkendem Strom (oben). Zudem zeigt sich ein weiterer Effekt: Selbst bei konstantem Strom driftet die gemessene Spannung mit einer Rate von $\frac{dU}{dt} = 0,415 \frac{\text{mV}}{\text{s}}$ (rechts) bzw. $\frac{dU}{dt} = -0,274 \frac{\text{mV}}{\text{s}}$ (links) (jeder der vier Bereiche wurde in einer Zeitspanne von 30...40 s aufgezeichnet).

Die aus der Messung erhaltenen Widerstandswerte finden sich ebenfalls in Abbildung 13, wobei die steigende (hellblau) und fallende Flanke (hellgrün) getrennt behandelt wurden. Die später aus der Mittelwertbildung ausgeschlossenen Werte sind in einem helleren Farbton gezeichnet. Man erkennt dank der Symmetrie der beiden Kurven, dass, zumindest in der Größenordnung von μA , keine Abhängigkeit des Widerstands von Strom vorliegt, sondern vielmehr von elektrochemischen Prozes-

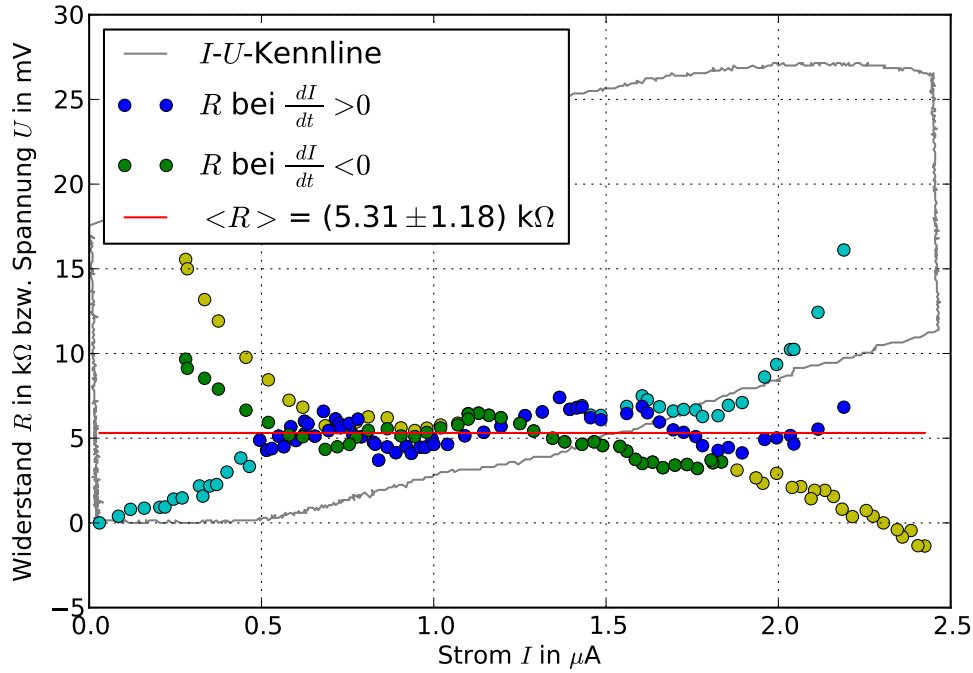


Abbildung 13: Widerstandswert der verwendeten Zelle bei gesättigter Salzlösung

sen bei Herauf- und Herabfahren der Stromstärke. Die Überhöhungen der Widerstandswerte bis hin zu $15 \text{ k}\Omega$ können mit den erwähnten Spannungsdriften erklärt und korrigiert werden. Hierfür wurde ein linearer Anstieg dieser Driftraten mit dem Strom im Bereich des steilen Widerstandsanstieges ($1,5 \dots 2,45 \mu\text{A}$ für den ansteigenden, bzw. $0,0 \dots 1,0 \mu\text{A}$ für den abfallenden Strombereich) angenommen. Für die übertrieben kleinen, bis hin zu negativen Widerstandswerte (vgl. auch die horizontalen Abschnitte der Kennlinie) kann allerdings keine befriedigende Erklärung gefunden werden, weshalb diese Bereiche einfach von der Mittelwertbildung ausgeschlossen werden. Auf diesem Weg erhalten wir schließlich einen Wert von

$$R = (5,31 \pm 1,18) \text{ k}\Omega \quad (7)$$

für unsere finale Zelle bei einer gesättigten Salzlösung.

4.2 Magnetfeld

Eine weiterer Messung zielte auf die Ermittlung der Abhängigkeit der Zellspannung vom angelegten Magnetfeld hin. Theoretisch müsste sich nach

$$U = B \cdot v \cdot d, \quad (8)$$

eine lineare Abhängigkeit ergeben (für $B, v = \text{const.}$). Eine erste Messreihe, bei der die beiden für diese Messung unerheblichen Druckmessungsschläuche (siehe Abb. 10) per Hand verschlossen wurden, lieferte scheinbar willkürliche Werte für die Zellspannung. Nach einer Befestigung dieser Schläuche lieferte der Aufbau jedoch Werte, die einwandfrei mit der Theorie übereinstimmten (siehe Abb. 14).

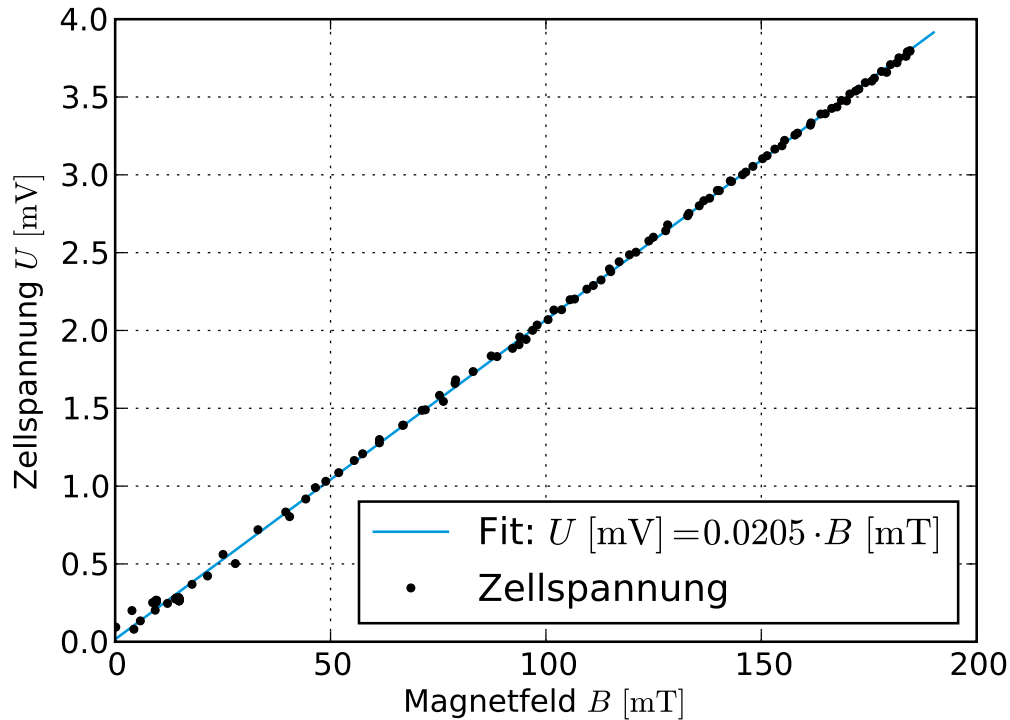


Abbildung 14: Zellspannungswerte in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke

Abb. 15 zeigt exemplarisch den Zellspannungsverlauf beim Auf- bzw Abbau des angelegten Magnetfeldes (Peak-Wert $B \approx 280 \text{ mT}$). Auch hier ist gut erkennbar, dass $U \propto B$ gilt.

Zu beachten war bei der Spannungsmessung, dass eine Grundspannung U_0 (siehe Abb. 15) an den Elektroden auch dann zu beobachten war, wenn kein Magnetfeld angelegt wurde. Diese Grundspannung stieg anfangs in etwa exponentiell an, dann stellte sie sich schnell auf einen in etwa asymptotischen Verlauf ein. Der genaue Spannungsverlauf ist in Abb. 16 dargestellt. Bis zur Protokollabgabe konnte trotz großer Bemühungen keine Erklärung für diese Grundspannung gefunden werden, in Betracht käme aber beispielsweise eine Art galvanisches Element.

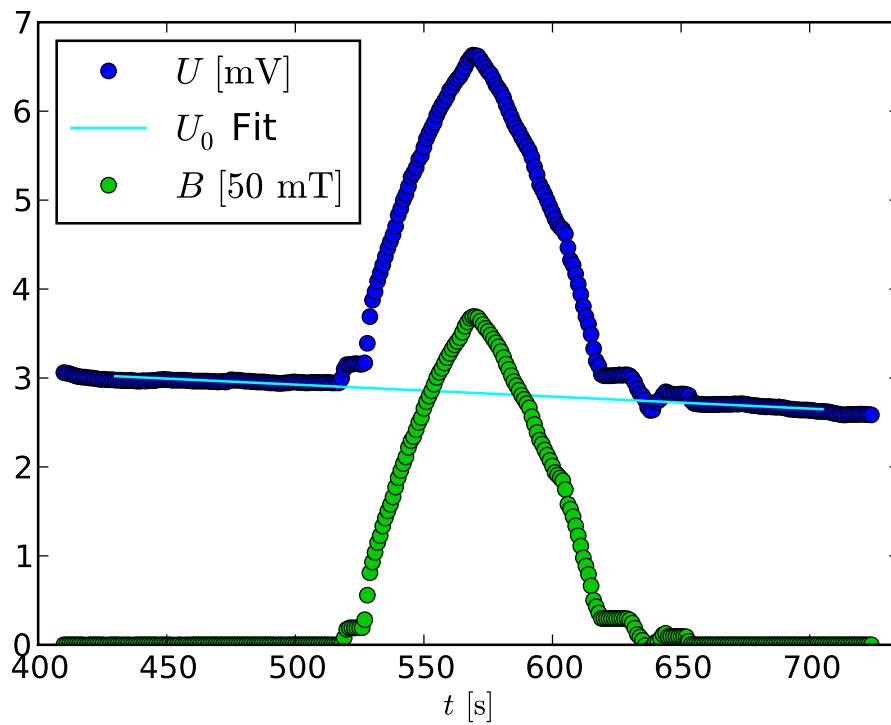


Abbildung 15: Spannungsverlauf an der Zelle bei zeitabhängigem Magnetfeld

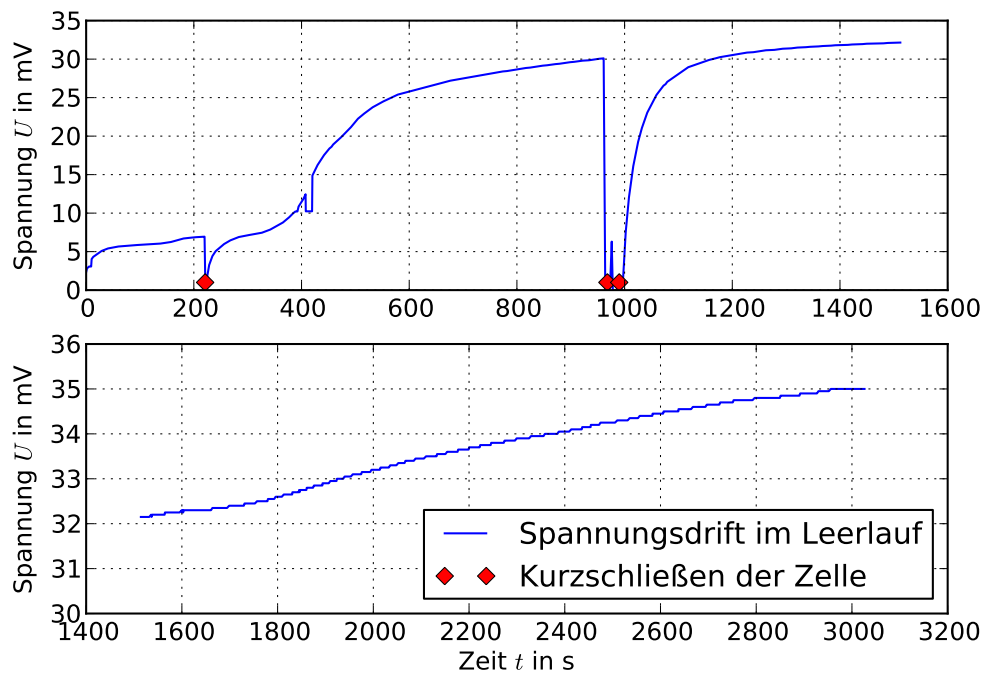


Abbildung 16: Zeitliche Entwicklung der Leerlaufspannung an der Zelle ohne äußere Einflüsse

4.3 Zellspannung und -strom

Prinzipiell dient ein Generator dazu, elektrische Leistung zu erzeugen, was nur dann möglich ist, wenn neben der anliegenden induzierten Spannung auch 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. Zusätzlich wurden nun verschiedene Lastwiderstände R_L parallel geschaltet und der Gesamtstrom in der Schaltung bzw. Zelle ist folglich

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{(R_U^{-1} + R_L^{-1})^{-1}} = U \cdot \left(\frac{1}{R_U} + \frac{1}{R_L} \right) \quad (9)$$

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

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

Die Apparatur 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 bis zu zehn Minuten dauern, bis das Signal asymptotisch wurde. Daraufhin wurde das Magnetfeld wieder deaktiviert und ein letztes mal gewartet. In Abb. 17 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 Wider-

standswert 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.

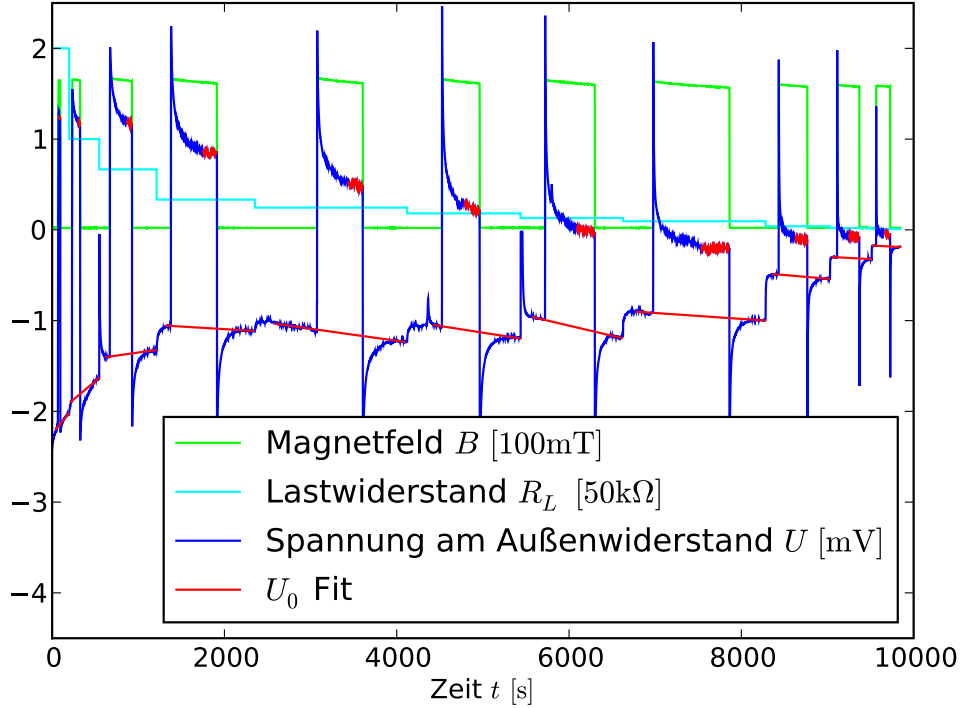


Abbildung 17: Spannungswerte am Außenwiderstand in Abhängigkeit vom Widerstand und dem Magnetfeld

Die so ermittelten Spannungs- und Stromwerte sind in Abb. 18 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 Spannungsbereich bei

$$R_Z = (15,7 \pm 1,7) \text{ k}\Omega \quad (10)$$

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 eine elektrische Leitfähigkeit von

$$\sigma = \frac{d}{RA} = (0,00153 \pm 0,00017) \cdot 10^{-3} \frac{1}{\Omega \text{m}} \quad \text{bei } U \approx 3 \text{ mV} \quad (11)$$

Dies ist erstaunlich wenig, wenn man bedenkt, dass die elektrische Leitfähigkeit von Leitungswasser in etwa bei $0,05 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ und die 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.

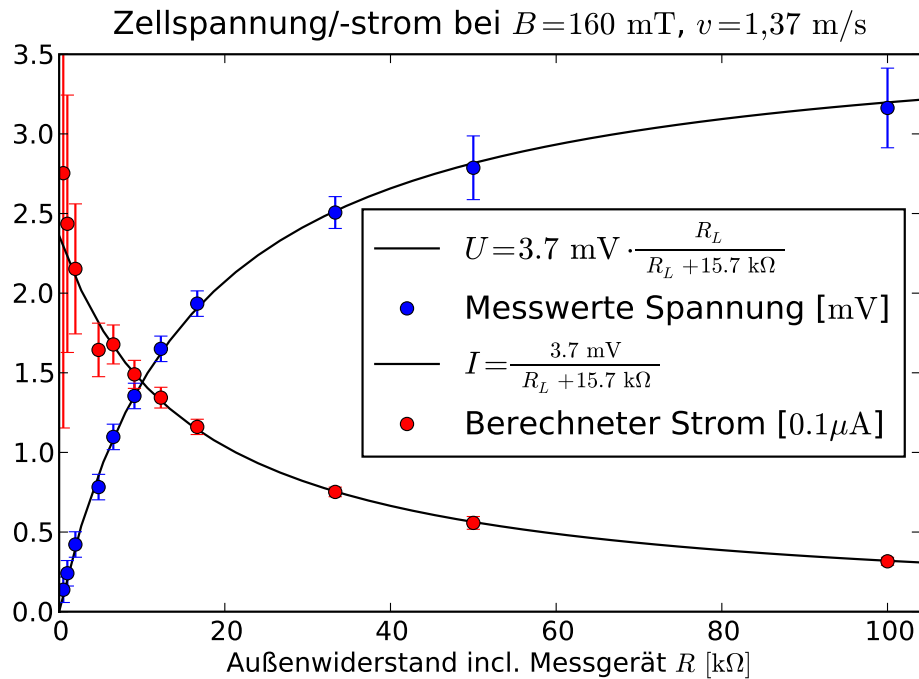


Abbildung 18: Spannung und Strom an der Zelle

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 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

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 Durch-

flussgeschwindigkeit durch die Zelle musste ein Weg gefunden werden, die Pumpe, die eigentlich einen konstanten Fluss liefert, 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. Zur Minimierung statistischer Fehler 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:

$$v = \frac{\text{Volumendurchsatz pro Zeit}}{A_{\text{Durchfluss}}} \quad (12)$$

Der Querschnitt der verwendeten Zelle betrug $A_{\text{Durchfluss}} = 0,5 \text{ cm} \cdot 1,8 \text{ cm} = 0,9 \text{ cm}^2$.

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:

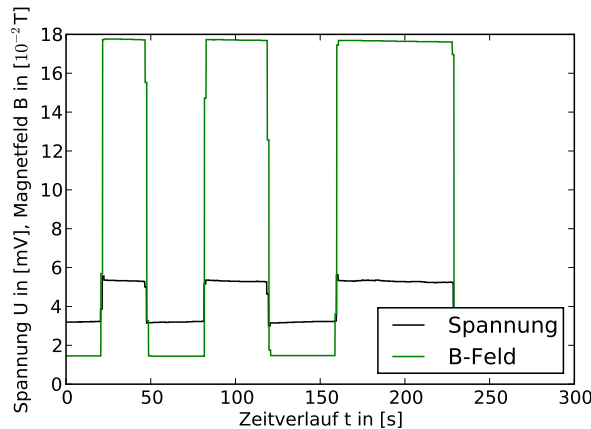


Abbildung 19: Spannungs- und B-Feld-Verlauf für $v = 0,68 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

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

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

Um Spannungswerte bei leicht verschiedenen Magnetfeldern (unterschiedliche Magnetisierung des Eisenjochs) vergleichen zu können, wurde der Quotient aus Spannung und B-Feld über der Durchflussgeschwindigkeit aufgetragen (siehe Abb. 20).

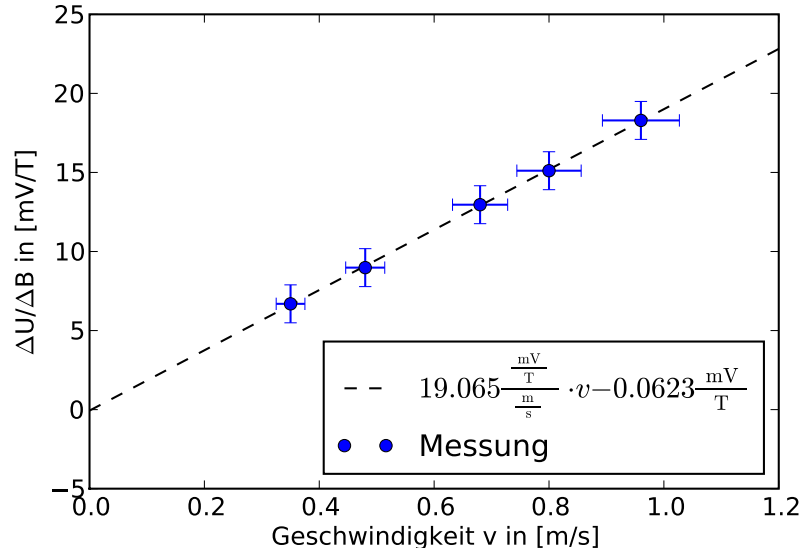


Abbildung 20: Abhängigkeit von Durchflussgeschwindigkeit und generierter Spannung

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

$$F = Q \cdot v \cdot B = Q \cdot E = Q \cdot \frac{U}{d} \quad (13)$$

$$U = B \cdot d \cdot v \quad (14)$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta B} = d \cdot v \quad (15)$$

Die lineare Abhängigkeit von Strom und Geschwindigkeit ist hervorragend erkennbar. Die Steigung der Fit-Gerade gibt laut Theorie den Abstand d der Elektroden an. Sie beträgt $19 \frac{\text{mV/T}}{\text{m/s}} = 19 \text{ mm}$ und stimmt damit sehr gut mit dem Abstand der Edelstahlplatten in unserer Zelle (18 mm) überein.

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 eine 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 15 km/h hinaus kam.² 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 40 km/s erreicht wurden.³

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 $\rho = (1,125 \pm 0,02) \frac{\text{kg}}{\ell}$ bestimmt. Es stellte sich jedoch heraus, dass man an den Enden der Schläuche keinen 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. Dies hatte zur Folge, 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:

$$\Delta p = g \cdot \rho \cdot \Delta h = (31 \pm 2) \text{ Pa} \quad (16)$$

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

³http://de.wikipedia.org/wiki/Magnetoplasmadynamischer_Antrieb

Hierbei entspricht $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ der Schwerebeschleunigung.
Nach dem Gesetz von Bernoulli

$$\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{\text{Fluss}}^2 + p = \text{const.} \quad (17)$$

kann man nun die nominelle Fließgeschwindigkeit berechnen und erhält

$$v_{\text{Fluss}} = (0,23 \pm 0,06) \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (18)$$

5 Fazit

Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass der Effekt im Rahmen der Möglichkeiten überraschend deutlich nachgewiesen werden konnte. Auch war der Einklang mit der zugrunde liegenden Theorie bei allen Messungen gut, teilweise wie etwa bei der Zellspannungsmessung in Abhängigkeit von der B-Feldstärke sogar hervorragend, gewährleistet. Nur die auch bei ausgeschaltetem Magnetfeld bestehende Grundspannung konnte nicht erklärt werden. Eine weitere Verbesserung, besonders bezüglich der Zellspannungswerte, wäre noch durch ein leitfähigeres Fluid oder auch durch eine höhere Fließgeschwindigkeit möglich gewesen. Beide Aspekte sind jedoch bei einer großindustriellen Anwendung im Normalfall gewährleistet.

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