

## Inhaltsverzeichnis

Zu mir.....	2
Die Aufgabe.....	3
Die Ansätze.....	3
Überlegungen.....	3
Dielektrikum des Kondensators.....	4
Versuch und Aufbau.....	4
Auswertung.....	5
Kern einer Spule.....	6
Versuch und Aufbau.....	6
Messergebnisse.....	8
Wirbelstrom.....	8
Versuch und Aufbau.....	9
Messergebnisse.....	9
Transformatorschaltung.....	9
Theorie.....	9
Praxis.....	11
Ergebnis.....	12
Resultat.....	14
Quellnachweise.....	14

## Zu mir

Ich wurde 1983 in Lörrach geboren und entwickelte schon in frühem Alter ein Interesse für die Naturwissenschaften. Ab 1996 habe ich das Jugendelektronikzentrum Basel besucht, welches dieses Interesse festigte. Nach der 10. Klasse vollzog ich den Schulwechsel von der Freien Waldorfschule Lörrach zum Hans-Thoma-Gymnasium, wo ich seit Beginn der 12. Klasse die Leistungskurse Physik und Französisch besuche. Über Herrn Kretschmer wurde ich in der Physik AG auch an die Wettbewerbsphysik (Physikolympiade, IYPT) gebracht.

Foto Jacob Lahr (9x13)



## Die Aufgabe

Das Thema dieser Seminararbeit ist eine der 17 Aufgaben des IYPT (International Young Physicists Tournament) des Jahres 2002. Das IYPT ist ein Turnier welches jedes Jahr Probleme veröffentlicht, die bisher nur unzulänglich erforscht wurden und somit nicht alleine durch die Lektüre von Fachliteratur gelöst werden können.

Nur durch gemeinsames Arbeiten und Nachdenken sowie eigene Versuche kann man sich dem Ziel einer theoretischen sowie einer praktischen Lösung langsam nähern.

Das Ziel ist dabei auch oft schon der Weg, welcher einem die Kniffe aber auch Tücken der Physik näher bringt und dabei mit der konsequenten Gruppenarbeit ein Kontrast zum gewohnten, manchmal frontalen Pflichtunterricht sein kann.

Hier die ursprüngliche Aufgabenstellung welcher meine Arbeit gewidmet ist:

„How can you measure the electroconductivity of salt solutions without using direct contact electrodes? Analyse the problem and demonstrate your device.“

sowie ihre sinngemäße Übersetzung:

„Wie kann man die elektrische Leitfähigkeit von Salzlösungen ohne den direkten Kontakt von Elektroden messen? Analysiere das Problem und führe deine Vorrichtung vor.“

## Die Ansätze

### Überlegungen

Das bekannteste und auch einfachste Verfahren für die Leitfähigkeitsmessung einer Flüssigkeit ist eine konduktive Messung, zwei an eine konstante Spannungsquelle angeschlossene Elektroden werden in eine Flüssigkeit getaucht. Der Strom in der Flüssigkeit ist dann proportional zu deren Leitwert. Der große Nachteil dieses Verfahrens ist aber, dass die Elektroden leicht verschmutzen oder angegriffen werden und es so zu Serienwiderständen oder zur Elektrolyse kommen kann, welche die Messergebnisse enorm verfälschen.

Für solche Anwendungen z.B. in der Lebensmittelindustrie muss ein Verfahren gefunden werden, welches es ermöglicht, die Leitfähigkeit einer Flüssigkeit ohne deren direkten Kontakt zu messen. Durch die Aufgabenstellung wurde ja auch das konduktive Verfahren ausgeschlossen, so dass wir zu folgenden Zwischenergebnissen kamen:

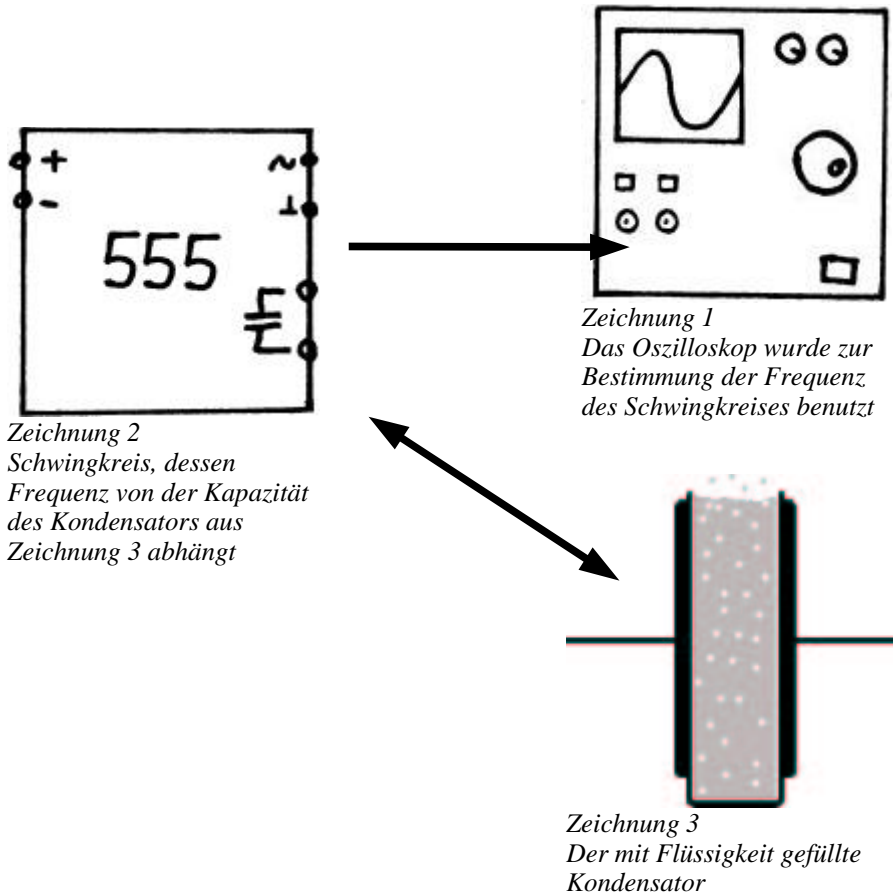
- entweder man geht das ganze Problem optisch an, was bei einem bekannten Elektrolyt (wie hier mit einer NaCl Lösung) auch möglich sein sollte (laut Endress & Hauser auch in der Industrie angewandt). Wenn man sich eine Eichskala anlegt, anhand der man dann die optischen Eigenschaften der Flüssigkeit mit deren Leitfähigkeit in Verbindung setzt, lässt sich über die Reflektionseigenschaften der Leitwert der Flüssigkeit hinreichend genau bestimmen.  
Leider schied dieses Verfahren für uns aus, da wir nicht die technischen Voraussetzungen hatten, solche Messungen durchzuführen (es ist eine komplizierte Optik vonnöten).
- oder man versucht sich mit Feldern dem Ziel zu nähern, in Betracht kommen das elektrische Feld und das magnetische Feld.

→ Dies schien uns die angemessenste Lösung zu sein und so konzentrierten wir unsere Überlegungen auf diese beiden Felder.

Also stellten wir gewisse Überlegungen an und kamen zu folgenden Ideen, welche zu überprüfen waren:

### ***Dielektrikum des Kondensators***

Ist die Dielektrizitätszahl eines Kondensators abhängig von der Leitfähigkeit des Dielektrikums?



### **Versuch und Aufbau**

Überprüfen wollten wir dies mit einem Schwingkreis aus einigen elektronischen Bauteilen, dessen Frequenz vom Prüfkondensator bestimmt wird (siehe Schaltbild bzw. Auswertung). Der mit dem zu überprüfenden Elektrolyt gefüllte Kondensator  $C_{\text{ges}}$  lässt sich über die Serienschaltung von drei Kondensatoren besser darstellen: zwei Kondensatoren, die als Dielektrikum das Glas des Behälters haben, sowie der eigentliche Kondensator durch das Elektrolyt in der Mitte. Im Laufe der Versuche wurde festgestellt, dass aber auch die Schaltung mit Verkabelung eine eigene Kapazität hat, welche der gemessenen Kapazität noch abgezogen werden muss (siehe Auswertung).

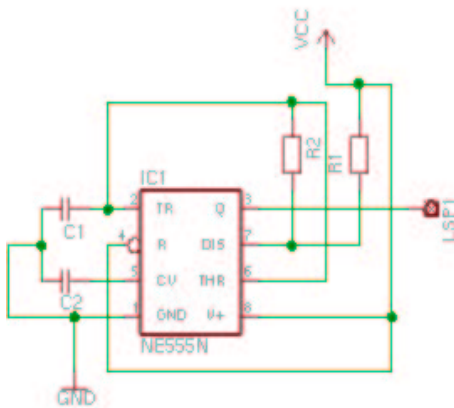


Abbildung 1  
Schaltbild des Schwingkreises, basierend  
auf dem Integrierten Schaltkreis NE555

Theoretisch war dies vielleicht kein schlechter Ansatz, da aber die Kapazitäten des Kondensators sehr gering sind, lässt sich die Schaltung sehr leicht durch äußere Einflüsse aus dem Tritt bringen, jede Person, die sich der Schaltung näherte war eine weitere Störquelle die das Messergebnis teilweise halbierte oder gar verdoppelte, eine Sinnvolle Auswertung war also kaum möglich. Die Ergebnisse aus dem Diagramm wurden mit der größtmöglichen Sorgfalt erstellt, so dass die Messungen unter sich vergleichbar sind, kaum aber mit Messungen aus einem ähnlichen Versuch, da die äußeren Einflüsse nicht reproduzierbar sind.

### Auswertung

Es wurde nach und nach NaCl (Salz) in den zuerst mit Wasser gefüllten Kondensator gegeben, die Kapazität des Kondensators lässt sich über die Frequenz des Schwingkreises nach der Formel

$$C_{ges} = \frac{1}{f \cdot \ln(2) \cdot (R_1 + 2 \cdot R_2)}$$

berechnen, (die Formel stammt aus dem Datenblatt des NE555 von National Semiconductors).

Die bekannten Größen:

R1=R2= 400 KΩ

C2= 10nF

zu C<sub>ges</sub>:

d= 58 mm

A= 992mm<sup>2</sup>

ε<sub>R</sub>Glases: 5

d<sub>Glas</sub>: 4mm

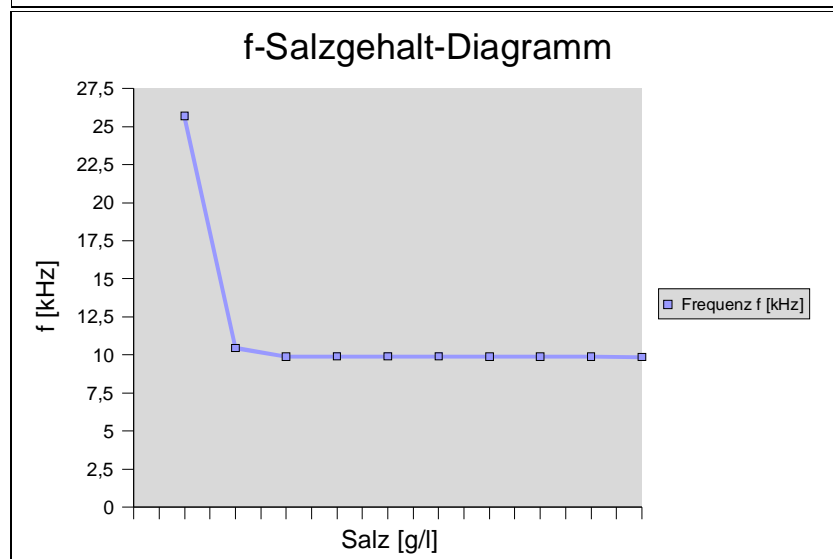
Volumen: 870 cm<sup>3</sup>

Und so sieht dann die theoretische Berechnung der Kapazität aus (hier bei leerem Glas):

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{Glas} \cdot \frac{A}{d_{Glas}}} + \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{Luft} \cdot \frac{A}{d_{Luft}}}$$

Salz [g/l]	F [kHz]	$C_{\text{mit kabel}}$	$C_{\text{ohne Kabel}}$
Luft	25,69	4,680E-11	1,598E-12
0	10,45	6,975E-11	6,985E-11
5,75	9,89	7,622E-11	7,632E-11
11,49	9,9	7,611E-11	7,621E-11
17,24	9,9	7,611E-11	7,621E-11
22,99	9,9	7,613E-11	7,623E-11
28,74	9,89	7,626E-11	7,636E-11
40,23	9,9	7,618E-11	7,628E-11
63,22	9,89	7,624E-11	7,634E-11
120,69	9,86	7,663E-11	7,673E-11

(Anmerkung:  $C_{\text{Kabel}}$ : 45pF, durch Eichmessung ermittelt)



## Kern einer Spule

Bei diesem Versuch wollten wir feststellen, ob das Elektrolyt als Kern einer Spule auf deren Induktivität bzw. als Kern eines Transformators auf dessen Effektivität eingeht.

### Versuch und Aufbau

Wir befestigten zunächst zwei Spulen (Primärspule  $n=300$ , Sekundärspule  $n=36000$ ) nebeneinander als Lufttransformator an zwei Stativen und führten einen Schlauch durch die beiden Spulen (siehe Abb). Danach überprüften wir bei verschiedenen Frequenzen von ca. 1 - 100 kHz sowie einer

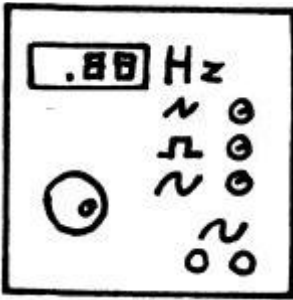
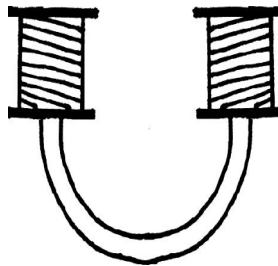
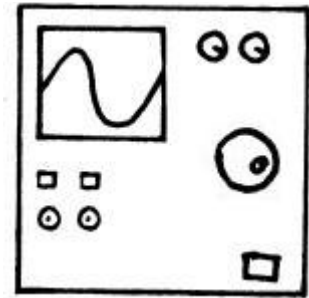


Abbildung 2  
Frequenzgenerator



Zeichnung 4  
mit Wasser gefüllter  
Schlauch, welcher durch  
zwei Spulen geführt ist



Zeichnung 5  
Oszilloskop

Eingangsspannung von  $20 V_{\text{eff}}$  die in der Sekundärspule induzierte Spannung. Als nächste Schritte wurden der Kern der Spule (ein Schlauch) mit Wasser gefüllt, die Messung wiederholt und dann zuletzt das Wasser mit NaCl versetzt. Je nach Frequenz konnten die Messungen nur mit Hilfe eines Messverstärkers (Verstärkungsfaktor: 100x) durchgeführt werden. Bei Frequenzen  $f > 1000\text{Hz}$  kam es zu einem enormen Einbruch der gemessenen Spannungen, so dass die niedrigeren Frequenzen eher interessant erscheinen.

## Messergebnisse

	Ohne Wasser	Mit Wasser	Mit Salzwasser
1000Hz	5,8V	5,0V	5,1V
10000Hz	0,8V	6,1V	6,0V
100000Hz	0,7V	4,7V	5,0V

Tabelle 1

Die Werte sind jeweils die Mittel aller Messungen

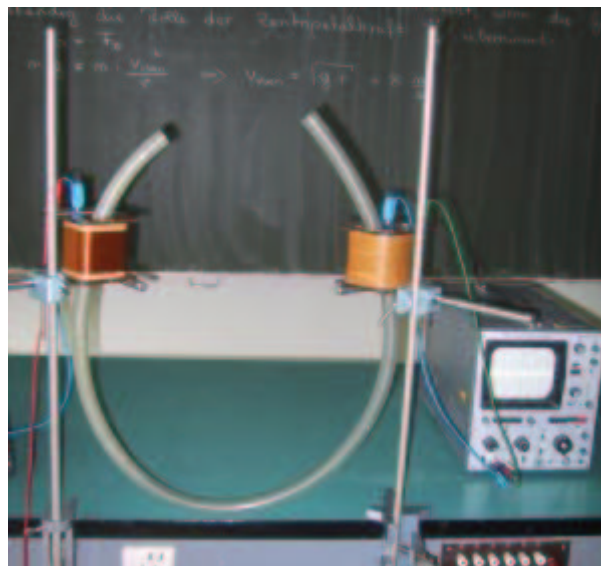


Foto 1

Der Versuchsaufbau, links die Sendespule, rechts die Induktionsspule und das Oszilloskop

Aus den geringen Unterschieden der Messungen mit Wasser und Salzlösung schlossen wir, dass dieses Verfahren uns nicht weiterbringen kann.

Nur bei einer perfekten Entkoppelung der beiden Spulen kann eine sinnvolle Auswertung des Versuches stattfinden, denn hier war die Übertragung über die Luft so groß, dass die verschiedenen Spulenkern keine großen Veränderungen mehr hervorriefen.

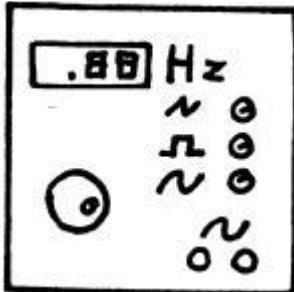
Der Versuch zeigt zwar, dass das Wasser den Einfluss der Erregerspule auf die Induktionsspule verringert, ein Effekt, der aber hier nicht von Interesse ist, da der Einfluss bei Zugabe von Salz sich nicht verändert.

### Wirbelstrom

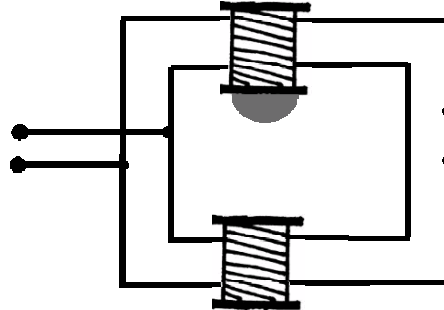
Eine andere Möglichkeit, um die Leitfähigkeit einer Flüssigkeit ohne direkten Kontakt zu messen ist laut einer Patentschrift über Wirbelströme im Elektrolyt möglich. Dazu wird in einer Spule ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, das mit einer anderen Spule wieder in eine Induktionsspannung umgewandelt wird. Wenn man aber nun in dieses wandelnde Magnetfeld einen leitenden Gegenstand bringt, so werden in diesem Wirbelströme erzeugt. Diese Ströme erzeugen wiederum nach dem Lenzschen Gesetz ein magnetisches Feld, welches dem verursachenden Feld entgegen

gerichtet ist. Das resultierende magnetische Feld ergibt sich also aus der vektoriellen Addition der beiden Felder. Da das resultierende Feld nun schwächer ist, sollte auch die in der zweiten Spule induzierte Spannung absinken.

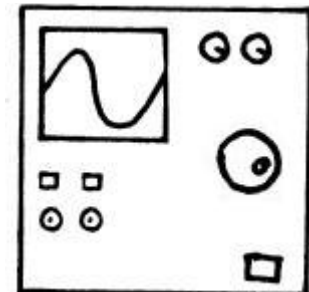
### Versuch und Aufbau



Zeichnung 7  
Frequenzgenerator



Zeichnung 6  
Kompensationsschaltung



Zeichnung 8  
Oszilloskop

Um den Effekt, überhaupt messbar zu machen bedurften wir einer Kompensationsschaltung, denn der Unterschied der induzierten Spannungen ist nicht besonders hoch. Des weiteren erlaubt der Aufbau einer Kompensationsschaltung auch die Nutzung zweier ineinander gewickelter Spulen, was die Genauigkeit des Aufbaus weiter erhöht. In diesem Falle wurde die Kompensation durch den doppelten Aufbau des Versuches verwirklicht, die beiden Schaltungen wurden so mit einem Messgerät verknüpft, dass man direkt die Spannungsdifferenz des Versuches mit Messmaterie in der Spule und dem ohne Messmaterie messen konnte (Überkreuzschaltung, siehe Abb.). Leider war der Effekt auch hier nur so schwach, dass er sich zwar mit nichtferromagnetischen Metallen (hier Messing, Aluminium oder Kupfer) bestätigen ließ, nicht aber mit Elektrolyten, da ein Wirbelstrom mit Ionen nur verhältnismäßig schwach ist.

### Messergebnisse

$ U_{\text{ind}} $ ohne Probe [V]	$ U_{\text{ind}} $ mit Probe [V]
0,16	0,32
0,17	0,322
0,16	0,316
Durchschnitt:	
0,16	0,32

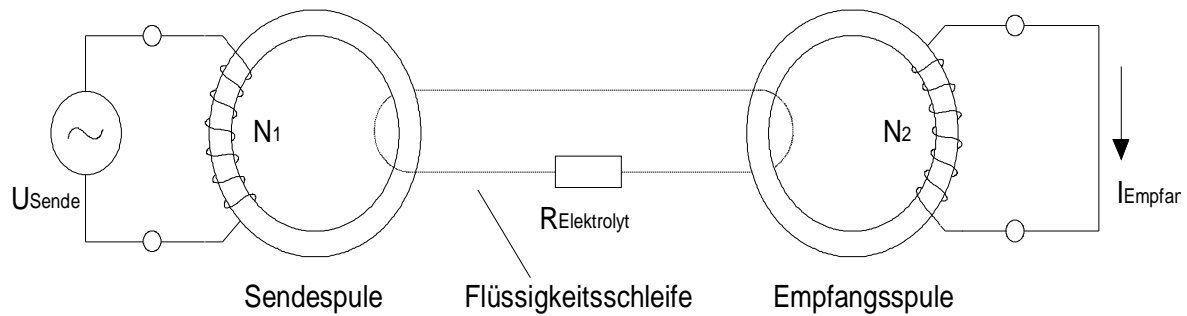
Eigentlich müsste die Spannung ohne Probe auf 0V liegen, doch da die beiden Spulen nicht genau gleich verarbeitet sind, kommt es zu einer recht stabilen Spannung von ca. 0.16V, was aber im Vergleich zur Eingangsspannung von 20V immer noch gering ist.

Versuche mit Salzlösungen, Basen und Säuren führten leider wie oben schon genannt zu keinen Ergebnissen.

### Transformatorschaltung

#### Theorie

In diesem Versuch wurde das Elektrolyt als Spule zweier Transformatoren verwendet. Der zweite Transformator ist in der Sekundärspule kurzgeschlossen, so dass eigentlich ein unendlich hoher Strom fließen müsste, welcher aber durch den Strom in der Primärspule begrenzt ist. Im Idealfall



Zeichnung 9

gilt:

$$\frac{I_{\text{empf}}}{I_1} = \frac{n_{\text{prim}}}{n_{\text{sek}}}$$

Da die Stromquelle des ersten Transformators im Idealfall nicht begrenzt ist, ist die einzige Hemmschwelle für den Strom der Widerstand des inneren Stromkreises, welcher ja durch das Elektrolyt fließt.

Durch die Ohmschen Gesetze und die Transformatorgesetze lässt sich nun über den Gemessenen Strom  $I_{\text{empf}}$  der Widerstand und somit auch der Leitwert des inneren Stromkreises bestimmen.

Herleitung:

Spannung im inneren Stromkreis:

$$U_1 = U_{\text{Sende}} \cdot \frac{n_{1\text{sek}}}{n_{1\text{prim}}}$$

Der Strom ist wegen des Kurzschlusses am zweiten Transformator nur durch den Widerstand des Elektrolyts begrenzt, also gilt

$$I_1 = \frac{U_1}{R_{\text{Elektrolyt}}}$$

und für den im kurzgeschlossenen Sekundärkreis des zweiten Transformators fließenden Strom  $I_{\text{empf}}$ :

$$I_{\text{empf}} = I_1 \cdot \frac{n_{2\text{prim}}}{n_{2\text{sek}}}$$

daraus folgt nun für den gesuchten Widerstand R

$$R_{\text{Elektrolyt}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{U_{\text{Sende}} \cdot n_{1\text{sek}} \cdot n_{2\text{prim}}}{n_{2\text{sek}} \cdot n_{1\text{prim}} \cdot I_{\text{empf}}}$$

Und da  $n_{1\text{prim}} = n_{2\text{sek}} = n_a$  und  $n_{1\text{sek}} = n_{2\text{prim}} = 1$  gilt:

$$R_{\text{Elektrolyt}} = \frac{U_{\text{Sende}}}{n_a^2 \cdot I_{\text{empf}}}$$

wobei  $n_a$  die Windungszahl der beiden echten Spulen ist.

Wenn man aber nun die Gleichung nach  $I_{\text{empf}}$  umstellt:

$$I_{\text{empf}} = \frac{U_{\text{Sende}}}{n_a^2 \cdot R_{\text{Elektrolyt}}}$$

sieht man durch einsetzen eines Widerstandes von über  $1\text{K}\Omega$ , wie er bei

den Elektrolyten auftritt ein Strom im  $\mu\text{A}$  Bereich fließt, welcher unter den gegebenen Bedingungen (Störung, keine absolute Entkoppelung) nur sehr schwer zu messen ist, was wir ja auch feststellen mussten.

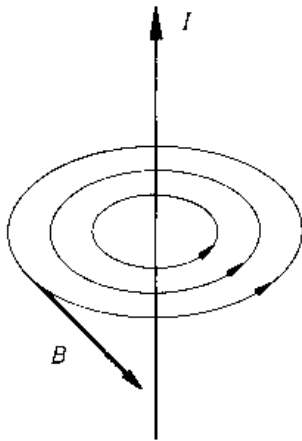


Abb. 1  
Der Strom ist senkrecht zum B-Feld, Voraussetzung für eine Induktion  
Praxis

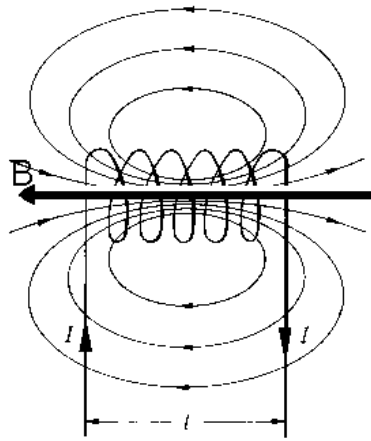


Abb. 2  
Wie man sieht läuft der Strom in der falschen Richtung, wenn man das Elektrolyt in die Spule einbringt.

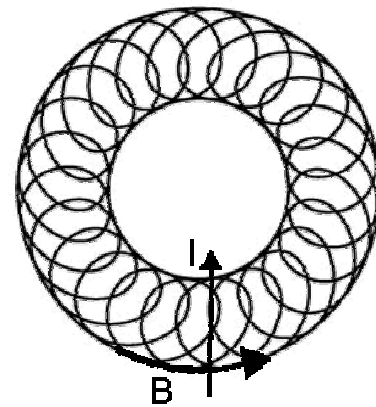


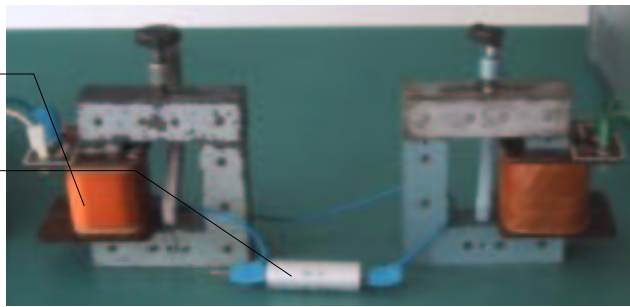
Abb. 3  
Erst jetzt sind die Richtung des Stromes und des B-Feldes senkrecht zueinander, eine Induktion kann stattfinden.

Beim Aufbau ist zu beachten, dass man bedenkt, dass man nicht das B-Feld durch den Elektrolytring laufen lassen will, sondern dass ein Strom in ihm induziert werden soll, welcher nur dann zustande kommen kann, wenn die Feldlinien des Magnetfeldes senkrecht zu ihm stehen (siehe Abb. 1). Man darf also den Ring nicht einfach durch eine normale Spule stecken (siehe Abb. 2), sondern muss entweder einen Rundkern in die Spule einführen und dann den Ring auch durch diesen Kern führen (siehe Foto), oder man benötigt eine torusförmige Spule, welche direkt die richtige Richtung des Magnetfeldes mit sich bringt (siehe Abb. 3). Wir machten hierzu zwei Versuche:

- Eine Leiterschleife wird durch zwei Transformatoreisen geführt, in sie ist ein Widerstand geschaltet, er simuliert das Elektrolyt.  
Der Vorteil eines Widerstandes gegenüber eines Elektrolyts ist, dass man seine Eigenschaften genau kennt und seine Größe gegebenenfalls beliebig anpassen kann. Dazu ist seine Handhabung natürlich auch viel einfacher.  
Am Eingang wird eine sinusförmige Wechselspannung mit einer Effektivspannung von 18V im kHz Bereich angelegt. Nun wird die Spannung über dem Widerstand sowie der Kurzschlussstrom an der zweiten Spule gemessen.

Transformatoreisen  
mit Spule

Widerstand



Torusspule

Gummi-schlauch  
gefüllt mit  
Salzlösung



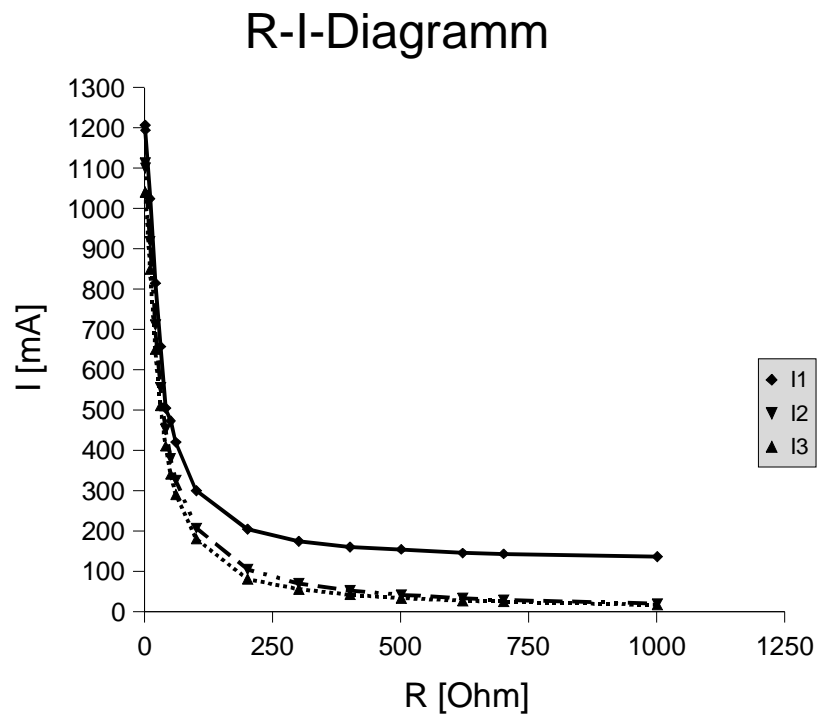
- Ein Schlauch der mit einer gesättigten Salzlösung gefüllt ist, wird durch zwei Torusspulen geführt, welche eigens für diesen Versuch gewickelt wurden. Um den Leiterquerschnitt des Schlauches konstant zu halten wurde jede Luftblase mit einer Spritze abgesaugt. Um nun auch noch ein sinnvolles Messergebnis zu erhalten haben wir die Torusspulen mit Alufolie abgeschirmt, um nicht die direkte Induktion durch die Luft aufzunehmen.

## Ergebnis

Wie man der Tabelle oder dem Diagramm entnehmen kann ist sehr wohl ein Zusammenhang zwischen der Leitfähigkeit bzw. dem Widerstand im inneren Stromkreis und der Stromstärke am kurzgeschlossenen Transformator vorhanden. Leider ist der Zusammenhang in diesem Fall nicht wie erwartet linear sondern eine exponentielle Funktion.

An der Kurve des Stromes in der Primärspule des ersten Transformators kann man auch erkennen, dass es sich um keinen idealen Transformator handelt, sondern um einen Transformator mit einem ohmschen Widerstand. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung ist nicht  $90^\circ$ . Deutlich wird dies durch das Streben des Stromes  $I_1$  gegen einen Wert von ca. 140 mA.

R [ $\Omega$ ]	I1[mA]	I2[mA]	I3[mA]
1,2	1207	1113	1040
2,2	1195	1101	1040
11,2	1025	918	850
21,2	815	711	650
31,2	658	556	510
41,2	505	452	410
51,2	473	379	340
61,2	420	326	290
101,2	300	207	180
201,2	204	104	80
301,2	174	69,6	55
401,2	160	51,7	41,3
501,2	154	41,2	33
621,2	145	32,7	26,3
701,2	143	28,6	23,9
1001,2	136	19,4	15,95



## Resultat

Klar muss man sagen, dass das Ziel, eine Vorrichtung zur kontaktlosen Leitwertbestimmung nicht erreicht wurde. Doch der Weg dorthin war voller Zwischenergebnisse und auch unser vierter Versuch mit der Transformatorschaltung wurde insofern als richtig bestätigt, dass sich mit Widerständen geringer Höhe eine Proportionalität zwischen dem gemessenen Strom und dem Kehrwert des Widerstandes nachweisen ließ. Der selbe Versuch, wiederholt mit einer Flüssigkeit anstatt dem Widerstand blieb ohne Erfolg, da die Ströme nun zu klein wurden.

Letztendlich kann man aber sagen, dass sich das Engagement für die Seminararbeit voll und ganz gelohnt hat, da ich erst durch sie etwas tiefer in die „wahre“ Physik eintauchte und einen Schritt weg von der vom Lehrplan vorgegebenen Themen machte.

Nicht zuletzt möchte ich mich besonders bei Herrn Kretschmer für die fast unendliche Geduld und seinen Einsatz für die Physik AG, der seinesgleichen sucht danken.

## Quellnachweise

1. *Deutsches Patent- und Markenamt / Offenlegungsschrift DE 199 48 465 A 1 vom 12.04.01*
2. *Christoph Wieland / Analyse-Messtechnik / FHT Esslingen*
3. *Felix Roth / E & H Conducta / DSPs in der Messtechnik*
4. *Universität Erlangen / Hans Rossmannith*  
<http://www.emf.eei.uni-erlangen.de/User/rossmannith/sdarb/maurer.html>
5. *Fairchild Semiconductors Datasheet für den NE555*  
<http://www.fairchildsemi.com/ds/NE/NE555.pdf>